

-500130-

# МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

А. В. ХОРХОРДИН, О. С. ВОЛУЕВА, В. В. ТУРУПАЛОВ

Под общей редакцией В. В. Турупалова



«Инфра-Инженерия»

**А. В. Хорхордин, О. С. Волуева, В. В. Турупалов**

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА  
И СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Учебник*

*Под общей редакцией  
кандидата технических наук, профессора В. В. Турупалова*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2022

УДК 681.511(075.8)

ББК 32.965.4я73

Х82

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор кафедры автоматике, телемеханики, связи и вычислительной техники, ректор Донецкого института железнодорожного транспорта **Чепцов Михаил Николаевич**;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Донецкого национального технического университета **Павлыш Владимир Николаевич**

**Хорхордин, А. В.**

**Х82** Методы анализа и синтеза цифровых систем автоматического управления : учебник / А. В. Хорхордин, О. С. Волуева, В. В. Турупалов ; под общ. ред. к. т. н., проф. В. В. Турупалова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 204 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0878-3

Приведены сведения, включающие методологию исследования и синтеза, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем автоматического управления, в том числе системы с прогнозирующими моделями, а также стабилизирующими и робастными регуляторами. Рассматриваются методические примеры, приводятся вопросы и задания для самоконтроля.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Управление в технических системах». Может быть полезно читателям, владеющим базовыми знаниями в сфере анализа, синтеза и проектирования систем автоматического управления.

УДК 681.511(075.8)

ББК 32.965.4я73

ISBN 978-5-9729-0878-3

© Хорхордин А. В., Волуева О. С., Турупалов В. В., 2022

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....	7
1.1 Общие понятия о цифровых системах управления .....	7
Функциональная схема цифровой системы .....	9
Понятие о решетчатых функциях и дискретном преобразовании Лапласа .....	11
Разностные уравнения цифровых систем управления .....	12
Понятие о Z-преобразовании .....	13
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	16
1.2 Передаточные функции цифровой системы управления .....	17
Передаточные функции разомкнутой цифровой системы управления .....	18
Передаточные функции замкнутой цифровой системы управления .....	24
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	28
1.3 Описание цифровых систем в пространстве состояний.	
Свойства цифровых систем: достижимость, управляемость, наблюдаемость, восстанавливаемость.....	29
Получение уравнений состояния цифровой системы на основе разностного уравнения .....	29
Описание в пространстве состояний многомерной системы .....	32
Описание системы в пространстве состояний в канонической форме управляемости .....	38
Свойства цифровых динамических систем .....	39
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	46
1.4 Частотные характеристики цифровых систем .....	48
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	52
1.5 Устойчивость и точность цифровых систем управления.....	53
Устойчивость цифровых систем. Критерии устойчивости .....	53
Анализ точности цифровых систем .....	60
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	61
РАЗДЕЛ 2 СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ.....	64
2.1 Реализация алгоритмов управления цифровыми контроллерами.....	64
Параметрически оптимизируемые регуляторы.....	66
2.2 Синтез модальных регуляторов .....	67
Синтез регулятора на основе преобразования матричных уравнений к канонической форме управляемости .....	67
Синтез регулятора цифровой системы на основе метода Аккермана.....	73
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	77
2.3 Проектирование компенсационного регулятора с конечным временем переходного процесса .....	77
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	81
2.4 Q-параметризация. Проектирование стабилизирующих регуляторов цифровых систем.....	82
Понятие внутренней устойчивости.....	85
Расчет стабилизирующего регулятора цифровой системы.....	86
Вопросы и задачи для самоконтроля.....	91

РАЗДЕЛ 3	РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	93
3.1	Описание неопределенности моделей объекта.....	93
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	101
3.2	Робастная устойчивость системы управления.....	102
	Общая форма описания системы для робастного регулирования.....	102
	Одномерная система управления с мультипликативной неопределенностью.....	106
	Робастная устойчивость многомерных систем .....	107
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	108
3.3	Проектирование робастных систем автоматического управления .....	110
	Методика проектирования робастных многомерных систем управления... ..	116
	Синтез робастного регулятора МИМО системы с использованием "2-Риккати подхода" (в пространстве состояний) .....	118
	Синтез робастного регулятора с использованием частотного метода.....	121
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	125
РАЗДЕЛ 4	СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩИМИ МОДЕЛЯМИ... ..	126
4.1	Концепция построения САУ с прогнозирующими моделями.....	126
	Модели объекта .....	127
	Расчет оптимального управления при заданных горизонтах прогнозирования и управления .....	135
	Замкнутая система управления с прогнозирующими моделями.....	136
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	144
4.2	Управление при наличии ограничений.....	145
	Типы ограничений и задача квадратичного программирования.....	145
	Решение задачи квадратичного программирования и поиск несущественных ограничений .....	154
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	157
4.3	Функции Лагерра в задаче управления с прогнозирующими моделями .....	159
4.4	Управление с функциями Лагерра при наличии ограничений .....	169
	Ограничение на управление .....	169
	Ограничения на выходную величину объекта .....	176
	Вопросы и задачи для самоконтроля.....	178
4.5	Управление многомерным и многосвязным объектом .....	180
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	185
	ЛИТЕРАТУРА.....	187
	ПРИЛОЖЕНИЕ П.1 .....	189
	ПРИЛОЖЕНИЕ П.2 .....	193
	ПРИЛОЖЕНИЕ П.3.....	194

Учебное издание

**ХОРХОРДИН Александр Владимирович**  
**ВОЛУЕВА Ольга Сергеевна**  
**ТУРУПАЛОВ Виктор Владимирович**

# **МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ**

*Учебник*

*Под общей редакцией  
кандидата технических наук, профессора В. В. Турупалова*

ISBN 978-5-9729-0878-3



Подписано в печать 17.09.2021  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Таймс».

Издательство «Инфра-Инженерия»  
160011, г. Вологда, ул. Козленская, д. 63  
Тел.: 8 (800) 250-66-01  
E-mail: [booking@infra-e.ru](mailto:booking@infra-e.ru)  
<https://infra-e.ru>

Издательство приглашает  
к сотрудничеству авторов  
научно-технической литературы