

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> . . . . .	8
<b>Глава 1. Перемещение многозвенных змееподобных механизмов в динамическом режиме</b> . . . . .	12
1.1. О движении змееподобных систем . . . . .	12
1.2. Движение трехзвенника по горизонтальной плоскости . . . . .	19
1.2.1. Механическая модель . . . . .	19
1.2.2. Элементарные движения . . . . .	21
1.2.3. Анализ медленных движений . . . . .	22
1.2.4. Анализ быстрых движений . . . . .	25
1.2.5. Построение произвольных движений из элементарных . . . . .	28
1.2.6. Числовой пример . . . . .	32
1.3. Движение двузвенника по горизонтальной плоскости. . . . .	35
1.3.1. Механическая модель . . . . .	35
1.3.2. Элементарные движения . . . . .	37
1.3.3. Анализ медленных движений . . . . .	38
1.3.4. Анализ быстрых движений . . . . .	41
1.3.5. Продольное перемещение двузвенника . . . . .	43
1.3.6. Произвольное перемещение двузвенника . . . . .	45
1.3.7. Частные случаи . . . . .	49
1.3.8. Примеры . . . . .	51
1.4. Оптимизация конструктивных параметров и режимов движения многозвенников . . . . .	52
1.4.1. Максимизация средней скорости движения трехзвенника . . . . .	53
1.4.2. Максимизация средней скорости движения двузвенника . . . . .	63
1.4.3. Обсуждение результатов оптимизации . . . . .	74
1.4.4. Учет затрат энергии на преодоление трения . . . . .	76
1.5. Обсуждение результатов и эксперименты. . . . .	88
<b>Глава 2. Квазистатическое перемещение многозвенных механизмов</b> . . . . .	96
2.1. О квазистатических движениях . . . . .	96
2.2. Волнообразные движения многозвенника по шероховатой горизонтальной плоскости . . . . .	98
2.2.1. Механическая модель . . . . .	98
2.2.2. Волнообразное движение с тремя подвижными звеньями . . . . .	99
2.2.3. Волнообразное движение с четырьмя подвижными звеньями . . . . .	101
2.2.4. Квазистатический подход . . . . .	103
2.2.5. Начальный этап . . . . .	104
2.2.6. Конечные этапы . . . . .	106
2.2.7. Основной этап при трех подвижных звеньях . . . . .	107

2.2.8. Основной этап при четырех подвижных звеньях . . . . .	109
2.2.9. Определение моментов . . . . .	111
2.2.10. Обсуждение результатов . . . . .	113
2.3. Квазистатические движения трехзвенного мобильного механизма с замкнутым контуром по шероховатой горизонтальной плоскости . . . . .	115
2.3.1. Механическая модель . . . . .	115
2.3.2. Квазистатические движения с одной подвижной точкой. Управляемость системы . . . . .	118
2.3.3. Построение оптимальной траектории движущейся точки . . . . .	121
<b>Глава 3. Движение цепочек тел в сопротивляющихся средах . . . . .</b>	<b>128</b>
3.1. О локомоции за счет продольных перемещений . . . . .	128
3.2. Математическая модель прямолинейного движения цепочки тел . . . . .	132
3.2.1. Описание модели и уравнения движения . . . . .	132
3.2.2. Уравнение движения центра масс . . . . .	134
3.2.3. Движение центра масс цепочки тел в среде с линейным законом сопротивления . . . . .	135
3.3. Оптимальное прямолинейное движение системы двух тел по плоскости с сухим трением в режиме кусочно-постоянной силы взаимодействия . . . . .	138
3.3.1. Постановка задачи . . . . .	138
3.3.2. Расчет движения . . . . .	140
3.3.3. Максимизация средней скорости . . . . .	145
3.4. Оптимальное прямолинейное перемещение системы двух тел по плоскости с сухим трением в режиме движения с кусочно-постоянной относительной скоростью . . . . .	147
3.4.1. Постановка задачи . . . . .	148
3.4.2. Анализ уравнений . . . . .	149
3.4.3. Средняя скорость . . . . .	153
3.4.4. Энергозатраты . . . . .	153
3.4.5. Оптимизация . . . . .	154
3.5. Безреверсное периодическое прямолинейное движение системы двух взаимодействующих тел на горизонтальной шероховатой плоскости . . . . .	159
3.5.1. Постановка задачи . . . . .	160
3.5.2. Безразмерные переменные . . . . .	162
3.5.3. Условие существования безреверсного периодического движения . . . . .	163
3.5.4. Анализ и параметрическая оптимизация периодического безреверсного режима движения . . . . .	173
3.6. Оптимальное управление движением системы двух взаимодействующих тел на горизонтальной шероховатой плоскости . . . . .	175
3.6.1. Постановка задач оптимального управления . . . . .	175
3.6.2. Вспомогательная задача оптимального управления для центра масс системы . . . . .	178
3.6.3. Решение задачи 3.6.1 . . . . .	180
3.6.4. Решение задачи 3.6.2 . . . . .	185
3.6.5. Параметрическая максимизация средней скорости оптимального движения . . . . .	187

---

3.7. Оптимальное управление цепочкой взаимодействующих тел вдоль прямой на горизонтальной шероховатой плоскости . . . . .	189
3.7.1. Постановка задач оптимального управления . . . . .	190
3.7.2. Вспомогательная задача об оптимальном движении центра масс . . . . .	191
3.7.3. Оптимальное управление для задач 3.7.1 и 3.7.2 . . . . .	193
3.7.4. Оптимальное управление при ограничении на относительные смещения тел . . . . .	197
3.8. Поступательное движение цепочки тел в вязкой сопротивляющейся среде . . . . .	200
3.8.1. Механическая система . . . . .	200
3.8.2. Поступательное движение системы . . . . .	202
3.8.3. Линейное сопротивление . . . . .	204
3.8.4. Квадратичное сопротивление . . . . .	206
<b>Глава 4. Локомоция многозвенных систем в жидкости. . . . .</b>	<b>209</b>
4.1. Плавание живых существ и бионических мобильных систем . . . . .	209
4.2. Оптимальное управление многозвенной системой с цилиндрическими шарнирами в среде со степенным законом сопротивления . . . . .	212
4.2.1. Механическая модель . . . . .	212
4.2.2. Анализ уравнения движения . . . . .	215
4.2.3. Случай кусочно-постоянной угловой скорости . . . . .	219
4.2.4. Задача оптимального управления . . . . .	221
4.2.5. Решение задачи 4.2.1 . . . . .	222
4.2.6. Решение задачи 4.2.2 . . . . .	228
4.2.7. Оптимальное решение . . . . .	229
4.2.8. Случай квадратичного сопротивления . . . . .	233
4.2.9. Учет подъемной силы . . . . .	233
4.3. Плавание при помощи двузвенных конечностей . . . . .	235
4.3.1. Механическая модель . . . . .	235
4.3.2. Уравнения движения . . . . .	237
4.3.3. Случай малых углов отклонения . . . . .	240
4.3.4. Случай конечных углов отклонения . . . . .	241
4.4. Упрощенная модель гребли . . . . .	245
4.4.1. Механическая модель . . . . .	246
4.4.2. Анализ и интегрирование уравнений движения . . . . .	248
4.4.3. Свойства решения . . . . .	251
4.4.4. Численное моделирование . . . . .	252
4.4.5. Циклические движения . . . . .	253
<b>Глава 5. Прямолинейные периодические движения систем с подвижными внутренними телами . . . . .</b>	<b>256</b>
5.1. Локомоционные системы с подвижными внутренними телами и капсульные роботы . . . . .	256
5.2. Периодическое движение системы с внутренним телом вдоль прямой на шероховатой горизонтальной плоскости . . . . .	264
5.2.1. Уравнения движения . . . . .	264
5.2.2. Относительное периодическое движение внутреннего тела . . . . .	267
5.2.3. Двухфазное движение . . . . .	273

5.2.4. Оптимизация двухфазного движения . . . . .	275
5.2.5. Трехфазное движение . . . . .	280
5.2.6. Оптимизация трехфазного движения . . . . .	286
5.2.7. Обсуждение результатов . . . . .	298
5.3. Оптимальные движения системы с подвижным внутренним телом в средах с различными законами сопротивления . . . . .	299
5.3.1. Постановка задачи . . . . .	299
5.3.2. Относительное движение внутреннего тела . . . . .	301
5.3.3. Схема решения задачи параметрической оптимизации . . . . .	302
5.3.4. Кусочно-линейное сопротивление . . . . .	303
5.3.5. Квадратичное сопротивление . . . . .	306
5.3.6. Сухое трение . . . . .	308
5.3.7. Оптимизация в случае сухого трения . . . . .	312
5.4. Оптимальное управление прямолинейным движением системы с подвижным внутренним телом в сопротивляющейся среде . . . . .	317
5.4.1. Описание системы и постановка задач оптимального управления . . . . .	317
5.4.2. Существование периодического движения с ненулевым смещением за период . . . . .	323
5.4.3. Краевая задача принципа максимума . . . . .	327
5.4.4. Общая схема решения задачи оптимального управления . . . . .	330
5.4.5. Функции $r(v)$ класса $\mathcal{R}$ . . . . .	334
5.4.6. Решение краевой задачи принципа максимума для некоторых функций $r(v)$ из класса $\mathcal{R}$ . . . . .	337
5.4.7. Движение в среде со степенным законом сопротивления при малом коэффициенте трения . . . . .	339
5.5. Оптимальное управление системой с двумя внутренними телами . . . . .	343
5.5.1. Постановка задачи . . . . .	343
5.5.2. Свойства оптимального движения . . . . .	346
5.5.3. Построение оптимального управления . . . . .	349
5.5.4. Предельные случаи . . . . .	352
5.6. Движение систем с подвижными внутренними телами и вибрационное перемещение . . . . .	365
5.6.1. Вибрационное перемещение частицы при прямолинейных колебаниях платформы . . . . .	366
5.6.2. Вибрационное перемещение частицы при плоскопараллельном поступательном движении платформы . . . . .	368
<b>Глава 6. Плоские движения тела под влиянием внутренних масс при наличии сухого трения между телом и плоскостью.</b> . . . . .	<b>371</b>
6.1. Об управлении движением твердого тела с подвижными внутренними массами на плоскости . . . . .	371
6.2. Движение тела по плоскости под воздействием двух подвижных масс . . . . .	374
6.2.1. Механическая система . . . . .	375
6.2.2. Задача управления . . . . .	376
6.2.3. Уравнения движения . . . . .	378
6.2.4. Построение управления . . . . .	380

---

6.3. Плоские движения тела, управляемые с помощью подвижной материальной точки . . . . .	386
6.3.1. Уравнения движения . . . . .	387
6.3.2. Типы движений . . . . .	389
6.3.3. Прямолинейные движения . . . . .	390
6.3.4. Вращение . . . . .	394
6.3.5. Управляемость . . . . .	398
<b>Глава 7. Управление ориентацией твердого тела посредством внутренних подвижных масс . . . . .</b>	<b>401</b>
7.1. Управление угловым движением твердых тел с внутренними точечными массами в отсутствие внешних сил . . . . .	401
7.2. Плоские оптимальные движения тела, управляемого при помощи внутренней массы . . . . .	404
7.2.1. Механическая система . . . . .	404
7.2.2. Уравнения движения . . . . .	405
7.2.3. Постановки задач оптимального управления . . . . .	406
7.2.4. Оптимальное управление . . . . .	408
7.2.5. Решения задач 7.2.1а–7.2.3а . . . . .	410
7.2.6. Модификация законов управления . . . . .	416
7.3. Плоские повороты при наличии фазового ограничения . . . . .	419
7.3.1. Основные уравнения и ограничения . . . . .	419
7.3.2. Анализ траекторий . . . . .	421
7.3.3. Численные результаты и их обсуждение . . . . .	424
7.4. Оптимальное управление плоским поворотом для нелинейной системы . . . . .	426
7.4.1. Постановка задачи . . . . .	427
7.4.2. Оптимальное управление . . . . .	428
7.5. Пространственное движение тела, управляемое посредством внутренней массы . . . . .	431
7.5.1. Уравнения движения . . . . .	432
7.5.2. Переориентация как последовательность плоских поворотов . . . . .	433
7.5.3. Упрощенный плоский поворот . . . . .	434
7.6. Управление ориентацией тела при помощи нескольких подвижных масс . . . . .	437
7.6.1. Уравнения движения . . . . .	438
7.6.2. Преобразование основного уравнения . . . . .	440
7.6.3. Задача переориентации . . . . .	441
7.6.4. Относительные движения . . . . .	442
7.6.5. Обсуждение результатов . . . . .	445
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>448</b>