

Nichtlineare Regelungen I

Grundbegriffe
Anwendung der Zustandsebene
Direkte Methode

von
Professor em. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Otto Föllinger
Universität Karlsruhe

8., verbesserte Auflage

Mit.190 Bildern und
18 Übungsaufgaben mit Lösungen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1998

Inhaltsverzeichnis

Band I

1	Grundbegriffe nichtlinearer Systeme	17
1.1	Lineare und nichtlineare Übertragungsglieder	17
1.2	Struktur nichtlinearer Systeme	23
1.3	Häufig auftretende Kennlinien	31
1.4	Ruhelagen dynamischer Systeme	41
1.5	Nichtlineare Standardregelung	50
1.6	Stabilitätsverhalten einer Ruhelage	53
1.7	Anwendung des Ljapunowschen Stabilitätsbegriffs auf lineare Systeme	61
2	Analyse und Entwurf in der Zustandsebene	68
2.1	Prinzipielle Vorgehensweise	69
2.2	Lineare Systeme	75
2.2.1	Die Differentialgleichung $\dot{x} = f(x)$	75
2.2.2	Die Differentialgleichung $\dot{x} + x = eK$	76
2.2.3	Die Differentialgleichung $\dot{x} + a^{\wedge} + a_Q x = 0$, $a_Q \geq 0$	80
2.2.4	Lineare Näherung nichtlinearer Differentialgleichungen in der Umgebung einer Ruhelage	89
2.3	Stabilitätsanalyse und Stabilisierung nichtlinearer Regelkreise in der Zustandsebene	92
2.3.1	Regelkreise mit Relaiskennlinie	92
2.3.2	Regelkreise mit stückweise linearer Kennlinie	100
2.3.3	Grenzzyklen	104
2.3.4	Regelkreise mit Totzeit	115
2.3.5	Grenzzyklen und das Stabilitätsverhalten der Ruhelage	125
2.3.6	Strukturumschaltung	129
2.4	Optimierung von Regelkreisen in der Zustandsebene	142
2.4.1	Vorbemerkung über Optimierung	142
2.4.2	Zeitoptimale Regelung	144
2.4.3	Suboptimale Regelung	152

12	<i>Inhaltsverzeichnis</i>	
2.5	Behandlung von Systemen höherer als 2. Ordnung in der Zustandsebene	156
2.6	Nichtlineare Systeme 1. Ordnung in der Zustandsebene	162
	2.6.1 Regelkreis mit Hysteresekennlinie	162
	2.6.2 Schaltender PI-Regler	166
3	Grundzüge und Anwendung der Direkten Methode	177
3.1	Grundgedanke der Direkten Methode	177
3.2	Stabilitätskriterien	182
3.3	Konstruktion von Ljapunow-Funktionen	189
	3.3.1 Positiv definite Funktionen	190
	3.3.2 Ljapunow-Funktionen für lineare Systeme	194
	3.3.3 Beispiele zur Konstruktion von Ljapunow-Funktionen für nichtlineare Systeme	201
	3.3.4 Die Methode von <i>M.A.Aiserman</i>	211
3.4	Eine Anwendung der Direkten Methode: Methode der ersten Näherung	218
3.5	Weitere Anwendung der Direkten Methode: Entwurf struktumschaltender Regelungen	232
	3.5.1 Zweck und mathematische Beschreibung struktumschaltender Regelungen	232
	3.5.2 Entwurf der Umschalt Strategie mittels einer Ljapunow-Funktion	237
	3.5.3 Beispiel und Literaturanmerkungen	243
3.6	Eine dritte Anwendung der Direkten Methode: Synthese nichtlinearer Regelungen durch Gütemaßangleichung nach <i>U. Sieber</i>	253
	3.6.1 Mathematische Vorbemerkung: Kronecker-Produkt und Vektorsierungsoperator	253
	3.6.2 Beschreibung des Syntheseverfahrens	260
	3.6.3 Herleitung der Reglerformel	265
	3.6.4 Beispiel: Über Feld und Anker geregelter Gleichstrommotor	269
	3.6.5 Entwurf nichtlinearer Ausgangsrückführungen	274
	Übungsaufgaben mit Lösungen zu Band I	292
	Verzeichnis von Buchveröffentlichungen zu nichtlinearen Systemen	337
	Sachwortverzeichnis zu Band I	344

Band II

4	Hannonische Balance (Harmonische Linearisierung, Methode der Beschreibungsfunktion)	11
4.1	Einführung der Beschreibungsfunktion und die Gleichung der Harmonischen Balance	12
4.2	Berechnung der Beschreibungsfunktion	22
4.3	Lösung der Gleichung der Harmonischen Balance	30
4.4	Beispiele zur Lösung der Gleichung der Harmonischen Balance	37
4.4.1	Regelkreis mit Dreipunktkenlinie	37
4.4.2	Nichtlineare Regelungen mit Totzeit	45
4.4.3	Regelkreis mit Hysterese	53
4.4.4	Ein kritischer Fall	57
4.5	Benutzung von Frequenzkennlinien	63
4.6	Stabilitätsverhalten von Dauerschwingungen	69
4.7	Dauerschwingungen und das Stabilitätsverhalten der Ruhelage	82
4.8	Stabilisierung nichtlinearer Regelungen	87
4.8.1	Lineare Stabilisierung	87
4.8.2	Nichtlineare Stabilisierung anhand eines Anwendungsbeispiels	91
4.9	Anwendung der Harmonischen Balance auf Regelkreise mit mehreren Kennlinien	107
4.9.1	In Reihe gelegene Kennlinien	107
4.9.2	Beliebige Lage der Kennlinien im Regelkreis	114
4.10	Anwendung der Harmonischen Balance auf Regelkreise mit unsymmetrischer Kennlinie und konstanten Eingangsgrößen	121
4.10.1	Aufstellen der Gleichungen der Harmonischen Balance	121
4.10.2	Lösung der Gleichungen der Harmonischen Balance	129
4.11	Harmonische Balance bei sinusförmigen Eingangsgrößen und allgemeineren Nichtlinearitäten (Querverbindung zur Schwingungstechnik)	139
4.11.1	Die Schwingungsdifferentialgleichung als Regelkreis	140
4.11.2	Die Gleichung der Harmonischen Balance für den Regelkreis der Schwingungsdifferentialgleichung	146
4.11.3	Beispiele	149
4.11.4	Die ungedämpfte Schwingungsdifferentialgleichung $x + f(x) = 0$	152
4.12	Zusammenstellung einiger Beschreibungsfunktionen	157

14	<i>Inhaltsverzeichnis</i>	
5	Stabilitätskriterien im Frequenzbereich	159
5.1	Die absolute Stabilität von Regelkreisen	159
5.2	Das Popow-Kriterium	161
5.3	Erweiterungen des Popow-Kriteriums	166
5.4	Formelmäßige Lösung der Popow-Ungleichung	169
5.5	Geometrische Deutung der Popow-Ungleichung	173
5.6	Sektortransformation	179
5.7	Popow-Sektor und Hurwitz-Sektor	186
5.8	Das Kreiskriterium	197
	5.8.1 Zusammenhang zwischen Popow- und Kreiskriterium	197
	5.8.2 Anwendung des Kreiskriteriums	201
	5.8.3 Vergleich von Popow- und Kreiskriterium	204
6	HyperStabilität	209
6.1	Begriff der Hyperstabilität	209
6.2	Hyperstabilitätskriterien	221
6.3	Behandlung von Eingrößenregelungen mittels der Hyperstabilität	232
	6.3.1 Allgemeine Vorgehensweise	232
	6.3.2 Beispiele	240
	6.3.3 Ein Regelkreis mit Stellgrößenbegrenzung	246
6.4	Behandlung von Mehrgrößenregelungen mittels der Hyperstabilität	254
	6.4.1 Allgemeine Vorgehensweise	254
	6.4.2 Beispiele	257
6.5	Verknüpfung hyperstabiler Systeme	266
	6.5.1 Verknüpfungsregeln	266
	6.5.2 Anwendung der Verknüpfungsregeln zur Regelungssynthese	271
7	Synthese nichtlinearer Regelungen durch Kompensation und Entkopplung („globale“ oder „exakte Linearisierung“)	281
7.1	Struktur der nichtlinearen Strecke	283
7.2	Begriff der Differenzordnung und direkte Systembeschreibung	288
7.3	Entwurf nichtlinearer Eingrößenregelungen durch Kompensation	299
7.4	Entwurf nichtlinearer Mehrgrößenregelungen durch Kompensation und Entkopplung	309

	<i>Inhaltsverzeichnis</i>	15
7.5	Nichtlineare Beobachter	324
7.5.1	Beobachterentwurf mittels Linearisierung	326
7.5.2	Beobachterentwurf mittels Gütemaßangleichung	337
	Übungsaufgaben mit Lösungen zu Band II	349
	Verzeichnis von Buchveröffentlichungen zu nichtlinearen Systemen	387
	Sachwortverzeichnis zu Band II	394