

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. ЖМУДЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Монография

НОВОСИБИРСК
2012

УДК 681.515/516 (075.8)
Ж 774

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *А.С. Востриков*,
д-р техн. наук, проф. *Н.Р. Рахимов*

Жмудь В.А.

Ж 774 Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления : монография / В.А. Жмудь. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.

ISBN 978-5-7782-2162-8

Монография предназначена студентам, аспирантам, научным сотрудникам и преподавателям, осуществляющим расчет, реализацию, модификацию или применение систем автоматического регулирования, а также исследования по теории и практике таких систем. Рекомендуется для расширенного изучения теории управления студентам очного и заочного отделений, обучающимся по направлению подготовки 220200.62 «Автоматизация и управление», дисциплине «Автоматизированное проектирование систем автоматического управления» (бакалавр, IV курс).

Монография содержит описание методики и результаты исследований, а также необходимые пояснения и учебные материалы.

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект № 7.559.2011 (Темплан).

УДК 681.515/516 (075.8)

ISBN 978-5-7782-2162-8

© Жмудь В.А., 2012

© Новосибирский государственный
технический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение в предмет и задачи исследования	7
1.1. Предмет: замкнутые динамические системы управления	7
1.2. Основные требования к системе и математический аппарат	13
1.3. Требования к физической реализуемости модели.....	15
1.4. Классификация направлений развития методов синтеза САУ.....	16
1.5. Адаптивные регуляторы и перспективы развития этого подхода.....	18
1.6. Самонастраивающиеся регуляторы	19
1.7. Робастные регуляторы	20
1.8. Преимущество цифровых регуляторов	20
1.9. Два вида задач численной оптимизации регулятора.....	22
1.10. Обоснование постановки задач	24
2. Визуальное моделирование разомкнутых структур.....	27
2.1. Окно программы VisSim	27
2.2. Настройки параметров симуляции и оптимизации	32
2.3. Выбор шага дискретизации по времени	34
2.4. Выбор метода интегрирования.....	35
2.5. Настройки параметров симуляции и оптимизации	37
2.6. Моделирование отклика линейного звена.....	38
2.7. Моделирование отклика нелинейных звеньев	41
2.8. Получение графиков на осях $X-Y$	42
3. Визуальное моделирование замкнутых структур.....	45
3.1. Моделирование замкнутой линейной системы.....	45
3.2. Моделирование замкнутой нелинейной системы.....	53
4. Оптимизация замкнутых структур	59
4.1. Требования к физической реализуемости модели.....	59
4.2. Формализация требований к системе: целевая функция	60
4.3. Обзор методов оптимизации	61
4.4. Недостатки известных методов применительно к задаче оптимизации параметров регулятора.....	70
4.5. Особенности целевых функций при оптимизации регуляторов	71
4.6. Рекомендуемые целевые функции (критерии качества) для оптимизации замкнутой системы	75

4.7. Синтетические критерии оптимальности.....	78
4.8. Оптимизация ансамбля систем	81
4.9. Автоматическая оптимизация регуляторов замкнутых систем.....	82
4.10. Оптимизация нелинейных ПИД-регуляторов	93
5. Обсуждение структур регуляторов и методов их расчета.....	99
5.1. Совмещение достоинств разных датчиков	99
5.2. Обеспечение разделения мод переходного процесса по различным трактам «регулятор-объект»	107
5.3. Обоснованность сопоставления структур регуляторов.....	111
5.4. Обоснованность модели для оптимизации регулятора.....	113
6. Обеспечение корректности моделирования	117
6.1. Основные требования к корректности моделирования.....	117
6.2. Корректность вычисления интегрального критерия	123
6.3. Обеспечение корректности вычисления старших производных в цифровом регуляторе.....	126
6.4. Применение составных интегральных критериев для оптимизации регуляторов линейных объектов	132
6.5. Формализации задач оптимизации САУ применительно к использованию составных критериев	139
6.6. Сходимость алгоритмов оптимизации.....	144
7. Применение обводного канала в САУ	153
7.1. Структурная схема обводного канала.....	153
7.2. Сопоставление обводного тракта с упредителем Смита.....	158
7.3. Управление нелинейными объектами размерностью 2×1	166
8. Методы одномерной оптимизации	171
8.1. Прямые методы отыскания экстремума	171
8.2. Итеративный поиск	172
8.3. Метод Монте-Карло	173
8.4. Дихотомическое деление отрезка	174
8.5. Метод чисел Фибоначчи	178
8.6. Метод золотого сечения.....	179
9. Методы многопараметрической оптимизации	183
9.1. Случайный поиск.....	183
9.2. Метод исключения касательными	184
9.3. Градиентный метод	184
9.4. Метод Ньютона.....	185
9.5. Метод секущих	186
9.6. Метод покоординатного спуска	186
9.7. Метод Розенброка.....	188
9.8. Метод Хука–Дживса	189

9.9. Метод Нелдера–Мида (деформируемого многогранника)	190
9.10. Метод Флетчера–Ривса (сопряженных градиентов)	190
9.11. Метод Девидона–Флетчера–Пауэлла (переменной метрики)	190
9.12. Метод локальной оптимизации	191
10. Эволюционные методы	193
10.1. Введение в эволюционные методы	193
10.2. Генетический алгоритм	194
10.3. Простой генетический алгоритм	195
10.4. Преимущества генетических алгоритмов	201
10.5. Пример с транспьютерными технологиями	202
10.6. Генетический метод комбинирования эвристик	206
10.7. Применение генетического алгоритма для селекции критерия оптимальности САУ	207
11. Исследование методов оптимизации ПИ-регулятора	219
11.1. Модельное исследование методов	219
11.2. Пример реализации разработанного ускоренного алгоритма оптимизации ПИД-регуляторов	225
12. Анализ метода проектирования робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации	229
12.1. Постановка задачи	229
12.2. Метод решения поставленной задачи	230
12.3. Выбор программных средств	232
12.4. Результаты оптимизации по двум параллельным системам с двумя изменяющимися параметрами	233
12.5. Расширение вариантов сочетания параметров	236
12.6. Детальное исследование и дальнейшая оптимизация	242
13. Проектирование робастных регуляторов методом численной опти- мизации их параметров для ансамбля систем	249
13.1. Постановка задачи	249
13.2. Метод решения поставленной задачи	251
13.3. Результаты оптимизации	252
14. Проектирование кусочно-адаптивных систем методом робастной оптимизации	259
14.1. Постановка задачи и методы ее решения	259
14.2. Пример разбиения множества параметров объекта на подмно- жества	261
14.3. Идентификация принадлежности модели объекта к заданному подмножеству	262
14.4. Пример практического применения метода	263

15. Проектирование дискретно-адаптивной системы квантованием двумерной области параметров объекта	271
15.1. Постановка задачи и методы ее решения	271
15.2. Демонстрация метода на примере	272
16. Расчет множества коэффициентов регуляторов для объекта с двумя нестационарными параметрами	279
16.1. Постановка задачи и методы ее решения	279
16.2. Расчет красевых значений	280
16.3. Интерполяция и проверка	281
16.4. Вторая интерполяция и проверка	285
17. Усовершенствование качественных характеристик систем управления при использовании PI^2D^2 -регулятора	290
17.1. Постановка задачи и методы ее решения	290
17.2. Формирование ПИД _ц -регулятора в рациональной форме	291
17.3. Демонстрационный пример	293
17.4. Исследование характеристик системы с PI^2D^2 -регулятором	296
18. Обоснование размещения корней уравнения системы	299
18.1. Постановка задачи и метод исследования	299
18.2. Результаты исследования	300
19. Оптимизация регуляторов для многосвязных объектов	306
19.1. Расчет ПИ-регулятора для многосвязного объекта первого порядка	306
19.2. Расчет ПИ-регулятора методом оптимизации	308
19.3. Обводной канал для САУ многоканальных объектов	310
19.4. Исследование влияния изменения параметров объекта на качество получаемых многоканальных систем	316
20. Улучшение статических свойств САУ	322
20.1. Формулирование требований к НЧ-части АЧХ	322
20.2. Синтез НЧ-части АЧХ	323
20.3. Анализ погрешности САУ	325
20.4. Исследование причин погрешностей САУ с целью повышения точности	328
21. Библиографический список	330