

J. Böcker · I. Hartmann · Ch. Zwanzig

# Nichtlineare und adaptive Regelungssysteme

Mit 194 Abbildungen

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1986

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführende Betrachtungen und nichtlineare Modelle</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung	1
1.2	Beispiele nichtlinearer Systeme	5
1.3	Ruhelagen, Arbeitspunkte und deren Stabilität	11
1.4	Das exakte nichtlineare Modell der Änderungen um einen Arbeitspunkt	17
1.5	Linearisierung eines nichtlinearen Systems	20
1.6	Systeme 2. Ordnung in der Zustandsebene	26
1.7	Verbesserung der Dynamik von Regelkreisen mit Stellgrößenbeschränkung durch "anti-reset-windup" (ARW)	34
<b>2</b>	<b>Periodisches Verhalten von nichtlinearen Systemen</b>	<b>40</b>
2.1	Geschlossene Trajektorien und deren Stabilität	41
2.2	Nichtlineare Systeme 2. Ordnung	43
2.2.1	Untersuchungen von Dauerschwingungen und Grenzzyklen	44
2.2.2	Beispiele	49
2.2.3	Zusammenhänge zwischen der Existenz von Ruhelagen und Dauerschwingungen	62
2.3	Die Methode der Harmonischen Balance	68
2.3.1	Vorbemerkungen	68
2.3.2	Annahmen und Voraussetzungen für die Methode der Harmonischen Balance	71
2.3.3	Die Gleichung der Harmonischen Balance	77
2.3.4	Berechnung von Beschreibungsfunktionen	79
2.3.5	Auswertung der Gleichung der Harmonischen Balance	86
2.3.6	Untersuchung des Stabilitätsverhaltens von Grenzschrwingungen	99
2.4	Korrekturglieder zur Erzeugung, Unterdrückung bzw. Verminderung der Amplitude von Grenzschrwingungen	107
2.4.1	Anwendung von Ljapunov-Funktionen	108
2.4.2	Anwendung der Methode der Harmonischen Balance	109

<b>3</b>	<b>Funktionalanalytische Methoden zur</b>	
	<b>Stabilitätsuntersuchung nichtlinearer Systeme</b>	118
3.1	Grundlagen	119
3.1.1	Der nichtlineare Standardregelkreis und die Stabilitätsbegriffe	119
3.1.2	Allgemeine Stabilitätssätze	122
3.1.3	Exponentielle Stabilität	134
3.1.4	Berücksichtigung von Anfangszuständen	136
3.2	Kreiskriterium ( $L_2$ -Stabilität)	137
3.2.1	Ortskurvendarstellung des Kreiskriteriums	143
3.2.2	Darstellung des Kreiskriteriums in der Wurzelortsebene	163
3.2.3	Algebraische Auswertung des Kreiskriteriums	167
3.3	Kreiskriterium für Mehrgrößensysteme ( $L_2^n$ -Stabilität)	173
3.3.1	Algebraische Auswertung des Mehrgrößen- kreiskriteriums	176
3.3.2	Ortskurvendarstellung des Mehrgrößen- kreiskriteriums	184
3.4	Modifikationen des Kreiskriteriums	195
3.5	$L_\infty$ -Stabilität	201
<b>4</b>	<b>Analyse und Synthese von Regelkreisen im Zustandsraum</b>	216
4.1	Einführende Betrachtungen zu nichtlinearen Zustandsmodellen	216
4.2	Einfache Stabilitätskriterien	223
4.2.1	Stabilität in der ersten Näherung	223
4.2.2	Stabilitätsverhalten periodischer Lösungen von zeitdiskreten Systemen	227
4.3	Die direkte Methode von Ljapunov	237
4.3.1	Stabilitätssätze von Ljapunov für zeitkontinuier- liche Systeme (direkte Methode)	240
4.3.2	Auffinden von Ljapunovfunktionen - zeitkontinuierlich -	248
4.3.3	Zubov-Methode bei kontinuierlichen Systemen	261
4.3.4	Stabilitätskriterien für zeitdiskrete Zustandsmodelle	265
4.4	Nichtlineare Parameter- und Zustandsschätzung	279
4.4.1	Dynamische Beobachtung des Zustandes	279
4.4.2	Parameterschätzung	291

4.5	Pulsbreitenmodulierte Regelungssysteme .....	292
4.6	Entwurf nichtlinearer Regelkreise .....	298
4.6.1	Einführende Betrachtungen .....	298
4.6.2	Entwurf mit der erweiterten Ljapunov-Methode .....	305
<b>5</b>	<b>Adaptive Systeme .....</b>	<b>317</b>
5.1	Einführung .....	317
5.2	Allgemeine Beziehungen zur Berechnung der Reglerparameter bei bekannter Regelstrecke und vorgegebenem Regelkreis- verhalten .....	330
5.2.1	Vorgabe des Führungsverhaltens (Pol- und Nullstellenvorgabe) .....	331
5.2.2	Vorgabe eines Störverhaltens (Minimum-Varianz-Regler) .....	342
5.3	Self-Tuning-Regler .....	351
5.3.1	Einführung .....	351
5.3.2	Übergang von einem expliziten zu einem impliziten Self-Tuning-Regler bei Vorgabe des Führungs- verhaltens .....	354
5.3.3	Ein Self-Tuning-Algorithmus für den Minimum- Varianz-Regler .....	356
5.3.4	Ein selbsteinstellender zeitdiskreter PID-Regler nach dem Verfahren von Ziegler-Nichols .....	359
5.4	Konvergenzbetrachtungen bei Self-Tuning-Regelkreisen ....	362
5.4.1	Vorbemerkungen .....	362
5.4.2	Self-Tuning-Regler bei Vorgabe eines Referenz- modells .....	365
5.4.3	Self-Tuning-Regler bei Vorgabe der Polstellen des geschlossenen Regelkreises .....	375
5.5	Zeitkontinuierliche MRAS-Strukturen .....	379
5.5.1	Einleitende Bemerkungen .....	379
5.5.2	Das Fehlermodell für den Zustandsfehler .....	382
5.5.3	Anwendung der direkten Methode von Ljapunov zur Herleitung von Adaptionsgleichungen .....	384
5.5.4	Anwendung der Hyperstabilitätstheorie zur Herleitung von Adaptionsgleichungen .....	388
5.5.5	Adaptiver Zustandsregler .....	397
5.5.6	Anwendung von Hilfsfiltern zur Vermeidung zeit- licher Ableitungen in den Adaptionsgesetzen .....	403

5.6 Zeitdiskrete MRAS-Strukturen .....	413
5.6.1 Vorbemerkungen .....	413
5.6.2 Das Fehlermodell .....	413
5.6.3 Anwendung der Hyperstabilitätstheorie zur Herleitung von Adaptionsgleichungen .....	415
5.7 Schätzung der Drehzahl einer konstant erregten Gleich- strommaschine mit einer MRAS-Struktur bei Messung von Ankerstrom und Ankerspannung .....	420
5.7.1 Drehzahlschätzung bei bekanntem konstantem Ankerwiderstand .....	420
5.7.2 Drehzahl- und Lastmomentschätzung bei bekanntem konstantem Ankerwiderstand .....	425
5.7.3 Drehzahlschätzung bei gleichzeitiger Schätzung des Ankerwiderstandes durch Adaption .....	426
5.8 Abschließende Bemerkungen .....	428

## Anhang

<b>A1 Mathematische Grundlagen gewöhnlicher Differentialgleichungen</b> .....	432
A1.1 Bezeichnungen .....	432
A1.2 Problemstellung und Definitionen .....	433
A1.3 Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen .....	434
A1.4 Gronwall-Ungleichung .....	441
A1.5 Stetigkeit und Differenzierbarkeit einer Lösung bezüg- lich der Anfangswerte und eventueller Parameter .....	442
<b>A2 Funktionaltransformationen</b> .....	445
A2.1 Fourier- und Laplace-Transformation .....	445
A2.2 Diskrete Fourier-Transformation, Fourier-Reihen und Z-Transformation .....	453
A2.3 Zusammenhänge zwischen zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Funktionen .....	459
A2.3.1 Zeitkontinuierliche und abgetastete Funktionen im Fourier-Bereich .....	459
A2.3.2 Zusammenhänge zwischen Fourier- und diskreter Fouriertransformation sowie zwischen Laplace- und Z-Transformation .....	463

<b>A3</b>	<b>Hilfsmittel der Funktionalanalysis</b>	466
A3.1	Einige Begriffe aus der Funktionalanalysis	466
A3.2	Spezielle Funktionenräume	470
A3.3	Faltungsoperatoren	477
A3.4	Matrixnormen	480
<b>A4</b>	<b>Zustandsregler-Beobachter-Entwurf bei linearen Regelstrecken</b>	487
A4.1	Der Zustandsregler	488
A4.2	Der dynamische Zustandsregler	489
A4.3	Kürzung von Nullstellen der Regelstrecke	497
<b>A5</b>	<b>Grundlagen der Stochastik</b>	499
A5.1	Grundbegriffe	499
A5.2	Die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen	500
A5.3	Die Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte	502
A5.4	Der Erwartungswert	504
A5.5	Die Momente einer Verteilung	505
A5.6	Zufallsgrößen	506
A5.7	Zufallsvektoren	509
A5.8	Zufallsprozesse	510
A5.9	Weißer Zufallsprozesse	513
A5.10	Stochastische Eigenschaften von Parameter- schätzverfahren	514
<b>A6</b>	<b>Parameterschätzverfahren</b>	516
A6.1	Die Methode der kleinsten Quadrate (MKQ)	516
A6.1.1	Allgemeine nichtrekursive Schätzgleichung	516
A6.1.2	Parameteridentifikation bei linearen Systemen	517
A6.1.3	Rekursive Schätzgleichung	519
A6.1.4	Der Einfluß der Anfangswerte $\underline{s}_0$ und $\underline{p}_0$	522
A6.1.5	Rekursive Schätzgleichung bei exponentieller Wichtung der Meßdaten	524
A6.1.6	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate bei korreliertem Störprozeß	525
A6.1.7	Umformung eines rekursiven MKQ-Algorithmus zur Verminderung des Rechenaufwandes	527
A6.1.8	Schwierigkeiten bei der Schätzung von Parametern linearer zeitdiskreter Systeme	529

A6.2 Die Methode der "Instrumentellen Variablen" (IV-Methode)	529
A6.3 Das Matrizeninversionslemma .....	531
<b>A7 Positive dynamische Systeme</b> .....	532
A7.1 Zeitkontinuierliche positive Systeme .....	532
A7.2 Zeitdiskrete positive Systeme .....	540
<b>A8 Hyperstabilität</b> .....	546
A8.1 Zeitkontinuierliche Regelkreise .....	546
A8.2 Zeitdiskrete Regelkreise .....	551
A8.3 Eigenschaften von Systemen der Klasse $\mathcal{P}$ bzw. $\mathcal{P}'$ .....	553
<b>Literatur</b> .....	556
<b>Sachverzeichnis</b> .....	568