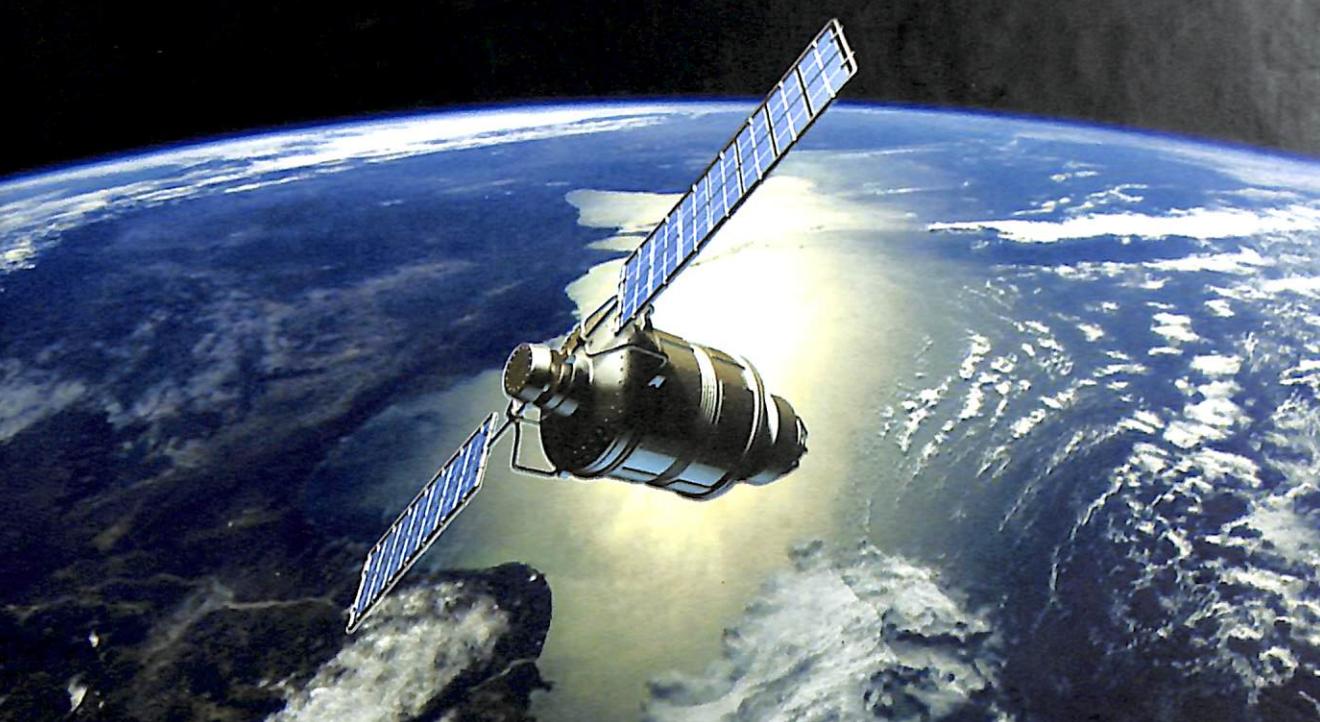




А. П. АЛПАТОВ

# ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ



629.78  
A 51

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

А. П. АЛПАТОВ

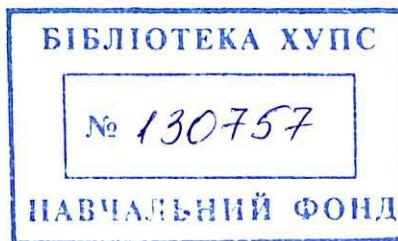
---

# ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

---

ПРОЕКТ  
«НАУКОВА КНИГА»

---



A 1 2 5 2 3 0

УДК 531.39

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 великовагові 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

ISBN 978-966-00-1520-3

© А.П. Алпатов, 2016  
© НПП «Видавництво «Наукова думка»  
НАН України», дизайн, 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>ГЛАВА 1. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 2. ОРБИТАЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 3. ДИНАМИКА УПРУГИХ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 4. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МАГНИТНЫМИ СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 5. ПОДВИЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 6. СИНТЕЗ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	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

## Оглавление

---

<b>ГЛАВА 7. ПОДВИЖНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ .....</b>	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
<b>ГЛАВА 8. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ .....</b>	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. Разворачивание 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 систе- мы при их отделении от базового аппарата .....	298
<b>ГЛАВА 9. ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗВИТЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ....</b>	309
9.1. Задачи динамики космических летательных аппаратов с пространственно разви- тыми 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 поверхнос- ти 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
<b>ГЛАВА 10. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКИХ МАНИПУЛЯТОРОВ .....</b>	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 мани- пулятором .....	373
10.5. Космические манипуляторы с упругими конструктивными элементами .....	386
<b>ГЛАВА 11. ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ УВОДА ФРАГМЕНТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА С РАБОЧИХ ОРБИТ</b>	396
11.1. Актуальность проблемы .....	396
11.2. Особенности взаимодействия электродинамических тросовых систем с физиче- скими полями земли .....	424
11.3. Методика выбора параметров аэродинамической системы увода .....	427
11.4. Особенности бесконтактного управления движением фрагмента космического мусора при его уводе с орбиты (проект LEOSWEEP) .....	431
<b>СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	436
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	438
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	450

# CONTENTS

---

FOREWORD .....	3
INTRODUCTION .....	5
<b>CHAPTER 1. THE DYNAMICS OF SPACECRAFT .....</b>	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
<b>CHAPTER 2. THE ORBITAL MOTION .....</b>	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
<b>CHAPTER 3. DYNAMICS OF ELASTIC MULTIPLE SYSTEMS .....</b>	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
<b>CHAPTER 4. DYNAMICS OF SPACECRAFT WITH MAGNETIC CONTROL SYSTEMS .....</b>	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
<b>CHAPTER 5. MOBILE CONTROL OF SPACECRAFT .....</b>	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
<b>CHAPTER 6. SYNTHESIS OF MOBILE CONTROL SYSTEMS .....</b>	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

---

<b>CHAPTER 7. MOBILE CONTROL OF SPACECRAFT ORIENTATION</b> .....	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 electrics flywheel-type drive .....	210
7.5. Uniaxial orientation of the spacecraft using magnetic conductor .....	222
<b>CHAPTER 8. DYNAMICS OF SPACE TETHERED SYSTEMS</b> .....	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
<b>CHAPTER 9. DYNAMICS OF SPATIAL DEVELOPMENT OF SPACECRAFT</b> .....	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
<b>CHAPTER 10. DYNAMICS OF SPACE MANIPULATORS</b> .....	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
<b>CHAPTER 11. WITHDRAWAL MODES FOR SPACE DEBRIS FRAGMENT FROM WORKING ORBITS</b> .....	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
<b>MAJOR ABBREVIATION</b> .....	436
<b>REFERENCES</b> .....	438
<b>BIBLIOGRAPHY</b> .....	450

## 850-00 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.

