

# Inhalt

Vorwort.....	5
1	Entwicklungsgeschichte geregelter Elektroantriebe..... 13
2	Elektromechanische Grundlagen..... 21
2.1	Rotation und Translation..... 22
2.2	Vierquadrantbetrieb..... 27
2.3	Elektrische Maschinen und Stromrichter..... 29
2.3.1	Gleichstromantriebe..... 30
2.3.2	Asynchronantriebe..... 35
2.3.3	Synchronantriebe..... 42
2.4	Dezentrales Energiemanagement..... 46
3	Konventioneller Reglerentwurf im Frequenzbereich..... 49
3.1	Zustandsgleichungen und Laplace-Transformation..... 50
3.2	Regelungstechnisches Strukturbild..... 53
3.3	Übertragungsfunktionen und Stabilität..... 54
3.3.1	Führungsverhalten..... 55
3.3.2	Störverhalten..... 60
3.4	Klassische Kaskadenregelung..... 61
3.4.1	Frequenzkennlinien..... 63
3.4.2	Unterlagerter Stromregelkreis..... 67
3.4.2.1	Bode-Diagramm..... 69
3.4.2.2	Nichols-Diagramm..... 71
3.4.3	Überlagerter Drehzahlregelkreis..... 73
3.4.4	Berechnung der Reglerparameter..... 78
3.4.5	Technische Realisierung der Kaskadenregelung..... 81
3.4.5.1	Analoge Regelstruktur mit Operationsverstärkern..... 82
3.4.5.1.1	Beschaltung eines PI-Reglers..... 82
3.4.5.1.2	Aufbau und Dynamik..... 83
3.4.5.2	Digitale Regelstruktur mit Mikroprozessoren..... 88
3.4.5.2.1	PI-Algorithmus..... 89
3.4.5.2.2	Software-Timing..... 92
3.4.5.2.3	Hardware-Aufbau..... 97
3.5	Überlagerte Positionsregelung..... 100

4	<b>Modellgestützte Regeltheorien im Zeitbereich</b> . . . . .	103
4.1	Antriebskonzepte im Zustandsraum . . . . .	103
4.1.1	Zustandsgleichungen und Matrizendarstellung . . . . .	106
4.1.1.1	Steuerbarkeit . . . . .	109
4.1.1.2	Beobachtbarkeit . . . . .	110
4.1.1.3	Beobachtungsnormalform . . . . .	111
4.1.2	Entwurf von Zustandsbeobachtern . . . . .	117
4.1.2.1	Zustandsbeobachter voller Ordnung . . . . .	121
4.1.2.2	Zustandsbeobachter reduzierter Ordnung . . . . .	124
4.1.3	Zustandsvektorrückführung . . . . .	127
4.1.3.1	Reglerentwurf durch Polvorgabe . . . . .	128
4.1.3.2	Zustandsregelung eines Gleichstromantriebs . . . . .	130
4.2	Antriebskonzepte im Binärmode . . . . .	133
4.2.1	Entwurf binärer Beobachter . . . . .	137
4.2.1.1	Periodische Zustandsgrößen . . . . .	138
4.2.1.2	Fourier-Reihenentwicklung . . . . .	140
4.2.1.3	Mittelwerte welliger Zustandsgrößen . . . . .	143
4.2.2	Binäre Beobachter in netzgeführten Stromrichtern . . . . .	147
4.2.2.1	Wechselstrombrückenschaltung (B2) . . . . .	149
4.2.2.1.1	Binärer Gleichspannungsbeobachter . . . . .	151
4.2.2.1.2	Binärer Gleichstrombeobachter . . . . .	158
4.2.2.1.3	Binärer Netzstrombeobachter . . . . .	165
4.2.2.2	Drehstrombrückenschaltung (B6) . . . . .	170
4.2.3	Binäre Beobachter in kommutierungslosen Stromrichtern . . . . .	176
4.2.3.1	Binärer Wechselspannungsbeobachter . . . . .	178
4.2.3.2	Binärer Wechselstrombeobachter . . . . .	181
4.2.4	Binäre Beobachter in selbstgeführten Stromrichtern . . . . .	184
4.2.4.1	Binärer Chopper-Spannungsbeobachter . . . . .	184
4.2.4.2	Binärer Chopper-Strombeobachter . . . . .	190
4.2.4.3	Binärer Strangstrombeobachter . . . . .	194
4.3	Antriebskonzepte mit Raumzeigern . . . . .	197
4.3.1	Raumzeigermodulation in Wechselrichtern . . . . .	198
4.3.2	Raumzeigermodell der Asynchronmaschine . . . . .	204
5	<b>Antriebskonzepte mit Fuzzy-Logik</b> . . . . .	209
5.1	Fuzzifizierung von Prozessgrößen . . . . .	212
5.2	Interferenz und Regelbasis . . . . .	214
5.3	Defuzzifizierung der Stellgröße . . . . .	217

<b>6</b>	<b>Antriebsbeispiele für die Low-Cost-Automation</b> .....	<b>221</b>
6.1	Vierquadrant-Gleichstromantrieb .....	222
6.1.1	Sensorlose Ankerstromregelung .....	224
6.1.1.1	Linearisierung im Lückbetrieb .....	224
6.1.1.2	Synchronisation der Steuerimpulse .....	227
6.1.1.3	Umschaltlogik .....	229
6.1.1.4	Dynamisches Verhalten .....	230
6.1.2	Sensorlose Drehzahlregelung .....	232
6.1.2.1	Drehzahlbeobachter .....	233
6.1.2.2	Dynamisches Verhalten .....	235
6.2	Vierquadrant-Chopper-Antrieb .....	237
6.3	Einquadrant-Drehstromantrieb .....	241
6.3.1	Spannungssteuerung der Asynchronmaschine .....	241
6.3.2	Dynamisches Verhalten .....	244
6.3.3	Sensorlose Festwert-Stromregelung .....	245
6.4	Vierquadrant-Drehstromantrieb .....	246
6.4.1	Frequenzsteuerung der Asynchronmaschine .....	247
6.4.1.1	Steuerkennlinie für konstanten Hauptfluss .....	249
6.4.1.2	Dynamisches Verhalten .....	250
6.4.1.3	Sensorlose Frequenzsteuerung .....	252
6.4.2	Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine .....	253
6.4.2.1	Vektorstromregelung .....	254
6.4.2.2	Drehzahlregelkreis .....	258
6.4.2.3	Dynamisches Verhalten .....	259
6.4.2.4	Sensorlose Vektorstromregelung .....	260
6.4.3	Feldorientierte Regelung der Synchronmaschine .....	261
6.4.3.1	Zweipunkt-Stromregelung .....	263
6.4.3.2	Dynamisches Verhalten .....	265
6.5	Sensorlose Energierückspeisung in Frequenzumrichtern .....	267
6.6	Sensorlose Temperaturregelung in elektrischen Verbrauchern ....	269
6.7	Redundante Regelung elektrischer Antriebe .....	272
<b>7</b>	<b>Genauigkeit digitaler Regelungen</b> .....	<b>277</b>
7.1	Mess- und Abtastfehler .....	277
7.2	Rechenungenauigkeiten .....	280
7.3	Parameterschwankungen und Modellfehler .....	284
<b>8</b>	<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b> .....	<b>287</b>

<b>9</b>	<b>Mathematischer Anhang</b> .....	<b>293</b>
9.1	Regeln der komplexen Rechnung .....	293
9.2	Trigonometrische Umformungen .....	294
9.3	Lösungsintegrale .....	297
9.4	Ableitungen (Differenziale) .....	298
9.5	Laplace-Transformation (Korrespondenzen) .....	300
9.6	Matrizenoperationen .....	302
9.7	Fourier-Transformation periodischer Größen .....	304
9.8	Arithmetische und effektive Mittelwerte .....	305
<b>10</b>	<b>Englische Fachausdrücke</b> .....	<b>307</b>
10.1	Deutsch – Englisch .....	307
10.2	Englisch – Deutsch .....	323
<b>11</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>339</b>
<b>12</b>	<b>Übungs- und Testaufgaben</b> .....	<b>345</b>
12.1	Konventionelle Regelungstechnik (KRT) .....	345
12.2	Moderne, modellgestützte Regelungstechnik (MRT) .....	350
12.3	Antriebsregelungen aus der Praxis (ATR) .....	354
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>361</b>