

О. А. Толпегин



МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИГР

НАУКА

О. А. Толпегин

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИГР**

Санкт-Петербург
«Наука»
2021

УДК 681.5
ББК 32.965
Т52

Толпегин О. А. Методы управления движением беспилотных летательных аппаратов на основе теории дифференциальных игр. — СПб.: Наука, 2021. — 332 с.

ISBN 978-5-02-040513-4

Книга посвящена методам решения прикладных задач управления движением беспилотных летательных аппаратов на основе теории дифференциальных игр. Особое внимание уделяется численным методам решения. Приводятся примеры и вычислительные алгоритмы, позволяющие лучше понять возможности теории и приобрести опыт ее практического применения.

Для инженеров и научных работников, специализирующихся в области проектирования беспилотных летательных аппаратов. Может быть полезна студентам, магистрантам и аспирантам вузов соответствующего профиля.

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки
и техники РФ, главный научный сотрудник АО «НПП «Радар ММС»,
академик РАН *В. А. Петров*

д-р техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник АО «Концерн «Гранит-Электрон»,
член-корреспондент РАН *С. Н. Шаров*

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 20-18-00031, не подлежит продаже



ISBN 978-5-02-040513-4

© Толпегин О. А., 2021
© Издательство «Наука», 2021
© Палей П., оформление, 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Глава 1. Постановка задач управления движением летательных аппаратов в виде дифференциальных игр | 6 |
| 1.1. Задача синтеза управления угловым движением летательного аппарата при действии возмущений | 6 |
| 1.2. Задача синтеза системы наведения летательного аппарата на маневрирующую цель | 8 |
| 1.3. Конфликтная задача сближения с учетом ошибок измерений фазового вектора маневрирующей цели | 11 |
| 1.4. Постановка антагонистической дифференциальной игры. Классификация дифференциальных игр | 13 |
| 1.5. Стратегии игроков. Выбор оптимальных стратегий ... | 17 |
| 1.6. Методы решения дифференциальных игр | 22 |
| Глава 2. Области достижимости беспилотных летательных аппаратов | 26 |
| 2.1. Общая характеристика областей достижимости и их применение | 26 |
| 2.2. Методы расчета областей достижимости | 31 |
| 2.3. Область достижимости в вертикальной плоскости | 33 |
| 2.4. Область достижимости в вертикальной плоскости с учетом ошибок измерений | 41 |
| 2.5. Аппроксимация области достижимости в пространстве угловых скоростей с помощью эллипсоидов | 45 |
| 2.6. Области достижимости летательного аппарата с постоянным ограничением на аэродинамическое управление . | 55 |
| 2.7. Область достижимости летательного аппарата с переменной областью управления | 70 |
| 2.8. Приближенный расчет областей достижимости летательного аппарата с аэродинамическим управлением ... | 81 |
| 2.9. Область достижимости летательного аппарата с аэродинамическим управлением и блоком корректирующих микродвигателей | 84 |

| | |
|--|------------|
| 2.10. Область достижимости для системы стабилизации нормальной перегрузки летательного аппарата при действии возмущений | 99 |
| Глава 3. Методы синтеза управления летательного аппарата в игровой постановке на основе динамического программирования | 110 |
| 3.1. Основное уравнение дифференциальной игры | 110 |
| 3.2. Синтез линейной системы с квадратичным критерием качества | 114 |
| 3.3. Синтез системы стабилизации летательного аппарата в вертикальной плоскости | 117 |
| 3.4. Метод характеристик | 124 |
| 3.5. Стабилизация движения крена при наличии возмущений | 128 |
| 3.6. Численные методы решения уравнения Беллмана—Айзекса | 136 |
| 3.7. Стабилизация углового положения летательного аппарата при отсутствии возмущений | 149 |
| 3.8. Стабилизация углового положения летательного аппарата при наличии возмущений | 157 |
| Глава 4. Методы синтеза управления в игровой постановке на основе решения вспомогательных задач программного управления и расчета областей достижимости | 165 |
| 4.1. Необходимые условия оптимальности в форме, аналогичной принципу максимума Л. С. Понтрягина | 165 |
| 4.2. Синтез системы наведения по лучу на маневрирующую цель | 169 |
| 4.3. Определение седловой точки в нелинейной игровой задаче преследования | 176 |
| 4.4. Метод экстремального прицеливания Н. Н. Красовского | 184 |
| 4.5. Оптимальное преследование цели в гравитационном поле | 194 |
| 4.6. Стабилизация движения крена при наличии возмущений на основе расчета областей достижимости | 200 |
| 4.7. Синтез следящей системы при действии возмущений .. | 211 |
| Глава 5. Синтез оптимального управления на основе прогнозирования минимаксного промаха с использованием областей достижимости | 221 |
| 5.1. Приближенное решение конфликтной задачи сближения—уклонения | 221 |
| 5.2. Синтез оптимального управления преследователя с учетом запаздывания получения информации о параметрах движения маневрирующей цели | 229 |

| | |
|--|------------|
| 5.3. Бескоалиционный дифференциально-игровой метод сближения группы беспилотных летательных аппаратов с группой целей | 234 |
| 5.4. Коалиционный дифференциально-игровой метод сближения группы беспилотных летательных аппаратов с целью | 240 |
| 5.5. Уклонение беспилотного летательного аппарата от преследователя с учетом попадания в заданную область .. | 248 |
| 5.6. Дифференциально-игровой алгоритм компенсации действия возмущений при управлении беспилотным летательным аппаратом | 255 |
| Глава 6. Информационная игровая задача сближения—уклонения | 264 |
| 6.1. Постановка задачи | 264 |
| 6.2. Метод решения | 265 |
| 6.3. Минимаксная фильтрация параметров движения спускаемого летательного аппарата с использованием линейной модели движения | 271 |
| 6.4. Минимаксная фильтрация параметров движения спускаемого летательного аппарата с использованием нелинейной модели движения | 283 |
| 6.5. Область достижимости летательного аппарата с учетом ошибок измерений | 301 |
| 6.6. Конфликтная задача сближения—уклонения с учетом ошибок измерения фазового вектора маневрирующей цели | 306 |
| 6.7. Минимаксная фильтрация параметров движения спускаемого летательного аппарата на основе нелинейной модели движения с коррекцией от спутниковой навигационной системы | 317 |
| Литература | 323 |