

# Содержание

От издательства .....	16
От автора .....	17
<b>Глава 1. Введение в робототехнику.....</b>	<b>21</b>
1.1. Определение и классификация роботов .....	21
1.1.1. Определение робота.....	21
1.1.2. Классификация роботов .....	23
1.1.3. Подход к решению задач управления различными типами роботов .....	26
1.1.4. Общее представление о задаче управления роботами на основе модели .....	28
1.2. Методы управления роботами.....	31
1.2.1. Первое и второе поколения роботов .....	31
1.2.2. Третье поколение: методы интеллектуального управления роботами .....	32
1.3. Методы управления на основе моделей и структура книги.....	32
1.3.1. Основы робототехники.....	32
1.3.2. Основные методы управления роботами .....	33
1.3.3. Управление с учетом неопределенностей .....	35
1.3.4. Силовое и гибридное позиционно-силовое управление .....	36
1.3.5. Оптимизация движения и оптимальное управление роботами.....	37
1.3.6. Моделирование и управление гибкими манипуляторами .....	38
1.3.7. Координированное управление группой роботов .....	38
1.3.8. Управление копирующими роботами .....	39
1.3.9. Управление мобильными манипуляторами.....	40
1.4. Как эффективно освоить теорию и методы модельного управления роботами .....	40
1.4.1. Фундаментальная инженерная подготовка.....	40
1.4.2. Объективная оценка робота как объекта управления и повышение профессиональной компетентности .....	41
1.5. О кибернетике, теории управления и инженерном управлении .....	44
1.5.1. О кибернетике Винера и понятии управления .....	44
1.5.2. Теория управления и управление техническими системами.....	46
Вопросы и упражнения .....	49
<b>Глава 2. Объект управления и состав робототехнической системы ....</b>	<b>51</b>
2.1. Общий состав робототехнической системы .....	52
2.1.1. Манипулятор для радиоактивных веществ как прототип робота .....	52

2.1.2. Общий состав робототехнической системы .....	55
2.1.3. Пример типичной робототехнической системы .....	85
2.2. Механическая система, механизмы и структура промышленного робота-манипулятора .....	89
2.2.1. Промышленный робот-манипулятор PUMA 262/562 .....	89
2.2.2. Промышленные роботы-манипуляторы серии MOTOMAN K .....	94
2.3. Системы, механизмы и строение мобильных роботов .....	102
2.3.1. Системы шагающих мобильных роботов и механизмы двуногих роботов .....	102
2.3.2. Механизм и механическая структура четвероногого робота .....	105
2.3.3. Системы, механизмы и строение шагающих роботов с комбинированными способами передвижения.....	111
2.3.4. Система, механизм и строение робота с двумя руками, имитирующего обезьяну с различными способами передвижения .....	120
2.3.5. Системы, механизмы и строение колесных мобильных роботов.....	132
2.3.6. Промежуточное резюме .....	135
2.4. Практические проблемы управления роботами .....	136
2.4.1. Ограниченность управления роботами и проблемы собственных конструктивных ограничений и сингулярностей .....	136
2.4.2. Точность роботов и компенсация недостаточной механической точности средствами управления .....	137
2.4.3. О практических проблемах управления траекторией и усилием роботов .....	139
2.4.4. Практические вопросы управления шагающими и колесными мобильными роботами .....	142
2.5. Резюме .....	143
Вопросы и упражнения .....	143
<b>Глава 3. Основы кинематики управляемого движения роботов.....</b>	<b>147</b>
3.1. Механизмы роботов и представление позиции и ориентации .....	148
3.1.1. Понятие механизмов робота и их классификация.....	148
3.1.2. Степени свободы и сочленения робота .....	155
3.1.3. Математические задачи, связанные с применением манипулятора промышленного робота .....	167
3.1.4. Что такое кинематика робота? .....	171
3.1.5. Представление координатных систем манипулятора робота и распространенные конфигурации его звеньев.....	174
3.1.6. Начальная конфигурация механизма как эталон для сравнения конфигураций манипулятора промышленного робота .....	176
3.1.7. Представление ориентации концевой эффектора, установленного на механическом интерфейсе конца манипулятора промышленного робота.....	177
3.2. Координатные системы и преобразования координат.....	179
3.2.1. Объект и система координат.....	179
3.2.2. Геометрический анализ преобразований координат для относительного движения объектов и однородные матрицы преобразования координат.....	186

3.3. Решения прямой задачи кинематики для робототехнических механизмов и их применение .....	208
3.3.1. Создание системы координат для робототехнических механизмов ...	208
3.3.2. Представление параметров ДН для звеньев и сочленений в механизмах роботов.....	210
3.3.3. Методы и примеры решения прямой задачи кинематики механизмов роботов .....	215
3.3.4. Методы решения прямой задачи кинематики и применение решений .....	219
3.4. Решения обратной задачи кинематики для механизмов роботов.....	221
3.4.1. Общие решения обратной задачи кинематики .....	221
3.4.2. Методы аналитической геометрии для решения обратной задачи кинематики .....	223
3.5. Матрица Якоби механизмов робота.....	237
3.5.1. Малые перемещения и матрица Якоби.....	237
3.5.2. Матрица Якоби для роботизированной руки с двумя степенями свободы в горизонтальной плоскости.....	240
3.5.3. Общее представление матрицы Якоби .....	241
3.5.4. Соотношение между силами и моментами в сочленениях.....	245
3.5.5. Соотношение преобразования координат силы.....	247
3.6. Динамика механизмов робота .....	250
3.6.1. Математическое описание кинематики и динамики механизмов робота.....	250
3.6.2. Применение векторного анализа и матричных преобразований в кинематике твердых тел или систем точечных частиц .....	252
3.6.3. От векторного представления уравнений Лагранжа к матричному .....	259
3.6.4. Уравнения движения многотельных систем, полученные методом Ньютона–Эйлера .....	267
3.7. Общая форма уравнения движения механизма робота и ее применение .....	275
3.7.1. Уравнения движения многотельной системы .....	275
3.7.2. Общая форма уравнений движения для многотельной роботизированной системы.....	276
3.8. Механизм и кинематика шагающих роботов .....	277
3.8.1. Прообразы механизмов и кинематики шагающих роботов .....	277
3.8.2. Основные походки шагающих роботов.....	281
3.8.3. Кинематика механизмов шагающих роботов и методы генерации паттернов ходьбы.....	284
3.9. Колесные мобильные роботы: их механизмы, кинематика и механика....	293
3.9.1. Обзор колесных мобильных роботов .....	293
3.9.2. Принципы управления поворотными колесами .....	294
3.9.3. Принципы рулевого управления с независимым приводом.....	297
3.9.4. Угол и радиус поворота мобильного робота-тележки с рулевым механизмом.....	298
3.9.5. Угол и радиус поворота и кривизна траектории мобильного робота с независимым приводом на два колеса.....	300

3.9.6. Движущая сила, необходимая для перемещения колесных мобильных роботов.....	301
3.9.7. Расчет движущей силы с учетом момента инерции вращения .....	304
3.10. Резюме .....	306
Вопросы и упражнения .....	306

<b>Глава 4. Определение параметров робота.....</b>	<b>311</b>
4.1. Зачем нужно определять параметры робота? .....	311
4.2. Уравнение движения робота и физические параметры .....	313
4.3. Основная идея ограниченного случайного возбуждения движения робота и определения параметров .....	315
4.3.1. Ограниченное случайное возбуждение движения робота .....	315
4.3.2. Основная идея и принцип определения параметров робота .....	317
4.4. Уравнение движения робота и выбор базовых параметров.....	318
4.4.1. Уравнение движения робота и параметры .....	318
4.4.2. Определение и выбор базовых параметров .....	321
4.5. Принципы и алгоритмы определения параметров .....	322
4.5.1. Метод последовательного определения параметров.....	322
4.5.2. Метод одновременного определения параметров .....	326
4.5.3. Преимущества и недостатки последовательного и одновременного методов определения .....	328
4.6. Практические аспекты эксперимента по определению параметров .....	329
4.7. Эксперимент по определению параметров двуногого робота.....	330
4.7.1. Определение параметров робота на основе данных о силе, действующей на стопу, и данных о положении/скорости сочленений .....	330
4.7.2. Общая модель определения параметров и алгоритм решения .....	331
4.7.3. Моделирование задачи определения параметров двуногого робота .....	333
4.7.4. Эксперимент по определению параметров двуногого робота и анализ результатов.....	336
4.8. Резюме .....	338
Вопросы и упражнения .....	339

<b>Глава 5. Управление положением и отслеживанием траектории робота.....</b>	<b>342</b>
5.1. Общие положения кинематики робота и управления положением/траекторией.....	342
5.1.1. Взаимосвязь между кинематикой и динамикой робота .....	342
5.1.2. Общие принципы управления положением/траекторией робота.....	344
5.2. Основные понятия и классификация управления положением/траекторией робота.....	348
5.2.1. Некоторые основные понятия управления положением/траекторией робота .....	348
5.2.2. Суть траекторий в практическом управлении положением/траекторией на примере сварочного манипулятора .....	350

5.2.3. Классификация методов управления положением/траекторией робота .....	352
5.3. Управление позицией/траекторией робота с использованием PID.....	353
5.3.1. Математические и механические основы PID-управления.....	353
5.3.2. PID-контроллер позиционного и траекторного слежения робота.....	356
5.3.3. PD-система и технология управления позицией и траекторией робота .....	357
5.4. Динамическое управление .....	360
5.4.1. Что такое динамическое управление роботом .....	360
5.4.2. Динамическое управление роботом с опережающей связью.....	361
5.5. Прямое + PD-обратное динамическое управление .....	363
5.5.1. Что такое прямое + PD-обратное динамическое управление роботом .....	363
5.5.2. Контроллер и структура системы прямого + PD-обратного динамического управления .....	364
5.6. Метод управления с вычислением момента .....	365
5.6.1. В чем заключается метод вычисления момента в динамическом управлении роботом .....	365
5.6.2. Контроллер и структура системы управления по методу вычисления момента .....	366
5.7. Метод управления с разложением ускорений .....	367
5.7.1. Зачем нужен метод управления с разложением ускорений.....	367
5.7.2. В чем заключается метод управления с разложением ускорения в динамическом управлении роботом .....	368
5.7.3. Контроллер метода управления с разложением ускорения и структура его системы управления .....	369
5.7.4. Система управления по методу разложения ускорения с внешней системой измерения траектории положения и ориентации в рабочем пространстве робота.....	371
5.8. Резюме .....	372
Вопросы и упражнения .....	374
<b>Глава 6. Управление усилием робота .....</b>	<b>377</b>
6.1. Классификация роботизированных операций и основные понятия управления усилием.....	377
6.2. Датчики силы, используемые для управления усилием робота, и их применение .....	381
6.2.1. Шестикомпонентная сила и датчик силы .....	381
6.2.2. Датчик силы/момента JR3 в системах управления усилием.....	383
6.2.3. Преобразование данных, полученных датчиком силы/момента.....	385
6.2.4. Методы обработки внешних сил, действующих на робота со стороны окружающей среды, и способы обратной связи по силе .....	390
6.3. Моделирование взаимодействия манипулятора робота с рабочей средой .....	391
6.3.1. Моделирование робота и рабочей среды или объекта в плоскости....	391
6.3.2. Общая модель взаимодействия $n$ -степенного робота с рабочей средой или объектом.....	392

6.3.3. О применении механических моделей взаимодействия робота и среды .....	393
6.4. Система управления усилием через положение .....	394
6.4.1. Понятие управления усилием через положение и классификация методов управления силой .....	394
6.4.2. Система управления усилием через жесткость (stiffness control) .....	397
6.4.3. Система управления усилием через демпфирование (damping control) .....	400
6.4.4. Система управления усилием через импеданс (impedance control) .....	404
6.4.5. Система управления усилием с виртуальным комплаентным управлением (compliance control) .....	405
6.4.6. Промежуточный итог по вопросам позиционно-силового управления .....	406
6.5. Система управления усилием, основанная на управлении моментом .....	407
6.5.1. Понятие и классификация систем управления усилием, основанных на управлении моментом .....	407
6.5.2. Система управления усилием в декартовой системе координат без динамической компенсации на основе $J^T$ и PD-управления и анализ устойчивости .....	409
6.5.3. Метод смешанного управления без динамической компенсации .....	412
6.5.4. Методы управления усилием с динамической компенсацией .....	412
6.5.5. Метод смешанного управления усилием с динамической компенсацией .....	414
6.6. Сравнение систем и методов управления усилием .....	415
6.7. Итоги главы .....	416
Вопросы и упражнения .....	416

<b>Глава 7. Динамическое управление роботом при неопределенных параметрах модели .....</b>	<b>419</b>
7.1. Неопределенность модели робота и проблемы динамического управления .....	419
7.1.1. Модель робота и неопределенность параметров модели .....	420
7.1.2. Проблема динамического управления роботом .....	424
7.1.3. Что такое робастное управление роботом .....	425
7.1.4. Что такое адаптивное управление роботом .....	426
7.2. Динамические характеристики робота и неопределенности в уравнениях динамики .....	427
7.2.1. Динамические характеристики .....	427
7.2.2. Представление неопределенностей модели робота .....	427
7.3. Управление на основе обратной задачи динамики и влияние неопределенностей .....	428
7.3.1. Номинальное управление .....	428
7.3.2. Матрицы коэффициентов усиления и устойчивый отклик замкнутой системы .....	430
7.3.3. Анализ влияния неопределенностей на устойчивость замкнутой системы .....	431

7.4. Робастное управление на основе метода Ляпунова.....	432
7.5. Робастное управление на основе пассивных характеристик .....	433
7.5.1. Основной способ робастного управления на основе пассивных характеристик – номинальное управление.....	433
7.5.2. Робастное управление, основанное на пассивных характеристиках – влияние неопределенности.....	436
7.5.3. Робастное управление по методу Ляпунова, основанное на пассивных характеристиках, и его улучшенный вариант.....	438
7.6. Адаптивное управление роботами .....	439
7.6.1. Адаптивное управление и типы адаптивных систем управления .....	439
7.6.2. Применение адаптивного управления к линейной модели системы манипулятора робота.....	441
7.6.3. Построение системы адаптивного управления с учетом конструкции роботизированного манипулятора.....	442
7.6.4. Моделирование системы роботизированного манипулятора в методах адаптивного управления.....	443
7.6.5. Моделирование системы робота, базовые параметры и закон (алгоритм) адаптивного управления.....	444
7.7. Резюме .....	449
Вопросы и упражнения .....	450

## **Глава 8. Оптимальное управление и кратчайшее время управления роботами.....**

8.1. Основные понятия и формализация оптимального управления .....	453
8.1.1. Основные задачи, понятия и развитие вариационного метода .....	453
8.1.2. Основные понятия оптимального управления.....	456
8.1.3. Оптимальное управление стационарных и нестационарных систем и преобразование задач .....	457
8.2. Применение вариационного метода в задачах оптимального управления.....	458
8.2.1. Множитель Лагранжа $\lambda(t)$ , функция Гамильтона $H(x, u, \lambda)$ и система уравнений Эйлера .....	458
8.2.2. Нормализованные формы граничных условий при применении вариационного метода к задачам оптимального управления .....	460
8.3. Принцип максимума для задачи со свободной конечной точкой в оптимальном управлении .....	463
8.3.1. Постановка задачи со свободной конечной точкой .....	463
8.3.2. Принцип максимума.....	463
8.4. Принцип максимума для задачи со свободной конечной точкой при подвижном $t_f$ .....	464
8.5. Принцип максимума для задачи оптимального управления с ограничением на конечное состояние.....	465
8.6. Задача оптимального управления роботом.....	466
8.6.1. Прикладные задачи оптимального управления роботом .....	466
8.6.2. Оптимизационное представление задачи нахождения оптимального управляющего воздействия робота .....	467

8.7. Методы нахождения оптимального управляющего воздействия в задаче оптимального управления роботом .....	469
8.7.1. Градиентный метод решения задачи нахождения оптимального управляющего воздействия робота .....	469
8.7.2. Численный алгоритм и процедура решения задачи оптимального управления методом градиента.....	471
8.8. Управление роботом по критерию минимального времени .....	473
8.8.1. Формализация задачи управления роботом по критерию минимального времени.....	473
8.8.2. Эксперимент и результаты управления по критерию минимального времени для плоского робота с двумя степенями свободы (2-DOF).....	475
8.9. Резюме .....	484
Вопросы и упражнения .....	484

<b>Глава 9. Манипуляторы с гибким звеном – моделирование и управление</b> .....	486
9.1. Основы моделирования гибких звеньев .....	486
9.1.1. Переход от жесткого промышленного манипулятора к механизму с гибкими звеньями .....	486
9.1.2. Типы и основные принципы работы гибких звеньев роботов.....	489
9.1.3. Системы координат и координатные преобразования гибкого звена робота типа «жесткое сочленение – упругое звено» .....	491
9.1.4. Уравнения прямой кинематики гибкого звена робота типа «жесткое сочленение – упругое звено» .....	493
9.2. Динамическое моделирование гибкого звена и его уравнения движения.....	496
9.2.1. Метод Лагранжа для динамического моделирования гибкого звена робота .....	496
9.2.2. Динамическое моделирование однозвенного робота с гибким звеном .....	501
9.3. Теория и методы управления роботизированными гибкими манипуляторами .....	506
9.3.1. Уравнение состояния и уравнение выхода .....	506
9.3.2. Робастное управление гибким звеном робота .....	509
9.4. Результаты моделирования управления гибким звеном робота .....	513
9.4.1. Модель и физические параметры гибкого звена робота.....	513
9.4.2. Результаты моделирования управления гибким звеном робота и их анализ.....	514
9.5. Резюме .....	516
Задачи и упражнения .....	517

<b>Глава 10. Координированное управление группой роботов</b> .....	518
10.1. Проблема координации одиночного робота и систем из нескольких роботов .....	518

10.1.1. Что представляет собой задача координации нескольких роботов? .....	518
10.1.2. Ключевые вопросы координированного управления несколькими роботами.....	520
10.2. Движение и внутренние силы объекта операции при групповой манипуляции .....	522
10.2.1. Движение объекта операции и определение координатных систем.....	522
10.2.2. Внутренние силы, действующие на объект манипулирования.....	527
10.3. Координированное управление операциями с объектом .....	529
10.3.1. Вопросы, которые необходимо учитывать при манипулировании объектом несколькими роботами .....	529
10.3.2. Управление движением объекта и внутренними силами .....	530
10.3.3. О проблеме распределения нагрузки .....	534
10.4. Координированное управление на основе импедансного контроля.....	534
10.4.1. Введение.....	534
10.4.2. Задача комплаентного управления при удержании одного объекта и виртуальный импеданс.....	535
10.4.3. Импедансное управление отдельными роботизированными манипуляторами при удержании одного объекта.....	536
10.4.4. Импедансное управление двумя роботизированными манипуляторами при выполнении сборочных операций.....	538
10.5. Резюме .....	545
Вопросы и упражнения .....	545

## **Глава 11. Управление роботами в системах «ведущий–ведомый».....**

11.1. Обзор концепции и истории развития роботов типа «ведущий–ведомый» .....	548
11.1.1. Что такое система «ведущий–ведомый» и система роботизированных операционных манипуляторов .....	548
11.1.2. Обзор истории развития систем типа «ведущий–ведомый».....	551
11.2. Основы двустороннего управления .....	552
11.2.1. Структура системы двустороннего управления.....	552
11.2.2. Моделирование системы с одной степенью свободы .....	554
11.2.3. Симметричное двустороннее управление.....	555
11.2.4. Двустороннее управление с отражением усилия .....	556
11.2.5. Двустороннее управление с возвратом усилия.....	557
11.2.6. Унифицированное представление двусторонних систем управления .....	559
11.3. Стабильность системы управления «ведущий–ведомый» .....	561
11.4. Двустороннее управление, ориентированное на обеспечение стабильности системы .....	562
11.4.1. Параллельный метод управления .....	562
11.4.2. Управление на основе гипотетической (виртуальной) внутренней модели .....	564
11.4.3. Динамическое управление в системе «ведущий–ведомый» .....	566

11.4.4. Импедансное управление в системе «ведущий–ведомый» .....	567
11.5. Управление «ведущий–ведомый» в системе гетерогенных роботов.....	568
11.5.1. Проблемы управления в робототехнической системе «ведущий–ведомый» и понятие гетерогенности .....	568
11.5.2. Двухнаправленное управление в общем координатном пространстве .....	569
11.5.3. Двухнаправленное управление в координатных системах отдельных манипуляторов .....	571
11.6. Резюме .....	572
Вопросы и задания.....	573

## **Глава 12. Основы теории, методов и технологий управления**

<b>мобильными роботами .....</b>	<b>575</b>
12.1. Введение в управление мобильными роботами .....	575
12.1.1. Перемещение, способы перемещения и классификация мобильных роботов .....	575
12.1.2. Обзор истории развития технологий мобильных роботов .....	576
12.1.3. Теоретические и практические проблемы управления мобильными роботами .....	587
12.2. Колесные мобильные роботы: управление движением по траектории.....	590
12.2.1. Управление движением по прямой при использовании органов управления, пропорциональных перемещению .....	590
12.2.2. Управление прямолинейным движением пропорционально перемещению и скорости.....	592
12.2.3. Управление прямолинейным движением мобильного робота с независимым приводом двух колес.....	594
12.2.4. Обобщение методов управления прямолинейным движением колесных мобильных роботов .....	595
12.2.5. Следование колесного мобильного робота по траектории и управление током электродвигателя .....	597
12.3. Неголономные системы колесных роботов и нелинейное управление .....	600
12.3.1. Нелинейное управление и интегрируемость .....	600
12.3.2. Что такое неполные связи и системы с неполными связями .....	603
12.3.3. Неголономное управление и управление недоприводными механическими системами.....	604
12.3.4. Геометрическая модель неинтегрируемых систем управления и недоприводных механизмов .....	609
12.3.5. Модель транспортного средства с неинтегрируемым ограничением скорости.....	612
12.4. Неполноприводное управление колесными мобильными роботами и проблема сингулярности .....	622
12.4.1. Введение.....	622
12.4.2. Управление мобильным роботом и проблема сингулярностей .....	623
12.4.3. Проблема отслеживания траектории мобильного робота .....	628

12.4.4. Управление отслеживанием целевой траектории транспортного средства.....	630
12.5. Подвижная устойчивость колесного мобильного робота и управление устойчивым движением.....	631
12.5.1. Проблема подвижной устойчивости колесного мобильного робота .....	631
12.5.2. Анализ динамических характеристик движения модели тележки с двойным маятником и изменяемой длиной звена.....	635
12.5.3. Восстановление устойчивости и управление стабильным движением колесного мобильного робота с манипулятором на основе модели тележки с перевернутым маятником .....	652
12.6. Стабилизированное управление ходьбой и глобальный самостабилизатор для шагающих мобильных роботов.....	680
12.6.1. Обзор теории и методов стабилизированного управления ходьбой шагающих мобильных роботов.....	680
12.6.2. Принципы работы и способы применения датчиков в шагающих роботах .....	684
12.6.3. Концепция ZMP и принцип стабильного шага на основе ZMP .....	702
12.6.4. Принципы и технологии управления ходьбой полностью автономных гуманоидных роботов Honda (модели P2, P3 и ASIMO) .....	707
12.6.5. Построение глобального самостабилизатора для шагающих роботов на основе обучения с подкреплением и тренировочной платформы с параллельным механизмом.....	714
12.6.6. Итоги раздела .....	742
12.7. Резюме.....	742
Вопросы и упражнения .....	743
<b>Литература.....</b>	<b>746</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>751</b>

# От автора

Как быстро летит время! В октябре 1989 г. я начал углубленно изучать теорию робототехники, а в марте 1990 г. купил в книжном магазине «Синьхуа» в Пекине свой первый классический учебник по робототехнике «Робототехника: управление, сенсорные технологии, зрение, интеллект», переведенный Ян Цзинъюем и опубликованный издательством Science and Technology Press of China. С той поры прошло более 33 лет. Но еще раньше я учился в магистратуре у своего наставника профессора Ван Юнцзе, занимаясь исследованием интеллектуальной технологии САПР для проектирования робота PUMA и разработкой программного обеспечения для моделирования механизмов робота. В 1992 г. я поступил в докторантуру к профессору Цай Хэгао, известному эксперту по робототехнике, и занимался разработкой антропоморфных манипуляторов с семью степенями свободы, а также проектированием и разработкой легких промышленных роботов. Я изучал и исследовал роботов на протяжении всего обучения. В 1999 г. по рекомендации профессора Цая я отправился в лабораторию профессора Тосио Фукуды в Университете Нагои в Японии в качестве постдокторанта, где занимался проектированием и разработкой антропоморфных и приматоподобных роботов. После возвращения в Китай в 2001 г. я начал преподавать в Харбинском политехническом институте.

Помимо вышеупомянутой книги по робототехнике, мне посчастливилось прочитать множество профессиональных книг по управлению роботами, включая японскую версию книги «Управление механическими системами» Кацухисы Фуруты, японскую версию книги «Управление роботами» профессора Таку Аримото из Университета Рицумейкан, японскую версию книги «Практика управления роботами», изданную Японским обществом измерений и автоматизации в 1997 г., и английскую версию книги «Управление роботами-манипуляторами на основе моделей», написанной в соавторстве с Чхэ Х. Аном, Кристофером Г. Аتكесином, Джоном М. Холлербахом и др. и изданной Массачусетским технологическим институтом в 1988 г.

Я был чрезвычайно впечатлен глубиной теоретических, технологических и математических основ управления, которыми обладали эти эксперты и ученые, а также их огромным научным вкладом. По мере роста сложности управляемых объектов, которые мне доводилось изучать в области робототехники и управления движением, я все глубже ощущал разрыв между *реальными* проблемами управления объектами и академической теорией управления. Изучая управление роботами, я постоянно размышлял о том, как помочь аспирантам воспринимать теорию и методы управления с точки зрения реальных объектов.

Со временем у меня возникла и окрепла идея разработать специальный курс «Управление роботами» для аспирантов. В 2005 и 2007 годах я составил конспект лекций для аспирантов кафедры машиностроения Харбинского политехнического института. На основе этого конспекта я вел курсы «Бионический робот и его интеллектуальное управление движением» (без использования моделей) и «Практическое применение управления роботами» (с использованием моделей). Я постоянно обновлял содержание курсов, опираясь на результаты собственных исследований.

Аспиранты, начинающие изучать теорию управления роботами, с первых шагов сталкиваются с динамическими уравнениями, векторами и матрицами. Сначала они просто испытывают дискомфорт, но постепенно осознают, что существует досадный пробел в преподавании между скалярными уравнениями из курса теоретической механики на начальных курсах вуза и динамическими уравнениями  $n$ -мерных обобщенных координат и обобщенных сил, выраженных векторами и матрицами, с которыми приходится иметь дело в магистратуре.

Более того, в структурных схемах систем управления, представленных в учебниках по управлению роботами и других книгах, выходной сигнал контроллера напрямую передается на управляемый объект, а такие важнейшие компоненты *реальной* системы, как усилители мощности, сервоприводы и блоки управления, остаются «за кадром». Без объяснений преподавателя студентам сложно выстроить ментальную модель робототехнической системы, даже если они изучали сервоприводы и технологию управления.

Если реальные проблемы механической системы и механики управляемого объекта робота не объяснены или объяснены недостаточно, студенты рискуют застрять на этапе структурной схемы системы управления. Какие проблемы управления указывают на сингулярность механизма робота? Какова диалектическая связь между силовым управлением и управлением положением в гибридном позиционно-силовом управлении роботом? Какие практические проблемы следует учитывать при разработке эксперимента по определению параметров робота? Как сделать силовое управление роботом безопасным и в максимально широком диапазоне? Как настроить параметры силового контроллера для управления реальной системой? Как можно наглядно объяснить распределение внутренних сил робота и координацию нескольких роботов с физической точки зрения? В чем заключаются фундаментальные математические основы ПИД-регулятора? И это лишь краткий перечень вопросов.

Некоторые вопросы требуют более углубленного изучения, а некоторые просто не рассматриваются в учебниках. Существующие учебники по управлению роботами на основе моделей больше сосредоточены на теории проектирования регуляторов и анализе характеристик систем с точки зрения современной теории и методов управления, но недостаточно освещают практические аспекты *реального* объекта управления или просто объясняют одну теорию через другую. В конечном итоге студенты и читатели могут так и не понять суть.

С точки зрения управления реальным роботом необходимо сначала понять и осмыслить управляемый объект с точки зрения категории, к которой он принадлежит, и лишь затем применить современные теории, методы и технологии управления для достижения желаемых результатов. Кроме того, необходимо соответствующим образом изложить репрезентативные знания и процессы различных теорий, методов и технологий управления роботами в процессе разработки. Например, в 1971 г. Оксфордский университет в Великобритании разработал метод управления ходьбой и структуру системы управления для первого в мире двуногого шагающего робота с гидравлическим приводом Witt. Хотя уровень технологий того времени был весьма далек от современного, можно сказать, что это было предвидением, которое по-прежнему имеет важное значение.

Эта книга создана на основе многолетнего опыта научно-исследовательской и педагогической деятельности и курсов «Управление в практической робототехнике» (разработан в 2007 г. для магистрантов и аспирантов Харбинского политехнического университета, в 2018 г. признан лучшим курсом для аспирантов и позднее переименован в «Теорию и практику робототехнического управления») и «Основы инновационного проектирования колесных мобильных роботов» (разработан в 2014 г. для Института дополнительного образования Харбинского политехнического университета). В ней объединены как педагогические наработки, постоянно дополнявшиеся новыми материалами, так и результаты научных исследований автора в области промышленных манипуляторов, антропоморфных механизмов, роботов с различными способами передвижения, бионических и антропоморфных роботов, а также роботизированных систем для перемещения в смешанных средах и каркасных конструкциях.

В данной монографии рассматриваются современные теории, методы и технологии управления роботами, где основное внимание уделяется системам, сочетающим мобильность и наличие манипуляторов. В качестве объектов управления выступают роботы-манипуляторы, колесные и шагающие платформы. Цель издания – помочь читателям на конкретных примерах механических систем (включая комбинированные платформы с манипуляторами и роботы с гибридной подвижностью) глубже понять и освоить современные подходы к управлению робототехническими системами.

Книга также служит учебным пособием для слушателей моего MOOC<sup>1</sup> «Практическое применение робототехнического управления», размещенного на платформе XuetangX в декабре 2019 г. Учебный материал дополнен вопросами и задачами, большинство из которых направлено на углубленное осмысление и практическое применение системных знаний по теории управления роботами.

Я отдаю себе отчет в ограниченности моих знаний и компетенций, поэтому буду признателен коллегам и читателям за ценные замечания и предложения.

---

<sup>1</sup> MOOC, Massive Open Online Course (массовый открытый онлайн-курс, MOOK).

Пусть эта скромная работа послужит данью уважения великим учителям:

- профессору Цай Хэгао, одному из основоположников робототехники в Китае, академику Китайской инженерной академии, преподавателю Харбинского политехнического университета, и профессору Фукуде Тосио, ныне члену Китайской академии наук, ранее – профессору Университета Нагои (Япония).
- В 2024 г. исполнилось 90 лет со дня рождения моего наставника, профессора Цая – выдающегося ученого, чьи достижения и ученики прославили его имя.

Материалы, представленные в книге, основаны на результатах научных исследований, выполненных при поддержке:

- гранта Национального фонда естественных наук Китая (№ 50275032, Исследование антропоморфных роботов с гибридной подвижностью);
- целевой программы 863 (№ 2006AA04Z201, Разработка и экспериментальная проверка технологий для эмоционально-интерактивных антропоморфных роботов);
- проекта Национальной ключевой программы R&D (№ 2018YFB1304502, Бионические механизмы и модули для приматообразных мобильных роботов);

а также при участии в следующих проектах серии 863:

- исследование модульных гибких манипуляторов с зубчатыми передачами (№ 863-512-0);
- разработка прототипов легких роботов (№ 863-512-0).

Выражаю искреннюю благодарность всем, кто способствовал этим исследованиям.

У Вэйго

21 сентября 2023 г.

Лаборатория бионической и антропоморфной робототехники  
Харбинский политехнический университет

# Глава 2

---

## Объект управления и состав робототехнической системы

Робот, рассматриваемый в данной книге, представляет собой прежде всего целостную физическую систему – автоматизированную или интеллектуальную машину, способную заменять человека при выполнении рабочих задач. Реализация этой особой машины основана на теоретических и технических достижениях, полученных в процессе развития робототехники и роботостроения. Робототехника и роботостроение – это комплексные научные дисциплины и технологии, объединяющие проектирование и производство механических узлов, приводы и управление, сенсорику, точные измерения, силовую электронику, вычислительную технику, искусственный интеллект, механику, математику, а также нейрофизиологию, психологию и науку о поведении, бионику и другие междисциплинарные области.

Чтобы читатели могли глубже понять физическую систему робота как объект управления, в данной главе подробно рассматривается физический состав и применение роботизированных систем, а затем на их основе обсуждаются задачи управления роботами, а также обобщенно излагаются теория, методы и технологии управления. Предполагается, что читатель обладает базовыми знаниями в области машиностроения на уровне бакалавриата, что является необходимым условием для понимания материала данной главы.

## 2.1. Общий состав робототехнической системы

### 2.1.1. Манипулятор для радиоактивных веществ как прототип робота

Как упоминалось в главе 1, появление промышленных роботов было вызвано острой потребностью в новых технологиях в связи с развитием ядерной промышленности США в 1940-х годах. Как известно, непосредственный контакт человека с радиоактивными веществами чрезвычайно опасен. Как разработать автоматизированное устройство, способное заменить человека и имитировать его действия при работе с радиоактивными веществами? Решение этой задачи фактически привело к возникновению робототехники.

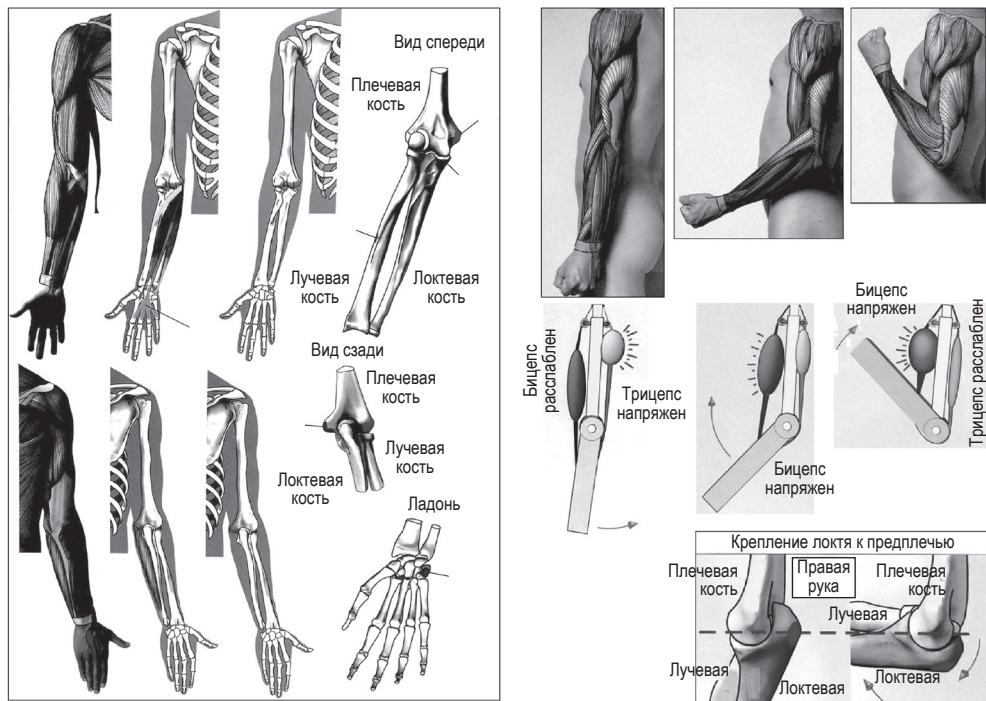
Для реализации этой идеи необходимо начать с анализа структуры движения человеческой руки и таких действий, как перемещение радиоактивных объектов. Даже сегодня, чтобы глубоко понять принципы устройства робота, а также спроектировать или исследовать промышленный манипулятор, имитирующий человеческую руку, по-прежнему необходимо изучать человеческую руку и ее рабочие движения. Система мышц и костей человеческой руки показана на рис. 2.1.

На этом рисунке изображены кости предплечья, локтевая кость, а также структура суставов локтя и запястья. В качестве примера показано, как двуглавая и трехглавая мышцы предплечья приводят в движение локтевой сустав, демонстрируя принцип работы мышц верхней конечности.

Общая структура движения человеческой руки представлена на рис. 2.2. Рука человека состоит из трех суставов: локтевого, локтевого и запястного, которые соединяют плечо со локтем, локоть с предплечьем и предплечье с кистью.

Локтевой сустав можно рассматривать как шарнир с тремя (тангаж/pitch – рыскание/yaw – крен/roll) или двумя (тангаж–рыскание) степенями свободы. В последнем случае одна из степеней свободы (крен) переносится на локтевой сустав, превращая его из одностепенного (тангаж) в двухстепенной (крен–тангаж). Запястный сустав можно рассматривать как трехстепенной (крен–тангаж–рыскание).

Применяя концепции теории механизмов, можно представить движение человеческой руки в виде механизированной модели. Локтевой, локтевой и запястный суставы рассматриваются как шарниры с двумя или тремя степенями свободы (локоть), одной или двумя степенями свободы (локоть) и тремя или двумя степенями свободы (запястье). При этом локтевая кость представляется как звено, соединяющее центр локтевого сустава с центром локтевого сустава, а предплечье (которое фактически состоит из локтевой и лучевой костей, соединенных параллельно суставом) – как звено, соединяющее центр локтевого сустава с центром запястного сустава.

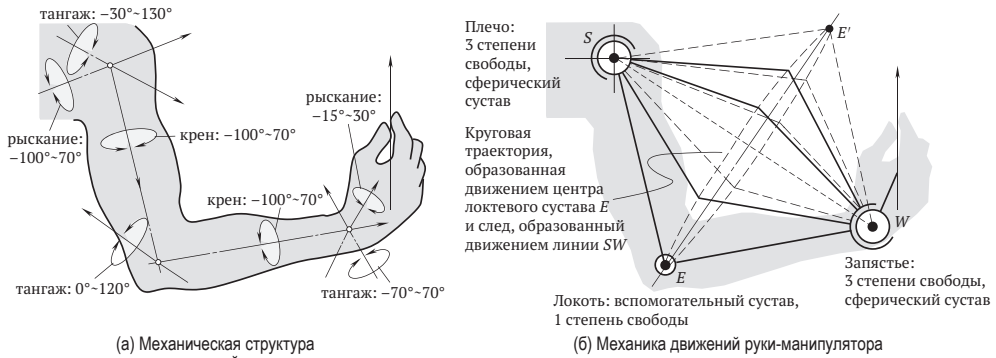


**Рис. 2.1** ❖ Мышцы, кости и суставы верхней конечности человека, а также схема движения предзвенья за счет локтевого сустава

В результате получается механизированная модель человеческой руки, показанная на рис. 2.2, с различными комбинациями степеней свободы, эквивалентными по движению:

- звеновой сустав – тангаж–рыскание–крен (3 степени свободы), локтевой сустав – тангаж (1 степень свободы), запястный сустав – крен–тангаж–рыскание (3 степени свободы);
- звеновой сустав – тангаж–рыскание (2 степени свободы), локтевой сустав – крен–тангаж (2 степени свободы), запястный сустав крен–тангаж–рыскание (3 степени свободы);
- звеновой сустав – тангаж–рыскание (2 степени свободы), локтевой сустав – крен–тангаж–рыскание (3 степени свободы), запястный сустав – тангаж–рыскание (2 степени свободы).

На рис. 2.2 показан типичный диапазон движений различных суставов человеческой руки. Функция руки заключается в том, что группы мышц различных участков приводят в движение звено, предзвенье и запястье, вращая их вокруг центров или осей суставов звена, локтя и запястья соответственно. Эти движения в совокупности приводят к перемещению кисти на конце руки, позволяя ей достичь заданного положения и ориентации или следовать по заданной траектории для выполнения требуемых действий и операций.



**Рис. 2.2** ❖ Избыточные степени свободы человеческой руки и их свойства в автономном движении

Промышленный манипулятор робота, имитирующий движение и операционные функции человеческой руки, а также ее двигательную структуру, по своей конструкции обязательно состоит из *сочленений* (суставы), *звеньев* (кости) и *приводов* (мышцы). Все движения приводов, сочленений и звеньев в конечном итоге сводятся к согласованной работе, обеспечивающей перемещение рабочего инструмента на конце манипулятора в соответствии с заданным положением, ориентацией или траекторией для выполнения операционных задач.

Верхнюю конечность человека с функциональной точки зрения обычно разделяют на кисть и остальную руку. Как правило, функция руки заключается в перемещении кисти в заданное положение и ориентацию, в то время как кисть выполняет конкретные операции. Соответственно, промышленный манипулятор робота эквивалентен человеческой руке: его задача – доставить рабочий инструмент, установленный на механическом интерфейсе запястья, в заданное рабочее положение и ориентацию, а сам рабочий инструмент аналогичен кисти человека и выполняет конкретную задачу.

В трехмерном пространстве реального физического мира для определения положения и ориентации любого объекта обычно используются три координаты положения ( $x, y, z$ ) и три угла ориентации ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) в трехмерной декартовой системе координат  $o$ –хуз, т. е. всего 6 переменных. Координаты можно представить в виде вектор-столбца  $6 \times 1 [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ .

Поэтому универсальный промышленный манипулятор робота, как правило, имеет не менее 6 степеней свободы, чтобы реализовать 6 компонентов положения и ориентации рабочего инструмента в трехмерном пространстве. Разумеется, универсальный 6-степенной манипулятор можно использовать и для задач, требующих меньшего числа степеней свободы: путем анализа задачи рабочего инструмента и кинематики механизма робота можно определить, какие степени свободы следует заблокировать.

Как показано на рис. 2.2а, механическая структура человеческой руки обладает 7 степенями свободы. Это означает, что человеческая рука или механизм может перемещать рабочий инструмент в одно и то же положение и ориентацию бесконечным числом способов (здесь также называемых *фор-*

мами руки), как показано на рис. 2.2b, что в последующих главах именуется *бесконечным множеством решений форм руки*. Таким образом, 7-степенной антропоморфный манипулятор при выполнении основной задачи (например, манипуляции рабочим инструментом) может изменять свою конфигурацию для улучшения кинематических и динамических характеристик, избегания препятствий или оптимального управления, что позволяет выполнять дополнительные задачи без ущерба для основной.

Как упоминалось ранее, промышленные манипуляторы роботов были разработаны по аналогии с функциональностью человеческой руки, приводящей в движение кисть на запястье, и структурой ее движений. Можно сказать, что в промышленных роботах (и роботах в целом) с момента появления заложены принципы биомиметики, антропоморфности и управления «ведущий–ведомый». При этом концепции как роботов вообще, так и промышленных роботов в частности менялись по мере развития робототехники и ее практического применения.

Обычно под промышленными роботами подразумеваются именно манипуляторы. Однако с развитием технологий колесных и гусеничных мобильных роботов и их внедрением в промышленность такие мобильные платформы, как колесные и гусеничные транспортные средства, также стали относить к категории промышленных роботов.

Итак, концепция робота (промышленного манипулятора), появившегося в 1940-х годах как средство автоматизации ручных операций, существенно расширилась к 1990-м годам, с распространением колесных и гусеничных мобильных роботов (таких как AGV) в производстве, включив в себя *мобильность* как ключевую функцию. К концу 1990-х, когда роботы с функциями манипуляции и перемещения были достаточно широко внедрены в промышленность, современные промышленные роботы (и роботы вообще) стали определять через сочетание этих двух ключевых возможностей. Отличительной чертой современных промышленных роботов, в отличие от классических, стала триада «мобильность, манипуляция, искусственный интеллект».

В первой главе данной книги представлены определения робота, данные ISO, Международной федерацией робототехники (IFR) и Японской ассоциацией робототехники. Однако ни одно из этих определений не отражает в полной мере эволюцию идеи робота с 1940-х годов до наших дней.

Именно в этом контексте мы будем рассматривать в данной книге теорию, методы и технологии управления роботами. Далее приводится описание системных компонентов промышленных манипуляторов, шагающих роботов, колесных и гусеничных мобильных роботов.

## 2.1.2. Общий состав робототехнической системы

В первой главе данной книги представлена классификация роботов по концепции, назначению, конструкции и функциям, включая классификацию манипуляторов (рис. 1.1) и роботов с комбинированными возможностями

перемещения и манипуляции (рис. 1.2). Хотя в некоторых книгах по робототехнике описывается состав робототехнических систем, обычно они ограничиваются традиционными промышленными роботами. Как правило, это базовые робототехнические системы, состоящие из трех основных компонентов: механической системы (механического корпуса), приводной системы и системы управления.

Источники механической энергии для привода роботов можно разделить на следующие основные группы: электрические (с электродвигателями в качестве первичных двигателей), гидравлические (с гидронасосными станциями и гидроцилиндрами), пневматические (с компрессорами и пневмоцилиндрами), ультразвуковые (с ультразвуковыми двигателями) и на основе сплавов с памятью формы (с приводными механизмами из таких сплавов). Электрические приводы, в свою очередь, делятся на три типа: серводвигатели постоянного тока, серводвигатели переменного тока и электростатические приводы.

### ***Состав робототехнической системы с электрическим приводом***

Обобщенная структура робототехнической системы с электрическим приводом показана на рис. 2.3 и включает пять основных компонентов: механическую систему, приводную систему, систему управления, сенсорную систему, а также систему питания и управления энергопотреблением.

На рис. 2.3 представлены как неинтегрированные, так и интегрированные автономные робототехнические системы. Различие между ними заключается в том, что в первом случае компоненты (система управления, приводы, сенсоры, источник питания) могут быть размещены отдельно от механической системы, тогда как во втором – все элементы системы установлены непосредственно на корпусе робота (или внутри него).

В свою очередь, сенсорная система делится на две подсистемы: для мониторинга внутреннего состояния робота и для мониторинга внешней среды и окружения.

Схема на рис. 2.3 отражает аппаратную структуру робототехнической системы и взаимосвязи между компонентами, а также демонстрирует возможные варианты приводов и методов управления (но не означает их обязательное использование в конкретных системах, что подчеркивается словом «или»).

Конкретная робототехническая система может использовать один или несколько типов приводов из перечисленных ранее. Систему управления тоже можно реализовать различными способами.

Для неинтегрированных и не полностью автономных систем (например, промышленных манипуляторов) первичным источником питания обычно служит промышленная сеть переменного тока. В интегрированных автономных системах (таких как колесные, гусеничные или шагающие мобильные роботы) применяются батареи или аккумуляторные блоки, установленные на корпусе робота.

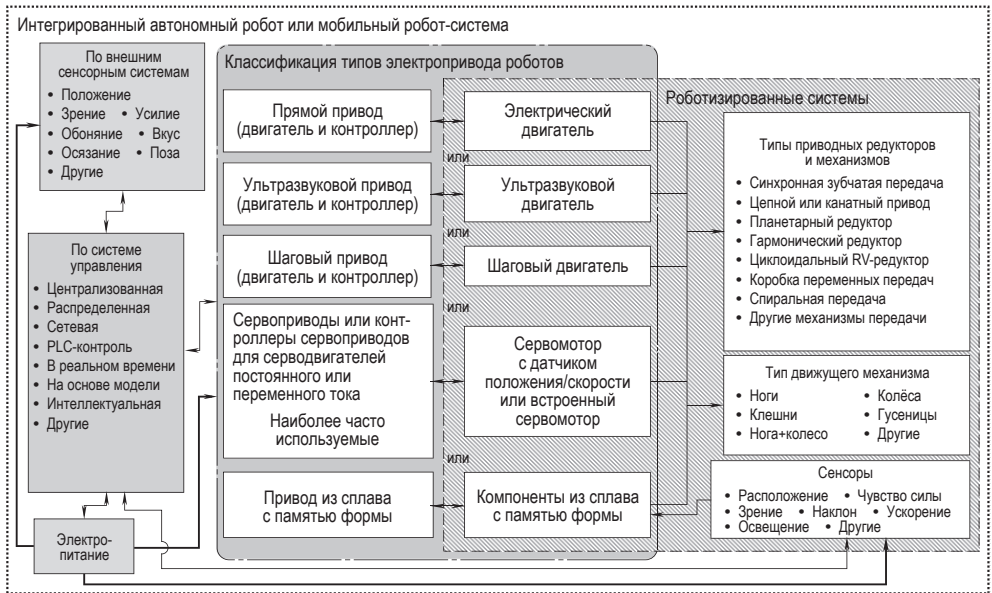


Рис. 2.3 ❖ Обобщенная структура робототехнической системы с электрическим приводом (включая классификацию компонентов)

Система управления робота, как правило, представляет собой компьютер, оснащенный специальными интерфейсами и модулями связи и обработки сигналов. Приводная система содержит драйверы или комбинацию драйверов и контроллеров, которые преобразуют управляющие сигналы от главного контроллера (компьютера, выполняющего сложные вычисления, планирование задач и принятие решений) в сигналы для сервоуправления, подаваемые на электродвигатели через усилители мощности.

Контроллеры в составе пары «драйвер–контроллер» являются низкоуровневыми и обеспечивают сервоуправление двигателями (например, по положению, скорости или моменту) с использованием PID-регуляторов или их комбинаций (например, пропорциональный регулятор положения, пропорционально-интегральный регулятор скорости, пропорционально-дифференциальный регулятор момента).

Принципы работы, характеристики, технические параметры и критерии выбора компонентов приводной системы, системы управления, механической системы и системы питания подробно рассматриваются в последующих главах.

## Состав робототехнической системы с гидравлическим приводом

Основными компонентами гидравлической системы являются гидравлический источник (гидронасосная станция, гидростанция), гидравлическое исполнительное устройство (гидроцилиндр), сервоклапан, датчик перемещения и контроллер.

Принцип работы гидравлической сервосистемы: гидравлический насос подает *рабочую жидкость*<sup>1</sup> под давлением через сервоклапан, регулирующий усилие и расход жидкости, в гидроцилиндр, приводя рабочий шток в движение. Датчик измеряет фактическое положение штока, сравнивает его с заданным значением, а разностный сигнал после усиления подается на сервоклапан для коррекции движения штока. Процесс продолжается до устранения рассогласования.

Структура электрогидравлической сервосистемы показана на рис. 2.4. Рассмотрим ее ключевые компоненты.



Рис. 2.4 ❖ Структура электрогидравлической сервосистемы

*Сервоклапан* (управляющий клапан) преобразует электрические сигналы в гидравлическое усилие. Он должен обладать высокой скоростью отклика, особенно в системах с большими нагрузками. Для задач с низкими требованиями к точности допустимо использование бюджетных пропорциональных электромагнитных клапанов. Типы сервоклапанов: струйные, сопло-заслоночные, золотниковые.

*Гидравлический сервомотор* представляет собой комбинацию сервоклапана и привода.

*Контроллер* предназначен для управления положением сервоклапана; в современных системах реализуется на базе вычислительных устройств.

## Характеристики гидравлического привода

Достоинства:

- *высокое отношение усилия к инерции* – гидроприводы обеспечивают значительную мощность на единицу массы, что оптимально для тяжелых нагрузок, требующих быстрого реагирования и компактных размеров;
- *прямая передача мощности* – не требует дополнительных преобразований энергии;
- *прямое линейное движение* – гидроцилиндры исключают необходимость в сложных передаточных механизмах (в отличие от электродвигателей), упрощая конструкцию. Подходит для манипуляторов и шагающих роботов с высокой нагрузкой;

<sup>1</sup> Обычно это специальное гидравлическое масло. Далее мы будем говорить просто «жидкость». – *Прим. ред.*

- *жесткость и надежность* – превосходит электроприводы по способности удерживать нагрузку, крутящему моменту и массе. Не требует редукторов для преобразования вращательного движения в линейное.

Недостатки:

- потребность в гидростанции, риск утечек жидкости;
- для мобильных систем требуется генератор;
- нелинейность характеристик сервоклапанов и сжимаемость рабочей жидкости снижают точность;
- сложность обслуживания по сравнению с электрическими системами.

По сравнению с гидроприводами электроприводы проще в управлении, обеспечивают легкую реализацию обратной связи по положению/скорости, но уступают в удельной мощности, нуждаются в редукторах для увеличения момента, нуждаются в тормозах или самоблокирующихся редукторах для удержания позиции при отключении питания (кроме двигателей с постоянными магнитами).

## ***Применение гидравлического привода в промышленных и бионических роботах***

Гидравлические приводные системы, требующие громоздких и тяжелых компонентов (таких как масляные баки, гидростанции, гидравлические контуры и системы клапанного управления), а также мобильных тележек с насосными станциями для подачи жидкости под давлением к гидроприводам робота, традиционно использовались в промышленных роботах, работающих на стационарных объектах. Однако в настоящее время их постепенно заменяют электроприводными промышленными роботами. Тем не менее в автоматизированных отраслях, связанных с тяжелыми нагрузками свыше 0,5 тонны, гидравлические промышленные роботы по-прежнему незаменимы.

Ключевыми технологиями для гидравлических приводных систем мобильных роботов являются миниатюризация, способность выдерживать высокое давление и 3D-печать внутренних трубопроводов высокого давления. Например, бионические роботы, такие как BigDog и Atlas от Boston Dynamics, демонстрируют абсолютные преимущества гидропривода (высокая плотность мощности и крутящего момента) благодаря использованию микронасосов, миниатюрных клапанов, 3D-печати внутренних гидравлических каналов в конечностях и надежных уплотнений в подвижных сочленениях.

## ***Состав и принцип работы гидравлической приводной системы промышленных роботов***

Гидравлическая система промышленных роботов, приводящих в движение свои сочленения через гидроцилиндры (поршневые штоки которых вращают или перемещают суставы под действием давления масла в левой и правой полостях цилиндра), в целом аналогична обычным гидравлическим системам

машин. Она состоит из приводов, исполнительных механизмов, управляющих компонентов и гидравлических контуров.

Гидравлический насос, преобразующий механическую энергию от электродвигателя в давление гидравлической жидкости (масла), служит источником энергии системы. Основные типы насосов: шестеренные, лопастные, плунжерные, винтовые.

В промышленных роботах чаще применяются шестеренные и лопастные насосы. Их выбирают, исходя из требований к рабочему давлению и расходу системы. Рабочее давление насоса рассчитывается как произведение максимального рабочего давления системы (с учетом потерь в трубопроводах с коэффициентом 1,05–1,15) на коэффициент запаса. Усилие гидроцилиндра определяется давлением жидкости и эффективной площадью поршня.

Управляющими компонентами в гидросистеме являются гидравлические клапаны, регулирующие направление потока, давление и расход жидкости. Обычно это клапаны давления, поддерживающие равновесие между гидравлическим усилием на золотнике и силой пружины. К ним относят перепускные клапаны (байпасы), редуционные и последовательные клапаны, реле давления и т. д.

## ***Способы управления гидравлической системой в робототехнике***

Регулирование расхода осуществляется посредством изменения проходного сечения клапана или длины гидравлического канала, что позволяет управлять скоростью перемещения исполнительных механизмов. Для этих целей применяют дроселирующие устройства стандартного типа, всевозможные регуляторы скорости, а также комбинированные конструкции, включая делители-сумматоры потоков.

Изменение направления потока достигается с помощью гидравлических клапанов, изменяющих траекторию движения рабочей жидкости и последовательность работы исполнительных механизмов. Наиболее часто применяются обратные и распределительные клапаны. Обратные клапаны пропускают жидкость исключительно в прямом направлении, и перекрывают поток в обратном. Золотниковые распределители изменяют направление потока за счет осевого перемещения регулирующего элемента. Конструктивно такие клапаны содержат систему каналов в корпусе, которые попеременно соединяются или перекрываются при перемещении золотника, что и обеспечивает перенаправление потока. В технической документации эти устройства классифицируют по числу рабочих позиций и гидролиний (потоков), записывая характеристики в краткой форме, например «2/2», «3/4» или «3/5».

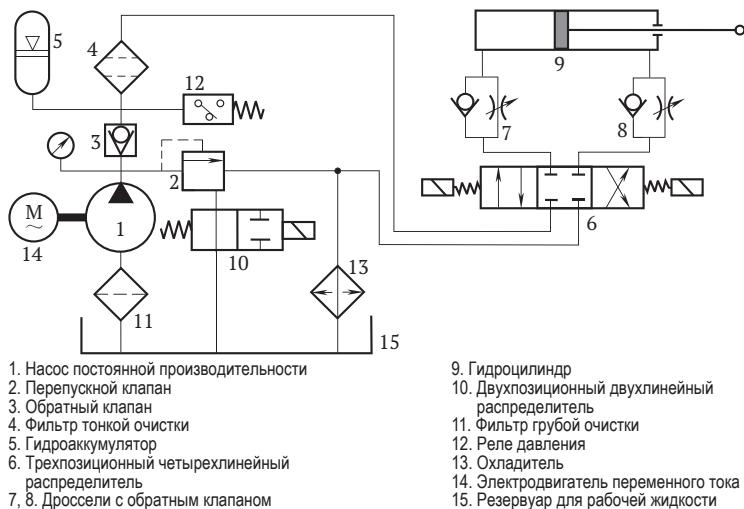
К вспомогательным компонентам гидросистем относятся резервуар для рабочей жидкости, фильтрующие элементы, гидроаккумуляторы, воздушные фильтры и трубопроводная арматура. Резервуар выполняет функции хранения и подачи жидкости, отделения воздуха, осаждения загрязнений и теплоотвода. Фильтрующие элементы обеспечивают очистку рабочей жид-

кости, а воздушные фильтры – чистоту поступающего в систему воздуха. Гидроаккумуляторы служат для накопления и отдачи давления при нормальной работе, стабилизации системы, аварийной подачи давления в систему и поглощения гидроударов. Они подразделяются на гравитационные, пружинные и газовые, причем последние могут быть баллонного, поршневого и мембранного типов.

## Управляющие контуры гидравлических систем

Гидравлическая система робота проектируется с учетом количества степеней свободы и требований к движению. Аналогично многоканальным сервоприводам электромеханических систем, она состоит из набора однотипных приводных модулей для каждого сочленения. Базовыми элементами таких модулей являются контуры регулирования скорости, давления и направления.

*Контур регулирования скорости* представляет собой ключевой узел, определяющий динамические характеристики робота. Типичная схема включает насос постоянной производительности, дросселирующий клапан, перепускной клапан и исполнительный механизм. Изменение проходного сечения дросселя позволяет управлять расходом жидкости и, соответственно, скоростью перемещения гидроцилиндра. На рис. 2.5 представлена принципиальная схема гидросистемы с односторонним дроссельным регулированием.



**Рис. 2.5** ❖ Гидравлическая система с источником давления и односторонним дроссельным регулированием скорости

### Принцип регулирования скорости

При подаче питания электродвигатель переменного тока 14 начинает вращаться, приводя в действие насос постоянной производительности 1, который нагнетает рабочую жидкость в гидравлический контур.

После того как перепускной клапан 2, расположенный на выходе насоса, стабилизирует давление подачи, часть жидкости проходит через обратный клапан 3 и фильтр тонкой очистки 4, а затем поступает к трехпозиционному четырехлинейному распределителю 6.

Когда катушка левого соленоида распределителя 6 находится под напряжением, золотник смещается вправо, и давление жидкости направляется через левый канал распределителя ( $\uparrow\downarrow\uparrow$ ) и дроссель с обратным клапаном 7 в левую полость гидроцилиндра 9, выталкивая шток вправо.

При этом жидкость из правой полости гидроцилиндра 9 проходит через дроссель 8 (регулирующий скорость обратного потока) и возвращается в бак 15 через правый канал левой стороны распределителя ( $\uparrow\downarrow\downarrow$ ).

Регулируя проходное сечение дроссельных клапанов 7 и 8, можно изменять расход жидкости, поступающей в гидроцилиндр, тем самым управляя скоростью движения роботизированного манипулятора.

### ***Принцип поддержания заданного давления в гидравлической системе***

Помимо создания механического движения (выдвижения/втягивания) за счет давления рабочей жидкости, гидроцилиндр 9 должен обеспечивать достаточное усилие, чтобы уравновешивать внешние нагрузки, возникающие при работе робота.

Регулирование давления осуществляется перепускным клапаном 2. Нужная часть жидкости, нагнетаемой насосом 1, проходит через обратный клапан 3, а избыток – через переливной клапан 2. Когда давление превышает заданное значение, избыточная рабочая жидкость сбрасывается через клапан 2 и двухпозиционный двухлинейный клапан 10 обратно в бак 15.

Фильтр грубой очистки 11 очищает жидкость от загрязнений перед подачей в насос. Реле давления 12 отправляет сигнал системе управления при превышении давления, после чего та активирует клапан 10, разгружая насос. Обратный клапан 3 предотвращает обратный переток и поддерживает давление в системе. Гидроаккумулятор 5 компенсирует утечки, стабилизируя давление в контуре.

### ***Синхронная схема управления с параллельным регулированием скорости***

Роботы с гидравлическим приводом часто содержат несколько гидравлических цилиндров. Поскольку каждый гидравлический цилиндр испытывает разные нагрузки и сопротивления трения, а также за счет утечек и погрешностей в геометрии цилиндров они будут работать несинхронно. Чтобы решить эту проблему и добиться синхронного движения, применяется *синхронная схема управления*. Структура и принцип работы синхронной схемы показаны на рис. 2.6.

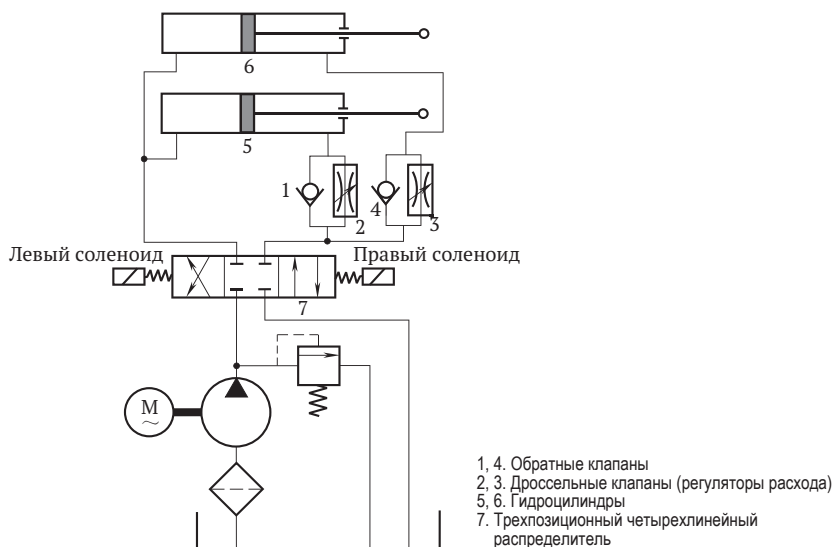


Рис. 2.6 ❖ Схема параллельного управления скоростью с синхронным управлением

### **Принцип синхронного управления с параллельным регулированием скорости**

Гидроцилиндры 5 и 6 соединены параллельно в контуре гидравлической системы, а клапаны регулирования скорости 2 и 3 соответственно управляют скоростью движения двух штоков. Поток через клапаны управления скоростью 2 и 3 должен быть одинаковым, чтобы обеспечить синхронное движение.

Когда на правый соленоид трехпозиционного четырехлинейного распределителя 7 подается напряжение, рабочая жидкость через левый канал правой секции распределителя (обозначенный как  $\uparrow$ ) одновременно поступает в левые полости гидроцилиндров 5 и 6, заставляя их штоки синхронно выдвигаться.

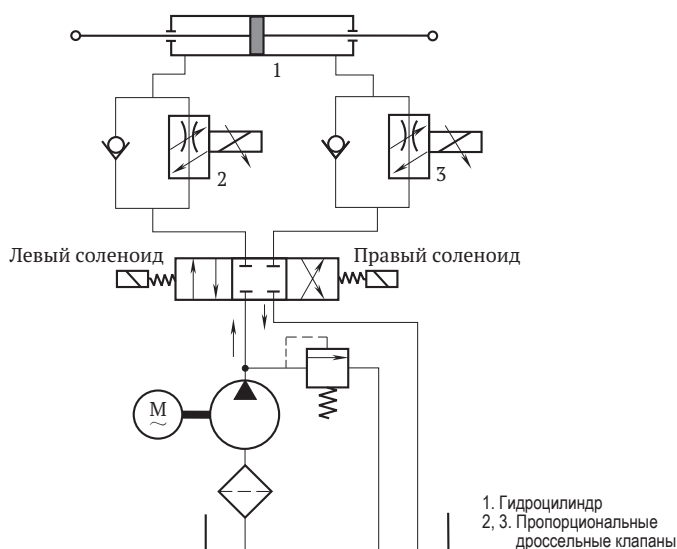
При подаче напряжения на левый соленоид распределителя 7 открываются оба канала левой секции (обозначенные как  $\wedge$  и  $\sphericalangle$ ), и рабочая жидкость через обратные клапаны 1 и 4 поступает в правые полости гидроцилиндров 5 и 6, обеспечивая синхронное втягивание штоков.

Особенностью данной схемы параллельного регулирования скорости является простота реализации синхронного управления. Однако точность синхронизации может снижаться под влиянием таких факторов, как изменение температуры рабочей жидкости, погрешности дроссельных клапанов и утечки в гидравлической системе. Для повышения точности синхронизации рекомендуется устанавливать дроссельные клапаны как можно ближе к соответствующим гидроцилиндрам. Это позволяет уменьшить влияние внешних факторов и улучшить синхронность работы гидропривода.

Контур управления скоростью с односторонним пропорциональным дроссельным клапаном

При движении робота каждое вращательное сочленение неизбежно требует выполнения операций ускорения и замедления. Даже при равномерном движении конечного исполнительного устройства отдельные сочленения не вращаются с постоянной скоростью, а постоянно совершают возвратно-поступательные движения с переменным ускорением.

Для реализации такого управления скоростью в соответствии с заданными условиями движения применяется *пропорциональный дроссельный клапан*. Схема контура управления скоростью с односторонним пропорциональным дроссельным клапаном представлена на рис. 2.7.



**Рис. 2.7** ❖ Схема управления скоростью с помощью пропорциональных односторонних дроссельных клапанов

### **Принцип управления скоростью с помощью пропорционального дроссельного клапана**

Как показано на рис. 2.7, клапаны управления скоростью 2 и 3 открываются пропорционально уровню сигнала с электронного блока управления и управляют скоростью движения поршня двухштокового гидроцилиндра 1 влево и вправо соответственно.

### **Контур управления давлением в гидравлических системах робототехники**

Контур управления давлением бывает преимущественно следующих типов: *регулирующие, разгрузочные, последовательные*, а также *балансирующие*.

ные и фиксирующие. Каждый из этих контуров выполняет важные функции в системе управления промышленными роботами. Регулирующие контуры поддерживают необходимое давление, разгрузочные снижают нагрузку на систему, последовательные обеспечивают правильный порядок операций, а балансирующие и фиксирующие отвечают за стабилизацию положения и фиксацию исполнительных механизмов.

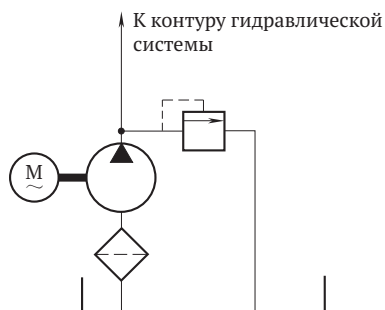
### **Регулирующие контуры**

Во время работы робота давление, подаваемое гидравлической системой в гидроцилиндр, находится в механическом равновесии с нагрузкой, приходящейся на этот цилиндр. Однако силы и моменты, действующие на концевой эффектор робота со стороны обрабатываемого объекта, является переменными (даже если сама нагрузка постоянна), и после преобразования через кинематическую схему робота нагрузка на гидроцилиндры, приводящие в движение отдельные сочленения, также становится переменной. Следовательно, давление в гидравлическом контуре, подаваемое на гидроцилиндры, должно изменяться в соответствии с нагрузкой.

Очевидно, что в гидравлической системе необходим контур управления давлением, способный адаптироваться к изменению нагрузки. В системах с насосами постоянной производительности для ограничения максимального рабочего давления обычно используется перепускной клапан, установленный рядом с выходом насоса. Этот клапан регулирует давление в системе, направляя избыточную рабочую жидкость обратно в бак. Кроме того, перепускной клапан выполняет функцию предохранительного клапана, обеспечивая защиту системы от перегрузок.

### **Регулирующий контур с одним перепускным клапаном**

Как показано на рис. 2.8, перепускной клапан установлен между выходным патрубком гидравлического насоса и накопительным баком. Перепускной клапан перенаправляет поток с выхода насоса и управляет величиной расхода за счет переменного открывания, реализуя простейшую функцию регулировки давления.



**Рис. 2.8** ❖ Регулирующий контур с одним перепускным клапаном

## Многоступенчатый регулирующий контур с использованием нескольких перепускных клапанов

Для снижения и стабилизации локального давления в гидравлической системе робота может применяться схема с несколькими перепускными клапанами, обеспечивающими ступенчатое регулирование с несколькими уровнями давления. В этой схеме между регулируемым узлом и гидробаком устанавливают несколько перепускных клапанов, а давление в основной магистрали, питающей исполнительные гидроэлементы, регулируется путем изменения расхода в параллельных ветвях.

На рис. 2.9 представлен двухступенчатый регулирующий контур с двумя перепускными клапанами. Вблизи выходного патрубка насоса 1 установлены два перепускных клапана 2 и 3, управляемых двухпозиционным двухлинейным клапаном 4. Возможны два варианта монтажа распределителя. В первом варианте он устанавливается между клапаном 3 и гидробаком – в этом случае открытие/закрытие выходного отверстия клапана 3 осуществляется клапаном 4, а максимальное рабочее давление насоса 1 определяется настройкой клапана 2. При переключении золотника клапана 4 в открытое положение выход клапана 3 соединяется с баком, и максимальное давление системы начинает определяться настройкой клапана 3.

Важно отметить, что рабочее давление клапана 3 должно быть ниже, чем у клапана 2 – в противном случае клапан 3 не сможет выполнять свою регулируемую функцию.

Второй вариант монтажа предполагает установку клапана 4 между перепускными клапанами 2 и 3. Принцип работы в этом случае остается аналогичным, изменяется только место установки, как показано пунктирной линией на рис. 2.9.

Преимуществом данной схемы является возможность оперативного переключения между двумя уровнями давления в зависимости от рабочих режимов робота, что особенно важно при переменных нагрузках на исполнительные органы. При этом всегда сохраняется функция защиты системы от превышения давления благодаря наличию основного перепускного клапана.

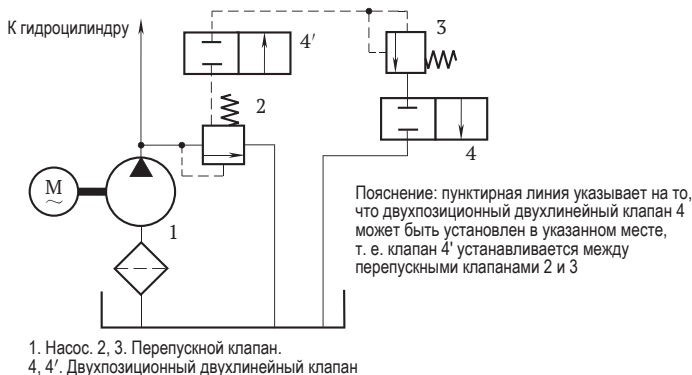


Рис. 2.9 ❖ Регулирующий контур с двумя перепускными клапанами

### Разгрузочный контур

Когда промышленный робот замирает в определенной конфигурации, гидроцилиндр останавливается и остается в заданном положении, в то время как двигатель, приводящий в действие насос, продолжает работать. Чтобы снизить потери мощности насоса и нагрев системы, а также обеспечить работу насоса при низкой нагрузке, нужен разгрузочный контур, показанный на рис. 2.10.

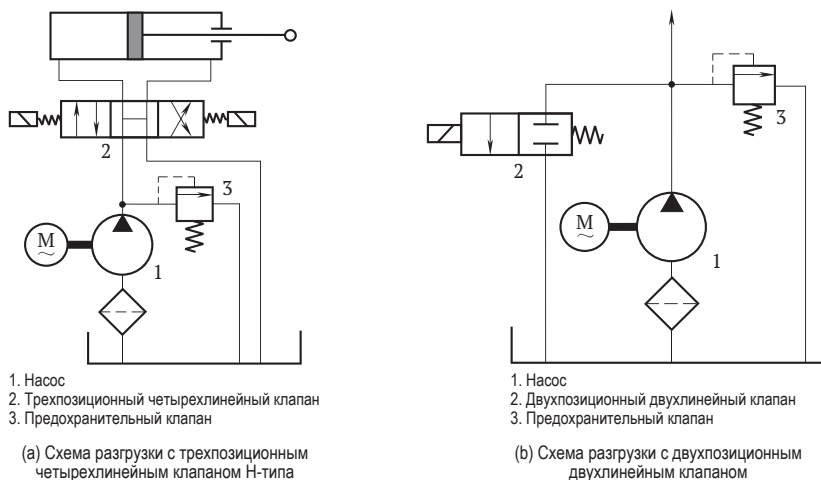


Рис. 2.10 ❖ Схема разгрузки гидравлической системы

### Принцип работы разгрузочного контура

В разгрузочном контуре, показанном на рис. 2.10а, для разгрузки насоса используется трехпозиционный четырехлинейный клапан типа Н. Когда клапан находится в среднем положении, насос напрямую подключен к гидробаку через электромагнитный разгрузочный клапан. На рис. 2.10б показана схема разгрузочного контура с двухпозиционным двухлинейным клапаном 2, параллельно подключенным к выходу насоса 1. При подаче питания на соленоид клапана 2 (как показано на рисунке) перекрывается канал от выхода насоса к гидробаку, и гидравлическая система находится в нормальном рабочем состоянии; при прекращении работы исполнительных элементов, таких как гидроцилиндр, питание соленоида клапана 2 отключается, и открывается прямой канал между насосом и гидробаком. Такая схема разгрузки обладает хорошим разгрузочным эффектом и обычно используется для насосов с производительностью менее 63 л/мин.

### Последовательное управление

Принцип последовательного управления применяется не только в роботах с электроприводом, но и в роботах с гидравлическим приводом.

Мы можем разработать гидравлическую систему, выполняющую заданную последовательность операций с гидроцилиндром. На рис. 2.11 показан пример контура последовательного управления с двумя клапанами.

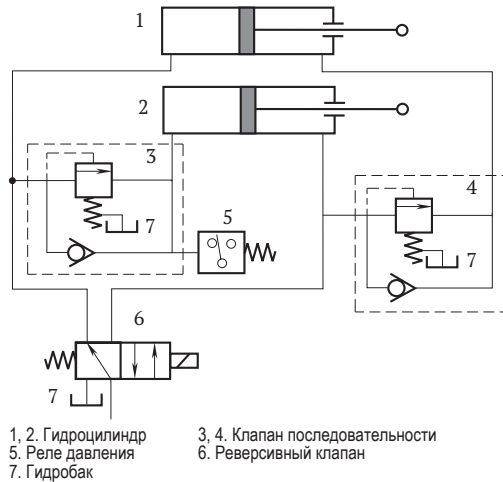


Рис. 2.11 ❖ Последовательный контур управления гидравлической системой

### Принцип работы последовательного контура

Когда рабочая жидкость под давлением поступает в гидроцилиндр 1 через реверсивный клапан 6, шток гидроцилиндра 1 выдвигается. После завершения действия давление в системе продолжает расти, и клапан 3 открывается под действием жидкости. Рабочая жидкость под давлением поступает через канал клапана 3 в гидроцилиндр 2, выдвигая его шток. После завершения действия гидроцилиндра 2 давление жидкости в системе продолжает расти. При достижении заданного давления срабатывает реле давления 5, которое подает электрический импульс, и робот переходит к следующему циклу управления последовательностью действий. Схема и принцип последовательного управления произвольным количеством гидроцилиндров аналогичны принципу работы контура с двумя гидроцилиндрами.

### Контур балансировки и фиксации

Чем обусловлена потребность в контуре балансировки? Манипуляторы промышленных роботов обычно имеют консольную конструкцию, где большое и малое звенья выступают относительно неподвижного основания. Чем больше вылет, тем значительнее изменения скорости, что требует от приводных элементов (гидроцилиндров, электродвигателей) большей доли выходного усилия или момента для компенсации сил тяжести, гравитационных моментов, инерционных сил и моментов, вызванных массой самого робота.

Поскольку максимальное усилие, развиваемое электродвигателями и гидроцилиндрами, ограничено, чем большая часть мощности расходуется на преодоление гравитационных и инерционных моментов, тем меньшая внешняя нагрузка может быть приложена к концевой точке. Следовательно, при проектировании приводной системы необходимо минимизировать

энергозатраты на компенсацию дисбаланса сил тяжести и инерционных воздействий, что позволит увеличить допустимую внешнюю нагрузку.

Для консольных конструкций с большим вылетом особое внимание при проектировании привода, конструкции и распределении масс / внутренних усилий должно уделяться вопросам статической и динамической балансировки механических компонентов. Возникает необходимость в оптимизации конструкции с точки зрения статического равновесия при различных положениях манипулятора и динамической балансировки при движении, что особенно критично для высокоскоростных операций.

Применение гидравлических балансировочных контуров позволяет поддерживать необходимое усилие в гидроцилиндрах независимо от положения звеньев манипулятора, а фиксирующие контуры обеспечивают фиксацию положения при остановках, предотвращая нежелательное перемещение под действием гравитации или инерции.

Чем обусловлена потребность в контуре фиксации?

В роботах с электроприводом при отключении питания, если сила трения или момент сопротивления в системе «двигатель + механическая передача» превышают силу тяжести, гравитационный момент, инерционные силы или моменты соответствующих частей робота, то сочленения не будут проворачиваться. Однако при наличии внешних возмущающих сил или моментов, которые могут превысить трение или сопротивление механической передачи, возможно обратное вращение, что способно привести к «обрушению» конструкции робота.

Существует также ситуация, когда сочленение робота внешне не проявляет признаков обратного вращения, но на самом деле может очень медленно проворачиваться. Поэтому в промышленных манипуляторах на выходных валах двигателей обычно устанавливают тормозные устройства (например, электромагнитные тормоза) для предотвращения нежелательного вращения при внезапном отключении питания, а также для удержания положения.

Если в конструкции механической передачи сочленений используются самотормозящиеся механизмы, такие как червячные передачи (редукторы), то тормоза могут не потребоваться, однако точность таких передач обычно ниже.

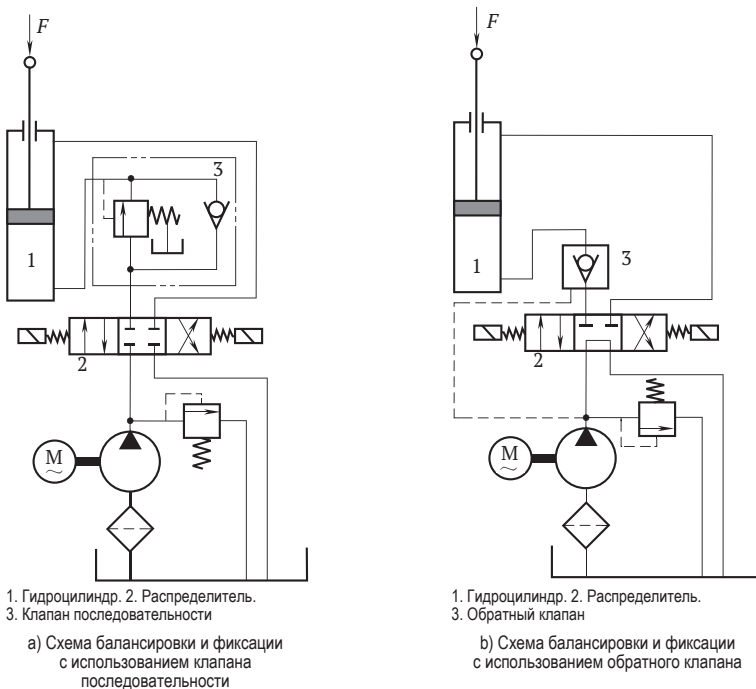
Для промышленных манипуляторов с гидравлическим приводом справедливы аналогичные соображения: при потере давления во избежание опускания стрелы под собственным весом, для предотвращения смещения под внешними воздействиями и для точной остановки в заданном положении после выполнения движения необходимо наличие блокировочных механизмов. Эти механизмы обеспечивают надежную фиксацию положения всех звеньев манипулятора как при нормальной работе, так и в аварийных ситуациях, что критически важно для тяжелых и крупногабаритных промышленных роботов.

Фиксирующие контуры в гидравлических системах обычно реализуются с помощью гидрозамков или механических стопорных устройств, которые активируются при падении давления ниже определенного уровня или по

сигналу системы управления. Это обеспечивает безопасность персонала и защиту оборудования при аварийных ситуациях.

### **Контур балансировки и фиксации с использованием клапана последовательности**

Как показано на рис. 2.12а, это контур, в котором клапан последовательности используется в качестве балансировочного клапана для обеспечения фиксации в любом положении. Когда шток гидроцилиндра 1 останавливается под действием силы  $F$  (тяжелого предмета или внешней силы) в определенном положении, соленоид реверсивного клапана 2 обесточивается. Поскольку давление управления клапана последовательности 3 превышает внешнюю силу  $F$ , нижняя камера гидроцилиндра 1 герметизируется, предотвращая соскальзывание штока под действием внешней нагрузки  $F$  и фиксируя его.



**Рис. 2.12** ❖ Контур управления балансировкой и фиксацией гидравлической системы

### **Контур балансировки и фиксации с применением обратного клапана**

Как показано на рис. 2.12б, данный контур с применением обратного клапана обеспечивает балансировку и фиксацию в произвольном положении. Когда шток гидроцилиндра 1, несущий груз или внешнюю нагрузку  $F$ , останавливается в поднятом положении, противодавление гидравлической жидкости

в нижней полости гидроцилиндра 1, создаваемое под действием собственного веса подвижных элементов или внешней нагрузки  $F$ , уравнивает эту силу тяжести или внешнюю нагрузку  $F$ .

В рабочем режиме давление жидкости в верхней полости гидроцилиндра используется для открытия гидравлически управляемого обратного клапана 2, что позволяет жидкости из нижней полости возвращаться в гидробак.

Особенностью данной схемы является использование гидравлически управляемого обратного клапана, который выполняет две важные функции:

- 1) в закрытом состоянии надежно удерживает нагрузку за счет блокировки жидкости в нижней полости цилиндра;
- 2) при подаче управляющего давления обеспечивает плавный слив жидкости при опускании груза.

Такой подход обеспечивает безопасную работу с нагрузками, исключая их самопроизвольное опускание при остановке, что особенно важно для робототехнических систем, работающих с тяжелыми грузами или требующих точного позиционирования.

### ***Контур управления направлением движения***

Телескопическое движение штока поршня гидроцилиндра, приводящее в движение каждое сочленение робота, нуждается в контуре *управления направлением движения*. Для этого, как правило, применяются различные электромагнитные и электрогидравлические *реверсивные клапаны*. В зависимости от источника питания электромагнитные клапаны делятся на две категории – постоянного и переменного тока. Электронная система управления посылает электрический сигнал в соответствии с нужным направлением потока рабочей жидкости и управляет электромагнитом (соленоидом), который приводит в движение золотник клапана, тем самым изменяя направление притока и оттока жидкости под давлением.

### ***Состав пневматической роботизированной системы***

*Пневматический привод* (или пневмопривод) – это еще один тип привода, основанный на использовании текучей среды. Этот метод передачи использует давление газа в замкнутой камере для приведения в действие исполнительного механизма, называемого пневматическим. В качестве рабочего тела обычно используется воздух. Сжимаемость воздуха определяет преимущества пневматики, но также порождает и недостатки.

Достоинства пневматики: простота и легкость накопления энергии, возможность быстрого достижения высокой скорости; возможность тонкого и гибкого управления усилием; отсутствие потребления энергии и выделения тепла при фиксации; плавность и безопасность; компактность, легкость, высокое отношение выходной мощности к массе; простота обслуживания и низкая стоимость.

Недостатки пневматики: сжимаемость воздуха обеспечивает плавность и безопасность работы, но также снижает жесткость и точность позицио-

нирования приводной системы. Добиться высокоточного и быстродействующего управления положением и скоростью непросто, а эффективность управления сильно зависит от трения и нагрузки. Поэтому при разработке пневматического привода следует стремиться в полной мере использовать его преимущества и минимизировать влияние недостатков.

### **Классификация пневматических приводов**

По принципу действия пневмоприводы делятся на две основные категории:

- 1) приводы поршневого типа (пневмоцилиндры). Сжатый воздух в полости цилиндра воздействует на поршень, перемещая шток. Корпус привода крепится к одному элементу конструкции, а шток – к другому, обеспечивая относительное движение двух узлов;
- 2) приводы с гибкой рабочей камерой. Движение (растяжение, изгиб, скручивание) достигается за счет изменения давления в герметичной камере. Оба конца привода соединяются с подвижными элементами конструкции.

Существуют и другие критерии классификации:

- 1) по жесткости корпуса – жесткие (традиционные пневмоцилиндры) и мягкие (гибкие пневмоприводы);
- 2) по типу движения – линейные (пневмоцилиндры) и вращательные (пневмомоторы, поворотные цилиндры).

В промышленных роботах чаще используются пневмомоторы, пневмоцилиндры и поворотные цилиндры. В бионических и антропоморфных роботах применяются мягкие пневмоприводы, такие как резиновые пневмоприводы и пневматические искусственные мышцы.

### **Состав пневматической системы и контура управления пневматическим приводом**

Пневматическая система состоит из четырех основных частей: *источника энергии, привода, блока слежения и блока управления*. Источник энергии включает в себя источник воздуха (воздушный компрессор или накопительный баллон), устройство очистки воздуха и блок питания; привод содержит клапан регулирования давления, клапан регулирования расхода, клапан регулирования направления и пневматический привод; блок обнаружения включает в себя различные переключатели, предельные клапаны, фотоэлементы и датчики; блок управления включает в себя схему управления (контроллер или компьютер), манипулятор, устройство отображения и т. д. Подробный состав и взаимосвязь между каждой частью системы показаны на рис. 2.13.

Аналогично системе гидравлического привода, работающей от жидкости, элементы управления пневматической системы тоже содержат клапаны направления, расхода и регулирования давления. Для переключения направления подачи воздуха чаще всего применяют двухпозиционные трехлинейные клапаны, двухпозиционные четырехлинейные клапаны, трехпозиционные четырехлинейные клапаны, двухпозиционные пятилинейные

клапаны и трехпозиционные пятилинейные клапаны. Площадь проходного сечения обычно составляет 2,5–14 мм<sup>2</sup>, а время срабатывания – от 10–16 мс до 22–70 мс. В ситуациях, когда требуется предотвратить резкое перемещение цилиндра из-за отключения питания, можно использовать сдвоенный электромагнитный клапан, оснащенный двумя соленоидами (т. е. сдвоенный электромагнитный клапан прямого действия). Такой клапан сохраняет текущее положение после отключения электрического сигнала. Регулирующий клапан обычно представляет собой односторонний дроссельный клапан, состоящий из одностороннего клапана и параллельного дросселя. Односторонний дроссельный клапан управляет скоростью движения, регулируя подачу или отвод воздуха к исполнительному элементу. Клапан регулировки давления обычно представляет собой перепускной клапан, иногда оснащенный отдельным предохранительным клапаном.



Рис. 2.13 ❖ Состав пневматической системы

### Схема пневматической приводной системы

Пневматическая система обычно строится на основе одной из базовых схем, выбранной в соответствии с задачами, которые она должна выполнять. Далее будут представлены базовые схемы, обычно используемые в пневматических роботах.

Базовая схема возвратно-поступательного движения на основе цилиндра двустороннего действия, обычно используемого в манипуляторах и штамповочных роботах. Это обычный телескопический цилиндр, состоящий из корпуса, поршня и штока поршня, которые должны быть герметично сопряжены. Две стороны поршня представляют собой закрытые воздушные полости. Основная функция пневматического контура в этой схеме заклю-

чается в управлении направлением и скоростью движения цилиндра путем перенаправления потока сжатого газа через односторонний дроссельный клапан, двухпозиционный четырехлинейный клапан и т. д.

На рис. 2.14 показан возвратно-поступательный контур цилиндра двустороннего действия. Двустороннее действие означает, что движения как в сторону выдвижения, так и в сторону втягивания штока активно управляются компонентами контура, то есть шток может перемещать полезную нагрузку в обоих направлениях. При подаче напряжения на катушку соленоида *левой* стороны четырехлинейного клапана сжатый газ поступает в *правую* воздушную камеру поршня цилиндра через *правый* канал (↑) ↓↑ и толкает поршень и шток влево, а газ из *левой* воздушной камеры цилиндра возвращается обратно через *левый* канал (↓) ↓↓; при подаче напряжения на катушку соленоида *правой* стороны клапана сжатый газ поступает в *левую* воздушную камеру цилиндра через *левый* канал (↖) ↖↘ и толкает поршень и шток *вправо*, а газ из *правой* воздушной камеры цилиндра возвращается обратно через *правый* канал (↘) ↘↘. Эта базовая схема часто используется в пневматических роботах для перемещения предметов, штамповки и других операций.

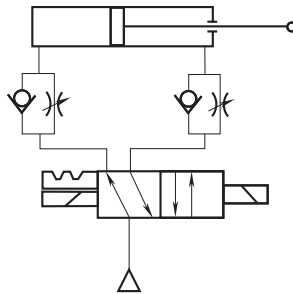


Рис. 2.14 ❖ Базовая схема контура двустороннего действия

### Контур промежуточной остановки

Зачем нужен контур промежуточной остановки? В пневматических роботах существует важная потребность в сохранении точного положения сочленений при внезапном отключении питания соленоидов распределительных клапанов. Контур промежуточной остановки позволяет удерживать все узлы робота в текущем положении с высокой точностью фиксации. Это позволяет возобновить работу с точки останова после восстановления электропитания, что критически важно для сохранения позиционной точности при выполнении операций.

Основная задача такой системы – предотвратить смещение рабочих органов при аварийных ситуациях, тем самым исключая брак продукции и обеспечивая безопасность технологического процесса. Реализация требует специальной конструкции пневматической системы, включающей механизмы точной фиксации, элементы контроля давления и систему аварийного тор-

можения. Особую важность эти решения приобретают в промышленных роботах-манипуляторах, где даже минимальное отклонение от заданной позиции может привести к существенным последствиям.

Технически контур промежуточной остановки гарантирует:

- стабильное удержание позиции при перебоях питания;
- высокую повторяемость позиционирования;
- плавное возобновление рабочего цикла без потери точности.

Это достигается за счет комбинации пневматических и электрических компонентов, работающих согласованно для обеспечения надежности системы в любых рабочих условиях.

### ***Контур промежуточной остановки с использованием трехпозиционного пятилинейного клапана***

Схема контура промежуточной остановки с применением пятилинейного трехпозиционного клапана с закрытой средней позицией показана на рис. 2.15а. Поочередное включение и выключение соленоидов на обоих концах клапана обеспечивает возвратно-поступательное движение цилиндра влево и вправо. Однако когда оба соленоида обесточены, клапан под действием возвратных пружин переходит в нейтральное положение, при котором все каналы перекрываются. В этом случае шток цилиндра перемещается за счет разницы давлений в его полостях и останавливается, когда эта разница становится равной нулю или уравнивается силой трения.

В случае когда на шток поршня не действует внешняя нагрузка, поршень обычно слегка смещается в сторону штока, так как эффективная площадь поршня со стороны штока меньше, чем с противоположной стороны. При отсутствии утечек в цилиндре и пневмолиниях поршень сохраняет это положение после остановки. Однако при наличии даже незначительных утечек газа поршень будет медленно перемещаться.

Важно отметить, что из-за сжимаемости газа данная схема промежуточной остановки не может обеспечить высокую точность позиционирования. Этот фактор необходимо учитывать при проектировании систем, где требуется точное поддержание положения в аварийных ситуациях или при перерывах в подаче питания. Точность остановки в значительной степени зависит от состояния уплотнений, величины утечек и баланса сил в системе.

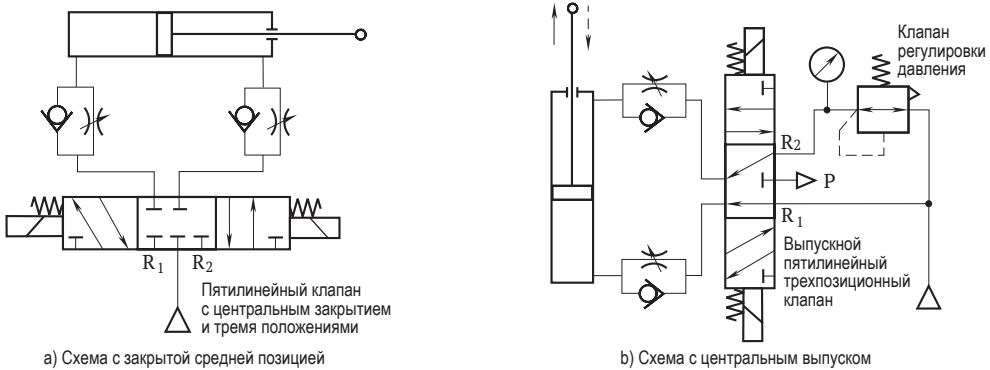
### ***Контур промежуточной остановки с использованием пятилинейного трехпозиционного клапана с центральным выпуском***

Контур, показанный на рис. 2.15b, в целом аналогичен представленному на рис. 2.14, но вместо клапана с закрытой средней позицией здесь используется пятилинейный трехпозиционный клапан с центральным выпуском. При отключении питания обеих соленоидов клапана пружины возвращают золотник в нейтральное положение, при этом полости цилиндра с обеих сторон поршня соединяются с выпускными портами  $R_1$  и  $R_2$ , обеспечивая

одновременный сброс давления с обеих сторон и уравновешивая воздействие на поршень.

Регулировкой давления на клапане можно достичь баланса сил, включая внешнюю нагрузку, что позволяет осуществить промежуточную остановку. При подаче питания на соленоиды воздух из цилиндра может сбрасываться через обратные клапаны с регулируемым расходом и выпускной порт Р. Такая схема обеспечивает стабильное равновесие сил по обе стороны поршня, что делает промежуточную остановку более устойчивой.

Ключевым преимуществом данной схемы является равномерное давление на поршень с обеих сторон во время остановки, что исключает риск резкого неконтролируемого движения («выстрела» цилиндра) при восстановлении питания катушек. Это особенно важно для плавного и предсказуемого возобновления работы после аварийной остановки. Техническая реализация такой схемы требует точной настройки давления и надежной работы выпускных клапанов для поддержания стабильного положения поршня в течение всего времени остановки.



**Рис. 2.15** ❖ Контур остановки в среднем положении с использованием трехпозиционного пятилинейного клапана

### Контур быстрого выпуска воздуха

Для выдвигания штока пневмоцилиндра необходимо, чтобы электромагнитный клапан подавал сжатый воздух в камеру без штока, тем самым выталкивая поршень. Скорость выдвигания регулируется с помощью обратного дроссельного клапана, обеспечивая точное управление перемещением.

В случае быстрого втягивания штока схема работает иначе: вместо электромагнитного клапана используется клапан быстрого выпуска, который заменяет дроссельный клапан. При этом воздух из камеры без штока моментально сбрасывается в атмосферу через этот клапан, что значительно увеличивает скорость втягивания.

Такая схема быстрого выпуска воздуха особенно востребована в системах, где необходимы высокоскоростные перемещения цилиндра или требуется

сократить время полного цикла возвратно-поступательного движения. Техническая реализация этого решения позволяет оптимизировать производительность пневматических систем без существенного усложнения конструкции.

Как показано на рис. 2.16 (слева), клапан быстрого выпуска имеет три порта: Р, А и Т. Порт Р подключен к источнику сжатого воздуха, порт А соединен с исполнительным механизмом (например, пневмоцилиндром), а порт Т сообщается с атмосферой.

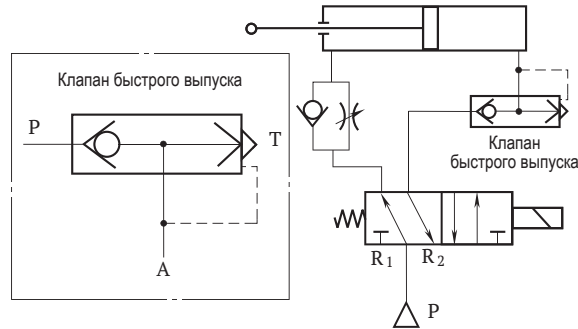


Рис. 2.16 ❖ Контур быстрого выпуска

При подаче сжатого воздуха через порт Р золотник клапана смещается вправо, соединяя порты Р и А. Это позволяет подавать рабочее давление к исполнительному механизму. Когда подача воздуха через порт Р прекращается, давление со стороны исполнительного механизма (порт А) заставляет золотник сместиться влево. В этом положении перекрывается соединение между Р и А, одновременно открывается канал между А и Т, что позволяет воздуху из исполнительного механизма быстро выходить в атмосферу.

Клапан быстрого выпуска обычно устанавливается между распределительным клапаном и пневмоцилиндром. Такая схема позволяет воздуху из цилиндра выходить напрямую в атмосферу, минуя распределительный клапан. Это значительно увеличивает скорость движения цилиндра и сокращает время полного рабочего цикла.

### **Контур двухступенчатого управления скоростью**

В зависимости от ситуации иногда необходимо обеспечить быстрое перемещение пневмоцилиндра, а в других случаях – медленное. Переключение между режимами высокой и низкой скорости достигается за счет специальной пневматической схемы с переменной скоростью.

На рис. 2.17 представлен контур двухступенчатого управления скоростью. Поскольку проходное сечение второго регулирующего клапана скорости можно настроить больше, чем у первого клапана, это позволяет получить медленную подачу. Когда соленоид клапана 2 обесточен, система работает как одноступенчатый контур, где скорость выдвигания штока цилиндра определяется только первым клапаном скорости.

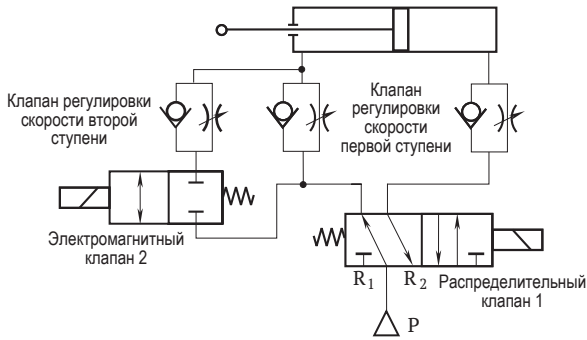


Рис. 2.17 ❖ Контур двухступенчатого изменения скорости

При подаче напряжения на соленоид второго клапана скорости (функцию регулирования выполняет дроссельный клапан 2) активируется вторая ступень управления скоростью, переключая систему в режим быстрой подачи. И наоборот, если сначала включить клапан 2, а затем отключить его во время движения поршня, цилиндр перейдет из быстрого режима в медленный.

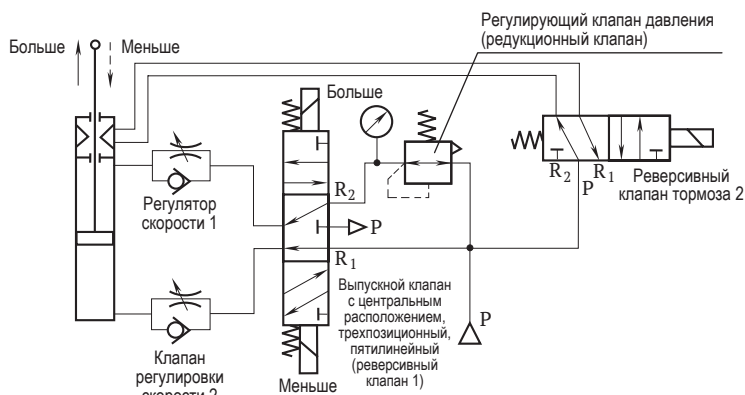
### ***Контур точного позиционирования пневматических систем***

Хотя пневматические роботы уступают электроприводным в точности позиционирования исполнительных органов, специальные схемы управления позволяют значительно улучшить этот показатель. Основные методы повышения точности включают применение цилиндров с тормозными механизмами и комбинацию таких цилиндров с двухступенчатыми контурами регулирования скорости.

На рис. 2.18 показана схема контура точного позиционирования с использованием цилиндра, оснащенного тормозным устройством. В данной системе электромагнитный распределитель (переключающий клапан 1), управляющий движением цилиндра, представляет собой пятилинейный трехпозиционный клапан с центральным выпуском. Регулировка редукционного клапана обеспечивает балансировку цилиндра, а переключающий клапан 1 позволяет реализовать промежуточную остановку.

Торможение осуществляется путем обесточивания соленоида тормозного клапана 2, что приводит в действие тормозной механизм цилиндра и надежно фиксирует положение штока. Такая конструкция обеспечивает стабильное удержание заданной позиции даже при наличии остаточного давления в системе.

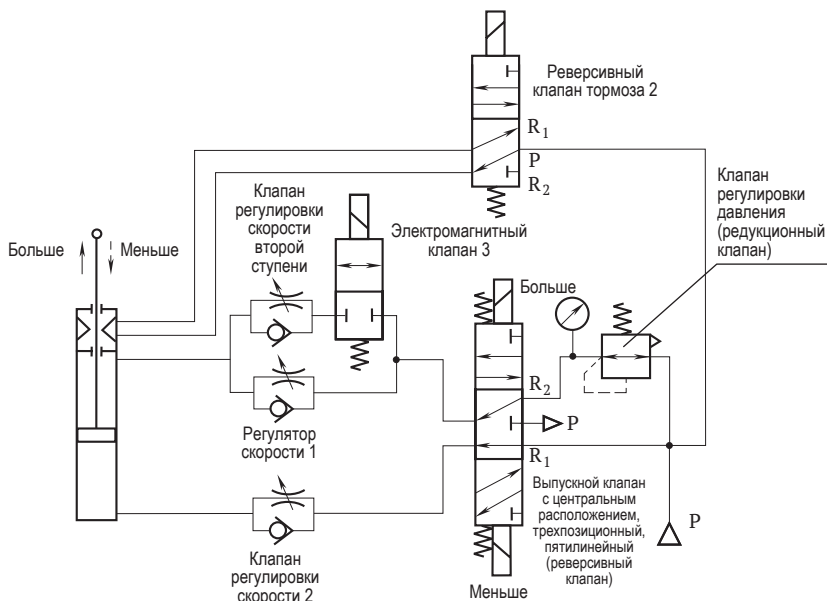
Комбинированное использование тормозных цилиндров с контурами двухступенчатого управления скоростью позволяет достичь оптимального соотношения между скоростью выполнения операций и точностью конечного позиционирования. Это особенно важно для технологических процессов, где требуется сначала быстрое перемещение к зоне обработки, а затем точное позиционирование инструмента. Техническая реализация таких систем требует тщательной настройки параметров торможения и согласованной работы всех элементов управления.



**Рис. 2.18** ❖ Контур точного позиционирования с тормозным цилиндром

### ***Контур точного позиционирования с тормозным цилиндром и двухступенчатым регулированием скорости***

Для дополнительного повышения точности остановки поршня в системах с тормозными цилиндрами может применяться комбинированная схема, представленная на рис. 2.19. Данное решение объединяет контур точного позиционирования с тормозным цилиндром (как показано на рис. 2.18) с двухступенчатой системой регулирования скорости, что позволяет существенно снизить скорость движения цилиндра перед моментом остановки.



**Рис. 2.19** ❖ Контур точного позиционирования, используемый в сочетании с тормозным цилиндром и двухступенчатым контуром управления скоростью

Принцип работы основан на последовательном переключении скоростных режимов: на начальном этапе перемещения используется высокая скорость для быстрого подвода, которая затем переключается на пониженную скорость при приближении к целевой позиции. Непосредственно перед остановкой активируется тормозной механизм, обеспечивающий фиксацию штока в требуемом положении.

Такие комбинированные системы нашли широкое применение в пневматических робототехнических комплексах, где требуется сочетание высокой производительности с точным позиционированием. Ключевым преимуществом является возможность минимизировать инерционные перегрузки при торможении за счет предварительного снижения скорости, что особенно важно для сохранения точности при работе с хрупкими или деликатными объектами.

Техническая реализация требует точной синхронизации работы скоростных контуров и тормозной системы, а также тщательной настройки моментов переключения между режимами. Оптимальные параметры работы определяются характеристиками конкретного технологического процесса и требованиями к точности позиционирования.

### ***Пневмогидравлический преобразователь и низкоскоростной контур управления газом/жидкостью***

Основным недостатком пневматических систем является сжимаемость газобразной рабочей среды. Пневмоцилиндр по своей природе подобен газовой пружине, что существенно затрудняет точное управление позиционированием и скоростью, особенно при работе на низких скоростях, где сложно добиться плавного и точного регулирования движения.

Эту проблему эффективно решают гидравлические системы, где в качестве рабочей среды используется практически несжимаемая жидкость. Комбинирование пневматических и гидравлических контуров представляет собой практичный и экономически целесообразный метод реализации низкоскоростного управления.

Ключевым элементом такой системы является *пневмогидравлический преобразователь*, представляющий собой комбинацию пневмоцилиндра и гидроцилиндра. Принцип работы основан на преобразовании энергии сжатого воздуха в давление рабочей жидкости, что позволяет сочетать преимущества обоих типов приводов:

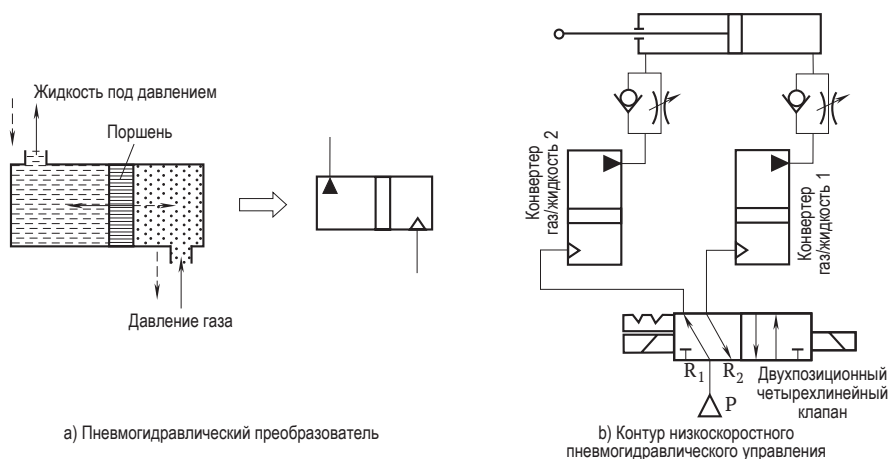
- энергоэффективность и простоту пневматических систем;
- точность и плавность хода, характерные для гидравлики.

Такие решения особенно востребованы в приложениях, где требуется точное позиционирование при сохранении экономичности пневматического привода, например в сборочных операциях или при работе с хрупкими материалами. Техническая реализация требует тщательного подбора соотношения площадей поршней в преобразователе и точной настройки гидравлической части системы.

С технической точки зрения пневмогидравлический преобразователь (или цилиндр преобразования рабочей среды газ/жидкость) представляет собой поршневой цилиндр без штока. Одна сторона поршневого цилиндра – воздушный цилиндр, другая – гидравлический. Разумеется, с обеих сторон имеются впускные отверстия для газа под давлением и выпускные отверстия для рабочей жидкости под давлением. Его функция заключается в преобразовании давления воздуха в давление рабочей жидкости. Принципиальная схема пневмогидравлического преобразователя показана на рис. 2.20а. Когда газовая полость преобразователя заполняется сжатым газом от источника, он толкает поршень, перемещая его в сторону полости с жидкостью. В этой полости возникает избыточное давление рабочей жидкости, которое можно использовать в гидравлическом приводе.

### ***Низкоскоростной контур управления газ/жидкость на основе пневмогидравлического преобразователя***

На основе пневмогидравлического преобразователя можно построить низкоскоростной контур управления газ/жидкость, работающий от источника газа. Как показано на рис. 2.20б, в первой половине контура используется электромагнитный клапан (двухпозиционный четырехлинейный реверсивный клапан) для подачи сжатого газа в один из двух преобразователей с газовой средой под давлением, а другой открывает обратный путь газа. Во второй половине контура используются два односторонних дроссельных клапана для управления потоками жидкости под давлением для прямого и обратного рабочего хода, подаваемой в гидроцилиндр двумя пневмогидравлическими преобразователями соответственно, что позволяет точно регулировать скорость перемещения штока гидроцилиндра. Эта схема в полной мере использует преимущества простой конструкции пневматической схемы и относительно высокую точность управления гидравлической системой.



**Рис. 2.20** ❖ Компоненты пневмогидравлической системы точного позиционирования