

J. Böcker · I. Hartmann · Ch. Zwanzig

Nichtlineare und adaptive Regelungssysteme

Mit 194 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo 1986

Inhaltsverzeichnis

1 Einführende Betrachtungen und nichtlineare Modelle	1
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
2 Periodisches Verhalten von nichtlinearen Systemen	40
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 Grenzschwingungen	99
2.4 Korrekturglieder zur Erzeugung, Unterdrückung bzw. Verminderung der Amplitude von Grenzschwingungen	107
2.4.1 Anwendung von Ljapunov-Funktionen	108
2.4.2 Anwendung der Methode der Harmonischen Balance ...	109

3 Funktionalanalytische Methoden zur Stabilitätsuntersuchung nichtlinearer Systeme	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_∞-Stabilität	201
4 Analyse und Synthese von Regelkreisen im Zustandsraum	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 zeitkontinuierliche 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
5 Adaptive Systeme	317
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 Adoptionsgleichungen	384
5.5.4 Anwendung der Hyperstabilitätstheorie zur Herleitung von Adoptionsgleichungen	388
5.5.5 Adaptiver Zustandsregler	397
5.5.6 Anwendung von Hilfsfiltern zur Vermeidung zeit- licher Ableitungen in den Adoptionsgesetzen	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 Adoptionsgleichungen	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

A1 Mathematische Grundlagen gewöhnlicher Differentialgleichungen	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
A2 Funktionaltransformationen	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

A3 Hilfsmittel der Funktionalanalysis	466
A3.1 Einige Begriffe aus der Funktionalanalysis	466
A3.2 Spezielle Funktionenräume	470
A3.3 Faltungsoperatoren	477
A3.4 Matrixnormen	480
A4 Zustandsregler-Beobachter-Entwurf bei linearen Regelstrecken	487
A4.1 Der Zustandsregler	488
A4.2 Der dynamische Zustandsregler	489
A4.3 Kürzung von Nullstellen der Regelstrecke	497
A5 Grundlagen der Stochastik	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 Weiße Zufallsprozesse	513
A5.10 Stochastische Eigenschaften von Parameterschätzverfahren	514
A6 Parameterschätzverfahren	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
A7 Positive dynamische Systeme	532
A7.1 Zeitkontinuierliche positive Systeme	532
A7.2 Zeitdiskrete positive Systeme	540
A8 Hyperstabilität	546
A8.1 Zeitkontinuierliche Regelkreise	546
A8.2 Zeitdiskrete Regelkreise	551
A8.3 Eigenschaften von Systemen der Klasse \mathcal{P} bzw. \mathcal{P}'	553
Literatur	556
Sachverzeichnis	568