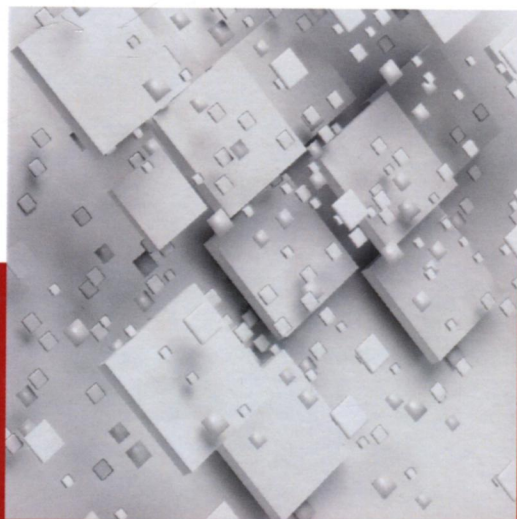


ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ

МЕХАТРОНИКА

Инженерный
ПОДХОД



E.LANBOOK.COM

МЕХАТРОНИКА. ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Под редакцией профессора А. Н. Веригина



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР

2023

УДК 681.5
ББК 32.96я73

М 55 Мехатроника. Инженерный подход : учебное пособие для вузов / А. Н. Веригин, Н. А. Незамаев, А. Г. Ишутин [и др.] ; под редакцией А. Н. Веригина. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 644 с. : ил. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-507-47913-9

Учебное пособие подготовлено в соответствии с учебным планом специальности «Проектирование технологических машин и комплексов», а также может быть использовано в курсах как для техников, так и для студентов других инженерных специальностей.

Общая цель учебного пособия — изложить мехатронику с позиций инженерного подхода, помочь читателю приобрести сочетание знаний и навыков в области машиностроения, электроники и вычислительной техники, необходимое для проектирования мехатронных модулей.

УДК 681.5
ББК 32.96я73

Рецензенты:

Л. А. РУСИНОВ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой автоматизации процессов химической промышленности Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета);

Н. А. МАРЦУЛЕВИЧ — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой механики Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

Обложка
П. И. ПОЛЯКОВА

© Издательство «Лань», 2023
© Коллектив авторов, 2023
© Издательство «Лань», художественное оформление, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ВВЕДЕНИЕ В МЕХАТРОНИКУ	14
1.1. Что такое мехатроника?.....	14
1.2. Проектирование.....	16
1.3. Система моделирования	18
1.4. Система измерения.....	20
1.5. Система управления.....	21
1.5.1. Обратная связь.....	21
1.5.2. Системы с открытым и закрытым контурами управления.....	22
1.5.3. Основные элементы замкнутой системы управления.....	24
1.5.4. Аналоговые и цифровые системы управления	27
1.5.5. Последовательные контроллеры	31
1.6. Программируемый логический контроллер	34
1.6.1. Принцип действия ПЛК.....	41
1.6.2. Программирование ПЛК. Реле и контроллер.....	43
1.7. Примеры мехатронных систем	46
1.7.1. Цифровая камера и автоматический фокус.....	46
1.7.2. Система управления двигателем внутреннего сгорания	47
1.7.3. Микроэлектромеханические системы и автомобильная подушка безопасности	49
Заключение	50
ГЛАВА 2 ДАТЧИКИ	51
2.1. Датчики и преобразователи.....	51
2.2. Преобразование сигналов. Основные определения.....	52
2.3. Перемещение, положение и близость	57
2.3.1. Датчик потенциометра.....	58
2.3.2. Тензометрический элемент	59
2.3.3. Емкостной элемент	61
2.3.4. Дифференциальные трансформаторы.....	63
2.3.5. Вихревые токовые датчики приближения.....	66
2.3.6. Индуктивные датчики.....	67
2.3.7. Оптические энкодеры	67
2.3.8. Пневматические датчики.....	69
2.3.9. Бесконтактные датчики	70
2.3.10. Концевые выключатели.....	71
2.3.11. Датчики Холла.....	71
2.3.12. Магниторезистивные датчики	73
2.4. Скорость и движение	74
2.4.1. Тахогенератор.....	74
2.4.2. Пироэлектрические датчики	75
2.5. Сила	77
2.6. Давление.....	78

2.6.1. Пьезоэлектрические датчики	81
2.6.2. Тактильный датчик	82
2.7. Расход жидкости.....	83
2.8. Уровень жидкости	85
2.9. Температура	86
2.9.1. Биметаллическая пластина.....	86
2.9.2. Термометры сопротивления (RTD).....	86
2.9.3. Термисторы.....	88
2.9.4. Термодиоды и термотранзисторы	89
2.9.5. Термопары.....	90
2.10. Датчики освещенности	92
2.11. Выбор датчиков	94
2.12. Ввод данных с помощью ключей	95
Заключение	98
ГЛАВА 3 ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ	100
3.1. Формирование сигнала	100
3.2. Операционный усилитель	101
3.2.1. Инвертирующий усилитель	102
3.2.2. Неинвертирующий усилитель	104
3.2.3. Интегратор и дифференциатор на ОУ	107
3.2.4. Разностный усилитель	108
3.2.5. Логарифмический усилитель	112
3.2.6. Компаратор	113
3.2.7. Реальные усилители	115
3.3. Защита	117
3.4. Фильтрация	119
3.5. Мост Уитстоуна.....	121
3.5.1. Температурная компенсация.....	122
3.5.2. Компенсация термопары	125
3.6. Импульсная модуляция	126
3.7. Проблемы с сигналами	128
3.7.1. Заземление	128
3.7.2. Электромагнитные помехи	130
Заключение	132
ГЛАВА 4 ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ	133
4.1. Цифровые сигналы.....	133
4.2. Аналоговые и цифровые сигналы	133
4.2.1. Теорема о выборке	136
4.2.2. Цифроаналоговое преобразование	137
4.3. Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи.....	137
4.3.1. Цифроаналоговые преобразователи.....	137
4.3.2. Аналого-цифровой преобразователь.....	140
4.3.3. Усилители выборки и удержания.....	145
4.4. Мультиплексоры	145
4.5. Сбор данных	147

4.6. Цифровая обработка сигналов	150
Заключение	152
ГЛАВА 5 ЦИФРОВАЯ ЛОГИКА	154
5.1. Цифровая логика	154
5.2. Логические элементы.....	155
5.2.1. Комбинирующие входы.....	160
5.2.2. Логические семейства и интегральные схемы.....	161
5.3. Области применения логических элементов.....	163
5.4. Последовательная логика	167
5.4.1. Триггер-флоп	167
5.4.2. Синхронные системы.....	170
5.4.3. JK триггер-флоп	170
5.4.4. D-триггер.....	172
5.4.5. Регистр.....	173
5.4.6. Таймер 555	174
Заключение	176
ГЛАВА 6 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ	177
6.1. Дисплеи	177
6.1.1. Аналоговые и цифровые счетчики	178
6.1.2. Электронно-лучевой осциллограф	179
6.1.3. Блок визуального отображения	181
6.2. Принтеры.....	182
6.3. Магнитная запись	184
6.4. Оптическая запись.....	189
6.5. Матричные дисплеи	189
6.6. Системы сбора данных	194
6.6.1. Компьютер с подключаемыми платами.....	194
6.6.2. Регистраторы данных	197
6.7. Измерительные системы.....	199
6.8. Тестирование и калибровка.....	202
Заключение	204
ГЛАВА 7 ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРИВОДЫ	205
7.1. Приводы как источники питания	205
7.1.1. Гидравлические источники питания	205
7.1.2. Пневматические источники питания	207
7.2. Клапаны, регулирующие направление потока.....	210
7.2.1. Обозначение клапанов	211
7.3.2. Клапаны с пилотным управлением	213
7.3.3. Направляющие клапаны	214
7.3. Клапаны регулирования давления.....	215
7.4. Цилиндры	216
7.5. Серво- и пропорциональные регулирующие клапаны.....	221
7.6. Клапаны, регулирующие технологический процесс	222
7.6.1. Корпуса клапанов и заглушек.....	223
7.6.2. Размер регулирующего клапана	226

7.6.3. Пример системы управления текучей средой	227
7.7. Поворотные приводы	228
Заключение	228
ГЛАВА 8 МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИВОДНЫЕ СИСТЕМЫ	230
8.1. Механизмы	230
8.2. Типы движения	231
8.3. Кинематические цепи	234
8.3.1. Цепь из четырех стержней	235
8.3.2. Кривошипно-ползунковый механизм	236
8.4. Кулачки	238
8.5. Шестерни	241
8.5.1. Зубчатые передачи	243
8.5.2. Ременная передача	244
8.6. Храповик и собачка	246
8.7. Ременные и цепные приводы	246
8.7.1. Типы ремней	247
8.7.2. Цепи	248
8.7.3. Подшипники скольжения с цапфой	248
8.7.4. Шариковые и роликовые подшипники	250
8.7.5. Выбор подшипников	251
Заключение	252
ГЛАВА 9 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИВОДНЫЕ СИСТЕМЫ	253
9.1. Электрические системы	253
9.2. Механические переключатели	253
9.3. Твердотельные переключатели	255
9.4. Соленоиды	263
9.5. Щеточный двигатель постоянного тока	266
9.5.1. Двигатели постоянного тока щеточного типа с катушками возбуждения	268
9.5.2. Управление щеточными двигателями постоянного тока	270
9.5.3. Бесщеточные двигатели постоянного тока с постоянными магнитами	272
9.6. Двигатели переменного тока	275
9.7. Шаговые двигатели	277
9.7.1. Технические характеристики шагового двигателя	279
9.7.2. Управление шаговым двигателем	280
9.7.3. Выбор шагового двигателя	284
9.8. Выбор двигателя	286
9.8.1. Согласование инерции	286
9.8.2. Требования к крутящему моменту	287
9.8.3. Требования к питанию	289
Заключение	289
ГЛАВА 10 МИКРОПРОЦЕССОРЫ И МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ	291
10.1. Контроль	291
10.2. Микропроцессорные системы	291

10.2.1. Шины	292
10.2.2. Микропроцессор.....	293
10.2.3. Память	297
10.2.4. Ввод или вывод	300
10.2.5. Примеры систем	301
10.3. Микроконтроллеры	305
10.3.1. Motorola Freescale M68HC11.....	306
10.3.2. Intel 8051.....	312
10.3.3. Микроконтроллеры Microchip™	317
10.3.4. Микроконтроллеры Atmel AVR и Arduino.....	324
10.3.5. Выбор микроконтроллера	327
10.4. Приложения	329
10.4.1. Система измерения температуры	329
10.4.2. Бытовая стиральная машина	329
10.4.3. Псевдокод.....	331
Заключение	331
ГЛАВА 11 СИСТЕМЫ ВВОДА ИЛИ ВЫВОДА	333
11.1. Сопряжение.....	333
11.2. Ввод или вывод.....	333
11.3. Интерфейс требования.....	336
11.3.1. Буферы.....	337
11.3.2. Установление связи (handshaking).....	338
11.3.3. Опрос и прерывания	341
11.3.4. Последовательное сопряжение	344
11.4. Адаптеры периферийного интерфейса	345
11.5. Серийный коммуникационный интерфейс	350
11.6. Примеры сопряжения	354
Заключение	357
ГЛАВА 12 ПРОГРАММИРОВАНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ	358
12.1. Программируемый логический контроллер.....	358
12.2. Базовая структура ПЛК	358
12.2.1. Ввод или вывод	359
12.2.2. Ввод программ.....	361
12.2.3. Формы ПЛК	362
12.3. Ввод или вывод, обработка	363
12.4. Лестница программирования	364
12.5. Списки инструкций.....	369
12.6. Защелкивание и внутренние реле.....	372
12.7. Таймеры и счетчики.....	377
12.7.1. Таймеры.....	377
12.8. Регистры сдвига.....	381
12.9. Управление мастером и прыжком	383
12.10. Обработка данных.....	385
12.11. Аналоговый ввод или вывод	387
Заключение	390

ГЛАВА 13 СИСТЕМЫ СВЯЗИ	391
13.1. Цифровое взаимодействие	391
13.2. Управление данными	391
13.3. Сети	394
13.3.1. Управление доступом к сети	395
13.3.2. Широкополосная связь и базовая полоса	396
13.4. Протоколы	396
13.5. Коммуникационная модель взаимосвязи открытых систем	398
13.6. Серийный номер и интерфейсы связи	401
13.6.1. Интерфейс RS-232	401
13.6.2. Контур тока 20 мА	403
13.6.3. Шина I ² C	403
13.6.4. CAN-шина	405
13.6.5. USB	406
13.7. Параллельные интерфейсы связи	407
13.8. Протоколы беспроводной связи	411
Заключение	412
ГЛАВА 14 ПОИСК НЕИСПРАВНОСТЕЙ	413
14.1. Методы обнаружения неисправностей	413
14.2. Сторожевой таймер	414
14.3. Проверка четности и кодирования ошибок	415
14.4. Общие аппаратные сбои	416
14.5. Микропроцессорные системы	418
14.5.1. Методы поиска неисправностей	418
14.5.2. Систематическое определение местоположения неисправностей	421
14.5.3. Само тестирование	421
14.6. Эмуляция и моделирование	422
14.7. Системы ПЛК	423
14.7.1. Тестирование программы	423
14.7.2. Тестирование входных и выходных данных	424
14.7.3. ПЛК как средство мониторинга систем	425
Заключение	425
ГЛАВА 15 ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	428
15.1. Математические модели	428
15.2. Блоки механической системы	429
15.2.1. Ротационные системы	431
15.2.2. Построение механической системы	432
15.3. Блоки электрических систем	438
15.3.1. Построение модели электрической системы	440
15.3.2. Электрические и механические аналогии	442
15.4. Блоки гидравлической системы	443
15.4.1. Построение модели для жидкостной системы	447
15.5. Блоки тепловой системы	451
15.5.1. Построение модели тепловой системы с камином	452

Заключение	454
ГЛАВА 16 СИСТЕМНЫЕ МОДЕЛИ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ	456
16.1. Инженерные системы	456
16.2. Реечная передача	456
16.3. Электромеханические модули	457
16.3.1 Потенциометр	457
16.3.2. Двигатель постоянного тока	458
16.4. Линейность.....	461
16.5. Гидравлические мехатронные модули.....	463
Заключение	466
ГЛАВА 17 ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ СИСТЕМ	467
17.1. Моделирование динамических систем	467
17.1.1. Дифференциальные уравнения.....	467
17.2. Терминология	468
17.2.1. Естественные и вынужденные реакции.....	468
17.2.2. Переходные и стационарные характеристики	469
17.2.3. Формы входных данных.....	470
17.3. Системы первого порядка	471
17.3.1. Естественная реакция	471
17.3.2. Реакция с принудительным вводом	472
17.3.3. Примеры систем первого порядка.....	473
17.3.4. Постоянная времени	475
17.4. Системы второго порядка	477
17.4.1. Естественная реакция	478
17.4.2. Реакция с принудительным вводом	481
17.4.3. Примеры применения уравнений второго порядка.....	482
17.5. Показатели эффективности для систем второго порядка	484
17.6. Идентификация системы	488
Заключение	488
ГЛАВА 18 ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ СИСТЕМЫ.....	491
18.1. Передаточная функция	491
18.2. Системы управления первого порядка.....	494
18.3. Системы управления второго порядка.....	497
18.3.1. Система второго порядка со ступенчатым вводом.....	497
18.3.2. Примеры систем второго порядка.....	498
18.4. Последовательные системы	499
18.4.1. Примеры последовательных систем	499
18.5. Системы управления с контурами обратной связи	500
18.5.1. Примеры систем с отрицательной обратной связью.....	501
18.6. Влияние расположения полюсов на переходную характеристику	502
18.6.1. s -образная плоскость.....	504
18.6.2. Компенсация	504
Заключение	505
ГЛАВА 19 ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	506
19.1. Гармонический (синусоидальный) входной сигнал.....	506

19.2. Фазовые векторы.....	507
19.2.1. Уравнения фазора.....	508
19.3. Частотная характеристика системы управления.....	510
19.3.1. Частотная характеристика системы первого порядка.....	510
19.3.2. Частотная характеристика СУ второго порядка.....	512
19.4. Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (диаграмма Боде).....	513
19.4.1. График Боде (ЛАФЧХ) для $G(s) = K$	513
19.4.2. График Боде для $G(s) = 1/s$	514
19.4.3. График Боде для системы первого порядка.....	515
19.4.4. График Боде (ЛАФЧХ) для СУ второго порядка.....	516
19.4.5. Построение графиков Боде (ЛАФЧХ).....	517
19.4.6. Идентификация системы.....	520
19.5. Представление технической характеристики.....	524
19.6. Стабильность.....	525
Заключение.....	527
ГЛАВА 20 КОНТРОЛЛЕРЫ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ УПРАВЛЕНИЯ.....	528
20.1. Непрерывное и дискретное управление.....	528
20.1.1. Системы с открытым и замкнутым контуром.....	529
20.2. Терминология.....	530
20.2.1. Задержка.....	530
20.2.2. Ошибка установившегося состояния.....	530
20.2.3. Режимы управления.....	532
20.3. Двухступенчатый режим управления.....	533
20.4. Пропорциональный режим.....	534
20.4.1. Электронный пропорциональный регулятор.....	535
20.4.2. Реакция системы.....	535
20.5. Контроль над производными финансовыми инструментами.....	536
20.5.1. Пропорциональный плюс производный контроль (PD).....	538
20.6. Интегральное управление.....	538
20.6.1. Пропорциональное плюс интегральное (PI) управление.....	540
20.7. ПИД-регулятор.....	541
20.8. Цифровые контроллеры.....	541
20.8.1. Реализация режимов управления.....	543
20.9. Производительность системы управления.....	545
20.10. Настройка контроллера.....	546
20.10.1. Способ технологической реакции.....	546
20.10.2. Метод конечного цикла.....	548
20.11. Регулирование скорости.....	548
20.12. Адаптивное управление.....	549
Заключение.....	552
ГЛАВА 21 НЕЧЕТКОСТЬ.....	553
21.1. Фундаментальные нечеткие проблемы искусственного интеллекта.....	553

21.2. Макрознания и макромысли	554
21.3. Взаимодействие человека с компьютером	556
21.4. Теория множеств	558
21.4.1. Четкие множества	559
21.4.2. Четкая логика.....	563
21.5. Нечеткие множества	568
21.5.1. Расширение понятия нечеткого множества	573
21.6. Нечеткая логика.....	575
21.7. Нечеткие выводы.....	580
Заключение	589
ГЛАВА 22 МЕХАТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ	591
22.1. Мехатронные модули.....	591
22.1.1. Переключатель времени	591
22.1.2. Движение стеклоочистителя ветрового стекла.....	594
22.1.3. Весы для ванной комнаты	598
22.2. Тематические исследования.....	601
22.2.1. Робот для подбора и размещения	601
22.2.2. Ограждение автостоянки.....	605
22.2.3. Цифровая камера	606
22.2.4. Автомобильные системы управления.....	611
22.2.5. Жесткий диск.....	614
22.3. Робототехника	616
Заключение	620
СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ.....	621
ЛИТЕРАТУРА	627