



А. П. АЛПАТОВ

ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ



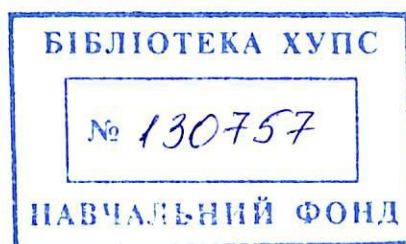
629.78
А 51

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

А. П. АЛПАТОВ

ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ПРОЕКТ
«НАУКОВА КНИГА»



В книге изложены подходы к решению основных задач динамики космических летательных аппаратов, которые имеют переменную конфигурацию и значительные абсолютные размеры. Рассмотрены различные способы управления как по характеру физической природы управляющих воздействий, так и по применяемым алгоритмам управления. Проанализированы тенденции развития перспективных космических аппаратов, в состав которых входят крупногабаритные антенны, радиотелескопы, концентраторы солнечного излучения. Приведены результаты анализа динамики существующих и перспективных космических летательных аппаратов.

Для специалистов, занимающихся автоматическим управлением космических аппаратов, а также для аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

У книзі викладено підходи до розв'язування основних завдань динаміки космічних літальних апаратів, які мають змінну конфігурацію і значні абсолютні розміри. Розглянуто різні способи керування як за характером фізичної природи керувальних дій, так і за застосованими алгоритмами керування. Проаналізовано тенденції розвитку перспективних космічних апаратів, до складу яких входять великогабаритні антени, радіотелескопи, концентратори сонячного випромінювання. Наведено результати аналізу динаміки існуючих і перспективних космічних літальних апаратів.

Для фахівців, що займаються автоматичним керуванням космічних апаратів, а також для аспірантів і студентів відповідних спеціальностей.

РЕЦЕНЗЕНТЫ :

член-корреспондент НАН Украины В.С. ГУДРАМОВИЧ
доктор технических наук, профессор Н.М. ДРОНЬ

*Рекомендовано к печати ученым советом
Института технической механики НАН Украины
и Государственного космического агентства Украины
(протокол № 8 от 14.10.2014 г.)*

*Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми
«Створення та розвиток науково-видавничого комплексу НАН України»*

Научно-издательский отдел
физико-математической и технической литературы
Редактор В.В. Вероцкая

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	13
1.1. Динамика космических объектов сложной конфигурации	13
1.2. Особенности математического моделирования пространственно развитых систем ..	17
1.3. Системы с неудерживающими связями	25
1.4. Упрощение уравнений динамики	30
ГЛАВА 2. ОРБИТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ	40
2.1. Основные понятия	40
2.2. Определение орбит	46
2.3. Возмущенное движение	48
2.4. Возмущенное движение космического летательного аппарата	50
2.5. Оптимальные импульсные маневры космического летательного аппарата	52
ГЛАВА 3. ДИНАМИКА УПРУГИХ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ	55
3.1. Уравнения движения элементов системы	55
3.2. Математическая модель упругого манипулятора	76
3.3. Задача о собственных колебаниях системы	83
3.4. Оценка влияния конструктивных параметров системы на динамические характеристики	89
ГЛАВА 4. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ	91
4.1. Пассивные магнитные системы успокоения космических аппаратов	91
4.2. Магнитная система успокоения с кулоновым трением	93
4.3. Модель системы с моментной характеристикой, содержащей падающие участки	99
4.4. Пассивная ориентация космических летательных аппаратов в геомагнитном поле ...	103
4.5. Анализ пространственного движения космического летательного аппарата	108
ГЛАВА 5. ПОДВИЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ	113
5.1. Определения и модели управляющих воздействий	114
5.2. Классификация задач	118
5.3. Устойчивость систем подвижного управления	128
5.4. Устойчивость в режиме циклических переключений	139
ГЛАВА 6. СИНТЕЗ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО УПРАВЛЕНИЯ	146
6.1. Построение программ переключения	146
6.2. Метод функций состояния	153
6.3. Синтез регулятора для сепаратных систем	167
6.4. Оптимизация параметров регулятора линейных нестационарных систем	176
6.5. Коррекция кинетического момента с помощью магнитного привода	178
6.6. Квазиэкстенсивное управление ориентацией	188

Г Л А В А 7. ПОДВИЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	195
7.1. Модель динамики ориентации и стабилизации космического аппарата	195
7.2. Модели ориентации при использовании различных исполнительных органов	204
7.3. Ориентация с помощью реактивных двигателей	207
7.4. Управление ориентацией космического аппарата с использованием электромаховичных двигателей	218
7.5. Одноосная ориентация космического аппарата с помощью магнитопривода	222
Г Л А В А 8. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ	235
8.1. Обзор проблемы	235
8.2. Обобщенная математическая модель	245
8.3. Управление многоэлементными космическими аппаратами линейной структуры	252
8.4. Динамика многоэлементных космических аппаратов замкнутой структуры	264
8.5. Стабилизация звездообразных многоэлементных космических аппаратов	266
8.6. Развертывание космической связки трех тел в поле центробежных сил	269
8.7. Гравитационная стабилизация спутника с использованием тросовой системы	279
8.8. Динамика систем тел с геометрически изменяемыми составляющими	285
8.9. Экспериментальное определение кинематических параметров тел тросовой системы при их отделении от базового аппарата	298
Г Л А В А 9. ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗВИТЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	309
9.1. Задачи динамики космических летательных аппаратов с пространственно развитыми периферийными элементами	309
9.2. Управление движением пространственно развитых механических систем	313
9.3. Управление формой больших отражающих поверхностей в космосе	316
9.4. Динамика несомых масс, установленных на выносных штангах космического аппарата	325
9.5. Крупногабаритные космические летательные аппараты для освещения поверхности планеты	330
9.6. Минимизация момента солнечного давления при ориентации крупногабаритного космического аппарата	336
9.7. Анализ способов управления ориентацией космической солнечной электростанции	340
9.8. Оптимальная фильтрация сигналов астродатчиков	349
Г Л А В А 10. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ	356
10.1. Особенности подвижного управления манипуляционными системами	356
10.2. Управление бортовым космическим манипулятором	361
10.3. Оценивание вектора состояния системы при подвижном наблюдении	370
10.4. Особенности синтеза исполнительной системы управления космическим манипулятором	373
10.5. Космические манипуляторы с упругими конструктивными элементами	386
Г Л А В А 11. ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ УВОДА ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С РАБОЧИХ ОРБИТ	396
11.1. Актуальность проблемы	396
11.2. Особенности взаимодействия электродинамических тросовых систем с физическими полями земли	424
11.3. Методика выбора параметров аэродинамической системы увода	427
11.4. Особенности бесконтактного управления движением фрагмента космического мусора при его увode с орбиты (проект LEOSWEEP)	431
СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	436
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	438
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	450

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
CHAPTER 1. THE DYNAMICS OF SPACECRAFT	13
1.1. Dynamics of complex configuration space objects	13
1.2. Mathematical modeling of the spatial development of systems	17
1.3. Systems with unilateral constraints	25
1.4. Simplifying dynamics equations	30
CHAPTER 2. THE ORBITAL MOTION	40
2.1. Base concepts	40
2.2. Determination of orbits	46
2.3. Perturbed motion	48
2.4. Perturbed motion of the spacecraft	50
2.5. Optimal pulse maneuvers of spacecraft	52
CHAPTER 3. DYNAMICS OF ELASTIC MULTIPLE SYSTEMS	55
3.1. The equations of motion of components	55
3.2. Mathematical model of the elastic manipulator	76
3.3. The problem of the natural vibrations of the system	83
3.4. Assessing the impact of design parameters on the dynamic characteristics of the system ...	89
CHAPTER 4. DYNAMICS OF SPACECRAFT WITH MAGNETIC CONTROL SYSTEMS	91
4.1. Passive magnetic spacecraft damping system	91
4.2. Magnetic damping system with Coulomb friction	93
4.3. Model of system with torque characteristics including falling portions	99
4.4. Passive orientation of spacecraft in the geomagnetic field	103
4.5. Analysis of the spatial motion of the spacecraft	108
CHAPTER 5. MOBILE CONTROL OF SPACECRAFT	113
5.1. Definitions and models of control actions	114
5.2. Classification of tasks	118
5.3. Stability of mobile control systems	128
5.4. Stability in the cyclic switching mode	139
CHAPTER 6. SYNTHESIS OF MOBILE CONTROL SYSTEMS	146
6.1. Building a program switch	146
6.2. Method of state functions	153
6.3. Synthesis of regulator for separate systems	167
6.4. Optimization of the regulator parameters of linear nonstationary systems	176
6.5. Correction of the angular momentum with a magnetic drive	178
6.6. Quasiextensive attitude control	188

Contents

CHAPTER 7. MOBILE CONTROL OF SPACECRAFT ORIENTATION	195
7.1. Model of dynamics of orientation and stabilization of spacecraft	195
7.2. Models of orientation using various executive devices	204
7.3. Orientation through jets	205
7.4. Spacecraft orientation control using electric flywheel-type drive	210
7.5. Uniaxial orientation of the spacecraft using magnetic conductor	222
CHAPTER 8. DYNAMICS OF SPACE TETHERED SYSTEMS	235
8.1. Problem Review	235
8.2. Generalized mathematical model	245
8.3. Control of multielement spacecraft linear structure	252
8.4. Dynamics of multielement closed structure spacecraft	264
8.5. Stabilizing starlike multielement spacecraft	266
8.6. Deploying ligament space of three bodies in the field of centrifugal forces	269
8.7. Gravitational stabilization of the satellite using a tethered system	279
8.8. Dynamics multibody systems with geometrically variable	285
8.9. Experimental determination of kinematic parameters of tethered system bodies in the time of their separation from the base unit	298
CHAPTER 9. DYNAMICS OF SPATIAL DEVELOPMENT OF SPACECRAFT	309
9.1. Problems of the dynamics of spacecraft with spatially developed peripheral elements	309
9.2. Motion control of the spatial development of mechanical systems	313
9.3. Control of the shape of large reflecting surfaces in space	316
9.4. Dynamics of weightless mass, placed on extension rods spacecraft	325
9.5. Large-size spacecraft to illuminate the surface of the planet	330
9.6. Solar pressure moment minimizing in the time of orientation large-size spacecraft	336
9.7. Analysis of ways to control the orientation of the space solar power plant	340
9.8. Optimal filtering of signals star tracker	349
CHAPTER 10. DYNAMICS OF SPACE MANIPULATORS	356
10.1. Features of mobile control manipulators systems	356
10.2. Control of board space manipulator	361
10.3. Estimation of the state vector of the system at the mobile monitoring	370
10.4. Features of the synthesis of the executive control of space manipulator	373
10.5. Space manipulators with elastic structural elements	386
CHAPTER 11. WITHDRAWAL MODES FOR SPACE DEBRIS FRAGMENT FROM WORKING ORBITS	396
11.1. Actuality of the problem	396
11.2. Features of electrodynamic tethered systems interaction with the physical Earth fields	424
11.3. Methods of choosing the parameters for aerodynamic system of withdrawal	427
11.4. Features of non-contact motion control space debris during de-orbit (project LEOSWEEP)	431
MAJOR ABBREVIATION	436
REFERENCES	438
BIBLIOGRAPHY	450



Алпатов Анатолий Петрович

Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Международной академии астронавтики. Заслуженный деятель науки и техники Украины. После окончания Казанского авиационного института по специальности «динамика полета и управление» работал в КБ «Южное» (г. Днепропетровск). В настоящее время руководит отделом системного анализа и проблем управления Института технической механики НАН Украины и Государственного космического агентства Украины. Основное направление научных исследований связано с разработкой теории и методов моделирования движения сложных механических систем в условиях космического пространства. Разработал теорию подвижного управления космическими летательными аппаратами, математические модели динамики пространственно-развитых механических систем с упругими связями, включая манипуляционные системы, космические тросовые системы и солнечные электростанции космического базирования. Автор и соавтор 260 научных публикаций, 15 монографий, 30 патентов и изобретений. Большое внимание уделяет педагогической работе. Создал кафедру медицинской кибернетики в Днепропетровском медицинском институте. Профессор кафедры специализированных компьютерных систем Днепропетровского химико-технологического университета. Подготовил 3 докторов и 9 кандидатов наук. Был членом секции Научного совета АН СССР по проблемам управления движением и навигации, членом Национального комитета Украинской ассоциации автоматического управления IFAC. В настоящее время член Международного комитета по проблемам засорения космического пространства.

