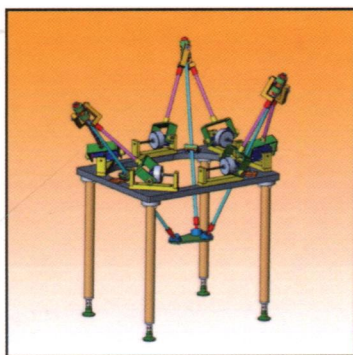


# РОБОТОТЕХНИКИ И МЕХАТРОНИКИ

Механизмы  
перспективных  
робототехнических  
систем

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
В.А. ГЛАЗУНОВА, С.В. ХЕЙЛО



Дипломант конкурса АСКИ  
«Лучшие книги года – 2020»



# **М. И. Р.** **робототехники** **и мехатроники**

**Механизмы  
перспективных  
робототехнических  
систем**

под редакцией  
В.А. Глазунова, С.В. Хейло

**ТЕХНОСФЕРА**  
Москва  
2021

**УДК 681.5+007.52**  
**ББК 32.816**  
**М55**

*Дипломант конкурса Ассоциации книгоиздателей России  
«Лучшие книги года – 2020» в номинации  
«Лучшая книга по естественным наукам, технике и медицине»*

**Рецензенты:**

*Н.П. Алёшин – академик РАН, д.т.н. (МГТУ им Н.Э. Баумана)*

*А.С. Дорохов – член-корреспондент РАН, д.т.н.*

*(Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ»)*

**M55 Механизмы перспективных робототехнических систем**

**Под редакцией В.А. Глазунова, С.В. Хейло**

**М.: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 296 стр. ISBN 978-5-94836-604-3**

Данная монография является продолжением предыдущей работы «Новые механизмы в современной робототехнике». Представлены вопросы структурного синтеза, кинематики и динамики новых механизмов робототехнических устройств, а также задачи управления. Кроме того, приведен обзор современных робототехнических систем для различных технических применений.

Представленные исследования проведены авторами различных организаций: ИМАШ РАН, ИКТИ РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РГУ им. А.Н. Косыгина, ЮЗГУ, МАИ, научно-производственной компанией «Шторм», компанией «Ассистирующие хирургические технологии».

Книга предназначена для научных работников, инженеров, аспирантов, студентов, занимающихся вопросами робототехники, теории механизмов и машин.

**УДК 681.5+007.52**  
**ББК 32.816**

© Алёшин А.К., Антонов А.В., Борисов В.А., Глазунов В.А., Зимин В.Н., Каганов Ю.Т., Карпенко А.П., Лесков А.Г., Нахушев Р.С., Нестеров В.А., Орлов А.В., Пушкарь Д.Ю., Рашоян Г.В., Серков Н.А., Скворцов С.А., Филиппов Г.С., Хейло С.В., Царьков А.В., Шалюхин К.А., Шептунов С.А., Шолохов М.А., Яцун А.С., Яцун С.Ф., 2020  
© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2020

**ISBN 978-5-94836-604-3**

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>8</b>
-------------------------	----------

## **ГЛАВА 1**

<b>МАНИПУЛЯТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКИХ ШАРНИРАХ ДЛЯ МИКРОНАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ.....</b>	<b>9</b>
<i>(В.А. Глазунов, А.В. Орлов, А.К. Алешин, Н.А. Серков)</i>	

1.1. Введение.....	9
1.2. Гибкие шарниры .....	11
1.3. Еще один шаг вглубь. Понижающий редуктор шага.....	25
1.4. Выводы.....	34
Литература.....	34

## **ГЛАВА 2**

<b>РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ В СВАРКЕ И РОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ .....</b>	<b>36</b>
<i>(М.А. Шолохов, С.В. Хейло, А.В. Царьков)</i>	

2.1. Общая классификация сварных конструкций .....	38
2.2. Манипуляционные системы сварочных роботов.....	40
2.3. Вспомогательное оборудование (позиционеры).....	41
2.4. Вспомогательное оборудование для расширения рабочей зоны манипуляторов промышленных сварочных роботов.....	45
2.5. Позиционеры с шестью степенями свободы .....	48
2.6. Применение роботов в механизмах относительного манипулирования .....	50
Литература.....	51

## **ГЛАВА 3**

<b>МЕХАНИЗМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ДВИГАТЕЛЯМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ ВНЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ .....</b>	<b>53</b>
<i>(А.В. Антонов, В.А. Глазунов)</i>	

3.1. Решение обратной задачи о положении .....	57
3.2. Решение прямой задачи о положении .....	59
3.2.1. Геометрический способ .....	59

3.2.2. Использование кинематических уравнений связи .....	61
3.3. Решение задач о скорости .....	62
3.3.1. Решение обратной задачи о скорости .....	63
3.3.2. Решение прямой задачи о скорости.....	63
3.4. Исследование рабочих зон механизма.....	64
3.4.1. Построение рабочей зоны постоянной ориентации .....	65
3.4.2. Построение рабочей зоны постоянного положения .....	68
3.4.3. Экспериментальная оценка рабочих зон.....	71
Заключение .....	82
Литература.....	83

#### **ГЛАВА 4**

### **РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ .....**

86

(Г.С. Филиппов, А.К. Алешин, Г.В. Рашоян,  
С.А. Скворцов, К.А. Шалюхин)

4.1. Синтез механизмов параллельно-последовательной структуры .....	87
4.2. Анализ и экспериментальные исследования механизмов .....	93
Литература.....	108

#### **ГЛАВА 5**

### **АНАЛИТИКО-ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ КИНЕМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ АВИАЦИОННЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....**

111

(В.А. Нестеров)

5.1. Основные и дополнительные условия синтеза плоских рычажных механизмов .....	114
5.1.1. Цель кинематического синтеза рычажного механизма .....	114
5.1.2. Основные условия синтеза .....	115
5.1.3. Дополнительные условия синтеза.....	118
5.2. Постановка задачи синтеза рычажных механизмов установок ЛА.....	119
5.2.1. Структура конструкции установки .....	119
5.2.2. Основные условия синтеза .....	120
5.3. Аналитикооптимизационный метод синтеза рычажных механизмов установок ЛА .....	122
5.3.1. Условия синтеза в форме уравнений и неравенств .....	122
5.3.2. Вычисляемые и варьируемые параметры механизма.....	123
5.3.3. Целевая функция .....	124

5.3.4. Общая структура алгоритма .....	127
5.3.5. Особенности целевой функции .....	129
5.4. Синтез восьмизвенного механизма с качающимся цилиндром .....	130
5.4.1. Уточнение постановки задачи .....	130
5.4.2. Расчет вычисляемых параметров .....	133
5.4.3. Условия синтеза в форме неравенств .....	136
5.4.4. Построение целевой функции .....	136
5.4.5. Числовой пример .....	138
Заключение .....	139
Литература .....	139

## ГЛАВА 6

### КОНТРОЛЛЕР ХИРУРГА ДЛЯ АССИСТИРУЮЩЕГО ХИРУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА .....

(*Р.С. Нахушев, Д.Ю. Пушкарь, С.А. Шептунов*)

6.1. Контроллеры для роботохирургии, представленные на рынке .....	145
6.2. Контроллеры для роботохирургии. Идеи и патенты .....	151
6.3. Представляемый контроллер хирурга .....	159
6.4. Контроллер руки .....	161
6.5. Контроллер запястья .....	170
6.6. Контроллер кисти .....	178
6.7. Цифровой блок управления контроллера хирурга .....	189
Пример реализации контроллера хирурга .....	189

## ГЛАВА 7

### МАНИПУЛЯЦИОННЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ .....

(*А.Г. Лесков, В.Н. Зимин*)

7.1. Робототехника и орбитальные космические станции .....	193
7.2. КМР для сборки и обслуживания ОКС .....	197
7.3. Проект КМР «Робонавт» .....	204
7.4. Другие проекты .....	206
7.5. Задачи, решаемые КМР МКС .....	206
7.5.1. Оперативное использование SSRMS .....	206
7.5.2. Оперативное использование Dextre .....	208
7.5.2.1. Монтажные операции, выполненные Dextre на МКС .....	209
7.5.2.2. Операция дозаправки спутника, выполненная Dextre на МКС .....	211
7.5.2.3. Операция саморемонта Dextre на МКС .....	215



7.5.3. Оперативное использование ERA.....	216
7.5.4. Оперативное использование JEMRMS .....	216
7.6. Описание дизайна и параметров космических роботов МКС.....	216
7.6.1. SSRMS.....	216
7.6.2. ERA.....	217
7.6.3. SPDM (Dextre) .....	219
7.6.4. JEMRMS .....	220
7.6.5. Характеристики роботов МКС .....	221
Литература.....	222

## ГЛАВА 8

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ

### ЭКЗОСКЕЛЕТНЫХ СИСТЕМ ..... 224

(С.Ф. Яцун, А.С. Яцун)

Введение .....	224
8.1. Основные понятия и структура БТШС .....	225
8.2. Описание процесса поднятия грузов человеком.....	226
8.3. Требования, предъявляемые к экзоскелетной человеко-машинной системе .....	227
8.4. Описание и структура ЧМИ.....	228
8.5. Математическая модель БТШС.....	230
8.5.1. Кинематическая модель БТШС.....	232
8.5.2. Динамическая модель БТШС .....	235
Заключение .....	240
Литература.....	241

## ГЛАВА 9

### СИНТЕЗ МНОГОСЕКЦИОННЫХ

### РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ

### СТРУКТУРЫ ТИПА «ХОБОТ» ..... 243

(А.П. Карпенко, Ю.Т. Каганов)

Введение .....	243
9.1. Определение формы продольного сечения ММТХ .....	245
9.2. Определение длин секций ММТХ.....	247
9.3. Определение геометрических параметров секций ММТХ .....	250
9.4. Планирование целевой конфигурации ММТХ.....	253
9.5. Многоагентный подход к управлению ММТХ .....	258
Заключение .....	261
Литература.....	263

<b>ГЛАВА 10</b>	
<b>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ</b>	
<b>МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ</b>	
<b>С ГИБКИМИ ЗВЕНЬЯМИ.....</b>	<b>265</b>
<i>(В.А. Борисов)</i>	
10.1. Синтез механизмов параллельной структуры с четырьмя степенями свободы.....	265
10.2. Разработка классификации манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями.....	275
10.3. Кинематический анализ манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями.....	280
10.3.1. Решение задачи о положениях.....	280
10.3.2. Решение задачи о положениях с учетом упруго-динамических свойств гибких звеньев.....	282
10.3.3. Решение задачи о скоростях.....	284
10.4. Динамический анализ манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями.....	285
10.4.1. Анализ сил и моментов.....	286
10.4.2. Определение сил, действующих на гибкие звенья.....	286
10.5. Примеры применения манипуляционных механизмов параллельной структуры с гибкими звеньями в технических решениях.....	287
Литература.....	294