

Contenido

Cap.		Pág.
	Prefacio	9
1.	Introducción	13
1.1	Sistemas de control	13
1.2	¿Qué es la realimentación y cuáles son sus efectos?	17
1.3	Tipos de sistemas con realimentación	22
2.	Fundamentos Matemáticos	27
2.1	Introducción	27
2.2	Concepto de variable compleja	27
2.3	Transformada de Laplace	30
2.4	Transformada inversa de Laplace por desarrollo en fracciones simples	33
2.5	Aplicación de la transformada de Laplace a la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales	37
2.6	Teoría elemental de matrices	38
2.7	Álgebra matricial	44
2.8	Transformada en z	51

3.	Función de Transferencia y Grafos de Fluencia	63
3.1	Introducción	63
3.2	Funciones de transferencia de sistemas lineales	63
3.3	Respuesta impulsional de los sistemas lineales	67
3.4	Diagrama de bloques	70
3.5	Grafos de fluencia	76
3.6	Resumen de propiedades básicas de los grafos de fluencia	78
3.7	Definiciones para grafos de fluencia	79
3.8	Algebra del grafo de fluencia	81
3.9	Ejemplos de elaboración de grafos de fluencia	83
3.10	Fórmula general de la ganancia para grafos de fluencia	87
3.11	Aplicación de la fórmula general de la ganancia de los diagramas de bloques	92
3.12	Funciones de transferencia de sistemas de datos discretos	93
4.	Caracterización de los Sistemas Dinámicos Mediante la Variable de Estado	107
4.1	Introducción al concepto de estado	107
4.2	Ecuaciones de estado y ecuaciones dinámicas	109
4.3	Representación matricial de las ecuaciones de estado	111
4.4	Matriz de transición de estado	113
4.5	Ecuación de transición de estado	115
4.6	Relaciones entre las ecuaciones de estado y las ecuaciones diferenciales de orden elevado	119
4.7	Transformación de la forma canónica de variables de fase o asociada	121
4.8	Relación entre ecuaciones de estado y función de transferencia	127
4.9	Ecuación característica, valores propios y vectores propios	129
4.10	Diagonalización de la matriz A (Transformación de similitud)	130
4.11	Forma canónica de Jordán	135
4.12	Diagrama de estado	138
4.13	Descomposición de las funciones de transferencia	148
4.14	Transformación en forma modal	153
4.15	Controlabilidad de sistemas lineales	156
4.16	Observabilidad de sistemas lineales	164
4.17	Relaciones entre controlabilidad, observabilidad y funciones de transferencia	168
4.18	Ecuaciones de estado no lineales y su linealización	170
4.19	Ecuaciones de estado de sistemas lineales de datos discretos	173
4.20	Solución de las ecuaciones de estado discretas mediante la transformada en z	177
4.21	Diagramas de estado para sistemas de datos discretos	179
4.22	Diagramas de estado para sistemas de datos muestreados	183
4.23	Ecuaciones de estado de sistemas lineales variantes en el tiempo	185
5.	Modelización Matemática de Sistemas Físicos	199
5.1	Introducción	199
5.2	Ecuaciones de redes eléctricas	200
5.3	Modelos de elementos de sistemas mecánicos	202
5.4	Ecuaciones de sistemas mecánicos	214
5.5	Dispositivos de detección de error en sistemas de control	220
5.6	Tacómetros	231
5.7	Motores de cd en sistemas de control	232
5.8	Motor de inducción bifásico	237
5.9	Motores paso a paso	240

5.10	Sistemas de control de estado	247
5.11	Sistema de control de guía de bordes	249
5.12	Sistemas con retardo de transporte	254
5.13	Sistemas de seguimiento del sol	255
6.	Análisis de los Sistemas de Control en el Dominio Temporal	271
6.1	Introducción	271
6.2	Señales típicas de prueba para la respuesta temporal de los sistemas de mando	272
6.3	Comportamiento de los sistemas de control en el dominio temporal — Respuesta en régimen permanente	274
6.4	Comportamiento de los sistemas de control en el dominio temporal — Respuesta transitoria	283
6.5	Respuesta transitoria de un sistema de segundo orden	285
6.6	Respuesta temporal de un sistema de control de posición	296
6.7	Efectos del control derivado en la respuesta temporal de los servosistemas	306
6.8	Efectos del control integral en la respuesta temporal de los servosistemas	311
6.9	Control por realimentación de velocidad o realimentación tacométrica	313
6.10	Control por realimentación de variables de estado	315
7.	Estabilidad de los Sistemas de Control	327
7.1	Introducción	327
7.2	Estabilidad, ecuación característica y matriz de transición de estado	328
7.3	Estabilidad de los sistemas lineales invariantes en el tiempo con entradas	330
7.4	Métodos para determinar la estabilidad de los sistemas lineales de control	332
7.5	Criterio de Routh-Hurwitz	333
7.6	Criterio de Nyquist	341
7.7	Aplicación del criterio de Nyquist	352
7.8	Efectos de los ceros y polos añadidos a $G(s)H(s)$ sobre la forma de lugar de Nyquist	361
7.9	Estabilidad en sistemas con múltiples cadenas de retorno	365
7.10	Estabilidad de los sistemas de control lineales con retardos	369
7.11	Estabilidad de sistemas no lineales — Criterio de Popov	372
8.	Técnica del Lugar de las Raíces	385
8.1	Introducción	385
8.2	Condiciones básicas del lugar de las raíces	386
8.3	Construcción del lugar completo de las raíces	390
8.4	Aplicación de la técnica del lugar de las raíces a la solución de las raíces de un polinomio	421
8.5	Algunos aspectos importantes de la construcción del lugar de las raíces	426
8.6	Contorno de las raíces — Variación de múltiples parámetros	436
8.7	Lugar de las raíces de sistemas con retardo de tiempo puro	443
8.8	Relación entre el lugar de las raíces y el lugar de Nyquist	452
8.9	Lugar de las raíces de sistemas de control muestreados	455
9.	Análisis de los Sistemas de Control en el Dominio Frecuencial	467
9.1	Introducción	467
9.2	Características en el dominio frecuencial	470
9.3	M_r , ω_r y BW en un sistema de segundo orden	471
9.4	Efectos de la adición de un cero de transferencia en cadena abierta	476

8 Contenido

9.5	Efectos de la adición de un polo a la función de transferencia en cadena abierta	478
9.6	Estabilidad relativa — Margen de amplitud, margen de fase y M_p	481
9.7	La estabilidad relativa en función de la pendiente de la curva de amplitud del lugar de Bode	487
9.8	Lugares de M constante en el plano $G(j\omega)$	490
9.9	Lugares de fase constante en el plano $G(j\omega)$	494
9.10	Lugares de M constante y lugares de N constante en el plano de coordenadas amplitud-fase-Abaco de Nichols	495
9.11	Análisis de la respuesta frecuencial, en cadena cerrada, de sistemas de control con retorno no unitario	502
9.12	Estudios de sensibilidad en el dominio frecuencial	502

10. Introducción al Proyecto de Sistemas de Control 511

10.1	Introducción	511
10.2	Proyecto clásico de sistemas de control	516
10.3	Compensación por avance de fase	521
10.4	Compensación por retardo de fase	541
10.5	Compensación por avance-retardo	557
10.6	Compensación por redes en T	562

11. Introducción al Control Optimo 577

11.1	Introducción	577
11.2	Proyecto analítico	578
11.3	Optimización paramétrica	587
11.4	Proyecto de un sistema con valores propios determinados — Una aplicación de la gobernabilidad	589
11.5	Proyecto de observadores de estado	592
11.6	Proyecto del regulador lineal óptimo	603
11.7	Proyecto con realimentación parcial del estado	619

APENDICE A Gráficos en el Dominio Frecuencial 631

A.1	Diagramas polares de las funciones de transferencia	631
A.2	Diagrama de Bode (diagrama asintótico) de una función de transferencia	638
A.3	Diagrama de amplitud en función de la fase	648

APENDICE B Tablas de transformadas de Laplace 651

APENDICE C Método de los multiplicadores de Lagrange 655