

Inhalt

Inhaltsübersicht zu Band I und Band III	xiii
1 Behandlung linearer kontinuierlicher Systeme im Zustandsraum	1
1.1 Die Zustandsraumdarstellung	1
1.2 Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	6
1.2.1 Die Fundamentalmatrix.....	6
1.2.2 Eigenschaften der Fundamentalmatrix.....	9
1.2.3 Die Gewichtsmatrix oder Matrix der Gewichtsfunktionen	10
1.3 Lösung der Zustandsgleichungen im Frequenzbereich	11
1.4 Einige Grundlagen der Matrizen­theorie zur Berechnung der Fundamentalmatrix	15
1.4.1 Der Satz von Cayley-Hamilton	15
1.4.2 Anwendung auf Matrizenfunktionen	18
1.4.3 Der Entwicklungssatz von Sylvester.....	20
1.5 Normalformen für Eingrößensysteme in Zustandsraumdarstellung	21
1.5.1 Frobenius-Form oder Regelungsnormalform.....	22
1.5.2 Beobachtungsnormalform	25
1.5.3 Diagonalform und Jordan-Normalform	27
1.5.3.1 Einfache reelle Pole (Diagonalform)	27
1.5.3.2 Mehrfache reelle Pole (Jordan-Normalform).....	29
1.5.3.3 Konjugiert komplexe Pole (Blockdiagonal-Form).....	32
1.6 Transformation der Zustandsgleichungen auf Normalformen	34
1.6.1 Ähnlichkeitstransformation.....	35
1.6.2 Transformation auf Diagonalform	36
1.6.3 Transformation auf Jordan-Normalform.....	39
1.6.4 Anwendung kanonischer Transformationen	42
1.7 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	45
1.7.1 Steuerbarkeit	46
1.7.2 Beobachtbarkeit	50
1.7.3 Anwendung der Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsbegriffe.....	52

1.8 Synthese linearer Regelsysteme im Zustandsraum	56
1.8.1 Das geschlossene Regelsystem	56
1.8.1.1 Regelsystem mit Rückführung des Zustandsvektors	58
1.8.1.2 Regelsystem mit Rückführung des Ausgangsvektors	59
1.8.1.3 Berechnung des Vorfilters	60
1.8.2 Der Grundgedanke der Reglersynthese.....	60
1.8.3 Verfahren zur Synthese von Zustandsreglern	61
1.8.3.1 Das Verfahren der Polvorgabe.....	61
1.8.3.2 Die modale Regelung.....	62
1.8.3.3 Optimaler Zustandsregler nach dem quadratischen Gütekriterium.....	62
1.8.4 Das Messproblem	63
1.8.5 Einige kritische Anmerkungen	64
1.8.6 Synthese von Zustandsreglern durch Polvorgabe	64
1.8.6.1 Entwurf eines Zustandsreglers für Ein- und Mehrgrößensysteme durch Polvorgabe.....	64
1.8.6.2 Reglerentwurf durch Polvorgabe bei Eingrößensystemen in der Regelungsnormalform	74
1.8.6.3 Reglerentwurf durch Polvorgabe bei Eingrößensystemen in beliebiger Zustandsraumdarstellung.....	77
1.8.7 Zustandsrekonstruktion mittels Beobachter.....	81
1.8.7.1 Entwurf eines Identitätsbeobachters für Ein- und Mehrgrößensysteme durch Polvorgabe.....	81
1.8.7.2 Beobachterentwurf durch Polvorgabe für Eingrößensysteme in der Beobachtungsnormalform	89
1.8.7.3 Beobachterentwurf durch Polvorgabe für Eingrößensysteme in beliebiger Zustandsraumdarstellung.....	90
1.8.7.4 Das geschlossene Regelsystem mit Zustandsbeobachter	95
1.8.7.5 Der Entwurf eines reduzierten Beobachters.....	97
2 Lineare zeitdiskrete Systeme (digitale Regelung)	101
2.1 Arbeitsweise digitaler Regelsysteme	101
2.2 Grundlagen der mathematischen Behandlung digitaler Regelsysteme	103
2.2.1 Diskrete Systemdarstellung durch Differenzgleichung und Faltungssumme	103
2.2.2 Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs	106
2.3 Die z-Transformation	109
2.3.1 Definition der z-Transformation	109
2.3.2 Eigenschaften der z-Transformation.....	113
2.3.3 Die inverse z-Transformation	114
2.4 Darstellung im Frequenzbereich	117
2.4.1 Übertragungsfunktion diskreter Systeme.....	117
2.4.2 Berechnung der z-Übertragungsfunktion kontinuierlicher Systeme	119

2.4.2.1 Herleitung der Transformationsbeziehungen.....	119
2.4.2.2 Durchführung der exakten Transformation.....	123
2.4.2.3 Durchführung der approximierten Transformation.....	126
2.4.3 Einige Strukturen von Abtastsystemen.....	128
2.4.4 Stabilität diskreter Systeme.....	131
2.4.4.1 Bedingungen für die Stabilität.....	131
2.4.4.2 Zusammenhang zwischen dem Zeitverhalten und den Polen bei kontinuierlichen und diskreten Systemen.....	134
2.4.4.3 Stabilitätskriterien.....	137
2.4.5 Spektrale Darstellung von Abtastsignalen und diskreter Frequenzgang.....	139
2.5 Regelalgorithmen für die digitale Regelung.....	143
2.5.1 PID-Algorithmus.....	143
2.5.2 Der Entwurf diskreter Kompensationsalgorithmen.....	146
2.5.2.1 Allgemeine Grundlagen.....	146
2.5.2.2 Deadbeat-Regelkreisentwurf für Führungsverhalten.....	150
2.5.2.3 Deadbeat-Regelkreisentwurf für Störungs- und Führungsverhalten.....	156
2.5.2.4 Vor- und Nachteile des Kompensationsverfahrens.....	164
2.6 Darstellung im Zustandsraum.....	164
2.6.1 Normalformen für Eingrößensysteme.....	165
2.6.1.1 Regelungsnormalform.....	165
2.6.1.2 Beobachtungsnormalform.....	167
2.6.2 Lösung der Zustandsgleichungen.....	169
2.6.3 Zusammenhang zwischen der kontinuierlichen und der diskreten Zustandsraumdarstellung.....	170
2.6.4 Stabilität, Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit.....	172
3 Nichtlineare Regelsysteme.....	173
3.1 Allgemeine Eigenschaften nichtlinearer Regelsysteme.....	173
3.2 Regelkreise mit Zwei- und Dreipunktreglern.....	178
3.2.1 Der einfache Zweipunktregler.....	178
3.2.2 Der einfache Dreipunktregler.....	184
3.2.3 Zwei- und Dreipunktregler mit Rückführung.....	186
3.2.3.1 Der Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung.....	187
3.2.3.2 Der Zweipunktregler mit verzögert nachgebender Rückführung.....	188
3.2.3.3 Der Dreipunktregler mit verzögerter Rückführung.....	188
3.3 Analyse nichtlinearer Regelsysteme mit Hilfe der Beschreibungsfunktion.....	190
3.3.1 Die Methode der harmonischen Linearisierung.....	190
3.3.2 Die Beschreibungsfunktion.....	192
3.3.3 Berechnung der Beschreibungsfunktion.....	194
3.3.4 Stabilitätsuntersuchung mittels der Beschreibungsfunktion.....	199

3.4 Analyse nichtlinearer Regelsysteme in der Phasenebene	203
3.4.1 Der Grundgedanke.....	204
3.4.2 Der Verlauf der Zustandskurven.....	206
3.5 Untersuchung von Relaisregelsystemen mit der Methode der Phasenebene	209
3.5.1 Zweipunktregler ohne Hysterese.....	209
3.5.2 Zweipunktregler mit Hysterese.....	213
3.6 Zeitoptimale Regelung	217
3.6.1 Beispiel in der Phasenebene.....	217
3.6.2 Zeitoptimale Systeme höherer Ordnung.....	220
3.7 Stabilitätstheorie nach Ljapunow	222
3.7.1 Definition der Stabilität.....	222
3.7.2 Der Grundgedanke der direkten Methode von Ljapunow.....	225
3.7.3 Stabilitätssätze von Ljapunow.....	227
3.7.4 Ermittlung geeigneter Ljapunow-Funktionen.....	232
3.7.5 Anwendung der direkten Methode von Ljapunow.....	237
3.8 Das Stabilitätskriterium von Popov	241
3.8.1 Absolute Stabilität.....	242
3.8.2 Formulierung des Popov-Kriteriums.....	244
3.8.3 Geometrische Auswertung der Popov-Ungleichung.....	244
3.8.4 Anwendung des Popov-Kriteriums.....	248
 ANHANG A: Aufgaben	 251
 ANHANG B: Rechnen mit Vektoren und Matrizen	 417
 Literatur	 431
 Sachverzeichnis	 439

Inhaltsübersicht zu Band I und Band III

H. Unbehauen, Regelungstechnik I

1. Einführung in die Problemstellung der Regelungstechnik
2. Einige wichtige Eigenschaften von Regelsystemen
3. Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zeitbereich
4. Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Frequenzbereich
5. Das Verhalten linearer kontinuierlicher Regelsysteme
6. Stabilität linearer kontinuierlicher Regelsysteme
7. Das Wurzelortskurven-Verfahren
8. Klassische Verfahren zum Entwurf linearer kontinuierlicher Regelsysteme
9. Identifikation von Regelkreisgliedern mittels deterministischer Signale
10. Grundlagen der Fuzzy-Regelung

H. Unbehauen, Regelungstechnik III

1. Grundlagen der statistischen Behandlung von Regelsystemen
2. Statistische Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme
3. Systemidentifikation mittels Korrelationsanalyse
4. Systemidentifikation mittels Parameterschätzverfahren
5. Adaptive Regelsysteme
6. Entwurf optimaler Zustandsregler
7. Sonderformen des optimalen Zustandsreglers für zeitinvariante Mehrgrößensysteme