

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩЕЕ ПРЕДИСЛОВИЕ К УЧЕБНИКУ	5
ВВЕДЕНИЕ К 4-МУ ТОМУ	11
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ АББРЕВИАТУР	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	18
ГЛАВА 1. ВАРИАЦИОННОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ	21
1.1. НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ЭКСТРЕМУМА ФУНКЦИОНАЛА	21
1.1.1. Функциональные пространства	22
1.1.2. Дифференциал функционала	23
1.1.3. Простейшая задача вариационного исчисления	26
1.1.4. Вариационная задача с n неизвестными функциями	30
1.2. Задача с подвижными концами. Условия ВЕЙЕРШТРАССА–ЭРДМАНА	31
1.2.1. Общая формула вариации функционала	31
1.2.2. Задача с подвижными концами	33
1.2.3. Условия Вейерштрасса–Эрдмана	35
1.3. НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ВЕЙЕРШТРАССА СИЛЬНОГО МИНИМУМА ФУНКЦИОНАЛА	36
1.4. Задачи на условный минимум	38
1.5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ВАРИАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ	41
1.5.1. Формулировка задачи оптимального управления	41
1.5.2. Необходимое условие экстремума	44
1.5.3. Необходимые условия Вейерштрасса	50
ГЛАВА 2. ПРИНЦИП МАКСИМУМА ПОНТРЯГИНА	51
2.1. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ В ФОРМЕ ПРИНЦИПА МАКСИМУМА	51
2.1.1. Задача оптимального управления	51
2.1.2. Необходимое условие оптимальности	54
2.2. Задача с подвижными концами. ПРИНЦИП МАКСИМУМА ДЛЯ НЕАВТОНОМНЫХ СИСТЕМ	65
2.2.1. Задача с закрепленным временем	65
2.2.2. Задача с подвижными концами	66
2.2.3. Неавтономный случай	71
2.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ	72
2.3.1. Максимизация функции Гамильтона	72
2.3.2. Теорема о числе переключений	74
2.3.3. Достаточные условия оптимальности	76
2.4. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	84

ГЛАВА 3. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	91
3.1. Синтез оптимального управления методом фазового пространства	91
3.1.1. Постановка задачи синтеза	91
3.1.2. Синтез оптимального управления	93
3.1.3. Обобщение задачи синтеза	100
3.2. Аппроксимация поверхности переключения	103
3.3. Ошибки слежения в оптимальных по быстродействию САУ	108
3.4. Приближенный способ учета малых постоянных времени	113
ГЛАВА 4. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА	121
4.1. Дискретный многошаговый процесс принятия решений	121
4.2. Принцип оптимальности. Основное функциональное уравнение Беллмана	122
4.3. Метод динамического программирования для непрерывных систем	127
4.3.1. Автономная система	127
4.3.2. Неавтономная система	132
4.4. Задача об аналитическом конструировании регулятора	133
4.4.1. Автономная система	133
4.4.2. Неавтономная система	137
4.5. Связь между принципом максимума и динамическим программированием	139
ГЛАВА 5. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АППАРАТА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	141
5.1. Постановка задачи оптимизации систем автоматического управления	142
5.2. Системы оптимального программного управления и оптимальные системы, работающие по принципу обратной связи	147
5.3. Управляемость и наблюдаемость систем	150
5.3.1. Управляемость систем	150
5.3.2. Наблюдаемость систем	158
5.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ: РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММНЫХ УПРАВЛЕНИЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ	165
5.4.1. Метод и общий алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ при описании объектов интегральными уравнениями и сеточно-матричными операторами	174
5.4.2. Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ по критерию минимальной энергии	177
5.4.3. Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ по критерию максимального быстродействия	195

5.4.4.	Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ по критерию минимального расхода топлива.....	208
5.5.	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ: РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММНЫХ УПРАВЛЕНИЙ И ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ	211
5.5.1.	Общий алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ методами математического программирования с использованием проекционно-матричных операторов.....	216
5.5.2.	Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ стационарных линейных объектов по критерию минимальной энергии.....	224
5.5.3.	Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ нестационарных линейных объектов по критерию минимальной энергии.....	251
5.5.4.	Алгоритм расчета программного управления, обеспечивающего экстремальное значение заданных фазовых координат	275
5.5.5.	Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ по критерию максимального быстродействия	283
5.5.6.	Алгоритм построения оптимальных программных управлений и оптимальных программ по критерию минимального расхода топлива.....	306
5.6.	ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА МОМЕНТОВ.....	310
5.6.1.	Формулировка проблемы моментов и ее решение	311
5.6.2.	Алгоритм синтеза оптимальных программных управлений методом моментов для класса линейных одномерных объектов	316
5.6.3.	Векторно-матричный вариант	319
5.7.	НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ ПО ПРИНЦИПУ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	320
5.7.1.	Линейно-квадратичные задачи	320
5.7.2.	Применение решения линейно-квадратичных задач для синтеза оптимальных нелинейных систем, работающих по принципу обратной связи	326
5.7.3.	Применение решения линейно-квадратичных задач для синтеза оптимальных линейных систем, работающих по принципу обратной связи	334
ГЛАВА 6.	ВВЕДЕНИЕ В ОПТИМИЗАЦИЮ УПРАВЛЕНИЯ МНОГООБЪЕКТНЫМИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ (ММС) НА ОСНОВЕ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ КОМПРОМИССОВ (ИГРОВЫЕ ПОДХОДЫ В УПРАВЛЕНИИ).....	365
6.1.	Постановка задач проектирования и управления многообъектной многокритериальной системой на основе стабильных эффективных решений и компромиссов в условиях исходной структурной несогласованности, конфликта и неопределенности	365

6.1.1.	Общее определение игры. Частные классы игр	367
6.1.2.	Математическая модель конфликтной ситуации в ММС	369
6.1.3.	Методы получения стабильных и эффективных решений.....	371
6.1.4.	О применении разработанных методов и алгоритмов стабильно-эффективного управления в практических задачах.....	376
6.2.	Модифицированный двухуровневый метод скалярной Нэш-оптимизации в бескоалиционной конфликтной ситуации (СТАБИЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ) С ТРЕХЭТАПНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ МЕТОДА	376
6.2.1.	Необходимое условие равновесия по Нэшу в форме двухуровневой структуры Пао [113].....	376
6.3.	СТАБИЛЬНЫЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОАЛИЦИОННОГО РАВНОВЕСИЯ.....	383
6.3.1.	Классификация стабильных и эффективных решений на основе коалиционного равновесия	383
6.3.2.	Алгоритм векторной оптимизации на основе конусов доминирования (эффективные решения).....	385
6.3.3.	Методы определения векторного равновесия (стабильные решения).....	389
6.3.4.	Решение задачи коалиционного перехвата подвижной цели с учетом противодействия на этапе ближнего наведения ЛА	396
6.4.	СТАБИЛЬНЫЕ КОАЛИЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ММС. УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА «УГРОЗ И КОНТРУГРОЗ»	399
6.4.1.	Понятие равновесия на основе «угроз и контругроз» (УКУ). Стратегическая значимость УКУ. Существование УКУ. Двухэтапная процедура оптимизации на основе принципа УКУ	399
6.4.2.	Этап 1. Выбор начальных приближений УКУ на основе построения ортогональной равномерной сети.....	400
6.4.3.	Этап 2. Оптимизация управления ММС на основе модифицированных достаточных условий локальных УКУ (ЛУКУ) [24] и метода моментов Н.Н. Красовского [52]	402
6.4.4.	Применение двухэтапного метода получения УКУ-оптимального управления прогнозом динамики конфликта ЛС СВН–ЛС ПВО	406
6.5.	ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КООПЕРАТИВНОГО КОМПРОМИССА И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕШЕНИЙ В ММС НА ОСНОВЕ ВЕКТОРА ДЕЛЕЖА ШЕПЛИ.....	411
6.5.1.	Обобщение характеристической функции, предпосылка игры, дележ и его свойства	411
6.5.2.	Методы оптимизации дележей.....	413
6.5.3.	Вычисление дележа в форме вектора Шепли	413
6.5.4.	Формирование двухэтапного алгоритма оптимизации решений в ММС на основе вектора дележа Шепли [24]	416
6.5.5.	Применение двухэтапного алгоритма для получения УКУ–Шепли-оптимального управления прогнозом динамики конфликта ЛС СВН–ЛС ПВО	416
6.6.	МЕТОДЫ КОМБИНИРОВАНИЯ РЕШЕНИЙ ПО НЭШУ (СКАЛЯРНЫЙ И ВЕКТОРНЫЙ ВАРИАНТЫ), ПАРЕТО, УКУ, ШЕПЛИ, «ИДЕАЛЬНОЙ ТОЧКИ», ϵ -РАВНОВЕСНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ И АРБИТРАЖНЫХ СХЕМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНЫХ КОМПРОМИССОВ В ММС.....	422

6.6.1.	СТЭК на основе Парето–Нэш–УКУ–Шепли-комбинаций [24]	422
6.6.2.	Комбинированные методы в условиях ε -равновесия по Нэшу, минимизации угроз и неполной информации о партнерах [24, 82].....	424
6.6.3.	Понятие о договорных компромиссах на основе комбинации обязательных и необязательных соглашений	428
6.6.4.	Об интеллектуальных СТЭК на основе обобщенного гомеостаза в форме предельного целевого качества интеллектуальной системы (ИС) с динамической экспертной поддержкой [24, 34, 65, 76]	430
6.7.	ПРОГРАММНО-КОРРЕКТИРУЕМОЕ СТАБИЛЬНО-ЭФФЕКТИВНОЕ ПОЗИЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДВУХКОАЛИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА «ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ПРИЦЕЛИВАНИЯ» Н.Н. КРАСОВСКОГО	433
6.7.1.	Постановка и анализ существования гарантирующих и равновесных решений	433
6.7.2.	Постановка и формализация задач оптимального преследования и уклонения летательных аппаратов	438
6.7.3.	Формирование нелинейных алгоритмов преследования и уклонения на основе принципа экстремального прицеливания Н.Н. Красовского [24]	445
6.7.4.	Алгоритм субоптимального позиционного преследования-уклонения.....	449
6.7.5.	Исследование противодействия ЗУР и ЛА-цель	453
6.7.6.	Формирование ПКЗУ в бескоалиционной конфликтной ситуации с антагонистическим ядром на основе принципа экстремального направления Н.Н. Красовского	455
6.7.7.	Пример противодействия ЛА с вектором показателей (промах, время и энергетические затраты).....	457
6.8.	РАЗРАБОТКА СТОХАСТИЧЕСКОЙ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ СТАБИЛЬНОГО АНТАГОНИСТИЧЕСКОГО КОНФЛИКТА В ДВУХКОАЛИЦИОННЫХ ММС В УСЛОВИЯХ ε -РАВНОВЕСИЯ НА ОСНОВЕ КОМБИНАЦИИ ФИЛЬТРАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ КООРДИНАТ, ПРОТОТИПА, ЗАДАННОЙ ЧАСТИ МОДЕЛИ, АДДИТИВНЫХ И МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫХ ПОМЕХ.....	460
6.8.1.	Максиминная постановка задачи сближения-уклонения позиционно (P)- и программно-управляемого (Q) объектов с интегро-дифференциальной моделью, адекватной реальным системам	460
6.8.2.	Решение задачи поиска оптимальной стратегии объекта P (для помех типа «белого» шума).....	466
6.8.3.	Об алгоритме определения оптимальной стратегии объекта Q.....	468
6.8.4.	Программные системы FILTR, FILTR-1, FILTR-2	469
6.8.5.	Об анализе близости минимаксных и максиминных оценок эффективности в интегро-дифференциальной позиционно-программной задаче сближения-уклонения на основе ε -равновесия.....	473
6.8.6.	Примеры применения интегро-дифференциальной задачи сближения-уклонения	474
6.9.	ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ММС.....	478

6.9.1.	Программная система многокритериальной оптимизации многообъектных динамических систем («МОМДИС») для отладки алгоритмов моделирования и оптимизации ММС и исследования СТЭК.....	478
6.10.	Алгоритм конфликтно-оптимального управления ММС с учетом текущих конфигураций систем, оптимального распределения активных ресурсов по целям (ЦР) и прогноза динамики конфликта (ПДК) на основе СТЭК.....	486
6.10.1.	Учет «текущей» конфигурации на такте конфликта в задаче ЦР	487
6.10.2.	Вариант алгоритма ЦР-ПДК	488
6.10.3.	Описание модели конфликта ЗРК «Ус. Хок» с ДЗУР — ПБ с ПИА (модель 1)	489
6.11.	Модель конфликтно-оптимального взаимодействия автомобиля и поверхности торможения на этапе робастного регулирования [84].....	492
6.11.1.	Общая характеристика задачи.....	493
6.11.2.	Проблема робастно-игровой коррекции робастного регулирования	493
6.11.3.	Формирование математической модели конфликтной ситуации «автомобиль–поверхность»	494
6.11.4.	Исследование конфликтно-оптимального взаимодействия автомобиля и поверхности торможения с элементами робастно-игровой коррекции	499
6.11.5.	Примеры анализа результатов экспериментов на основе базовых вариантов	500
6.12.	Оптимизация управления робота «Универсал-5» с учетом мехатронной структуры в условиях неопределенности на основе стабильно-эффективных компромиссов	506
6.12.1.	Математическая модель робота «Универсал-5» в пространстве состояний	507
6.12.2.	Моделирование в программной среде «МОМДИС»	512
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ФАЗОВЫЕ КООРДИНАТЫ		515
П.1.1.	Принцип максимума при ограничениях на фазовые координаты	515
П.1.2.	Достаточные условия оптимальности по быстродействию	524
П.1.3.	Оптимальное по быстродействию управление в случае инерционного руля	537
П.1.4.	Синтез оптимального по быстродействию управления при ограничениях на скорость движения и ускорение	545
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ		557
П.2.1.	Безусловные методы оптимизации	557
П.2.1.1.	Метод, использующий только значения функции.....	557
П.2.1.2.	Методы, использующие первые производные.....	560
П.2.1.3.	Использование вторых частных производных.....	565
П.2.2.	Методы условной оптимизации (задачи математического программирования)	567
П.2.2.1.	Общая запись задачи математического программирования и ее виды	568

П.2.2.2.	Некоторые сведения об экстремуме функции, частных производных, градиенте и производной по направлению	569
П.2.2.3.	Особенности нахождения оптимальных решений в задачах математического программирования	572
П.2.2.4.	Необходимые и достаточные условия оптимума в задачах математического программирования	576
П.2.2.5.	Теория двойственности и недифференциальные условия оптимальности в задаче выпуклого программирования	580
П.2.2.6.	Графическое решение задач математического программирования	583
П.2.3.	ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ	584
П.2.3.1.	Математическая постановка задачи линейного программирования	584
П.2.3.2.	Симплекс-метод — основной метод решения задач линейного программирования	586
П.2.3.3.	Метод полного исключения Жордана для решения систем линейных алгебраических уравнений	590
П.2.3.4.	Двойственность в задачах линейного программирования	595
П.2.3.5.	Целочисленное линейное программирование	600
П.2.3.6.	Дробно-линейное программирование	606
П.2.3.7.	Анализ устойчивости оптимального решения задачи линейного программирования	608
П.2.3.8.	Методы ветвей и границ	614
П.2.3.9.	Решение задачи выбора оптимального маршрута методом ветвей и границ	616
П.2.4.	РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	623
П.2.4.1.	Понятие о параметрическом программировании	623
П.2.4.2.	Штрафные (барьерные) функции. Методы внутренней точки для задачи математического программирования	629
П.2.4.3.	Методы внешней точки для задачи математического программирования	632
П.2.4.4.	Комбинированный метод внутренней и внешней точек	634
П.2.4.5.	Метод проекции градиента	635
П.2.4.6.	Многокритериальные задачи линейного программирования	638
П.2.4.7.	Метод взвешенных сумм с точечным оцениванием весов	641
П.2.4.8.	Сжатие множества допустимых решений	643
П.2.4.9.	Минимальные значения критериев на множестве эффективных точек	645
П.2.4.10.	Параметризация целевой функции	646
П.2.4.11.	Целевое программирование	652
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИВЕДЕНИЕ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ЧИСЛОВОЙ КВАДРАТНОЙ МАТРИЦЫ К КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЕ. НАХОЖДЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ И ПРИСОЕДИНЕННЫХ ВЕКТОРОВ		
П.3.1.	НИЛЬПОТЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ОПЕРАТОРЫ)	657
П.3.1.1.	Нильпотентные преобразования	658
П.3.1.2.	Корневые подпространства	659
П.3.1.3.	Циклические подпространства	660

Содержание	739
П.3.2. Алгоритмы канонического представления матриц	661
П.3.2.1. Алгоритм нахождения собственных и присоединенных векторов матрицы A для вещественных собственных значений.....	661
П.3.2.2. Комплексификация линейного оператора. Нахождение канонического представления для матриц с комплексными корнями.....	665
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	671
ТЕМА 1. ВАРИАЦИОННОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ.....	671
ТЕМА 2. ВАРИАЦИОННОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ	681
ТЕМА 3. ПРИНЦИП МАКСИМУМА Л.С. ПОНТРЯГИНА.....	690
ТЕМА 4. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ	698
ТЕМА 5. АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ (АКОР).....	701
Т.5.1. Задача стабилизации объекта управления	701
Т.5.2. Метод диагонализации для решения алгебраического уравнения РИККАТИ	703
Т.5.3. Задача АКОР для отслеживания известного задающего воздействия	704
Т.5.3.1. Первый подход	704
Т.5.3.2. Второй подход (задача построения линейного сервомеханизма).....	706
Т.5.3.3. Задача АКОР-слежения со скользящим интервалом.....	706
Т.5.4. Задача АКОР-стабилизации для компенсации известного возмущающего воздействия	707
Т.5.5. Построение наблюдателя пониженного порядка	708
ТЕМА 6. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....	713
ТЕМА 7. ОПТИМАЛЬНАЯ L-ПРОБЛЕМА МОМЕНТОВ	717
Т.7.1. Построение оптимального программного управления с помощью оптимальной L -проблемы моментов	717
Т.7.1.1. Оптимальная L -проблема моментов в пространстве «вход–выход»	719
Т.7.1.2. Оптимальная L -проблема моментов в пространстве состояний	720
Т.7.2. Нахождение оптимального управления с использованием ГРАМИАНА УПРАВЛЯЕМОСТИ (КРИТЕРИЙ — МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ).....	721
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	724
ЛИТЕРАТУРА	726