

Rolf Isermann

Digitale Regelsysteme



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York 1977

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
<u>A Prozesse und Prozeßrechner</u>	<u>5</u>
2. Regelung mit Digitalrechnern (Prozeßrechner, Mikroprozessoren)	5
3. Prozesse	10
3.1 Grundtypen technischer Prozesse	10
3.2 Mathematische Prozeßmodelle für zeitdiskrete Signale	13
3.2.1 Differenzengleichungen, z-Übertragungsfunktionen ..	13
3.2.3 Vektordifferenzengleichungen	17
3.2.3 Berechnung von Differenzengleichungen und z-Übertragungsfunktionen aus Differential- gleichungen und s-Übertragungsfunktionen	28
3.2.4 Vereinfachung von Prozeßmodellen für zeit- diskrete Signale	34
3.3 Gewinnung der Prozeßmodelle - Modellbildung und Identifikation	39
<u>B Regelungen für deterministische Störungen</u>	<u>41</u>
4. Deterministische Regelungen	41 +
5. Parameteroptimierte Regler	48
5.1 Diskretisieren der Differentialgleichungen kontinuierlicher PID-Regler	48
5.2 Parameteroptimierte diskrete Regelalgorithmen niederer Ordnung	50
5.2.1 Regelalgorithmen erster und zweiter Ordnung	54
5.2.2 Regelalgorithmen mit Vorgabe der ersten Stellgröße	58
5.3 Modifikationen diskreter PID-Regelalgorithmen	60
5.4 Simulationsergebnisse	63
5.4.1 Testprozesse	63
5.4.2 Simulationsergebnisse für Regelalgorithmen zweiter Ordnung	66
5.5 Wahl der Abtastzeit bei parameteroptimierten Regel- algorithmen	82
5.6 Einstellregeln für parameteroptimierte Regelalgorithmen	86

6. Kompensationsregler	94
7. Regler für endliche Einstellzeit (Deadbeat)	100
7.1 Deadbeat-Regler ohne Stellgrößenvorgabe	100
7.2 Deadbeat-Regler mit Stellgrößenvorgabe	105
7.3 Wahl der Abtastzeit bei Deadbeat-Reglern	109
8. Zustandsregler	111
8.1 Optimale Zustandsregler für Anfangswerte	112
8.2 Optimale Zustandsregler für äußere Störungen	123
8.3 Zustandsregler mit vorgegebener charakteristischer Gleichung	129
8.4 Modale Zustandsregelung	131
8.5 Zustandsregler für endliche Einstellzeit (Deadbeat)	137
8.6 Zustandsgrößen-Beobachter	139
8.7 Zustandsregler mit Beobachter	143
8.7.1 Beobachter für Anfangswerte	143
8.7.2 Beobachter für äußere Störungen	145
8.8 Zustandsgrößen-Beobachter reduzierter Ordnung	155
8.9 Zur Wahl der Bewertungsmatrizen und der Abtastzeit	160
8.9.1 Bewertungsmatrizen bei Zustandsreglern und Beobachtern	161
8.9.2 Wahl der Abtastzeit	162
9. Regler für Prozesse mit großen Totzeiten	164
9.1 Modelle für Prozesse mit Totzeiten	164
9.2 Deterministische Regler für Totzeitprozesse	166
9.2.1 Prozesse mit großen Totzeiten und zusätzlicher Dynamik	167
9.2.2 Reine Totzeitprozesse	169
9.3 Vergleich der Regelgüte und Empfindlichkeit verschiedener Regler für Totzeitprozesse	174
10. Regelung von variablen Prozessen mit konstanten Reglern.....	181
10.1 Zur Empfindlichkeit von Regelungen	182
10.2 Zur Regelung von Prozessen mit großen Parameter- änderungen	188
11. Vergleich verschiedener Regler für deterministische Störsignale	190
11.1 Vergleich von Reglerstrukturen, Polen und Nullstellen ..	190
11.1.1 Allgemeiner linearer Regler für vorgegebene Pole	192
11.1.2 Parameteroptimierte Regler niederer Ordnung	194
11.1.3 Allgemeiner Kompensationsregler	194
11.1.4 Deadbeat-Regler	194

11.1.5	Prädiktorregler	196
11.1.6	Zustandsregler	197
11.2	Kennwerte für einen Gütevergleich	201
11.3	Gütevergleich der Regelalgorithmen	203
11.4	Vergleich des dynamischen Regelfaktors	217
11.5	Folgerungen für die Anwendung der Regelalgorithmen	224
<u>C Regelungen für stochastische Störungen</u>		<u>227</u>
12.	Stochastische Regelungen	227
12.1	Vorbemerkungen	227
12.2	Mathematische Modelle stochastischer Signalprozesse	228
12.2.1	Grundbegriffe	228
12.2.2	Markov-Signalprozeß	231
12.2.3	Skalare stochastische Differenzengleichungen	233
13.	Parameteroptimierte Regler für stochastische Störsignale	235 +
14.	Minimal-Varianz-Regler für stochastische Störsignale	239 +
14.1	Verallgemeinerte Minimal-Varianz-Regler für Prozesse ohne Totzeiten	239
14.2	Verallgemeinerte Minimal-Varianz-Regler für Prozesse mit Totzeiten	249
14.3	Minimal-Varianz-Regler für Prozesse mit reinen Totzeiten	254
14.4	Simulationsergebnisse mit Minimal-Varianz-Reglern	255
15.	Zustandsregler für stochastische Störungen	261
15.1	Optimale Zustandsregler für weißes Rauschen	261
15.2	Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung für weiße Störsignale	264
15.3	Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung für äußere Störsignale	267
<u>D Vermaschte Regelungen</u>		<u>274</u>
16.	Kaskaden-Regelungen	275
17.	Steuerungen zur Störgrößenaufschaltung	284
17.1	Kompensationssteuerungen	287
17.2	Parameteroptimierte Steuerungen	291
17.2.1	Parameteroptimierte Steuerung ohne Stellgrößen- vorgabe	291
17.2.2	Parameteroptimierte Steuerung mit Stellgrößen- vorgabe	292
17.3	Zustandssteuerungen	297

17.4 Minimal-Varianz-Steuerungen	298
<u>E Mehrgrößen-Regelungen</u>	301
18. Strukturen von Mehrgrößenprozessen	301
18.1 Strukturelle Eigenschaften bei Übertragungsdarstellung .	302
18.1.1 Kanonische Strukturen	302
18.1.2 Charakteristische Gleichung und Koppelfaktor	307
18.1.3 Einwirkung äußerer Signale	311
18.1.4 Gegenseitige Wirkung der Hauptregler	312
18.2 Strukturelle Eigenschaften bei Zustandsdarstellung	315
19. Parameteroptimierte Mehrgrößen-Regelungen	323
19.1 Parameteroptimierung der Hauptregler ohne Koppelregler .	325
19.1.1 Stabilitätsgebiete	327
19.1.2 Optimierung der Reglerparameter und Einstell- regeln für Zweigrößenregler	332
19.2 Entkopplung durch Koppelregler (Autonomisierung)	337
19.3 Parameteroptimierung von Haupt- und Koppelreglern	341
20. Mehrgrößen-Regelungen mit Zustandsreglern	345
<u>F Signalfilterung und Zustandsschätzung</u>	351
21. Tief- und Hochpaßfilter für zeitdiskrete Signale	353
22. Zustandsgrößenschätzung	362
22.1 Vektorielle Signalprozesse und Annahmen	364
22.2 Rekursive Schätzung skalarer Größen	366
22.2.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier skalarer Größen	366
22.2.2 Rekursive Schätzung einer konstanten Größe	367
22.2.3 Rekursive Schätzung einer stochastischen zeit- varianten Größe	368
22.3 Rekursive Schätzung vektorieller Größen	376
22.3.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier vektorieller Meßwerte	376
22.3.2 Rekursive Schätzung vektorieller Zustandsgrößen (Kalman-Filter)	379
<u>G Adaptive Regelungen</u>	391
23. Adaptive Regelungen - ein kurzer Überblick	391

24. On-line-Identifikation dynamischer Prozesse und stochastischer Signale	395
24.1 Prozeß- und Störsignalmodelle	396
24.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate (RLS)	397
24.2.1 Dynamische Prozesse	397
24.2.2 Stochastische Signale	401
24.3 Rekursive, erweiterte Methode der kleinsten Quadrate (RELS)	402
24.4 Rekursive Methode der Hilfsvariablen (RIV)	403
24.5 Rekursive Maximum-Likelihood-Methode (RML)	405
24.6 Methode der stochastischen Approximation (STA)	408
24.7 Einheitlicher rekursiver Parameterschätzalgorithmus und Vergleich der verschiedenen Methoden	409
25. On-line-Identifikation im geschlossenen Regelkreis	413
25.1 Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	414
25.1.1 Indirekte Prozeßidentifikation	416
25.1.2 Direkte Prozeßidentifikation	421
25.2 Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal	425
25.3 Methoden zur Identifikation im geschlossenen Regelkreis	427
25.3.1 Indirekte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal	428
25.3.2 Direkte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal ..	428
25.3.3 Direkte Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal ...	429
26. Selbstoptimierende adaptive Regler	430
26.1 Übersicht selbstoptimierender adaptiver Regler	430
26.2 Geeignete Regelalgorithmen	437
26.2.1 Deadbeat-Regelalgorithmen	437
26.2.2 Minimal-Varianz-Regler	438
26.2.3 Parameteroptimierte Regler	440
26.2.4 Allgemeiner linearer Regler mit Polvorgabe	443
26.2.5 Zustandsregler	443
26.2.6 Vergleich der Regelgüte bei verschiedenen Störsignalen	443
26.2.7 Bewertung der verschiedenen Eigenschaften	444
26.3 Geeignete Kombinationen von Identifikations- und Regelalgorithmen	449
26.3.1 Adaptive Regler RLS - MV4	450
26.3.2 Adaptive Regler RLS - MV3	453
26.3.3 Adaptive Regler RML - MV3	453
26.3.4 Adaptive Regler RLS - DB	453
26.4 Vergleich verschiedener adaptiver Regler	455
26.5 Beispiele adaptiver digitaler Regelungen mit einem Prozeßrechner	464

26.5.1 Pipeline-Modellprozeß (nichtlinearer Prozeß)	464
26.5.2 Analog simulierter instabiler Prozeß	464
26.5.3 Schlußfolgerungen	466

H Zur digitalen Regelung mit Prozeßrechnern und

<u>Mikroprozessoren</u>	468
27. Einfluß der Amplitudenquantisierung bei digitalen Regelungen	470
27.1 Ursachen von Quantisierungsfehlern	470
27.2 Verschiedene Quantisierungseffekte	476
27.2.1 Quantisierungseffekte von Variablen	476
27.2.2 Quantisierungseffekte von Koeffizienten	481
27.2.3 Quantisierungseffekte von Zwischenergebnissen ...	481
28. Störsignalfilterung	488
29. Anpassung von Regelalgorithmen an verschiedene Stellantriebe	498
30. Rechnergestützter Entwurf von Regel- und Steueralgorithmen ..	514
Anhang	524
Literatur	531
Verzeichnis der Abkürzungen	545
Sachverzeichnis	550