

УДК 521.1, 517.97
ББК 22.62 + 39.62/66
Б 815

Боннар Б., Фобур Л., Треля Э.

Небесная механика и управление космическими летательными аппаратами. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. — 344 с.

Как следует из названия, предлагаемая книга трех авторов посвящена теории управления космическими аппаратами в околоземном пространстве. Однако в действительности содержание монографии шире. Авторы последовательно излагают основы современной теории управления механическими системами, движение которых описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, содержащими управляющие функции. В первых главах приводятся необходимые сведения по небесной механике, без знания которых невозможно браться за задачу управления в космосе. Поскольку управление в космосе осуществляется с ограниченной точностью, далекой от так называемой астрономической точности, рассматривается нерелятивистская небесная механика. Теория применена к двум классам задач. В первом рассматривается управление ориентацией космического аппарата, движение центра масс которого предполагается известным. Во втором классе рассматривается управление движением космического аппарата как материальной точки с целью перевести его с одной орбиты на другую, отвечающую задачам, для решения которых запущен спутник.

Мы надеемся, что публикация этого труда будет полезной для специалистов по управлению движением космических аппаратов, а также аспирантов и студентов старших курсов соответствующего профиля.

ISBN 978-5-4344-0190-6

ББК 22.62 + 39.62/66

Translation from French language edition:

Mécanique céleste et contrôle des véhicules spatiaux

by Bernard Bonnard, Ludovic Faubourg and Emmanuel Trélat

© Springer Berlin Heidelberg, 2006

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

© АНО «Ижевский институт компьютерных исследований»,
перевод на рус. яз., 2014

<http://shop.rcd.ru>

<http://ics.org.ru>

Оглавление

Предисловие к русскому переводу	xi
Введение	xv
 Часть I. Небесная механика	 1
ГЛАВА 1. Симплектическая геометрия и канонические преобразования	3
1.1. Элементы внешней алгебры и линейной симплектической геометрии	3
1.2. Внешние формы степени 2 и линейная симплектическая геометрия	4
1.3. Симплектическая группа	5
1.3.1. Представление группы	6
1.3.2. Симплектическая группа и линейные гамильтоновы векторные поля	6
1.3.3. Понятия симплектической линейной алгебры	8
1.3.4. Устойчивость и структурная устойчивость	11
1.4. Симплектические многообразия и гамильтоновы векторные поля	13
1.4.1. Обозначения и определения	13
1.4.2. Координаты Дарбу	15
1.4.3. Симплектическое поднятие	16
1.5. Симплектическая геометрия и вариационное исчисление . . .	17
1.5.1. Фундаментальная формула	17
1.5.2. Условия трансверсальности	18
1.5.3. Уравнения Гамильтона	19
1.5.4. Уравнение Гамильтона–Якоби	20
1.5.5. Принцип максимума Понтрягина в его слабой версии .	21
1.5.6. Канонические преобразования	24
1.6. Примечания и источники	29

ГЛАВА 2. Некоторые свойства дифференциальных уравнений Гамильтона: интегрируемость и устойчивость	31
2.1. Интегрируемость	31
2.1.1. Теорема о симплектическом выпрямлении	32
2.1.2. Теорема Нётер	32
2.1.3. Метод интегрирования Якоби	33
2.1.4. Теорема интегрируемости для неавтономного линейного случая	36
2.1.5. Теорема интегрируемости Лиувилля	37
2.2. Устойчивость состояний равновесия; прямой метод Ляпунова	42
2.3. Теорема Лагранжа – Дирихле	47
2.4. Нормальные формы Пуанкаре – Дюлака	47
2.5. Нормальная форма гамильтоновой системы вблизи положения равновесия	50
2.6. Введение в КАМ-теорию и в теорию устойчивости гамильтоновых систем	52
2.6.1. Теория Флоке — гамильтонов случай	52
2.6.2. Отображение последования Пуанкаре — гамильтонов случай	53
2.6.3. Четырёхмерный случай; применение к устойчивости	55
2.6.4. Изоэнергетическая теорема КАМ-теории	56
2.6.5. Теорема устойчивости Арнольда	57
2.7. Теорема Пуанкаре о возвращении	57
2.8. Примечания и источники	59
ГЛАВА 3. Введение в задачу N тел; случаи $N = 2$ и $N = 3$	61
3.1. Введение в задачу N тел	61
3.2. Классические первые интегралы	62
3.2.1. Сохранение импульса	62
3.2.2. Сохранение кинетического момента	63
3.2.3. Сохранение энергии, тождество Лагранжа и неравенство Сундмана	63
3.3. Однородность и теорема вириала	65
3.4. Задача двух тел	67
3.4.1. Сведение к относительному движению	67
3.4.2. Сведение к системе координат, связанной с центром масс	67
3.5. Движение в центральном поле	68

3.5.1. Закон площадей	69
3.5.2. Интегрирование уравнений	69
3.6. Задача Кеплера	71
3.6.1. Эллиптический случай	73
3.6.2. Словарь небесной механики	73
3.6.3. Уравнение Кеплера	73
3.7. Введение в задачу трех тел	74
3.8. Работы Эйлера и Лагранжа по задаче трех тел	75
3.9. Понятие центральной конфигурации	77
3.9.1. Решения Лагранжа	79
3.9.2. Теорема Эйлера – Мультона	80
3.9.3. Координаты Якоби для задачи трех тел	81
3.9.4. Ограниченная круговая задача	82
3.10. Введение в задачу о столкновениях; работы Сундмана; регуляризация двойных столкновений Леви-Чивиты	85
3.10.1. Изучение полных столкновений	86
3.10.2. Эвристическое представление регуляризации двойных столкновений в задаче трех тел	87
3.11. Примечания и источники	91
ГЛАВА 4. Поиск периодических траекторий	93
4.1. Построение периодических траекторий методом продолжения	94
4.2. Теорема центра Ляпунова – Пуанкаре в гамильтоновом случае	95
4.3. Применение к точкам либрации	96
4.4. Два примера применения метода продолжения в небесной механике	97
4.4.1. Орбиты Пуанкаре	97
4.4.2. Орбиты Хилла	98
4.5. Периодические решения и принцип наименьшего действия	99
4.6. Прямой метод расчета вариаций и его применение для поиска периодических траекторий	100
4.6.1. Введение	100
4.6.2. Уравнение Эйлера – Лагранжа на H^1	102
4.6.3. Полунепрерывные снизу функции и выпуклые функции	102
4.6.4. Понятие сильного потенциала и существование периодических траекторий для задачи двух тел	105
4.6.5. Периодические траектории для задачи N тел в рамках гипотезы сильного потенциала	107

4.6.6. Ньютоновский случай	108
4.7. Периодическое решение задачи трех тел равной массы	108
4.7.1. Описание орбиты «восьмерки»	108
4.7.2. Геометрия задачи и топологическая сфера	109
4.7.3. Построение траектории в форме восьмерки	112
4.7.4. Концепция хореографии	115
4.8. Примечания и источники	116
ГЛАВА 5. Управляемость в нелинейных системах и задача управления положением жесткого спутника	119
5.1. Управляемость системами с кусочно-постоянным управлением	119
5.2. Управляемость жестким спутником с помощью реактивных двигателей	124
5.2.1. Уравнения движения	124
5.2.2. Задача выбора представления	127
5.2.3. Свойства траекторий свободного движения	129
5.2.4. Необходимые и достаточные условия управляемости жестким спутником	131
5.3. Геометрическое построение закона управления в задаче управления ориентацией тела и локальная управляемость . .	133
5.4. Локальная управляемость	135
5.5. Управление ориентацией посредством последовательных вращений	138
5.6. Примечания и источники	140
ГЛАВА 6. Орбитальные перелеты	141
6.1. Введение	141
6.2. Моделирование задачи	141
6.3. Интеграл Лапласа и интегрирование уравнений Кеплера . . .	142
6.4. Орбитальные параметры	145
6.5. Разложение силы тяги	146
6.6. Метод вариации постоянных	147
6.7. Представление системы в равноденственных координатах . .	148
6.8. Вращающиеся координаты	150
6.9. Задача управляемости	150
6.9.1. Предварительные замечания	150
6.9.2. Структура алгебры Ли системы	151
6.9.3. Политика геометрического управления	154
6.10. Орбитальный переход методом стабилизации	155

6.10.1. ω -предельное множество и теорема устойчивости Ласалля	156
6.10.2. Стабилизация нелинейных систем применением теоремы Ласалля: метод Джурджевича–Куинна	157
6.10.3. Доказательство асимптотической устойчивости орбиты (c_T, L_T) методом Ласалля	158
6.10.4. Глобальная устойчивость	159
6.11. Принцип максимума и условия трансверсальности	160
6.12. Принцип максимума и субриманова задача с девиацией	162
6.12.1. Общий расчет экстремалей	162
6.12.2. Ломаные и особые экстремали	163
6.12.3. II-сингулярность и ее нильпотентная модель	164
6.12.4. Применение к размерности 4	166
6.13. Условия оптимальности второго порядка. Сопряженные и фокальные точки	172
6.13.1. Предварительные замечания	172
6.13.2. Применение к плоскому орбитальному переходу	174
6.14. Примечания и источники	176
ГЛАВА 7. Принцип максимума Понтрягина, принцип максимума с ограничениями на состояния и синтез оптимальных решений	177
7.1. Принцип максимума Понтрягина	178
7.1.1. Формулировка	178
7.1.2. Доказательство принципа максимума	179
7.1.3. Обобщение принципа максимума	192
7.2. Принцип максимума с ограничениями на состояние	196
7.2.1. Работы Вейерштрасса (1879 г.)	196
7.2.2. Метод множителей Лагранжа и теорема Куна–Таккера	202
7.2.3. Аффинный случай и принцип максимума Маурера	213
7.2.4. Локальная классификация синтезов минимальных времен для задач с ограничениями	218
7.3. Замечания и источники	227
ГЛАВА 8. Управление траекторией полета в атмосфере	229
8.1. Моделирование задачи входа в атмосферу	229
8.1.1. Описание задачи	229
8.1.2. Моделирование задачи	230
8.1.3. Силы	232
8.1.4. Система уравнений	233

8.1.5. Координаты Кеплера	234
8.1.6. Задача оптимального управления	236
8.1.7. Стратегия Харпольда и Грейвса	237
8.1.8. Числовые параметры	238
8.1.9. Понятие равновесной траектории	240
8.1.10. Редукция задачи. Упрощенная трехмерная модель . . .	241
8.2. Оптимальное управление и стабилизация в упрощенной трехмерной модели	242
8.2.1. Задача без ограничений	242
8.2.2. Задача с учетом ограничений на состояние	246
8.2.3. Стабилизация в окрестности номинальной траектории	250
8.3. Оптимальное управление в полной задаче	255
8.3.1. Экстремали задачи при отсутствии ограничений	257
8.3.2. Построение квазиоптимальной траектории	261
8.4. Примечания и источники	266
ГЛАВА 9. Численные методы и оптимальное управление	267
9.1. Введение	267
9.2. Методы первого порядка: простая и множественная пристрелка	268
9.2.1. Предварительные замечания	268
9.2.2. Метод простой пристрелки	269
9.2.3. Метод множественной пристрелки	271
9.2.4. Некоторые замечания	274
9.2.5. Метод продолжения	275
9.2.6. Применение к задаче плоского орбитального перехода	279
9.2.7. Применение к задаче входа в атмосферу	286
9.3. Методы второго порядка: теория сопряженных точек	288
9.3.1. Лагранжевы многообразия — уравнение Якоби	288
9.3.2. Методы расчета сопряженных времен	291
9.3.3. Сопряженные времена и оптимальное управление . . .	292
9.3.4. Применение в задаче орбитального перехода	304
9.3.5. Сопряженные времена для аффинных систем управ- ления	306
Литература	315
Предметный указатель	321