

Rolf Isermann

Digitale Regelsysteme

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Band II:
Stochastische Regelungen
Mehrgrößenregelungen
Adaptive Regelungen
Anwendungen

Mit 120 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1987

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	XXI
---------------------------------------	-----

C Regelungen für stochastische Störungen

12 Stochastische Regelungen (Einführung)	3
12.1 Vorbemerkungen	3
12.2 Mathematische Modelle stochastischer Signalprozesse	4
12.2.1 Grundbegriffe	4
12.2.2 Markov-Signalprozeß	6
12.2.3 Skalare stochastische Differenzengleichungen	9
13 Parameteroptimierte Regler für stochastische Störsignale	10
14 Minimalvarianzregler für stochastische Störsignale	13
14.1 Verallgemeinerte Minimalvarianzregler für Prozesse ohne Totzeiten	13
14.1 Verallgemeinerte Minimalvarianzregler für Prozesse mit Totzeiten	22
14.3 Minimalvarianzregler für Prozesse mit reinen Totzeiten	26
14.4 Minimalvarianzregler für bleibende Störungen	27
14.4.1 Hinzufügen eines integral wirkenden Gliedes	27
14.4.2 Minimieren der Regeldifferenz	28
14.5 Simulationsergebnisse mit Minimalvarianzreglern	29
14.6 Vergleich verschiedener deterministischer und stochastischer Regler	34
15 Zustandsregler für stochastische Störungen	38
15.1 Optimale Zustandsregler für weißes Rauschen	38
15.2 Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung für weiße Störsignale	41
15.3 Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung für äußere Störsignale	43

D Vermaschte Regelungen

16 Kaskadenregelungen	51
17 Steuerungen zur Störgrößenaufschaltung	58
17.1 Kompensationssteuerungen	59
17.2 Parameteroptimierte Steuerungen	62
17.2.1 Parameteroptimierte Steuerung ohne Stellgrößenvorgabe	62
17.2.2 Parameteroptimierte Steuerung mit Stellgrößenvorgabe	63
17.2.3 Zusammenwirken von Steuerung und Regelung	66
17.3 Zustandssteuerungen	67
17.4 Minimalvarianzsteuerungen	67

E Mehrgrößenregelungen

18 Strukturen von Mehrgrößenprozessen	73
18.1 Strukturelle Eigenschaften bei Übertragungsdarstellung	74
18.1.1 Kanonische Strukturen	74
18.1.2 Charakteristische Gleichung und Koppelfaktor	78
18.1.3 Einwirkung äußerer Signale	81
18.1.4 Gegenseitige Wirkung der Hauptregler	82
18.1.5 Matrizenpolynomdarstellung	84
18.2 Strukturelle Eigenschaften bei Zustandsdarstellung	85
19 Parameteroptimierte Mehrgrößenregelungen	91
19.1 Parameteroptimierung der Hauptregler ohne Koppelregler	93
19.1.1 Stabilitätsgebiete	93
19.1.2 Optimierung der Reglerparameter und Einstellregeln für Zweigrößenregler	98
19.2 Entkopplung durch Koppelregler (Autonomisierung)	102
19.3 Parameteroptimierung von Haupt- und Koppelreglern	105
20 Mehrgrößenregelungen mit Matrizenpolynomen	108
20.1 Allgemeiner Matrizenpolynomregler	108
20.2 Matrizenpolynom-Deadbeat-Regler	109
20.3 Matrizenpolynom-Minimalvarianzregler	110
21 Mehrgrößenregelungen mit Zustandsreglern	112
21.1 Mehrgrößen-Zustandsregler mit Polvorgabe	112
21.2 Mehrgrößen-Matrix-Riccati-Zustandsregler	116
21.3 Mehrgrößen-Entkopplungs-Zustandsregler	116
21.4 Mehrgrößen-Minimalvarianz-Zustandsregler	117

22 Zustandsgrößenschätzung	119
22.1 Vektorielle Signalprozesse und Annahmen	120
22.2 Rekursive Schätzung skalarer Größen	122
22.2.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier skalarer Größen	122
22.2.2 Rekursive Schätzung einer konstanten Größe	123
22.2.3 Rekursive Schätzung einer stochastischen zeitvarianten Größe	124
22.3 Rekursive Schätzung vektorieller Größen	130
22.3.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier vektorieller Meßwerte	130
22.3.2 Rekursive Schätzung vektorieller Zustandsgrößen (Kalman-Filter)	133
 F Adaptive Regelungen	
23 Adaptive Regelungen (Übersicht)	145
23.1 Adaptive Regler mit Referenzmodell (MRAS)	148
23.1.1 Lokale Parameteroptimierung	148
23.1.2 Ljapunov-Entwurf	150
23.1.3 Hyperstabilitätsentwurf	152
23.2 Adaptive Regler mit Identifikationsmodell (MIAS)	157
 24 On-line-Identifikation dynamischer Prozesse und stochastischer Signale	160
24.1 Prozeß- und Störsignalmodelle	160
24.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate (RLS)	162
24.2.1 Dynamische Prozesse	162
24.2.2 Stochastische Signale	168
24.3 Rekursive, erweiterte Methode der kleinsten Quadrate (RELS)	169
24.4 Rekursive Methode der Hilfsvariablen (RIV)	170
24.5 Einheitlicher rekursiver Parameterschätzalgorithmus	172
24.6 Modifikationen rekursiver Parameterschätzalgorithmen	175
 25 On-line-Identifikation im geschlossenen Regelkreis	179
25.1 Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	180
25.1.1 Indirekte Prozeßidentifikation	181
25.1.2 Direkte Prozeßidentifikation	185
25.2 Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	189
25.3 Methoden zur Identifikation im geschlossenen Regelkreis	191
25.3.1 Indirekte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	191
25.3.2 Direkte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	191
25.3.3 Direkte Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	192

26 Parameteradaptive Regler	193
26.1 Entwurfsprinzipien	193
26.2 Geeignete Regelalgorithmen	198
26.2.1 Deadbeat-Regelalgorithmen	199
26.2.2 Minimalvarianzregler	200
26.2.3 Parameteroptimierte Regler	201
26.2.4 Allgemeiner linearer Regler mit Polvorgabe (LRPV)	203
26.2.5 Zustandsregler	203
26.3 Geeignete Kombinationen	204
26.3.1 Arten der Kombinationen	204
26.3.2 Stabilität und Konvergenz	206
26.3.3 Auswahl der Elemente parameteradaptiver Regelungen	211
26.4 Stochastische parameteradaptive Regler	212
26.4.1 Adaptiver Minimalvarianzregler (RLS/MV4)	212
26.4.2 Adaptive verallgemeinerte Minimalvarianzregler (RLS/MV3, RELS/MV3)	215
26.5 Deterministische parameteradaptive Regler	217
26.5.1 Adaptiver Deadbeat-Regler (RLS/DB)	218
26.5.2 Adaptive Zustandsregler (RLS/ZR)	221
26.5.3 Adaptive PID-Regler	225
26.6 Simulationsbeispiele	228
26.6.1 Stochastische und deterministische adaptive Regler	229
26.6.2 Verschiedene Prozesse	233
26.7 Start der adaptiven Regler und Wahl der freien Parameter	233
26.7.1 Voridentifikation	233
26.7.2 Wahl der Entwurfparameter	237
26.7.3 Startverfahren	238
26.8 Überwachung und Koordinierung adaptiver Regelungen	239
26.8.1 Überwachung der adaptiven Regelung	239
26.8.2 Koordinierung der adaptiven Regelung	241
26.9 Parameteradaptive Störgrößenaufschaltung	242
26.10 Parameteradaptive Mehrgrößenregelungen	245
26.11 Einsatz parameteradaptiver Regelalgorithmen	246

G Zur digitalen Regelung mit Prozeßrechnern und Mikrorechnern

27 Einfluß der Amplitudenquantisierung bei digitalen Regelungen	253
27.1 Ursachen von Quantisierungsfehlern	253
27.2 Verschiedene Quantisierungseffekte	258
27.2.1 Quantisierungseffekte von Variablen	258
27.2.2 Quantisierungseffekte von Koeffizienten	262
27.2.3 Quantisierungseffekte von Zwischenergebnissen	263

28 Störsignalfilterung	268
28.1 Störsignalquellen und Störsignalspektren	268
28.2 Analoge Filterung	272
28.3 Digitale Filterung	274
28.3.1 Tiefpaßfilter	274
28.3.2 Hochpaßfilter	277
28.3.3 Spezielle Filter	278
29 Anpassung von Regelalgorithmen an verschiedene Stellantriebe	283
30 Rechnerunterstützter Entwurf von Regelalgorithmen mit Prozeßidentifikation	296
30.1 Programmpakete	296
30.1.1 Modellgewinnung durch theoretische Modellbildung oder Identifikation	298
30.1.2 Programmpakete zur Prozeßidentifikation	299
30.1.3 Programmpakete zum Entwurf der Regelalgorithmen	302
30.2 Beispiele	304
30.2.1 Digitale Regelung eines Überhitzers (Simulation)	304
30.2.2 Digitale Regelung eines Wärmeaustauschers	305
30.2.3 Digitale Regelung eines Trommeltrockners	310
31 Adaptive und selbsteinstellende Regelung mit Mikrorechnern und Prozeßrechnern	322
31.1 Mikrorechner für die adaptive Regelung	322
31.2 Beispiele	324
31.2.1 Adaptive Regelung eines Überhitzers (Simulation)	325
31.2.2 Adaptive Regelung von Klimaanlage	325
31.2.3 Adaptive Regelung des pH-Wertes	332
Literatur	339
Sachverzeichnis	349