

Dierk Schröder

Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen

3. bearbeitete Auflage

 Springer

Inhaltsverzeichnis

1	Regelungstechnische Grundbegriffe und Grundregeln	1
1.1	Gegenüberstellung von Steuerung und Regelung	1
1.2	Beschreibung des dynamischen Verhaltens durch Signalfußpläne	6
1.3	Frequenzgang	10
1.3.1	Ortskurvendarstellung in rechtwinkligen Koordinaten	13
1.3.2	Frequenzkennlinien, Bode-Diagramm	15
1.4	Rechenregeln, Umwandlungsregeln, Signalfußplan	22
1.5	Führungs- und Störungsübertragungsfunktion	26
2	Stabilisierung und Optimierung von Regelkreisen	28
2.1	Stabilität	29
2.1.1	Nyquist-Kriterium	31
2.1.2	Frequenzkennlinien	34
2.2	Stabilitätsprüfung anhand der Übertragungsfunktion	36
2.3	Optimierung bei offenem Kreis (Bode-Diagramm)	41
3	Standard-Optimierungsverfahren	46
3.1	Betragsoptimum (BO)	46
3.1.1	Herleitung für Strecken ohne I-Anteil	47
3.1.2	Verallgemeinerung und Anwendung des Betragsoptimums	50
3.1.3	Mathematische Herleitung des Betragsoptimums	56
3.2	Symmetrisches Optimum (SO)	60
3.2.1	Herleitung für Strecken mit I-Anteil	60
3.2.2	Verallgemeinerung und Anwendung des Symmetrischen Optimums	65
3.2.3	Mathematische Herleitung des Symmetrischen Optimums	72
3.3	Auswahl des Reglers und Bestimmung der Optimierung	74
3.4	Optimierungstabelle	81
3.5	Führungsverhalten bei rampenförmiger Anregung	83
4	Verallgemeinerte Optimierungsverfahren	85
4.1	Dämpfungsoptimum (DO)	85

4.1.1	Herleitung der Doppelverhältnisse	86
4.1.2	Standardfunktionen des Dämpfungsoptimums	87
4.1.3	Reglerauslegung nach dem Dämpfungsoptimum	89
4.2	Beispiele zum Dämpfungsoptimum	93
4.3	Zählerpolynom und äquivalente Sollwertglättung	98
4.4	Erweitertes Dämpfungsoptimum	100
4.4.1	Kompensation des Zählerpolynoms	100
4.4.2	Divisionsmethode	100
4.4.3	Allgemeine Methode für Strecken mit Zählerpolynomen	101
4.5	Reglerentwurf durch Gütefunktionale	105
4.6	Reglerauslegung mit MATLAB	111
5	Regelkreisstrukturen	115
5.1	Allgemein vermaschter Regelkreis	115
5.1.1	Begrenzungsregelung	115
5.1.2	Störgrößenaufschaltung	116
5.1.3	Hilfsstellgrößen	117
5.2	Kaskadenregelung	118
5.3	Modellbasierte Regelungen	122
5.3.1	Conditional Feedback	122
5.3.2	Internal Model Control (IMC)	123
5.3.3	Smith-Prädiktor	125
5.4	Vorsteuerung	126
5.4.1	Übertragungsfunktionen	127
5.4.2	Auslegung der Vorsteuerübertragungsfunktion $A(s)$	127
5.4.3	Beispiel: Nachlaufregelung mit IT_1 -Strecke	128
5.4.4	Beispiel: Nachlaufregelung mit zwei PT_1 -Strecken und PI-Regler	129
5.5	Zustandsregelung	131
5.5.1	Zustandsdarstellung	131
5.5.2	Normalformen	133
5.5.3	Lösung der Zustandsdifferentialgleichung im Zeitbereich	137
5.5.4	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	137
5.5.5	Entwurf einer Zustandsregelung	139
5.5.6	Zustandsbeobachter	142
5.5.6.1	Beobachtung mit Differentiation und Parallelmodell	143
5.5.6.2	Luenberger-Beobachter	144
5.5.6.3	Zustandsregelung mit Beobachter	146
5.5.6.4	Kalman-Filter	148
5.5.7	Zusammenfassung	149
5.6	Stellbegrenzungen in Regelkreisen	
	<i>P. Hippe, C. Wurmthaler</i>	150
5.6.1	Allgemeine Vorbemerkungen	150
5.6.2	Regler-Windup bei PI- und PID-Reglern	151

5.6.2.1	Beschreibung des Phänomens	151
5.6.2.2	Maßnahmen zur Vermeidung des Regler-Windup bei PI- und PID-Reglern	152
5.6.3	Systematisches Vorgehen zur Beseitigung von Regler- und Strecken-Windup	155
5.6.4	Struktur zur Berücksichtigung von Begrenzungen der Stellgeschwindigkeit und der Stellamplitude	165
6	Abtastsysteme	171
6.1	Grundlagen der z -Transformation	171
6.1.1	Abtastvorgang	172
6.1.2	z -Transformation	173
6.1.3	Gesetze und Rechenmethoden der z -Transformation	175
6.1.4	Transformationstabelle	183
6.2	Übertragungsfunktionen von Abtastsystemen	187
6.2.1	Stabilität und Pollagen	187
6.2.2	Übertragungsverhalten von zeitdiskreten Systemen	192
6.2.3	Frequenzkennlinien-Darstellung von Abtastsystemen	194
6.2.4	Systeme mit mehreren nichtsynchrone Abtastern	198
6.3	Einschleifige Abtastregelkreise	200
6.3.1	Aufbau von digitalen Abtastregelkreisen	200
6.3.2	Elementare zeitdiskrete Regler	202
6.3.3	Quasikontinuierlicher Reglerentwurf	204
6.4	Optimierung des Reglers bei Abtastregelkreisen	207
6.4.1	Realisierungsverfahren von Abtastreglern	207
6.4.2	Parameteroptimierung des Reglers nach einem Gütekriterium	209
6.4.3	Entwurf als Kompensationsregler	209
6.5	Entwurf zeitdiskreter Regelkreise auf endliche Einstellzeit	211
6.5.1	Reglerentwurf ohne Stellgrößenvorgabe	213
6.5.2	Reglerentwurf mit Stellgrößenvorgabe	217
6.5.3	Wahl der Abtastzeit bei Dead-Beat-Reglern	220
6.5.4	Beispiel zum Dead-Beat-Regler	220
7	Regelung der Gleichstrommaschine	223
7.1	Geregelte Gleichstromnebenschlußmaschine im Ankerstellbereich	224
7.1.1	Stromregelkreis	224
7.1.1.1	EMK-Kompensation	225
7.1.1.2	EMK-Bestimmung	226
7.1.1.3	Ausführung der EMK-Aufschaltung	228
7.1.1.4	Optimierung des Stromregelkreises	229
7.1.1.5	Optimierung des Stromregelkreises mit Meßwertglättung	234
7.1.2	Drehzahlregelkreis	237
7.1.2.1	Optimierung des Drehzahlregelkreises mit Meßwertglättung	240

7.1.2.2	Regelkreise mit Stromsollwertbegrenzung	241
7.1.2.3	Direkte Drehzahlregelung	245
7.1.2.4	Strombegrenzungsregelung	247
7.1.3	Lageregelung	248
7.2	Geregelte Gleichstromnebenschlusmaschine im Feldschwächbereich	252
7.2.1	Erregerstromregelung	256
7.2.2	Schaltungsvarianten	258
7.2.3	Sammelschienenantrieb	260
7.2.4	Contiflux-Regelung	262
7.2.5	Spannungsabhängige Feldschwächung	264
8	Fehlereinflüsse und Genauigkeit bei geregelten Systemen	275
8.1	Ausregelbare Fehler	275
8.2	Nicht ausregelbare Fehler	279
8.3	Abschätzung der Auswirkung der Fehler	285
8.3.1	Statische Fehler	285
8.3.1.1	Fehler des Operationsverstärkers	286
8.3.1.2	Laständerungen	288
8.3.1.3	Sollwertgeber	289
8.3.1.4	Tachogenerator	290
8.3.1.5	Istwertteiler	291
8.4	Erreichbare Genauigkeit analog drehzahl geregelter Antriebe	291
8.5	Fehler in Systemen mit digitaler Erfassung von Position und Drehzahl	293
8.5.1	Digitale Positionsmessung	293
8.5.2	Digitale Drehzahlerfassung	294
8.6	Geber	296
8.6.1	Strommessung	296
8.6.2	Spannungsmessung	299
8.6.3	Gegenüberstellung von Drehzahl- und Positionsgebern <i>R. Kennel</i>	300
8.6.3.1	Drehzahlregelung	300
8.6.3.2	Positionsregelung	302
8.7	EMV, störsichere Signalübertragung und Störschutzmaßnahmen	315
8.7.1	Oberschwingungen, EMV und Normen	315
8.7.2	Störsichere analoge Signalübertragung	317
8.7.3	Störschutzmaßnahmen	318
9	Netzgeführte Stromrichter	321
9.1	Prinzipielle Funktion netzgeführter Stellglieder	321
9.2	Vereinfachte Approximation	325
9.3	Untersuchung des dynamischen Verhaltens netzgeführter Stromrichterstellglieder	330

9.3.1	Analyse des Stromrichterstellglieds bei einer Zündwinkelverstellung in Richtung abnehmendem Steuerwinkel	331
9.3.2	Analyse des Stromrichterstellglieds bei einer Zündwinkelverstellung in Richtung zunehmendem Steuerwinkel	336
9.4	Diskussion der Ergebnisse	339
9.5	Laufzeitnäherung für das Großsignalverhalten, Symmetrierung	345
9.6	Großsignal-Approximationen für netzgeführte Stromrichterstellglieder	349
9.7	Zusammenfassung	355
10	Untersuchung von Regelkreisen mit Stromrichtern mit der Abtasttheorie	356
10.1	Untersuchung des Steuergerätes ohne dynamische Symmetrierung	358
10.2	Untersuchung des Stromrichters	360
10.3	Stromrichterstellglied bei lückendem Strom	365
10.4	Adaptive Stromregelung	370
10.4.1	Allgemeine Betrachtung	370
10.4.2	Praktische Realisierung	375
10.4.3	Prädiktive Stromführung	384
10.5	Zusammenfassung	386
11	Beschreibungsfunktion des Stromrichters mit natürlicher Kommutierung	387
11.1	Allgemeine Einführung	387
11.2	Diskussion der Ergebnisse	390
11.3	Untersuchung von Regelkreisen mit der Beschreibungsfunktion	397
11.4	Grenzen des Verfahrens	402
12	Vergleich verschiedener Approximationen für netzgeführte Stromrichter	403
12.1	Ermittlung von $G_l(z, m)$, Sprungfähigkeit	404
12.2	Berechnung der ersten Ableitung der Steuersatzeingangsspannung	407
12.3	Überprüfung der Stromrichterstellglied-Approximationen	411
12.4	Synthese von Regelkreisen mit Stromrichter-Stellgliedern	418
13	Asynchronmaschine	423
13.1	Grundlagen	423
13.1.1	Funktionsprinzip der Drehfeld-Asynchronmaschine	424
13.1.2	Raumzeigerdarstellung	425
13.1.2.1	Definition eines Raumzeigers	425
13.1.2.2	Rücktransformation auf Momentanwerte	429
13.1.2.3	Koordinatensysteme	429

13.1.2.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem	432
13.1.2.5	Bestimmung der Raumzeiger aus Motordaten	433
13.2	Signalflußpläne der Asynchronmaschine	434
13.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	434
13.2.2	Verallgemeinerter Signalflußplan der spannungsgesteuerten Asynchronmaschine	448
13.2.3	Signalflußplan der stromgesteuerten Asynchronmaschine	451
13.2.4	Stationärer Betrieb der Asynchronmaschine	452
13.2.5	Umrechnung für Stern- und Dreieckschaltung	455
13.3	Steuerverfahren der Asynchronmaschine	458
13.3.1	Signalflußplan bei Statorflußorientierung	459
13.3.2	Signalflußplan bei Rotorflußorientierung	460
13.3.3	Signalflußplan bei Luftspaltflußorientierung	468
13.4	Regelungsverfahren der Asynchronmaschine	473
13.4.1	Entkopplungsregelung der Asynchronmaschine	474
13.4.2	Entkopplung bei Umrichtern mit eingprägter Spannung	476
13.4.3	Entkopplung bei Umrichtern mit eingprägtem Strom	485
13.4.4	Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine	491
13.5	Modellbildung der Asynchronmaschine	500
13.5.1	I_1 -Modell (Strommodell)	500
13.5.2	$I_1\beta_L$ -Modelle und $I_1\Omega_L$ -Modelle	506
13.5.3	U_1I_1 -Modell	510
13.5.4	$U_1I_1\Omega_L$ -Modell	514
13.5.5	$U_1\Omega_L$ -Modell	515
13.5.6	Zusammenfassung der Modelle	518
13.6	Parameterbestimmung an Drehstrom-Asynchronmaschinen <i>W. Michalik</i>	523
13.6.1	Übersicht zu Methoden der Parameterbestimmungen an Drehstrom-Asynchronmaschinen	523
13.6.2	Parameterbestimmungen mit herkömmlichen Verfahren der Maschinenprüfung	527
13.6.2.1	Vorgehensweise	529
13.6.3	Parameterbestimmungen mit Parameterschätzverfahren	537
13.6.3.1	Prinzip der Parameterschätzung	537
13.6.3.2	Parameterschätzungen an Asynchronmaschinen bei linearem Parametereinfluss auf die Schätzfehler	538
13.6.3.3	Parameterschätzungen an Drehstrom-Asynchronmaschinen bei nichtlinearem Parametereinfluss auf die Schätzfehler	553
13.7	Asynchronmaschine in normierter Darstellung	574
13.8	Feldschwächbetrieb der Asynchronmaschine	579
13.9	Einschränkungen bei der Realisierung der Regelung von Drehfeldantrieben	581
13.9.1	Abtastender Regler	581
13.9.2	Sättigungseffekte	583

13.9.3	Realisierbare Entkopplungsstruktur	584
13.9.4	Zusammenfassung	586
14	Regelung von Drehfeldmaschinen ohne Drehzahlsensor	587
14.1	Einführung	587
14.1.1	Prinzipielle Grundgleichungen	593
14.2	Grundlegendes nichtadaptives Verfahren	596
14.3	Nichtadaptive Verfahren: Statorspannungsgleichungen	600
14.4	Nichtadaptive Verfahren: Flußgleichungen	604
14.5	Nichtadaptive Verfahren: Sollgrößenansatz	605
14.6	Direkte Schätzung der Rotordrehzahl	607
14.7	Adaptive Verfahren	613
14.7.1	MRAS-Verfahren	618
14.7.2	Problematik bei tiefen Frequenzen	619
14.7.3	MRAS-Verfahren: EMK-Berechnung	623
14.7.4	MRAS-Verfahren: Flußberechnung	624
14.7.5	MRAS-Verfahren, basierend auf Blindleistungsberechnung	626
14.7.6	Verfahren mittels Zustandsschätzung	627
14.7.6.1	Verfahren auf Basis eines Luenberger-Beobachters	628
14.7.6.2	Verfahren auf Basis eines Kalman-Filters	637
14.8	Schätzverfahren mit neuronalen Netzen	641
14.9	Auswertung von Harmonischen	644
14.10	Auswertung von hochfrequenten Zusatzsignalen	646
14.11	Bewertende Zusammenfassung	656
14.12	Comments on Sensorless Control Methods <i>J. Luomi</i>	663
15	Stromregelverfahren für Drehfeldmaschinen	666
15.1	Regelstrecke und Stellglied der Statorstromregelung	666
15.2	Indirekte Verfahren der Statorstromregelung	671
15.3	Modulationsverfahren <i>A. Steimel</i>	673
15.3.1	Grundfrequenztaktung	673
15.3.2	Nichtsynchronisierte („freie“) Pulsweitenmodulation	677
15.3.2.1	Sinus-Dreieck-Modulation	677
15.3.2.2	Symmetrierte Sinus-Dreieck-Modulation mit Zusatzsignalen	679
15.3.2.3	Ströme des Wechselrichters bei symmetrierter Sinus-Dreieck- Modulation	683
15.3.2.4	Digitale Realisierung der Pulsweitenmodulation	684
15.3.3	Diskontinuierliche Taktungen	685
15.3.3.1	Flat-Top-Modulation	685
15.3.3.2	Übermodulation	688
15.3.4	Synchrone Taktungen	690

15.3.4.1	Dreifachtaktung	691
15.3.4.2	Fünffachtaktung	695
15.3.4.3	Siebenfachtaktung	696
15.3.4.4	Taktfrequenzbereiche, -wechsel	700
15.3.5	WR-Spannungsfehler	704
15.4	Optimierte Pulsverfahren	706
15.4.1	Spannungsraumzeigermodulation	706
15.4.2	On-line optimierte Pulsmustererzeugung	709
15.4.3	Raumzeiger-Hystereseverfahren	716
15.4.4	Prädiktive Stromregelung mit Schalttabelle	726
15.4.5	Dead-Beat-Pulsmustererzeugung	733
15.5	Direkte Regelungen	
	<i>A. Steimel</i>	740
15.5.1	Direkte Selbstregelung	740
15.5.2	Indirekte Statorgrößen-Regelung	752
15.5.3	Direct Torque Control	755
16	Synchronmaschine	759
16.1	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung	760
16.1.1	Beschreibendes Gleichungssystem	760
16.1.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung	765
16.1.3	Signalflußplan bei Spannungseinprägung	768
16.1.4	Signalflußplan bei Stromeinprägung	772
16.1.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine	775
16.2	Synchron-Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	777
16.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußplan	777
16.2.2	Ersatzschaltbild der Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	779
16.3	Synchron-Vollpolmaschine	783
16.3.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußpläne	783
16.3.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine	790
16.3.3	Feldorientierte Darstellung der Synchron-Vollpolmaschine mit Dämpferwicklung	794
16.3.4	Steuerbedingungen der Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	802
16.4	Regelung der Synchronmaschine durch Entkopplung	804
16.5	Regelung der Synchronmaschine durch Feldorientierung	
	<i>F. Bauer</i>	814
16.5.1	Modelle zur Flußermittlung	815
16.5.2	Spannungsmodell ($U_1 I_1$ -Modell)	815
16.5.2.1	Spannungsmodell als Wechselgrößenmodell	816
16.5.2.2	Polares Spannungsmodell	818
16.5.2.3	Spannungsmodell als Gleichgrößenmodell	819
16.5.2.4	Strommodell der Schenkelpolmaschine	822
16.5.3	Regelung der Synchronmaschine	824

16.5.3.1	Berechnung des Erregerstroms mit dem Strommodell	825
16.5.4	Ablösung verschiedener Modelle	830
16.5.5	Flußregelung	837
16.5.6	Flußführung im Feldschwächbereich	838
16.5.7	Steuerung des $\cos \varphi$ der fremderregten Synchronmaschine	839
16.6	Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PM-Maschine)	843
16.6.1	Signalflußplan der PM-Maschine	843
16.6.2	Regelung der PM-Maschine ohne Reluktanzeinflüsse	849
16.6.3	Rechteckförmige Stromeinprägung ohne Reluktanzeinflüsse	852
16.6.4	Vergleich der sinus- und rechteckförmig gespeisten PM-Maschine	856
16.6.5	Feldschwächbereich der PM-Maschine	857
16.7	PM-Maschine mit Reluktanzeinflüssen	866
16.7.1	Maximales Moment pro Ampere	870
16.7.2	Verlustminimierung	876
16.7.3	Maximales Moment pro Volt	879
16.7.4	Feldschwächung unter Strom- und Spannungsbegrenzung	881
16.7.5	Zusammenfassung der Steuerverfahren	882
16.7.6	Einbindung in ein Antriebssystem	891
16.7.7	Feldschwächregelung mit Rückkopplung	895
16.7.8	Hybride Feldschwächregelungsstruktur	896
17	Geschaltete Reluktanzmaschine	898
17.1	Überlappende Bestromung von Statorwicklungen	902
17.2	Leistungselektronische Stellglieder	903
17.3	Drehmoment-Welligkeit	905
17.4	Geberloser Betrieb	906
18	Identifikation linearer dynamischer Systeme	907
18.1	Grundlagen der Identifikation	908
18.1.1	Parametrische und nichtparametrische Identifikationsverfahren	908
18.1.2	Identifikation	909
18.2	Lineare dynamische Modellstrukturen	910
18.2.1	Modelle mit Ausgangsrückkopplung	912
18.2.1.1	Autoregressive with Exogenous Input Model	913
18.2.1.2	Output Error Model	915
18.2.2	Modelle ohne Ausgangsrückkopplung	917
18.2.2.1	Finite Impulse Response Model	918
18.2.2.2	Orthonormal Basis Function Model	919
18.3	Identifikationsbeispiele	924
18.3.1	ARX-Modell	925
18.3.2	OE-Modell	925
18.3.3	FIR-Modell	933
18.3.4	OBF-Modell	935

18.4	Lerngesetz: Least-Squares-Verfahren	937
18.4.1	Nichtrekursiver Least-Squares-Algorithmus (LS)	938
18.4.2	Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS)	939
18.5	Gradientenabstiegsverfahren	942
18.6	Zusammenfassung	944
19	Drehzahlregelung bei elastischer Verbindung zur Arbeitsmaschine	945
19.1	Regelung der Arbeitsmaschinendrehzahl	947
19.1.1	Streckenübertragungsfunktion $G_{S1}(s)$	947
19.1.2	Analyse der Übertragungsfunktion $G_{S1}(s)$	949
19.1.3	Einfluß der elastischen Kopplung auf den Drehzahlregelkreis	950
19.2	Regelung der Antriebsmaschinendrehzahl	953
19.2.1	Streckenübertragungsfunktion $G_{S2}(s)$	953
19.2.2	Analyse der Übertragungsfunktion $G_{S2}(s)$	953
19.2.3	Einfluß der elastischen Kopplung auf den Drehzahlregelkreis	955
19.2.4	Simulative Untersuchung der Arbeitsmaschinendrehzahl	958
19.2.5	Bewertung der konventionellen Kaskadenregelung	962
19.3	Zustandsregelung des Zweimassensystems	963
19.3.1	Zustandsdarstellung	963
19.3.2	Zustandsregelung ohne I-Anteil	965
19.3.3	Auslegung einer Zustandsregelung nach dem Dämpfungsoptimum	968
19.3.4	Zustandsregelung mit I-Anteil	973
19.4	Verallgemeinerung: Mehrmassensysteme	977
19.5	Nichtlineare Systeme — Intelligente Strategien	984
20	Schwingungsdämpfung	993
20.1	Allgemeine Problemstellung	993
20.2	Local Absorption of Vibrations	
	<i>D. Filipović</i>	1000
20.2.1	Introduction	1000
20.2.2	Resonant Absorbers: Linear Active Resonator (LAR)	1001
20.2.2.1	Design of the LAR	1002
20.2.2.2	Single-mass Multi-frequency Resonator	1009
20.2.2.3	Comments	1012
20.2.3	Absorbers with Local Feedback in Multi-mass Systems	1014
20.2.3.1	Analysis of the Primary System	1016
20.2.3.2	Combined System with the Absorber	1019
20.2.3.3	Related Problems	1025
20.2.3.4	Verification of Results	1026
20.2.3.5	Comments	1033
20.2.4	Bandpass Absorber (BPA)	1035
20.2.4.1	Concept of the BPA	1035

20.2.4.2	A Case Study: Paper Mill Vibrations	1040
20.2.4.3	Simulation Results of the Paper Mill Model	1042
20.2.4.4	Comments	1044
20.2.5	Conclusion	1045

21 Objektorientierte Modellierung und Simulation von Antriebssystemen

M. Otter 1049

21.1	Modulare Signalfusspläne	1051
21.2	Objektdiagramme	1058
21.3	Ein vollständiges Beispiel	1062
21.4	Modelica — Kontinuierliche Systeme	1067
21.5	Modelica — Komponenten-Schnittstellen	1079
21.6	Modelica — Modellierung elektrischer Maschinen <i>A. Haumer, Ch. Kral</i>	1087
21.6.1	Ungeregelte elektrische Maschinen	1087
21.6.2	Geregelte elektrische Antriebe	1095
21.7	Transformationsalgorithmen	1105
21.7.1	Reguläre Deskriptorsysteme	1105
21.7.2	Singuläre Deskriptorsysteme	1112
21.7.3	Strukturell inkonsistente Deskriptorsysteme	1119
21.8	Lineare Deskriptorsysteme	1121
21.9	Modelica — Hybride Systeme	1130
21.10	Modelica — Strukturvariable Systeme	1144
21.10.1	Ideale elektrische Schaltelemente	1144
21.10.2	Coulomb-Reibung	1150
21.10.3	Reibungsbehaftete Komponenten	1160

22 Modellierung und Regelung kontinuierlicher Fertigungsanlagen

W. Wolfermann 1166

22.1	Einführung	1166
22.2	Modellierung des Systems	1167
22.2.1	Technologisches System	1167
22.2.1.1	Stoffbahn	1168
22.2.1.2	Linearisierung	1174
22.2.1.3	Verhalten der Mechanik	1176
22.2.2	Elektrische Antriebe	1176
22.2.3	Linearer Signalfußplan des Gesamtsystems	1176
22.3	Systemanalyse	1177
22.3.1	Regelbarkeit der Bahnkräfte	1178
22.3.2	Stillstand der Maschine	1179
22.3.3	Dynamik des unregulierten Teilsystems	1179

22.4	Drehzahlregelung mit PI-Reglern in Kaskadenstruktur	1182
22.4.1	Nicht schwingfähiges ungeregeltes System	1183
22.4.2	Schwingfähiges ungeregeltes System	1184
22.4.2.1	Regelung ohne Entkopplung	1184
22.4.2.2	Regelung mit Entkopplung	1185
22.5	Bahnkraftregelung mit PI-Reglern	1187
22.6	Registerfehler bei Rotationsdruckmaschinen	1191
22.6.1	Einführung	1191
22.6.2	Ableitung des Registerfehlers	1192
22.6.3	Linearisierung des Registerfehlers	1193
22.6.4	Zusammenhang der Registerfehler aufeinanderfolgender Druckwerke	1194
22.6.5	Linearisierter Signalfußplan	1195
22.6.6	Dynamisches Verhalten des Registerfehlers	1195
22.6.6.1	Druckmaschine mit Drehzahlregelung	1196
22.6.6.2	Druckmaschine mit Winkelregelung	1199
22.6.6.3	Druckmaschine mit Registerfehlerregelung	1199
22.7	Zustandsregelung des Gesamtsystems	1200
22.8	Dezentrale Regelung	1202
22.8.1	Regelung des isolierten Teilsystems	1202
22.8.2	Dezentrale Entkopplung	1206
22.8.2.1	Grundlagen des Verfahrens	1206
22.8.2.2	Mathematische Beschreibung	1207
22.8.2.3	Modaltransformation des Teilsystems	1208
22.8.2.4	Berechnung der Rückführkoeffizienten	1208
22.8.2.5	Algorithmus	1209
22.8.2.6	Beispiel	1209
22.9	Beobachter	1212
22.9.1	Zentrale Beobachter	1212
22.9.2	Dezentrale Beobachter	1213
22.9.2.1	Allgemeines	1213
22.9.2.2	Approximation durch Störmodelle	1214
22.9.2.3	Beispiel: Dezentraler Beobachter für zwei Teilsysteme	1216
22.9.2.4	Parameteränderungen	1219
22.9.2.5	Informationsaustausch zwischen den Teilbeobachtern	1221
22.9.2.6	Zustandsregelung mit dezentralen Beobachtern	1223
22.9.2.7	Einflussung von dezentralen Reglern und Beobachtern	1224
22.10	Zusammenfassung	1225
	Variablenübersicht	1226

Literaturverzeichnis	1244.
Grundlagen	1244
Stellbegrenzungen in Regelkreisen	1248
z-Transformation	1248
Antriebstechnik und benachbarte Gebiete	1249
Netzgeführte Stromrichter: Regelung	1250
Direktumrichter	1254
Untersynchrone Kaskade (USK)	1256
Stromrichteromotor	1257
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter)	1259
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter)	1261
Regelung von Asynchron- und Synchronmaschine	1263
Motoridentifikation	1271
Direkte Selbstregelung von Drehfeldmaschinen	1275
Geberlose Regelungen von Drehfeldmaschinen	1278
Comments on Sensorless Control Methods	1293
Reluktanzmaschine	1295
Geschaltete Reluktanzmaschine: Auslegung und Regelung	1299
Geschaltete Reluktanzmaschine: Optimierter Betrieb	1303
Geschaltete Reluktanzmaschine: Geberloser Betrieb	1303
Geschaltete Reluktanzmaschine: Synchron-Reluktanzmotor	1306
Identifikation linearer dynamischer Systeme	1310
Systemintegration elektrischer Antriebe	1311
Schwingungsdämpfung	1312
Objektorientierte Modellierung, Deskriptorsysteme	1315
Kontinuierliche Fertigungsanlagen	1320
 Stichwortverzeichnis	 1323