

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиатдинов, В. В. Изранцев, А. В. Небылов, Н. Г. Соколов, Е. А. Фабрикант.**

## **Микропроцессорные системы автоматического управления**

ЛЕНИНГРАД «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

1988

Монография посвящена вопросам проектирования и исследования систем автоматического управления объектами и технологическими процессами на основе использования в них элементов электроники четвертого поколения — микропроцессорных комплексов с аппаратным и микропрограммным принципом управления. В ней дается дальнейшее развитие теории анализа и синтеза цифровых систем с использованием компьютерного управления на основе применения микропроцессоров, приводятся методы оптимального и робастного синтеза. Особое внимание уделяется вопросам реализации микропроцессорных элементов систем управления.

Для научных работников, занимающихся созданием систем автоматического управления.

Авторы: В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиатдинов, В. В. Изранцев, А. В. Небылов, Н. Г. Соколов, Е. А. Фабрикант

Микропроцессорные системы автоматического управления. В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиатдинов и др.; Под общ. ред. В. А. Бесекерского. — Ленинград, издательство Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. — 365 с.— ISBN 5-217-00176-3

### **Содержание книги**

#### **Микропроцессорные системы автоматического управления**

Предисловие

#### **Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

##### **1.1. Структуры микропроцессорных САУ**

Структуры с центральным и децентрализованным управлением (6). Многопроцессорные системы (7). Микропроцессорные САУ с перестраиваемой структурой (8). Структуры с резервированием (9). Обобщенная структура иерархических САУ (10).

1.2. Примеры использования микропроцессоров в системах автоматического управления  
Микропроцессоры в промышленных САУ (13). Микропроцессоры в научном эксперименте

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

(14). Микропроцессоры в медицинской технике (15). Микропроцессоры в авиационной технике (16). Другие области применения микропроцессоров (17).

## **Глава 2. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

### 2.1. Особенности управления в реальном масштабе времени

Выбор микропроцессорных комплектов БИС в соответствии с требованиями к их быстродействию (19). Использование методов ускоренных вычислений (20). Распараллеливание вычислительных задач (21). Переход к аппаратурной реализации времяемких алгоритмов (21).

### 2.2. Эффекты в САУ, связанные с квантованием по уровню

Ошибки, вызванные квантованием по уровню (23). Влияние квантования сигналов на качество микропроцессорных САУ (24). Влияние округления коэффициентов (24). Квантование по уровню и показатели качества решений автоматических устройств (24).

### 2.3. Сопряжение непрерывной и цифровой частей микропроцессорной САУ

Особенности выбора аналого-цифрового преобразователя (26). Выравнивание длины кода преобразователя и слова данных процессора (27). Объединение цифрового управляющего и исполнительных устройств (28). Требования, предъявляемые к цифроаналоговым преобразователям (29).

## **Глава 3. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ КОМПЛЕКТЫ С АППАРАТНЫМ ПРИНЦИПОМ УПРАВЛЕНИЯ**

### 3.1. Архитектура центрального процессора

Внутренняя структура микропроцессора (03). Адресная шина (31). Шина данных (32). Шина управления (32). Генератор тактовых импульсов КРБ80ГФ24 (33). Системный контроллер КРБ80ВК28 (34). Системная реализация модуля центрального процессора (36).

### 3.2. Организация памяти и устройств ввода—вывода

Общие принципы (36). Основные типы постоянных запоминающих устройств (36). Организация ОЗУ (39). Совместное использование ОЗУ и ПЗУ в микропроцессорной системе (41). Подключение устройств ввода—вывода (43).

### 3.3. Устройства параллельного и последовательного ввода—вывода

Параллельный порт ввода—вывода КРБ80ВВ5Б (43). Режимы работы (44). Пример использования (46). Устройство последовательного ввода—вывода информации КР580ВВ51 (47). Программирование режимов работы (49). Пример использования (51).

### 3.4. Использование режимов прерывания, ожидания и прямого доступа в память

Прерывания в микропроцессоре (52). Контроллер прерываний КР580ВНБ9 (53). Особенности режима ожидания (55). Прямой доступ в память (57). Контроллер прямого доступа в память КРБ80ВТБ7 (57).

### 3.5. Дополнительные устройства микропроцессорной системы

Интервальный таймер КРБ80ВИБ3 (60). Контроллер клавиатуры и индикации КРБ80ВВ79 (63). Применение устройств АЦП и ЦАП (66).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

## 3.6. Программное обеспечение микропроцессорных систем

Процедуры многоразрядного сложения и вычитания (70). Программы умножения и деления (70). Извлечение квадратного корня (71).

## **Глава 4. СЕКЦИОНИРОВАННЫЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ КОМПЛЕКТЫ**

### 4.1. Принципы и цели секционирования микропроцессоров

Применение секционированных микропроцессоров (79). Основные типы секционированных комплектов (81).

### 4.2. Состав и параметры микропроцессорного комплекта КБ89

Состав комплекта (82). Блок микропрограммного управления К589ИК01 (82). Центральный процессорный элемент КБ89ИК02 (85). Схема ускоренного переноса К589ИК03 (87). Многорежимный буферный регистр КБ89ИР12 (88). Блок приоритетного прерывания КБ89ИК14 (89). Шинные формирователи КБ89АП16 и КБ89АП26 (90). Многофункциональное синхронизирующее устройство К589ХЛ4 (91).

### 4.3. Области применения и состав микропроцессорного комплекта К1804

Назначение и состав комплекта (91). Микропроцессорная секция К1804ВС1 (92). Микропроцессорная секция К1804ВС2 (96). Схема ускоренного переноса К1804ВР1 (100). Четырехразрядный параллельный регистр К1804ИР1 (101). Схема управления состояниями и сдвигами К1804ВР2 (101)

### 4.4. Микросхемы комплекта К1804 для блока микропрограммного управления

Назначение микросхем (106). Схемы управления адресом микрокоманды К1804ВУ1 и К1804ВУ2 (106). Нарращивание разрядности схем управления адресом микрокоманд К1804ВУ1 и К1804ВУ2 (109). Схема управления следующим адресом К1804ВУ3 (109). Схема управления последовательностью микрокоманд К1804ВУ4 (109).

## **Глава 5. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ**

### 5.1. Дискретные процессы и их описание

Решетчатые функции (113). Прямая и обратная разности (114). Разностные уравнения (115).

### 5.2. Дискретные преобразования процессов

Дискретное преобразование Лапласа (116). Использование z-преобразования (117). Основные правила и теоремы (120). Решение разностных уравнений (127).

### 5.3. Частотные методы исследования

Синусоидальные решетчатые функции (128). Реакция импульсного фильтра на синусоидальную последовательность (130). Частотные характеристики (131).

## **Глава 6. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ЦИФРОАНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ**

### 6.1. Структурные схемы цифроаналоговых систем

Общие сведения (133). Квантование по времени и по уровню (133). Коэффициенты передачи цифрового устройства (135). Структура цифровой системы автоматического управления (136).

### 6.2. Передаточные функции цифровых систем управления

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Передаточная функция непрерывной части (137). Передаточная функция цифрового управляющего устройства (140). Требования по устойчивости цифровых фильтров (142). Требования к точности задания коэффициентов цифровых фильтров (142). Использование последовательного программирования (144). Использование параллельного программирования (144). Передаточные функции ЦАС (144). Более сложные структуры ЦАС (146). Корректирующие обратные связи (146).

6.3. Устойчивость и качество управления в цифроаналоговых системах  
Устойчивость ЦАС (147). Оценка качества (148). Оценка точности (149).

## Глава 7. СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ ЦАС

7.1. Статистические характеристики случайных процессов

Основные понятия (150). Корреляционная функция (151). Стационарные процессы (152). Спектральная плотность (156).

7.2. Типовые решетчатые случайные стационарные процессы

Дискретный белый шум (158). Процессы с экспоненциальной корреляционной функцией (159). Процесс с равномерным спектром в ограниченной полосе частот (160). Нерегулярная качка (162). Гармонический сигнал (165).

7.3. Прохождение случайного решетчатого сигнала через линейную систему

Использование корреляционной функции (166). Использование спектральной плотности входного сигнала (169). Расчет выходной величины в промежутке между дискретными моментами времени (171).

7.4. Установившиеся ошибки в линеаризованных ЦАС

Случай отсутствия возмущения (172). Случай задающего и возмущающего воздействий, приложенных в общей точке (172). Приложение задающего и возмущающего воздействий в разных точках (174).

## Глава 8. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ АНАЛОГОЦИФРОВЫХ СИСТЕМ

8.1. Особенности постановки задачи исследования

Понятие аналого-цифровой системы (175). Задачи анализа и синтеза (177).

8.2. Анализ устойчивости и качества

Эквивалентная структурная схема системы (175). Используемые дискретные передаточные функции (180). Оценка устойчивости (180). Построение переходной характеристики (181). Анализ ошибки при гармоническом воздействии (181). Исследование дополнительных ошибок от шумов квантования по уровню (182).

8.3. Анализ точности при случайных воздействиях

Использование псевдочастоты (184). Использование обычной частоты (187).

8.4. Синтез цифровой части системы по непрерывному прототипу

Закономерности образования погрешностей управления, связанных с заменой непрерывного управляющего устройства цифровым (189). Нахождение дискретной передаточной функции цифровой части (193). Оценка ошибок реализации желаемых

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

частотных характеристик (196).

8.5. Выбор периода дискретности и характеристик преобразователей

Выбор периода дискретности (199). Выбор характеристик АЦП (202). Выбор характеристик ЦАП (203).

## Глава 9. СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЦАС

9.1. Статистическая линеаризация нелинейных элементов

Вводные замечания (204). Представление входного сигнала (205). Расчет дисперсий (205). Представление выходного сигнала (207).

9.2. Прохождение случайного сигнала через нелинейное звено в разомкнутой системе

Нелинейное звено с кусочно-линейной характеристикой (208). Характеристики с разрывом непрерывностей (209). Идеальная релейная характеристика (210). Релейная характеристика с зоной нечувствительности (212). Релейная характеристика с гистерезисом (213). Линейная характеристика с насыщением (214). Кубическая характеристика (215).

9.3. Случайные процессы в замкнутых нелинейных ЦАС

Особенности расчета замкнутых систем (218). Воздействие помехи (222).

9.4. Примерная схема расчета замкнутой нелинейной ЦАС

Описание системы (223). Согласование выхода цифрового устройства с объектом управления (224). Определение передаточных функций и спектральных плотностей (225). Расчет математических ожиданий и дисперсий (226).

## Глава 10. ОПТИМАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

10.1. Общие сведения о синтезе систем управления

Статические и динамические требования (229). Другие требования при синтезе (231). Критерии запаса устойчивости (232). Критерии быстродействия (232). Особенности использования микропроцессоров (233).

10.2. Цифровые винеровские фильтры

Общие сведения (233). Уравнение фильтра Винера (234). Ошибки в оптимальных системах (237). Системы с белым шумом на входе (239). Передаточная функция разомкнутой системы (241). Прогнозирование (244). Определение периода дискретности и вторичная оптимизация (247).

10.3. Цифровые калмановские фильтры

Общие сведения (248). Формирующие фильтры (249). Алгоритм фильтра Калмана (250). Прогнозирование (257).

## Глава 11. РОБАСТНЫЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

11.1. Проблема исследования систем управления при неполной априорной информации

Понятие робастных систем (257). Модели входных воздействий (258). Показатели точности управления (261). Оценка достоверных характеристик, входных воздействий (263).

11.2. Ограничение меры динамической ошибки

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Оценка дисперсии динамической ошибки (265). Условия ограничения дисперсии ошибки (267). Условия ограничения максимальной динамической ошибки (272).

## 11.3. Ограничение меры суммарной ошибки

Методика учета ошибки от возмущающего воздействия (274). Построение запретных областей для ЛАХ (275). Оценка возможности получения требуемой точности (276).

## 11.4. Оптимизация системы по критерию наивысшей точности

Методика оптимизации (279). Расчетные формулы (279). Оценка проигрыша (282). Учет неустойчивости параметров системы (285).

## 11.5. Синтез робастных нерекурсивных цифровых фильтров

Особенности постановки задачи (287). Использование критерия минимума максимальной ошибки (290).

## **Глава 12. РЕАЛИЗАЦИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

### 12.1. Микропроцессорные преобразователи информации

Общие сведения (291). Преобразователи «код—напряжение» параллельного типа (293). Микропроцессорные цифроаналоговые преобразователи (296). Последовательные аналого-цифровые преобразователи «напряжение—код» (299). Параллельные аналого-цифровые преобразователи «напряжение—код» (300). Микропроцессорные аналого-цифровые преобразователи (301).

### 12.2. Дифференцирование цифровых последовательностей

Общие сведения (304). Алгоритмы дифференцирования (305). Методические ошибки дифференцирования (305). Влияние шумов квантования (309). Оптимизация алгоритмов дифференцирования (311). Микропроцессорные дифференцирующие устройства (315).

### 12.3. Интегрирование цифровых последовательностей

Общие сведения (317). Алгоритмы интегрирования (317). Алгоритмы точного интегрирования (319). Двойное интегрирование (320). Влияние шумов квантования (320). Использование интеграторов в законах управления (321). Микропроцессорные интегрирующие устройства (321).

### 12.4. Цифровые комплексные фильтры

Понятие комплексных фильтров (324). Дискретные комплексные фильтры (326). Оптимальные комплексные режекторные фильтры (327). Влияние шумов квантования (329). Микропроцессорные комплексные фильтры (330).

### 12.5. Микропроцессорные устройства быстрого преобразования Фурье

Дискретное преобразование Фурье (333). Алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием по времени (334). Алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием по частоте (336). Реализация микропроцессорных устройств быстрого преобразования Фурье (339). Влияние шумов квантования (341).

### 12.6. Микропроцессорные специализированные устройства

Микропроцессорные временные дискриминаторы (342). Микропроцессорные частотные

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

дискриминаторы (345). Микропроцессорные фазовые дискриминаторы (346). Микропроцессорные цифровые исполнительные устройства (348).

Приложения.

Приложение I. Список команд микроЭВМ с общей шиной (351). Приложение 2. Таблица интегралов (354)

Список литературы

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В развитии общества наблюдалось несколько этапов научно-технических преобразований, связанных с вопросами управления. Первая промышленная революция характеризовалась заменой физического труда человека работой машин. В дальнейшем оказалось, что многие машины, в частности паровые, нуждаются в постоянном автоматическом управлении (регулировании). Это привело в 80-х годах XVIII столетия к появлению центробежных регуляторов.

Затем были изобретены и начали широко применяться многие другие регулирующие и управляющие автоматические системы, улучшившие качество работы машин и освободившие человека от выполнения монотонных функций умственной и физической деятельности.

Особая роль в эпоху современной научно-технической революции принадлежит микроэлектронике и электронным вычислительным машинам, использование которых в системах автоматического управления обеспечивает резкий скачок в оценке их возможностей и свойств. Это заключается не только в улучшении точностных характеристик, повышении надежности и отказоустойчивости, обеспечении стабильности функционирования, но и в придании системам автоматического управления принципиально новых свойств, таких, как гибкость и перестраиваемость структуры, адаптивность, способность решать вычислительные и логические задачи, самоконтроль и др.

Особо эффективным оказывается использование в автоматических системах микропроцессоров и построенных на их основе цифровых блоков и устройств.

В отличие от обычных вычислительных машин цифровое управляющее устройство может быть выполнено, например, по интегральной технологии и расположено на миниатюрном кристалле площадью 20—30 мм<sup>2</sup>. Такое устройство легко встраивается в любой объект — станок, технологическую линию, автомобиль, электрическую пишущую машинку, кухонный комбайн, электронные весы, кассовый автомат, светофор, сложный научный прибор и т. п., придавая ему качества автоматических систем, повышая уровень его «интеллекта».

Внедрение микропроцессоров в традиционные системы автоматического управления (САУ) связано с принципиальными изменениями как их структуры, так и характеристик: преобладающими становятся структуры с децентрализованным управлением, многопроцессорные системы, системы с перестраиваемой структурой, реализующие оптимальные алгоритмы цифрового управления и регулирования. Меняются также методы и технические средства проектирования автоматических систем.

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

Все это связано с рядом особенностей микропроцессоров как элементов цифровых управляющих устройств САУ, основными из которых являются программируемость и относительно большая вычислительная мощность, сочетающиеся с высокой надежностью, малыми габаритными размерами, массой, энергопотреблением и стоимостью.

Программируемость микропроцессоров определяет возможность гибкой оперативной перестройки как алгоритма работы САУ, так и ее структуры с целью приспособления их к меняющимся условиям работы. При этом вносимые в систему изменения сводятся зачастую к замене одной большой интегральной схемы (БИС) памяти на другую. Свойство программируемости обеспечивает возможность внесения изменений в структуру и в программу работы системы на всех этапах ее проектирования — от предварительного проектирования до эксплуатации серийных образцов.

Значительная вычислительная мощность микропроцессоров и систем на их основе, величина которой по оценкам специалистов достигнет к 2000 г. нескольких сотен миллионов операций в секунду, создает хорошие предпосылки для использования микропроцессоров в быстродействующих системах реального времени.

Применение микропроцессоров в системах автоматического управления позволяет поднять на качественно новый уровень такие важные их характеристики, как отказоустойчивость и живучесть. Так, отказоустойчивость, т. е. способность системы сохранять свою работоспособность при возникновении в системе разнообразных отказов, обеспечивается в микропроцессорных САУ введением аппаратурной, программной и информационной избыточности. Широкое распространение получают системы с резервированием, а также системы с программной реконфигурацией структуры и использованием самокорректирующихся кодов. Для оперативного контроля и диагностики все шире используется встроенный программно-аппаратный контроль, осуществляемый с привлечением относительно дешевых дополнительных ресурсов.

По прогнозам специалистов преимущества отказоустойчивых систем, связанные с большими удобствами в эксплуатации, резким снижением эксплуатационных расходов, исключением материального и морального ущерба из-за отказов в работе, сделают такие системы автоматического управления основными системами ближайшего будущего.

[Скачать книгу В. А. Бесекерский, Н. Б. Ефимов, С. И. Зиятдинов, В. В. Изранцев, А. В. Небылов, Н. Г. Соколов, Е. А. Фабрикант. Микропроцессорные системы автоматического управления.](#) Под общей редакцией В. А. Бесекерского. Ленинград, издательство Машиностроение, Ленинградское отделение, 1988