

УДК 531.7
ББК 22.21
Ф 225

Перевод и издание книги выполнены при поддержке гранта Правительства Российской Федерации для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования, договор № 11.G34.31.0039

Фантони И., Лозано Р.

Нелинейное управление механическими системами с дефицитом управляющих воздействий. — М. – Ижевск: ООО «Компьютерная динамика», 2012. — 312 с.

В книге изложены результаты исследований нелинейных механических систем с дефицитом управляющих воздействий, представлена универсальная методика для оценки управляемости и устойчивости подобных систем. Приведены результаты имитационного моделирования целого ряда известных механических систем с дефицитом управляющих воздействий. Книга будет полезна студентам, инженерам и научным работникам, интересующимся вопросами управления техническими системами и динамикой механических систем, а также может использоваться в качестве учебного пособия для магистрантов группы направлений 220000 «Автоматика и управление» и аспирантов.

ISBN 978-5-906268-01-3

ББК 22.21

Translation from English language edition:
Non-linear Control for Underactuated Mechanical Systems
by Isabelle Fantoni and Rogelio Lozano

© 2002 Springer London

Springer London is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved.

© ООО «Компьютерная динамика», перевод на рус. яз., 2012

<http://shop.rcd.ru>
<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие	13
ГЛАВА 1. Введение	15
1.1. Наши мотивы	15
1.2. Структура книги	21
1.2.1. Подходы, связанные с управлением, основанным на энергии, для некоторых механических систем с де- фицитом управляющих воздействий	21
1.2.2. Модель судна на воздушной подушке, летательного аппарата PVTOL и вертолета	22
ГЛАВА 2. Предварительные теоретические сведения	25
2.1. Устойчивость по Ляпунову	25
2.1.1. Прямой метод Ляпунова	26
2.2. Пассивность и диссипативность	28
2.3. Обеспечение устойчивости	30
2.4. Неголономные системы	31
2.5. Системы с дефицитом управляющих воздействий	32
2.6. Гомоклиная орбита	34
ГЛАВА 3. Система «тележка – перевернутый маятник»	37
3.1. Введение	37
3.2. Построение модели	39
3.2.1. Модель системы, использующая второй закон Ньютона	40
3.2.2. Уравнения Эйлера – Лагранжа	41
3.3. Пассивность перевернутого маятника	43
3.4. Управляемость линеаризованной модели	44
3.5. Стабилизирующий закон управления	45
3.5.1. Гомоклиная орбита	45
3.5.2. Стабилизация в окрестности гомоклиной орбиты	45
3.5.3. Область притяжения	47
3.6. Анализ устойчивости	48
3.7. Результаты имитации	52

3.8. Результаты экспериментов	54
3.9. Выводы	55
ГЛАВА 4. Система «подъемный кран»	57
4.1. Введение	57
4.2. Модель	57
4.3. Пассивность системы	59
4.4. Закон управления, вызывающий затухание колебаний	60
4.4.1. Анализ асимптотической устойчивости	61
4.5. Результаты имитационного моделирования	62
4.6. Заключительные замечания	63
ГЛАВА 5. Система «робот–маятник»	65
5.1. Введение	65
5.2. Динамика системы	66
5.2.1. Уравнения движения, полученные по формулам Эйлера – Лагранжа	67
5.3. Пассивность робота–маятника	70
5.4. Линеаризация системы	71
5.5. Закон управления для верхнего положения	72
5.5.1. Гомоклидная орбита	72
5.5.2. Стабилизация вблизи гомоклидной орбиты	73
5.6. Анализ на устойчивость	76
5.7. Результаты имитации	80
5.8. Результаты экспериментов	81
5.9. Выводы	83
ГЛАВА 6. Маятник Фуруты	85
6.1. Введение	85
6.2. Построение модели системы	86
6.2.1. Энергия системы	87
6.2.2. Уравнения Эйлера – Лагранжа, описывающие динамику	88
6.2.3. Свойства пассивности у маятника Фуруты	90
6.3. Управляемость линеаризованной модели	90
6.4. Алгоритм стабилизации	92
6.5. Анализ на устойчивость	95
6.6. Результаты имитационного моделирования	98
6.7. Выводы	99

ГЛАВА 7. Маятник с реактивным колесом	101
7.1. Введение	101
7.2. Маятник с реактивным колесом	102
7.2.1. Уравнения движения	102
7.2.2. Свойства пассивности системы	104
7.2.3. Линеаризация системы	105
7.2.4. Линеаризация обратной связи	106
7.3. Построение первого управления, основанного на энергии	107
7.4. Вторая система управления, основанная на энергии	110
7.5. Результаты имитации	113
7.6. Выводы	115
7.7. Обобщение для систем Эйлера–Лагранжа	116
ГЛАВА 8. Плоский робот с шарнирными сочленениями	119
8.1. Введение	119
8.2. Плоский двухзвенный робот	120
8.2.1. Уравнения движения	120
8.2.2. Линеаризация системы	122
8.2.3. Пассивность системы	123
8.3. Закон управления для двухзвенного манипулятора	124
8.3.1. Эквивалентная взаимная связь замкнутого контура	124
8.4. Анализ на устойчивость	125
8.5. Результаты имитационного моделирования	129
8.6. Плоский трехзвенный робот	130
8.7. Закон управления для трехзвенного робота	133
8.8. Анализ на устойчивость	134
8.9. Результаты имитаций	137
8.10. Выводы	137
ГЛАВА 9. Плоский манипулятор ППВ	141
9.1. Введение	141
9.2. Динамика системы	142
9.2.1. Уравнение движения, полученное по формулам Эйлера–Лагранжа	144
9.2.2. Свойства пассивности плоских манипуляторов типа ППВ	147
9.3. Закон управления, обеспечивающий устойчивость (энергетический подход)	147
9.3.1. Эквивалентная взаимная связь замкнутого контура	148
9.4. Сходимость и анализ на устойчивость	150

9.5. Результаты имитационного моделирования	151
9.6. Выводы	152
ГЛАВА 10. Шар и действующая на него качающаяся балка	155
10.1. Введение	155
10.2. Динамическая модель	156
10.2.1. Механические свойства	158
10.3. Закон управления	158
10.3.1. Анализ на устойчивость	159
10.4. Результаты имитационного моделирования	163
10.5. Выводы	164
ГЛАВА 11. Модель судна на воздушной подушке	167
11.1. Введение	167
11.2. Модель судна на воздушной подушке	170
11.2.1. Модель системы, построенная с помощью второго за- кона Ньютона	170
11.2.2. Уравнения Эйлера–Лагранжа	172
11.2.3. Управляемость линеаризованной системы	173
11.3. Стабилизирующий закон управления для скорости	174
11.4. Стабилизация положения	175
11.4.1. Первый подход	175
11.4.2. Второй подход	177
11.4.3. Третий подход	178
11.5. Результаты имитационного моделирования	179
11.6. Выводы	179
ГЛАВА 12. Плоские летательные аппараты с вертикальным взлетом и посадкой (PVTOL)	185
12.1. Введение	185
12.2. Модель летательного аппарата PVTOL	187
12.3. Линеаризация входа-выхода системы	188
12.4. Второй подход к стабилизации	190
12.5. Третий алгоритм стабилизации	191
12.6. Закон управления с переадресацией	191
12.6.1. Шаг первый: функция Ляпунова для подсистемы (y, θ) «высота–угол»	192
12.6.2. Ограниченность функции $\theta(t)$	193
12.6.3. Шаг второй: построение переадресации	195
12.6.4. Шаг третий: последняя замена координат	199
12.7. Результаты имитационного моделирования	204

12.8. Выводы	205
ГЛАВА 13. Вертолет на платформе	209
13.1. Введение	209
13.2. Общие соображения	210
13.2.1. Разновидности полета	210
13.2.2. Аэродинамические силы и моменты	211
13.2.3. Моменты инерции и произведения	219
13.2.4. Общая модель	222
13.3. Модель «вертолет–платформа»	223
13.4. Диссипативные свойства модели с тремя степенями свободы	229
13.5. Построение системы управления	229
13.5.1. Основанное на пассивности управление вращением	230
13.5.2. Взлет	230
13.5.3. Управление высотой	231
13.6. Результаты имитационного моделирования	233
13.6.1. Первая имитация	233
13.6.2. Вторая имитация	233
13.7. Выводы	237
ГЛАВА 14. Лагранжева модель вертолета	239
14.1. Введение	239
14.2. Модель вертолета	241
14.3. Построение системы управления, основанной на энергии	252
14.4. Анализ и имитации	260
14.5. Выводы	270
ГЛАВА 15. Ньютонова модель вертолета	271
15.1. Введение	271
15.2. Построение модели вертолета с использованием законов Ньютона	273
15.3. Новая модель динамики, необходимая для построения системы управления	277
15.4. Построение следящего управления, основанное на идеях Лапунова	279
15.5. Анализ	289
15.6. Имитации	291
15.7. Выводы	295
Литература	297
Предметный указатель	308