

А.В. Данеев, В.Н. Сизых



**МЕТОДОЛОГИЯ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АЛГОРИТМИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННЫМИ
ТРАНСПОРТНЫМИ
СРЕДСТВАМИ
НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ**

НАУКА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

А.В. Данеев, В.Н. Сизых

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ
СРЕДСТВАМИ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ
НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ**

МОСКВА НАУКА 2021

УДК 681.511.4

ББК 39.17

Д46



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований,
по проекту № 21-11-00007\21, не подлежит продаже*

Рецензенты:

доктор физико-математических наук *А.В. Лакеев*

доктор физико-математических наук *В.А. Русанов*

Данеев А.В., Сизых В.Н.

Методология проектирования алгоритмического обеспечения интегрированных систем управления авиационными транспортными средствами на основе уравнений нелинейной динамики: монография / А.В. Данеев, В.Н. Сизых. – М.: Наука, 2021. 295 с. – ISBN 978-5-02-040876-0

Книга посвящена проблемам разработки нетрадиционных адаптивных систем управления транспортными средствами на основе концепций обратных задач динамики и для класса абсолютно устойчивых динамических систем. Эта проблема напрямую связана с решением задач синтеза на основе нелинеаризованных уравнений динамики транспортных средств, а также разработкой их алгоритмического и программного обеспечения. Дан подробный анализ существующих методов проектирования систем управления воздушным транспортным средством как сложной многомерной системой. В работе приведено алгоритмическое обеспечение интегрированной двухуровневой нелинейной системы управления самолетом.

Для специалистов в области динамики летательных аппаратов, других разделов мехатроники, робототехники и прикладной математики, а также для аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-02-040876-0

© Данеев А.В., Сизых В.Н., 2021

© ФГУП Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2021

Оглавление

Условные обозначения	7
Введение	9
Глава 1. Современное состояние разработок бортовых систем управления.....	17
1.1. Краткий обзор методов оптимального управления	17
1.1.1. Принципы управления	17
1.1.2. Анализ существующих подходов к проектированию алгоритмического обеспечения систем автоматического управления ВС	19
1.1.3. Физические принципы построения моделей управления... ..	24
1.2. Концепция и принципы построения нелинейных интегрированных систем автоматического управления	26
1.3. Метод и алгоритм аналитического конструирования сингулярно-вырожденных задач управления	30
1.3.1. Формулировка и метод решения задачи АКОР с сингулярностью $u = 0$	30
1.3.2. Алгоритм синтеза оптимальных начальных условий	38
1.4. Методика синтеза параметрически самоорганизующихся регуляторов для систем автоматического управления полетом самолета.....	42
1.4.1. Инвариантная стратегия управления в вырожденной задаче аналитического конструирования регуляторов	42
1.4.2. Вариационный подход к проблеме инвариантности.....	46
Глава 2. Технология проектирования алгоритмического обеспечения нелинейной ИСУ на основе оптимизации траекторного уровня управления пространственным движением воздушного судна.....	50
2.1. Описание математической модели ВС как объекта управления... ..	50
2.2. Декомпозиция математической модели ВС по уровням управления	57

2.3. Оптимизация процессов управления на траекторном уровне на основе метода АКОР в вырожденной формулировке	59
2.3.1. Формы аналитического решения для траекторного уровня.....	60
2.3.2. Аналитическая реализация алгоритма оптимизации начальных условий с нечетко заданным непрерывным параметром.....	63
2.4. Оптимизация процессов управления на траекторном уровне на основе концепции обратных задач динамики.....	71
2.4.1. Формулировка и решение обратной задачи динамики для траекторного контура по уравнениям линейных скоростей.....	71
2.4.2. Формулировка и решение обратной задачи динамики для траекторного контура с декомпозицией пространственного движения ВС по горизонтали	75
2.5. Управление на пилотажном уровне на основе решения прямой задачи динамики	83
Глава 3. Технология проектирования алгоритмического обеспечения нелинейной ИСУ на основе оптимизации пилотажного уровня управления пространственным движением воздушного судна.....	86
3.1. Оптимизация процессов управления на пилотажном уровне по методике последовательной оптимизации	86
3.1.1. Управление пилотажным контуром на основе метода обратных задач динамики	86
3.1.2. Решение двухточечной краевой задачи оптимизации пилотажного контура.....	90
3.2. Оптимизация процессов управления на пилотажном уровне на основе метода обратной задачи динамики в формулировке П. Д. Крутько	94
3.2.1. Формулировка и решение обратной задачи динамики для пилотажного контура.....	97
3.2.2. Выбор параметров эталонной модели вращательного движения.....	106
3.3. Алгоритм управления поступательными движениями ЛА на основе решения прямой задачи динамики.....	108
3.4. Алгоритм управления траекторным движением воздушного судна на основе решения прямой задачи динамики.....	111
3.5. Функциональные схемы организации процесса управления пространственным движением ВС на основе оптимизации параметров пилотажного и траекторного контуров.....	113
3.6. Исследование разработанных алгоритмов управления на пилотажном уровне.....	116

3.7. Результаты исследования алгоритмов управления на траекторном уровне	118
3.8. Исследование собственных свойств движения воздушного судна через первые и общий интегралы движения динамических уравнений Эйлера.....	126
3.9. Исследование разработанных алгоритмов управления вращательным движением самолета ИЛ-76.....	137
Глава 4. Технология проектирования алгоритмического обеспечения адаптивными системами управления физическими объектами и технологическими процессами на основе нейроморфных структур	150
4.1. Кибернетический подход к организации оперативного нейронного управления технологическим процессом.....	153
4.2. Постановка задачи нейронного управления	155
4.3. Свойства функции активации.....	157
4.4. Прямой метод Ляпунова исследования абсолютной устойчивости	160
4.5. Настройка нейронной сети по функции активации.....	168
4.6. Параметрический синтез стабилизирующего управления на основе метода скоростного градиента и теории скользящих режимов.....	170
4.7. Инициализация начальных условий	176
Глава 5. Технология проектирования алгоритмического обеспечения нелинейных интегрированных систем автоматического управления по методике АКОР в вырожденной формулировке.....	178
5.1. Основные этапы предлагаемой методики	178
5.1.1. Преобразование модели системы к канонической модели Ассео.....	179
5.1.2. Решение обратной задачи оптимального управления по методу АКОР	182
5.2. Разработка регуляторов комплексной системы и управления самолетом	186
5.2.1. Методика построения параметрически самоорганизующихся регуляторов для бокового канала САУ	186
5.2.2. Методика построения параметрически самоорганизующихся регуляторов для продольного канала САУ	191
5.2.3. Синтез автомата перекрестных связей путем поэтапной оптимизации по методике АКОР.....	193
5.3. Анализ разработанных законов управления	197
5.4. Алгоритмическое и программное обеспечение для разработки и исследования системы управления по предполагаемой методике	200

Глава 6. Результаты численного исследования разработанных алгоритмов.....	204
6.1. Исследование алгоритмов управления в идеальных условиях...	204
6.1.1. Исследование алгоритмов управления продольного движения.....	204
6.1.2. Исследование алгоритмов управления бокового движения.....	211
6.1.3. Результаты моделирования взаимосвязанного продольного и бокового движения.....	221
6.2. Исследование алгоритмов управления с учетом реальных условий функционирования системы.....	221
6.2.1. Статистическое моделирование при реакции на турбулентность атмосферы.....	222
6.2.2. Моделирование работы системы с учетом погрешностей датчиков информации.....	226
6.2.3. Моделирование работы системы с учетом рулевого привода.....	230
6.3. Исследование влияния параметрических возмущений на функционирование системы.....	232
6.4. Рекомендации по обоснованию структуры предлагаемой комплексной системы управления с использованием предлагаемых алгоритмов.....	239
6.5. Нечеткое управление человеко-машинной системой на основе энтропийного подхода и антропоцентрической модели оператора.....	242
6.5.1. Энтропийная формулировка задачи управления.....	242
6.5.2. Вычисление резервного времени на принятие решения по критерию статистической устойчивости.....	244
6.5.3. Методология оценки опасных ситуаций.....	245
Литература.....	252
Приложения.....	275
Приложение А. Аэродинамические коэффициенты модели пространственного движения летательного аппарата.....	281
Приложение Б. Параметры и аэродинамические коэффициенты гипотетического самолета.....	284
Приложение В. Листинг программы на языке MATLAB для вычисления коэффициентов регулятора.....	294