

Contenido

Prefacio

xi

PARTE I

Análisis básico de sistemas de control por métodos convencional y de espacio de estado

1

1

Introducción al análisis de sistemas de control

1

- 1-1 Introducción 1
- 1-2 Ejemplos de sistemas de control 7
- 1-3 La transformada de Laplace 14
- 1-4 Transformación inversa de Laplace 37
- 1-5 Resolución de ecuaciones diferenciales lineales, invariantes en el tiempo 42
- 1-6 Función de transferencia 44
- 1-7 Diagramas de bloques 46
- 1-8 Gráficos de flujo de señal 55
- 1-9 Método del espacio de estado para el análisis de control de sistemas 64
- 1-10 Principios básicos de diseño de sistemas de control 71

- 1-11 Plan de la obra 75
- Ejemplos de problemas y soluciones 76
- Problemas 93

2

Modelo matemático de sistemas dinámicos

98

- 2-1 Introducción 98
- 2-2 Representación de sistemas dinámicos en el espacio de estado 102
- 2-3 Sistemas mecánicos 107
- 2-4 Sistemas eléctricos 114
- 2-5 Sistemas análogos 123
- 2-6 Sistemas electromecánicos 126
- 2-7 Sistemas de nivel de líquido 134
- 2-8 Sistemas térmicos 142
- 2-9 Sistemas de brazo de robot 146
- 2-10 Linealización de modelos matemáticos no lineales 152
 - Ejemplos de problemas y soluciones 159
 - Problemas 188

3

Acciones básicas de control y controladores automáticos industriales

194

- 3-1 Introducción 194
- 3-2 Acciones básicas de control 195
- 3-3 Controladores neumáticos 203
- 3-4 Controladores hidráulicos 223
- 3-5 Efectos de las acciones de control integral y derivativa en el comportamiento del sistema 234
- 3-6 Reducción de la variación de los parámetros mediante la retroalimentación 240
 - Ejemplos de problemas y soluciones 244
 - Problemas 261

4

Análisis de respuesta transitoria y análisis de error en estado estacionario

267

- 4-1 Introducción 267
- 4-2 Función respuesta impulsiva 269
- 4-3 Sistemas de primer orden 272
- 4-4 Sistemas de segundo orden 276

- 4-5 Sistemas de orden superior 298
- 4-6 Criterio de estabilidad de Routh 304
- 4-7 Análisis de error en estado estacionario 310
- 4-8 Introducción a la optimización de sistemas 317
- 4-9 Solución de la ecuación de estado invariante en el tiempo 326
- 4-10 Solución por computadora de las ecuaciones de estado 335
 - Ejemplos de problemas y soluciones 340
 - Problemas 367

PARTE II

Análisis y diseño de sistemas de control por métodos convencionales

371

5

Análisis del lugar de las raíces

371

- 5-1 Introducción 371
- 5-2 Diagramas del lugar de las raíces 373
- 5-3 Ejemplos ilustrativos 377
- 5-4 Resumen de reglas generales para construir los lugares de las raíces 392
- 5-5 Análisis del lugar de las raíces de sistemas de control 400
- 5-6 Lugar de las raíces para sistemas con retardo de transporte 408
- 5-7 Diagramas de contorno de raíz 413
- 5-8 Conclusiones 415
 - Ejemplos de problemas y soluciones 416
 - Problemas 452

6

Análisis de respuesta en frecuencia

455

- 6-1 Introducción 455
- 6-2 Diagramas de Bode 462
- 6-3 Diagramas polares 482
- 6-4 Diagramas del logaritmo de la magnitud en función de la base 491
- 6-5 Criterio de estabilidad de Nyquist 493
- 6-6 Análisis de estabilidad 504
- 6-7 Estabilidad relativa 575
- 6-8 Respuesta en frecuencia de lazo cerrado 529

- 6-9 Determinación experimental de funciones de transferencia 541
- Ejemplos de problemas y soluciones 546
- Problemas 570

7

Técnicas de diseño y compensación

573

- 7-1 Introducción 573
- 7-2 Consideraciones preliminares de diseño 578
- 7-3 Compensación en adelanto 582
- 7-4 Compensación en atraso 600
- 7-5 Compensación en atraso-adelanto 615
- 7-6 Reglas de sintonización o afinación para controladores PID 634
- 7-7 Resumen de los métodos de compensación de sistemas de control 647
- Ejemplos de problemas y soluciones 657
- Problemas 686

8

Análisis de sistemas de control no lineales con la función descriptiva

689

- 8-1 Introducción a sistemas no lineales 689
- 8-2 Sistemas de control no lineales 695
- 8-3 Funciones descriptivas 697
- 8-4 Análisis de sistemas no lineales de control mediante la función descriptiva 707
- 8-5 Conclusiones 712
- Ejemplos de problemas y soluciones 713
- Problemas 723

PARTE II

Análisis y diseño de sistemas de control por métodos del espacio de estado

724

9

Análisis y diseño de sistemas de control por métodos del espacio de estado

724

- 9-1 Introducción 724
- 9-2 Conceptos básicos para el análisis en el espacio de estado 725

| | | |
|-----|---|-----|
| 9-3 | Matriz transferencia | 742 |
| 9-4 | Controlabilidad | 747 |
| 9-5 | Observabilidad | 754 |
| 9-6 | Formas canónicas de las ecuaciones de estado | 761 |
| 9-7 | Análisis de estabilidad de Liapunov | 771 |
| 9-8 | Análisis de estabilidad de Liapunov para sistemas lineales invariantes en el tiempo | 781 |
| 9-9 | Sistemas lineales variables en el tiempo | 786 |
| | Ejemplos de problemas y soluciones | 790 |
| | Problemas | 820 |

10

Diseño de sistemas de control por método de espacio de estado **823**

| | | |
|------|--|-----|
| 10-1 | Introducción | 823 |
| 10-2 | Diseño de sistema de control por medio de ubicación de los polos | 827 |
| 10-3 | Diseño de observadores de estado | 847 |
| 10-4 | Diseño de servosistemas | 875 |
| 10-5 | Sistemas de control óptimos cuadráticos | 891 |
| 10-6 | Sistemas de control con referencia de modelo | 901 |
| 10-7 | Sistemas de control adaptable | 905 |
| | Ejemplos de problemas y soluciones | 912 |
| | Problemas | 943 |

Apéndice Análisis vectorial-matricial **947**

| | | |
|-----|---|-----|
| A-1 | Definiciones | 947 |
| A-2 | Determinantes | 952 |
| A-3 | Inversión de matrices | 954 |
| A-4 | Reglas de operaciones con matrices | 956 |
| A-5 | Vectores y análisis vectorial | 962 |
| A-6 | Valores propios, vectores propios y transformación de similitud | 968 |
| A-7 | Formas cuadráticas | 981 |
| A-8 | Seudoinversas | 985 |
| | Ejemplos de problemas y soluciones | 988 |

Referencias **1006**

Índice **1013**