

# ***Indice general***

**Prefacio** vii

## **1** **Introducción a los sistemas de control** 1

- 1.1 Introducción 1
- 1.2 Historia del control automático 4
- 1.3 La práctica de la ingeniería de control 7
- 1.4 Ejemplos de sistemas modernos de control 9

## **2** **Modelos matemáticos de los sistemas** 27

- 2.1 Introducción 27
- 2.2 Ecuaciones diferenciales de los sistemas físicos 28
- 2.3 Aproximaciones lineales de los sistemas físicos 33
- 2.4 La transformada de Laplace 37
- 2.5 La función de transferencia de sistemas lineales 44
- 2.6 Modelos de diagramas de bloques 56
- 2.7 Modelos de grafos de flujo de señal 62
- 2.8 Simulación de sistemas de control 69
- 2.9 Resumen 72

### **3 Características de los sistemas de control con retroalimentación 93**

- 3.1 Sistemas de control de circuito cerrado y de circuito abierto 93
- 3.2 Sensibilidad de los sistemas de control a las variaciones de los parámetros 95
- 3.3 Control de la respuesta transitoria en los sistemas de control 100
- 3.4 Señales perturbadoras en un sistema de control por retroalimentación 103
- 3.5 Error en el estado estacionario 108
- 3.6 El costo de la retroalimentación 112
- 3.7 Resumen 114

### **4 Funcionamiento de los sistemas de control con retroalimentación 127**

- 4.1 Introducción 127
- 4.2 Especificaciones del funcionamiento en el dominio del tiempo 128
- 4.3 Localización de las raíces en el plano  $s$  y respuesta transitoria 139
- 4.4 El error en estado estacionario de los sistemas de control con retroalimentación 141
- 4.5 Indices de funcionamiento 146
- 4.6 Simplificación de sistemas lineales 156
- 4.7 Resumen 159

### **5 Estabilidad de los sistemas lineales de retroalimentación 175**

- 5.1 El concepto de estabilidad 175
- 5.2 El criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz 179
- 5.3 Estabilidad relativa de los sistemas de control con retroalimentación 187
- 5.4 Determinación de la localización de las raíces en el plano  $s$  189
- 5.5 Resumen 192

### **6 Método del lugar geométrico de las raíces 201**

- 6.1 Introducción 201
- 6.2 Concepto del lugar geométrico de las raíces 202
- 6.3 Método del lugar geométrico de las raíces 207
- 6.4 Ejemplo del análisis y diseño de un sistema de control utilizando el método del lugar geométrico de las raíces 222
- 6.5 Diseño de parámetros por el método del lugar geométrico de las raíces 227
- 6.6 Sensibilidad y lugar geométrico de las raíces 233
- 6.7 Resumen 242

**7 Métodos de la respuesta de frecuencia 261**

- 7.1 Introducción 261
- 7.2 Gráficas de la respuesta de frecuencia 264
- 7.3 Ejemplo del trazado del diagrama de Bode 281
- 7.4 Mediciones de la respuesta de frecuencia 285
- 7.5 Especificaciones del funcionamiento en el dominio de la frecuencia 287
- 7.6 Diagramas de fase y magnitud logarítmica 290
- 7.7 Resumen 293

**8 Estabilidad en el dominio de la frecuencia 307**

- 8.1 Introducción 307
- 8.2 Transformación de los contornos en el plano  $s$  308
- 8.3 El criterio de Nyquist 314
- 8.4 La estabilidad relativa y el criterio de Nyquist 325
- 8.5 Respuesta de frecuencia de circuito cerrado 332
- 8.6 Estabilidad de los sistemas de control con atraso de tiempo 340
- 8.7 Resumen 343

**9 Análisis de los sistemas de control en el dominio del tiempo 369**

- 9.1 Introducción 369
- 9.2 Las variables de estado de un sistema dinámico 370
- 9.3 Ecuación diferencial del vector de estado 374
- 9.4 Modelos de estado de grafos de flujo de señal 376
- 9.5 Estabilidad de los sistemas en el dominio del tiempo 384
- 9.6 La respuesta en el tiempo y la matriz de transición 391
- 9.7 Cálculo en tiempo discreto de la respuesta en el tiempo 396
- 9.8 Resumen 403

**10 Diseño y compensación de sistemas de control con retroalimentación 421**

- 10.1 Introducción 421
- 10.2 Enfoques para la compensación 423
- 10.3 Redes de compensación en cascada 425
- 10.4 Compensación de sistemas en el diagrama de Bode usando una red de adelanto de fase 431
- 10.5 Compensación en el plano  $s$  usando una red de adelanto de fase 438
- 10.6 Compensación de sistemas usando redes de integración 446
- 10.7 Compensación en el plano  $s$  usando una red de atraso de fase 450

- 10.8 Compensación en el diagrama de Bode usando una red de atraso de fase 455
- 10.9 Compensación en el diagrama de Bode usando métodos analíticos y computacionales 460
- 10.10 Diseño de sistemas de control en el dominio del tiempo 462
- 10.11 Retroalimentación de variables de estado 474
- 10.12 Resumen 478

## **11** Sistemas de control digital 495

- 11.1 Introducción 495
- 11.2 Aplicaciones de los sistemas de control por computadores digitales 496
- 11.3 Ensamblaje automático y robots 501
- 11.4 Sistemas de muestreo de datos 503
- 11.5 Programas de computador para el control 508
- 11.6 La transformada  $z$  509
- 11.7 Análisis de estabilidad en el plano  $z$  515
- 11.8 Funcionamiento de un sistema de segundo orden de datos muestreados 517
- 11.9 Sistemas de circuito cerrado con compensación mediante un computador digital 520
- 11.10 Evolución futura de la robótica y de los sistemas de control 523
- 11.11 Resumen 524

### **Apéndice A 533**

Pares de transformadas de Laplace 533

### **Apéndice B 535**

Tabla B.1 Símbolos y unidades 535

Tabla B.2 Factores de conversión 536

### **Apéndice C 537**

Una introducción al álgebra matricial 537

### **Apéndice D 549**

Cálculo de la matriz de transición de un sistema lineal invariante en el tiempo mediante un algoritmo computacional 549

### **Apéndice E 553**

Conversión de decibeles 553

**Respuestas a los problemas seleccionados 557**

**Indice de materias 563**