

Heinz Unbehauen

Regelungstechnik III

Identifikation, Adaption, Optimierung

5., korrigierte Auflage

Inhalt

1. Grundlagen der statistischen Behandlung von Regelsystemen	1
1.1. Einige Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung	1
1.1.1. Relative Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit	1
1.1.2. Verteilungsfunktion und Dichtefunktion	4
1.1.3. Mittelwerte und Momente	7
1.1.4. Die Gaußverteilung	9
1.2. Stochastische Prozesse	10
1.2.1. Beschreibung stochastischer Prozesse	10
1.2.2. Der stationäre stochastische Prozeß	12
1.3. Korrelationsfunktionen und ihre Eigenschaften	14
1.3.1. Der Korrelationsfaktor	14
1.3.2. Autokorrelations- und Kreuzkorrelationsfunktion	15
1.3.3. Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften von Korrelationsfunktionen	17
1.3.4. Bestimmung der Autokorrelationsfunktion	20
1.4. Die spektrale Leistungsdichte	21
1.4.1. Definition der spektralen Leistungsdichte	21
1.4.2. Einige Beispiele für spektrale Leistungsdichten	23
2. Statistische Bestimmung dynamischer Eigenschaften linearer Systeme	26
2.1. Grundlegende Zusammenhänge	26
2.2. Auflösung der Grundgleichung	28
2.2.1. Auflösung im Frequenzbereich	28
2.2.2. Numerische Lösung im Zeitbereich	30
2.3. Zusammenhang zwischen den spektralen Leistungsdichten am Ein- und Ausgang linearer Systeme	32

3. Systemidentifikation mittels Korrelationsanalyse	37
3.1. Ermittlung der Gewichtsfunktion	37
3.2. Korrelationsanalyse mittels binärer und ternärer Rausch- signale	38
3.2.1. Gewöhnliches binäres Rauschen als Testsignal	38
3.2.2. Quantisiertes binäres Rauschsignal als Testsignal ..	41
3.2.3. Quantisierte binäre und ternäre Pseudo-Rauschsignale als Testsignal	42
3.3. Korrelationsanalyse im geschlossenen Regelkreis	52
3.4. Korrelationsanalyse zur direkten Bestimmung des Frequenz- ganges	54

**4. Systemidentifikation mittels
Parameterschätzverfahren** **57**

4.1. Problemstellung	57
4.2. Parameterschätzung bei linearen Eingrößensystemen	62
4.2.1. Modellstruktur	62
4.2.2. Numerische Lösung des Schätzproblems	68
4.2.2.1. Direkte Lösung (LS-Methode)	68
4.2.2.2. Rekursive Lösung (RLS-Methode)	73
4.2.2.3. Die Hilfsvariablen-Methode oder Methode der "Instrumentellen Variablen" (IV-Methode)	78
4.2.2.4. Die "Maximum-Likelihood"-Methode (ML-Methode)	81
4.2.3. Gewichtete Parameterschätzung	87
4.3. Strukturprüfverfahren	90
4.3.1. Formulierung des Problems	90
4.3.2. Verfahren zur "a priori"-Ermittlung der Ordnung	91
4.3.2.1. Der Determinantenverhältnis-Test (DR-Test) ..	91
4.3.2.2. Der erweiterte Determinantenverhältnis- Test (EDR-Test)	92
4.3.2.3. Der "instrumentelle" Determinantenverhält- nis-Test (IDR-Test)	92
4.3.3. Verfahren zur Bewertung der Ausgangssignalschätzung	93
4.3.3.1. Der Signalfehler-Test	93

4.3.3.2.	Der Fehlerfunktionstest	94
4.3.3.3.	Der statistische F-Test	94
4.3.4.	Verfahren zur Beurteilung der geschätzten Übertragungsfunktion	96
4.3.4.1.	Der Polynom-Test	96
4.3.4.2.	Der kombinierte Polynom- und Dominanz-Test	96
4.3.5.	Vergleich der Verfahren	98
4.4.	Einige praktische Aspekte zur Systemidentifikation	105
4.4.1.	Theoretische Betrachtungen des untersuchten Systems (Stufe I)	105
4.4.2.	Voridentifikation zur Bestimmung der Abtastzeit und der Eingangstestsignale (Stufe II)	106
4.4.3.	Festlegung der Modellstruktur und der Startwerte .. des Rekursionsalgorithmus (Stufe III)	109
4.4.4.	Beobachtung und Beeinflussung der Parameterschätzwerte (Stufe IV)	111
4.4.5.	Modellverifikation (Stufe V)	114
4.5.	Parameterschätzung von Eingrößensystemen im geschlossenen Regelkreis	115
4.5.1.	Indirekte Identifikation	115
4.5.2.	Direkte Identifikation	117
4.6.	Parameterschätzung bei linearen Mehrgrößensystemen	118
4.6.1.	Modellansätze für Mehrgrößensysteme	119
4.6.1.1.	Gesamtmodellansatz	119
4.6.1.2.	Teilmodellansatz	122
4.6.1.3.	Der Einzelmodellansatz	125
4.6.2.	Algorithmen zur Parameterschätzung von Mehrgrößensystemen	128
4.6.2.1.	Parameterschätzung bei Verwendung des Teilmodellansatzes	128
4.6.2.2.	Parameterschätzung bei Verwendung des Einzelmodellansatzes	130
4.6.3.	Einige praktische Gesichtspunkte	131
5.	Adaptive Regelsysteme	133
5.1.	Strukturen adaptiver Regelsysteme	133
5.1.1.	Problemstellung	133

5.1.2.	Drei wichtige Grundstrukturen	136
5.1.2.1.	Verfahren der geregelten Adaption mit parallelem Vergleichsmodell	136
5.1.2.2.	Verfahren der geregelten Adaption ohne Vergleichsmodell	137
5.1.2.3.	Verfahren der gesteuerten Adaption	138
5.1.3.	Extremwertregelsysteme	139
5.1.4.	Die wichtigsten Entwurfsprinzipien	141
5.1.4.1.	Der "Self-tuning"-Regler (ST-Regler)	141
5.1.4.2.	Regleradaption durch Modellvergleich	143
5.2.	Das Prinzip des "Self-tuning"-Reglers	144
5.2.1.	Der Minimum-Varianz-Regler (MV-Regler)	144
5.2.1.1.	Herleitung des MV-Reglers	144
5.2.1.2.	Stabilitätsbetrachtung	149
5.2.1.3.	Erweiterung des MV-Reglers durch Bewer- tung der Stellgröße	150
5.2.2.	Der "Self-tuning"-Regler	152
5.2.2.1.	Herleitung des einfachen "Self-tuning"- Reglers	152
5.2.2.2.	Stabilität und Konvergenz des einfachen "Self-tuning"-Reglers	156
5.2.2.3.	Erweiterung des "Self-tuning"-Reglers für Führungsverhalten	160
5.2.2.4.	Erweiterung des "Self-tuning"-Reglers durch Bewertung der Stell- und Führungs- größe	161
5.3.	Adaptive Regelsysteme mit parallelem Bezugsmodell	170
5.3.1.	Regleradaption nach dem Gradientenverfahren	171
5.3.2.	Einige Grundlagen aus der Stabilitätstheorie	182
5.3.2.1.	Vorbemerkungen	182
5.3.2.2.	Der Satz von Meyer-Kalman-Yacubovich	184
5.3.2.3.	Der Begriff der Hyperstabilität	193
5.3.2.4.	Definition der Hyperstabilität	196
5.3.2.5.	Eigenschaften hyperstabiler Systeme	198
5.3.2.6.	Hyperstabilität linearer Systeme	200
5.3.3.	Regleradaption mit Parallelmodell nach der Stabili- tätstheorie	203
5.3.3.1.	Das allgemeine Adaptionsverfahren	203
5.3.3.2.	Die Realisierung der Modifikationsstufe im Grundregelkreis	207

5.3.4.	Regleradaption mit Parallelmodell unter Verwendung des Satzes von Meyer-Kalman-Yacubovich	211
5.3.5.	Die Methode des "vermehrten Fehlers"	221
5.3.6.	Der Entwurf modelladaptiver Regelsysteme nach der Hyperstabilitätstheorie	231
5.3.6.1.	Der grundlegende Entwurfsgedanke	231
5.3.6.2.	Entwurf für beliebiges Modellverhalten ...	235
5.3.6.3.	Konvergenzverbesserung des Entwurfs	238
5.3.6.4.	Das allgemeine Adaptionsgesetz	240
5.3.6.5.	Das allgemeine Stellgesetz	242
5.3.6.6.	Auslegung der Entwurfsparameter	246
5.3.6.7.	Vereinfachungen des allgemeinen Entwurfsverfahrens	250
5.4.	Zusammenhang zwischen "Self-tuning"-Reglern und modelladaptiven Regelsystemen nach der Hyperstabilitätstheorie	255
5.5.	Die Anwendung der Hyperstabilitätstheorie zur Untersuchung der Stabilität von "Self-tuning"-Reglern	259

6. Entwurf optimaler Zustandsregler 262

6.1.	Problemstellung	262
6.2.	Einige Grundlagen der Variationsrechnung	264
6.2.1.	Aufgabenstellung	264
6.2.2.	Das Fundamentallemma der Variationsrechnung	265
6.2.3.	Das Euler-Lagrange-Verfahren	267
6.2.3.1.	Herleitung für feste Endzeit	267
6.2.3.2.	Herleitung für beliebige Endzeit	272
6.2.4.	Das Hamilton-Verfahren	279
6.2.5.	Vor- und Nachteile der Optimierung nach den Verfahren von Euler-Lagrange und Hamilton	290
6.3.	Das Maximumprinzip von Pontrjagin	290
6.4.	Das optimale lineare Regelgesetz	303
6.4.1.	Herleitung für kontinuierliche zeitvariante Systeme	303
6.4.2.	Kontinuierliche zeitinvariante Systeme als Spezialfall	311
6.4.3.	Herleitung für zeitdiskrete zeitinvariante Systeme	315
6.4.4.	Die stationäre Lösung der Matrix-Riccati-Differenzgleichung	319

6.5.	Lösungsverfahren für die Matrix-Riccati-Gleichung	321
6.5.1.	Der kontinuierliche Fall	321
6.5.1.1.	Direkte Integration	321
6.5.1.2.	Verfahren von Kalman-Englar	323
6.5.1.3.	Newton-Raphson-Methode	323
6.5.1.4.	Verfahren von Kleinman	325
6.5.1.5.	Direkte Lösung durch Diagonalisierung	327
6.5.2.	Der diskrete Fall	330
6.5.2.1.	Rekursives Verfahren	330
6.5.2.2.	Das sukzessive Verfahren	331
6.5.2.3.	Eigenwert-Eigenvektor-Methode	332

7. Sonderformen des optimalen linearen Zustandsreglers für zeitinvariante

Mehrgrößensysteme

336

7.1.	Einführende Bemerkungen	336
7.2.	Berücksichtigung von sprungförmigen Stör- und Führungsgrößen	340
7.2.1.	Stör- und Führungsgrößenaufschaltung	340
7.2.2.	Optimale Zustandsregler mit integraler Ausgangsvektorrückführung	345
7.2.2.1.	Herleitung des Stellgesetzes bei integraler Ausgangsvektorrückführung	345
7.2.2.2.	Stör- und Führungsgrößenaufschaltung bei integraler Ausgangsvektorrückführung	349
7.2.3.	Zustandsregelung mit Beobachter	354
7.2.3.1.	Beobachter bei gemessenen Störgrößen	354
7.2.3.2.	Regelung mit Beobachter bei gemessenen Störgrößen	357
7.2.3.3.	Regelung mit Beobachter bei nicht gemessenen und nicht beobachteten Störgrößen	360
7.2.3.4.	Störbeobachter für beliebige deterministische Störungen	360
7.3.	Entwurf optimaler Zustandsregler im Frequenzbereich	367
7.3.1.	Die Rückführdifferenz-Matrix	368
7.3.2.	Das Entwurfsverfahren	371
7.4.	Einfluß des Gütefunktional auf den Reglerentwurf	376
7.4.1.	Optimaler linearer Regler bei unvollständiger Zustandsrückführung	376

7.4.2. Optimaler linearer Regler mit vorgegebenem Stabilitätsgrad	379
7.4.3. Spezielle Ansätze für die Bewertungsmatrix \underline{Q}	381
7.4.4. Integralkriterium für optimale Abtastregler	382
7.4.5. Zustandsregler mit Kreuzbewertung	387

Anhang

Anhang zu Kapitel 1	389
Anhang zu Kapitel 5	398
Anhang zu Kapitel 6	405

Literatur	408
------------------	-----

Sachverzeichnis	425
------------------------	-----