

INDICE DE MATERIAS

Pág.

Prefacio.....	7
---------------	---

Capítulo 1. Introducción

1-1. Introducción general.....	21
1-2. Introducción a un sistema de control.....	21
1-3. Definiciones.....	23
1-4. Fundamento histórico.....	25
1-5. Fundamentos matemáticos.....	29
1-6. Naturaleza del problema técnico del control.....	30
1-7. Contenido del texto.....	31

Capítulo 2. Métodos de plantear ecuaciones diferenciales

2-1. Introducción.....	33
2-2. Circuitos y componentes eléctricos.....	34
2-3. Sistemas mecánicos de traslación.....	39
2-4. Circuitos analógicos.....	43
2-5. Sistemas mecánicos de rotación.....	44
2-6. Sistemas térmicos.....	49
2-7. Amplificador hidráulico.....	54
2-8. Transmisión hidráulica.....	57
2-9. Amplificadores rotativos de potencia.....	59
2-10. Servomotor de continua.....	62
2-11. Servomotor de alterna.....	65
2-12. Ecuación de Lagrange.....	67
2-13. Conclusiones.....	75

Capítulo 3. Resolución de ecuaciones diferenciales

3-1. Introducción.....	77
3-2. Entrada de los sistemas de control.....	78

	<i>Pág.</i>
3-3. Entradas normalizadas.....	78
3-4. Respuesta en régimen permanente: entrada senoidal..	79
3-5. Respuesta en régimen permanente: entrada en serie de potencias.....	82
3-6. Respuesta transitoria: método clásico.....	86
3-7. Definición de la constante de tiempo.....	91
3-8. Ejemplo: sistema de primer orden.....	91
3-9. Ejemplo: sistema mecánico de segundo orden.....	93
3-10. Ejemplo: sistema eléctrico de segundo orden.....	94
3-11. Transitorios de segundo orden.....	96
3-12. Especificaciones sobre el tiempo de respuesta.....	99
3-13. Conclusiones.....	100

Capítulo 4. Transformadas de Laplace

4-1. Introducción.....	102
4-2. Definición de la transformada de Laplace.....	103
4-3. Obtención de las transformadas de Laplace de funciones simples.....	103
4-4. Teoremas sobre la transformación de Laplace.....	105
4-5. Aplicación de la transformada de Laplace a las ecuaciones diferenciales.....	108
4-6. Transformación inversa.....	109
4-7. Teoremas sobre el desarrollo de Heaviside en fracciones parciales.....	110
4-8. Ejemplo de transformación inversa.....	118
4-9. Simplificaciones en el desarrollo de fracciones.....	119
4-10. Determinación gráfica de los coeficientes de las fracciones parciales.....	121
4-11. Empleo de la «Spirule».....	127
4-12. Respuesta espectral dada por el diagrama cero-polar...	129
4-13. Situación de los polos y estabilidad.....	134
4-14. Criterio de estabilidad de Routh.....	135
4-15. Situación regional de las raíces.....	140
4-16. Transformada de Laplace de la función impulso unitario.....	143
4-17. Respuesta a una función impulso.....	144
4-18. Sistema de segundo orden con impulso de excitación..	145
4-19. Conclusiones.....	147

Capítulo 5. Diagramas funcionales. Funciones transferencia-Flujogramas

5-1.	Introducción: diagramas funcionales.....	149
5-2.	Ejemplos de diagramas funcionales.....	150
5-3.	Puntos de suma en diagramas funcionales.....	154
5-4.	Definición de la función transferencia.....	155
5-5.	Bloques en cascada.....	157
5-6.	Combinación de bloques en cascada.....	158
5-7.	Determinación de la relación de mando.....	159
5-8.	Terminología empleada en los sistemas realimentados de control.....	161
5-9.	Control de velocidad empleando una unidad motor-generator.....	162
5-11.	Control de vuelo.....	165
5-12.	Sistema hidráulico de control de posición.....	167
5-13.	Funciones transferencia de redes compensadoras.....	169
5-14.	Flujogramas de señal.....	172
5-15.	Conclusiones.....	178

Capítulo 6. Características básicas de un servo

6-1.	Introducción.....	179
6-2.	Señales físicas matemáticas.....	179
6-3.	Tipos de sistemas realimentados.....	181
6-4.	Análisis de tipos de sistemas.....	182
6-5.	Ejemplos de tipos de algunos sistemas.....	189
6-6.	Coefficientes de error estático.....	195
6-7.	Empleo de los coeficientes de error.....	199
6-8.	Conclusiones.....	202

Capítulo 7. Lugar de raíces

7-1.	Introducción.....	204
7-2.	Trazado de las raíces de la ecuación característica.....	205
7-3.	Análisis cualitativo del lugar de raíces.....	208
7-4.	Exposición del procedimiento.....	213
7-5.	Función transferencia en bucle abierto.....	213
7-6.	Polos de la relación de mando $C(s)/R(s)$	214
7-7.	Aplicación de las condiciones modulares y angulares..	216
7-8.	Propiedades geométricas (reglas de construcción).....	221

7-9.	Ejemplo 1.....	237
7-10.	Ejemplo 2.....	241
7-11.	Respuesta espectral.....	246
7-12.	Características de comportamiento.....	248
7-13.	Síntesis.....	253
7-14.	Resumen de las reglas constructivas del lugar de raíces para una realimentación negativa.....	253
7-15.	Conclusiones.....	255

Capítulo 8. Temas especiales sobre polos y ceros

8-1.	Introducción.....	257
8-2.	Respuesta transitoria-Polos complejos dominantes....	257
8-3.	Polos adicionales significativos.....	262
8-4.	Correlación del diagrama cero-polar con las respuestas espectral y temporal.....	265
8-5.	Recomposición factorial de polinomios empleando el lugar de raíces (método de partición).....	269
8-6.	Existencia y situación de puntos de dispersión y confluencia (método de partición).....	275
8-7.	Trazado del lugar de raíces para variaciones de parámetros distintos de la ganancia.....	277

Capítulo 9. Respuesta espectral

9-1.	Introducción.....	283
9-2.	Correlación entre las respuestas espectral y temporal..	284
9-3.	Tipos de trazados gráficos.....	285
9-4.	Curvas de respuesta espectral.....	285
9-5.	Introducción a los trazados logarítmicos.....	288
9-6.	Definiciones de términos logarítmicos.....	288
9-7.	Expresiones generales de la función transferencia espectral.....	291
9-8.	Trazado de los diagramas logarítmicos de la magnitud y fase.....	292
9-9.	Ejemplo de trazado de los diagramas log. magnitud y fase.....	300
9-10.	Tipo del sistema y ganancia referidos a las curvas logarítmicas.....	303

9-11.	Determinación experimental de funciones de transferencia.....	306
9-12.	Introducción a los trazados polares.....	306
9-13.	Trazados polares directos.....	307
9-14.	Resumen sobre los trazados polares.....	316
9-15.	Trazados polares inversos.....	319
9-16.	Resumen sobre los trazados polares inversos.....	322
9-17.	Demora.....	324
9-18.	Conclusiones.....	324

Capítulo 10. Criterio de estabilidad de Nyquist

10-1.	Introducción.....	326
10-2.	Desarrollo del criterio de estabilidad de Nyquist.....	327
10-3.	Ejemplos de aplicación del criterio de Nyquist.....	336
10-4.	Aplicación del criterio de Nyquist a sistemas con demora.....	339
10-5.	Situación regional de las raíces.....	341
10-6.	Aplicación del criterio de Nyquist en el trazado polar inverso.....	342
10-7.	Ejemplos de aplicación del criterio Nyquist a trazados polares inversos.....	344
10-8.	Definición del margen de fase y ganancia y su relación con la estabilidad.....	346
10-9.	Características de estabilidad con los trazados logarítmicos log.-magnitud y fase.....	347
10-10.	Diagrama log.-magnitud/ángulo.....	349
10-11.	estabilidad con el diagrama log.-magnitud/fase.....	350
10-12.	Efecto que sobre la estabilidad ejerce la adición de un polo o un cero.....	352
10-13.	Conclusiones.....	354

Capítulo 11. Comportamiento de un sistema realimentado de control según su respuesta espectral

11-1.	Introducción.....	355
11-2.	Trazado polar directo.....	355
11-3.	Determinación de M_m y ω_m para un sistema simple de segundo orden.....	357

11-4.	Correlación entre las respuestas sinusoidal y temporal . . .	361
11-5.	Desarrollo de contornos de $M(\omega)$ y $\alpha(\omega)$ constantes en el plano complejo (trazado directo)	362
11-6.	Contornos en el plano polar inverso	375
11-7.	Ajuste de la ganancia mediante el empleo de contornos M y α , y los trazados polares directo e inverso	380
11-8.	Ajuste de la ganancia para tener un valor de M_m dado en un sistema con realimentación unitaria y con el trazo polar inverso	380
11-9.	Ajuste de la ganancia para tener una valor dado de M_m en un sistema con realimentación unitaria y con el trazo polar inverso	383
11-10.	Curvas de M y α constantes en el diagrama log.-magnitud/ángulo (cartas de Nichols)	386
11-11.	Ajuste de la ganancia empleando el diagrama log.-magnitud/ángulo	389
11-12.	Respuesta espectral en bucle cerrado obtenida con el diagrama log.-magnitud/ángulo	389
11-13.	Ajuste de ganancia para un valor dado de M_m en un sistema de realimentación no unitaria	391
11-14.	Conclusiones	392

Capítulo 12. Compensación en cascada: Lugar de raíces

12-1.	Introducción	394
12-2.	Reforma del lugar de raíces	395
12-3.	Compensación con integración ideal	396
12-4.	Compensación por retraso de fase empleando elementos pasivos	398
12-5.	Compensación ideal derivativa	404
12-6.	Compensación de adelanto empleando redes pasivas	406
12-7.	Diseño de un compensador general de adelanto	411
12-8.	Compensación combinada de retraso-adelanto	415
12-9.	Comparación de los compensadores en cascada	418
12-10.	Problemas especiales	420
12-11.	Otros compensadores	422
12-12.	Realización de funciones de transferencia	424
12-13.	Conclusiones	426

Capítulo 13. Compensación en cascada: Trazados espectrales

13-1.	Introducción.....	429
13-2.	Reforma del trazado espectral.....	430
13-3.	Selección del compensador.....	431
13-4.	Compensador de retraso.....	435
13-5.	Ejemplo de compensación por retraso.....	438
13-6.	Compensación de adelanto.....	442
13-7.	Ejemplo de compensación en adelanto a un sistema tipo 1.....	445
13-8.	Compensador combinado de retraso y adelanto.....	450
13-9.	Ejemplo de compensación combinada.....	452
13-10.	Ejemplo de compensación de adelanto aplicada a un sistema del tipo 2.....	456
13-11.	Conclusiones.....	459

Capítulo 14. Compensación por realimentación

14-1.	Introducción.....	462
14-2.	Condiciones ambientales.....	464
14-3.	Tiempo de respuesta.....	467
14-4.	Situación de un compensador de realimentación.....	469
14-5.	Restricciones a considerar en la compensación de realimentación.....	470
14-6.	Transformación de un sistema en otro del tipo 0.....	471
14-7.	Procedimientos de diseño de la compensación por realimentación, empleando el lugar de raíces.....	472
14-8.	Compensación por realimentación con tacómetro (lugar de raíces).....	473
14-9.	Tacómetro de realimentación (lugar de raíces).....	475
14-10.	Realimentación con tacómetro y filtro RC (lugar de raíces).....	479
14-11.	Resultados del empleo del lugar de raíces para la compensación por realimentación.....	482
14-12.	Compensación por realimentación. Procedimientos de diseño empleando los trazados polares.....	483
14-13.	Realimentación con tacómetro (trazado polar inverso).....	485
14-14.	Tacómetro con filtro RC (trazado polar inverso).....	488
14-15.	Resultados del empleo del trazado polar inverso en la determinación de la compensación por realimentación..	491

	<i>Pág.</i>
14-16. Compensación por realimentación. Empleo de los trazados logarítmicos.....	496
14-17. Aplicación de la compensación por realimentación (trazados logarítmicos).....	499
14-18. Resultados obtenidos con la compensación por realimentación al emplear los trazados logarítmicos.....	504

Capítulo 15. Sistemas de control complicados

15-1. Introducción.....	506
15-2. Sistemas de control de bucles múltiples con una sola entrada deseada.....	507
15-3. Sistema complejo de control.....	509
15-4. Sistemas de control de bucles múltiples interconectados	512
15-5. Entradas múltiples.....	513
15-6. Perturbaciones indeseadas.....	514
15-7. Ejemplo de cómo aminorar una perturbación indeseada.	517
15-8. Compensación de avance de señal.....	525
15-9. Sistemas de realimentación condicionada.....	525
15-10. Principio de la invariancia.....	526
15-11. Síntesis preliminar de un sistema de control de bucles múltiples.....	528
15-12. Ejemplo de síntesis: sistema de control lateral de un avión.....	532
15-13. Análisis de un sistema de bucles múltiples por el método de las raíces.....	537
15-14. Conclusiones.....	546

Capítulo 16. Sistemas realimentados de control con alterna

16-1. Introducción.....	548
16-2. Tipos generales de control por realimentación.....	549
16-3. Sistema híbrido de control.....	553
16-4. Sistema de control de alterna.....	557
16-5. Compensadores de alterna.....	559
16-6. Diseño de compensadores de adelanto en alterna.....	563
16-7. Conclusiones.....	575

Capítulo 17. Respuesta óptima

17-1.	Introducción.....	577
17-2.	Desarrollo del criterio del tiempo de establecimiento....	578
17-3.	Criterio del área de control.....	579
17-4.	Criterios adicionales.....	581
17-5.	Definición de sistemas de error nulo.....	583
17-6.	Sistemas de error nulo con escalón.....	584
17-7.	Sistemas sin error a la rampa.....	587
17-8.	Optimización con los parámetros en bucle abierto.....	588
17-9.	Conclusiones.....	590

Capítulo 18. Nolinealidades y funciones generalizadas

18-1.	Introducción.....	592
18-2.	Nolinealidades continuas.....	594
18-3.	Tipos de nolinealidades.....	595
18-4.	Funciones generalizadas.....	598
18-5.	Ejemplos de funciones generalizadas.....	601
18-6.	Efecto de las nolinealidades sobre la estabilidad.....	610
18-7.	Estabilidad: empleo del trazado polar.....	612
18-8.	Estabilidad: empleo de un trazado logaritmico.....	614
18-9.	Estabilidad: empleo del lugar de raíces.....	616
18-10.	Precisión de los resultados que dan las funciones generalizadas.....	621
18-11.	Sistemas multiplicativos.....	622
18-12.	Conclusiones.....	623

Capítulo 19. Ordenadores analógicos

19-1.	Introducción.....	625
19-2.	Componentes de los ordenadores analógicos.....	626
19-3.	Montaje del ordenador analógico.....	630
19-4.	Simulación de nolinealidades.....	634
19-5.	Cambio en la escala del tiempo.....	637
19-6.	Empleo del ordenador analógico.....	638
19-7.	Problemas de diseño.....	647
19-8.	Conclusiones.....	652

Capítulo 20. Procedimientos experimentales de diseño

20-1.	Introducción.....	653
20-2.	Planteamiento del problema.....	653
20-3.	Determinación de las constantes del sistema por el método de la respuesta espectral.....	654
20-4.	Determinación de las constantes del sistema por métodos basados en el régimen transitorio.....	655
20-5.	Evaluación de $G(s)$ de la respuesta transitoria en bucle cerrado.....	662
20-6.	Análisis del sistema básico.....	665
20-7.	Selección de un compensador en cascada.....	668
20-8.	Conclusiones.....	674

Capítulo 21. Estado de la técnica

21-1.	Introducción.....	676
21-2.	Sistemas adaptativos.....	677
21-3.	Sistemas muestreados.....	680
21-4.	Conclusiones.....	687

Apéndice A.	<i>Tabla de transformadas de Laplace.....</i>	689
Apéndice B.	<i>Métodos de factorizar polinomios (obtención de raíces).....</i>	693
Apéndice C.	<i>Terminología normalizada de los diagramas funcionales.....</i>	703
Apéndice D.	<i>La «Spirule».....</i>	707
Apéndice E.	<i>Angulo a un punto ensayado próximo al eje real.....</i>	715
Apéndice F.	<i>Lugares de ángulo de fase.....</i>	717
Apéndice G.	<i>Conversión: Decibelios-Magnitud.....</i>	724
Apéndice H.	<i>Diseño de un compensador en T punteada.....</i>	726
Apéndice I.	<i>Criterio de estabilidad de Nyquist.....</i>	739
Apéndice J.	<i>Transformación de diagramas funcionales.....</i>	747
	<i>Problemas.....</i>	750
	<i>Algunas soluciones.....</i>	794
	<i>Tabla P-1 de conversión de unidades.....</i>	801