

# Оглавление

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>3</b>
ЛИТЕРАТУРА.....	8
<b>СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	<b>11</b>
<b>ГЛАВА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА</b> .....	<b>15</b>
1.1. ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ .....	15
1.2. РОЛЬ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ТЕОРИИ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ .....	16
1.3. ОПЕРАТОР .....	16
1.4. ПРОСТРАНСТВА .....	18
1.5. ЛИНЕЙНЫЕ ОПЕРАТОРЫ В ЛИНЕЙНЫХ НОРМИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВАХ .....	26
1.6. ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ .....	41
1.7. ИНТЕГРИРОВАНИЕ .....	44
1.8. РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	50
1.9. ОБОБЩЕННЫЕ ФУНКЦИИ .....	52
ФУНКЦИИ MATLAB .....	57
ВОПРОСЫ.....	58
ЛИТЕРАТУРА .....	58
<b>ГЛАВА 2. НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ В ПЕРЕМЕННЫХ ВХОД—ВЫХОД</b> .....	<b>60</b>
2.1. ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ .....	60
2.2. ПОНЯТИЯ СКАЛЯРНЫХ И МНОГОМЕРНЫХ СИСТЕМ .....	61
2.3. ПРОСТРАНСТВА СИГНАЛОВ И СИСТЕМ .....	62
2.4. СВЯЗЬ МЕЖДУ ВХОДОМ И ВЫХОДОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ .....	63
2.5. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МОДЕЛИ В ПЕРЕМЕННЫХ ВХОД—ВЫХОД .....	65
2.6. ОПЕРАТОРНАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ .....	67
2.7. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛАПЛАСА .....	71
2.8. КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ .....	77
2.9. СВЕРТКА, ВЕСОВАЯ И ПЕРЕХОДНАЯ ФУНКЦИИ.....	80
2.10. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ .....	90
2.11. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЗВЕНЬЯ .....	100
2.11.1. Классификация .....	100
2.11.2. Усилительное (пропорциональное) звено .....	101
2.11.3. Интегрирующее (астатическое) звено .....	102
2.11.4. Апериодическое (инерционное) звено.....	103
2.11.5. Идеальное дифференцирующее звено .....	110

2.11.6. Форсирующее звено 1-го порядка .....	111
2.11.7. Форсирующее звено 2-го порядка .....	112
2.11.8. Инерционное дифференцирующее звено.....	113
2.11.9. Колебательное звено.....	116
2.11.10. Консервативное звено (осциллятор).....	125
2.11.11. Двойное апериодическое звено .....	127
2.11.12. Цепочка из двух инерционных звеньев .....	128
2.11.13. Неминимально-фазовые звенья .....	130
2.11.14. Звено запаздывания и его аппроксимация.....	134
2.12. Многомерные линейные модели систем .....	140
2.13. Устойчивость линейных непрерывных моделей.....	147
2.13.1. Понятие устойчивости.....	147
2.13.2. Основное условие устойчивости.....	148
2.13.3. Устойчивость по входу–выходу.....	150
2.13.4. Алгебраические критерии устойчивости .....	151
2.13.5. Принцип аргумента и критерий Найквиста .....	160
Функции MATLAB .....	167
Вопросы.....	169
Литература .....	170

### **ГЛАВА 3. НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ..... 172**

3.1. Термины и понятия .....	172
3.2. Уравнения модели вход–состояние–выход.....	173
3.3. Линеаризация модели в пространстве состояний .....	174
3.4. Линейные дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами .....	180
3.5. Матричная экспонента в линейных моделях систем .....	187
3.6. Преобразования подобия.....	208
3.7. Структурные схемы и их преобразования.....	213
3.8. Масштабирование модели объекта .....	223
3.9. Устойчивость линейных моделей в пространстве состояний .....	226
3.10. Критерий Найквиста для многомерных систем управления.....	231
3.11. Управляемость по состоянию.....	235
3.12. Эквивалентные критерии управляемости .....	243
3.13. Наблюдаемость по состоянию .....	250
3.14. Эквивалентные критерии наблюдаемости .....	256
3.15. Устойчивость, управляемость и наблюдаемость.....	258
Функции MATLAB .....	267

---

ВОПРОСЫ.....	268
ЛИТЕРАТУРА.....	269
<b>ГЛАВА 4. ДИСКРЕТНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ.....</b>	<b>270</b>
4.1. ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ .....	270
4.2. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ НЕПРЕРЫВНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	271
4.3. ПЕРЕХОД ОТ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ К НЕПРЕРЫВНОМУ АНАЛОГУ.....	275
4.4. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ .....	275
4.5. УСТОЙЧИВОСТЬ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ .....	278
4.6. УСТОЙЧИВОСТЬ ПО ВХОДУ–ВЫХОДУ.....	284
4.7. АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ.....	285
4.8. УПРАВЛЯЕМОСТЬ И ДОСТИЖИМОСТЬ ПО СОСТОЯНИЮ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ ..	286
4.9. НАБЛЮДАЕМОСТЬ ПО СОСТОЯНИЮ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ.....	289
4.10. ВХОДО-ВЫХОДНОЕ ОПИСАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ .....	291
4.11. Z-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ.....	294
4.12. УСТОЙЧИВОСТЬ, УПРАВЛЯЕМОСТЬ И НАБЛЮДАЕМОСТЬ.....	303
Функции MATLAB .....	307
ВОПРОСЫ.....	307
ЛИТЕРАТУРА.....	308
<b>ГЛАВА 5. РЕДУКЦИЯ МОДЕЛЕЙ .....</b>	<b>310</b>
5.1. ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ .....	310
5.2. ОБЩАЯ ЗАДАЧА РЕДУКЦИИ .....	311
5.3. УСЕЧЕНИЕ.....	312
5.4. СОХРАНЕНИЕ ОСТАТКА.....	314
5.5. ВНУТРЕННЕЕ БАЛАНСИРОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ.....	315
5.6. СБАЛАНСИРОВАННАЯ РЕДУКЦИЯ.....	321
5.7. РЕДУКЦИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ МОДЕЛЕЙ.....	322
5.7.1. <i>Редукция устойчивой части</i> .....	322
5.7.2. <i>Редукция взаимно-простой факторизации</i> .....	322
Функции MATLAB .....	324
ВОПРОСЫ.....	325
ЛИТЕРАТУРА .....	326
<b>ГЛАВА 6. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>327</b>
6.1. ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ .....	327
6.2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ .....	329
6.3. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОЙ СКАЛЯРНОЙ МОДЕЛИ .....	330
6.4. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ.....	331

---

6.5. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МНК .....	337
6.6. МЕТОД ПОДПРОСТРАНСТВ СИСТЕМ .....	339
6.6.1. Введение.....	339
6.6.2. Уравнение данных.....	339
6.6.3. Идентификация автономных систем.....	342
6.6.4. Идентификация по входному импульсу .....	347
6.6.5. Идентификация по произвольному входу .....	350
Функции MATLAB .....	357
ВОПРОСЫ.....	357
ЛИТЕРАТУРА .....	359
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>360</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>361</b>
ТЕОРЕМЫ ОПЕРАЦИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ .....	361
ФОРМУЛЫ СООТВЕТСТВИЯ.....	362
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....</b>	<b>363</b>
СИНГУЛЯРНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ МАТРИЦ.....	363
Функции MATLAB .....	371
ВОПРОСЫ.....	372
ЛИТЕРАТУРА .....	372
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....</b>	<b>373</b>
КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА .....	373
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>375</b>