

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
1      Einleitung .....	13
2      Projektieren von Antrieben .....	17
2.1    Auswahl des passenden Antriebs für die Anwendung .....	17
2.2    Bestimmung der optimalen Baugröße des gewählten Motortyps .....	17
2.3    Motorschutz .....	19
3      Antriebselektronik .....	21
3.1    Endstufe .....	21
3.2    Modulationsverfahren .....	22
3.2.1    Unterschwingungsverfahren .....	22
3.2.2    Raumzeigermodulation .....	24
3.3    Verluste in der Leistungselektronik .....	28
3.3.1    Verluste beim Einsatz von Frequenzumrichtern und Installationshinweise für den Anwender .....	32
3.3.2    Quantifizierung der Schaltverluste in Frequenzumrichtern .....	34
4      Regelung elektrischer Maschinen .....	39
4.1    Regelung des Gleichstrommotors .....	42
4.2    Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine .....	43
4.3    Polradorientierte Regelung der Synchronmaschine .....	49
5      Sensoren für die Antriebstechnik .....	53
5.1    Drehzahlmessung .....	53
5.2    Positionsmessungen .....	53
5.2.1    Aufbau inkrementaler Positionsgeber mit impulsförmigem Ausgang .....	54
5.2.1.1    Rechtslauf-/Linkslauf-Erkennung bei Einfachauswertung .....	56
5.2.1.2    Vierfachauswertung der Geberausgangssignale .....	57
5.2.1.3    Rechtslauf-/Linkslauf-Erkennung bei Vierfachauswertung .....	57
5.2.2    Aufbau inkrementaler Positionsgeber mit sin/cos-Ausgang .....	60
5.2.2.1    Auswertung über die arctan-Funktion .....	60
5.2.3    Resolver .....	62
5.2.3.1    Auswertung über die arctan-Funktion .....	64
5.2.3.2    Auswertung über einen geschlossenen Regelkreis .....	64
5.2.4    Absolutwertgeber .....	66
5.3    Vergleich von Positionsgebern .....	69

<b>6</b>	<b>Motoren</b> .....	<b>71</b>
6.1	Asynchronmotor.....	71
6.1.1	DS-Normmotor .....	73
6.1.1.1	Betrieb eines DS-Normmotor mit Feldschwächung .....	79
6.1.2	Servo-Asynchronmotor.....	81
6.2	Synchronmotoren.....	82
6.2.1	Synchronmotoren mit Dämpferkäfig .....	84
6.2.2	Servo-Synchronmotoren.....	85
6.2.3	Kenngrößenvergleich zwischen Servo-Asynchronmotor und Servo-Synchronmotor .....	87
6.3	Torquemotoren .....	88
6.4	Linearmotoren .....	89
<b>7</b>	<b>Getriebe</b> .....	<b>91</b>
7.1	Kraftschlüssige Getriebe.....	91
7.2	Formschlüssige Getriebe.....	92
7.2.1	Ketten- und Zahnriementriebe .....	92
7.2.2	Zahnradgetriebe .....	92
7.2.2.1	Einstufiges Stirnradgetriebe.....	92
7.2.2.2	Zweistufiges Stirnradgetriebe .....	93
7.2.2.3	Winkelgetriebe.....	94
7.2.2.4	Schneckengetriebe .....	94
7.2.2.5	Planetengetriebe .....	95
7.2.2.5.1	Auswahlkriterien von Planetengetrieben.....	96
7.3	Auswahlkriterien von Getriebemotoren.....	98
<b>8</b>	<b>Kriterien für die Zusammenschaltung von Antriebsregler, Motor, Geber und Getriebe</b> .....	<b>101</b>
8.1	Geregelte Mehrachs'antriebe.....	103
8.1.1	Master-Slave-System.....	103
8.1.2	Vorgabe von vorausberechneten Bahnkurven für alle Achsen .....	105
<b>9</b>	<b>Grundlagen der Kinematik</b> .....	<b>107</b>
9.1	$v, t$ -Diagramme.....	108
9.1.1	$v, t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit beim Beschleunigen und Abbremsen .....	108
9.1.2	$v, t$ -Diagramm mit $\sin^2$ -förmigem Verlauf der Geschwindigkeit beim Beschleunigen und beim Bremsen.....	111
9.1.3	$v, t$ -Diagramm mit linear/parabolischem Verlauf der Geschwindigkeit beim Beschleunigen und Abbremsen .....	115
9.1.4	Anwenderspezifische Forderungen an $v, t$ -Diagramme .....	119
9.1.4.1	$v, t$ -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit für zeitoptimales Positionieren.....	119
9.1.4.2	$v, t$ -Diagramm mit linear/parabolischem Verlauf der Geschwindigkeit für zeitoptimales Positionieren .....	120

9.1.4.3	<i>v,t</i> -Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit für einen Verlauf mit vorgegebenem Weg, vorgegebener Zeit und vorgegebener Beschleunigung und Verzögerung.....	123
9.2	<i>s,v</i> -Diagramm.....	125
9.3	Wahl der Beschleunigung und Verzögerung.....	127
9.3.1	Maximal zulässige Beschleunigung eines Förderbands mit einem unbefestigten Gegenstand .....	127
9.3.2	Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Kippgrenze .....	128
9.3.3	Einfluss der Beschleunigung auf die Flüssigkeitshöhe in einem Gefäß .....	129
9.3.4	Ausschlag der Last an einem Kran bei Beschleunigung .....	131
9.3.5	Beziehung zwischen Maximalbeschleunigung und Vortriebskraft.....	132
10	<b>Grundlagen der Kinetik</b> .....	135
10.1	Ableitung des reduzierten Massenträgheitsmoments.....	137
10.2	Antriebsmoment und Antriebsleistung.....	138
10.3	Effektive Drehmomente von Motoren.....	140
10.3.1	Effektives Drehmoment von eigenbelüfteten Drehstromnormmotoren.....	141
11	<b>Definition von Massenträgheitsmomenten</b> .....	143
11.1	Massenträgheitsmoment einer Einzelmasse .....	144
11.2	Massenträgheitsmoment eines dünnwandigen Hohlzylinders.....	145
11.3	Massenträgheitsmoment eines Zylinders mit Vollkreisquerschnitt .....	146
11.4	Massenträgheitsmoment eines dickwandigen Hohlzylinders.....	147
11.5	Massenträgheitsmomente von dünnen, langen Stäben.....	148
11.5.1	Drehpunkt im Schwerpunkt.....	148
11.5.2	Drehpunkt am Stabende .....	149
11.6	Massenträgheitsmoment einer Rechteckscheibe mit dem Drehpunkt im Schwerpunkt .....	150
11.7	Massenträgheitsmoment einer massiven Kugel mit der Drehachse durch den Schwerpunkt .....	151
11.8	Massenträgheitsmoment einer dünnwandigen Kugelschale mit der Drehachse durch den Schwerpunkt .....	152
11.9	Steiner'scher Satz .....	153
12	<b>Berechnungsbeispiele für Massenträgheitsmomente von technisch häufig verwendeten Rotationskörpern</b> .....	155
12.1	Laufrad aus Vollmaterial.....	155
12.2	Laufrad mit minimalem Gewicht .....	157
13	<b>Reibung</b> .....	159
13.1	Coulomb'sche oder trockene Reibung.....	159
13.2	Rollreibung.....	161
13.3	Reibung in Gewindespindeln.....	164

<b>14</b>	<b>Auslegung der Antriebe.....</b>	<b>167</b>
14.1	Fahrantrieb .....	167
14.1.1	Fahrantriebsauslegung über Momentengleichgewicht.....	176
14.1.1.1	Beschleunigungsvorgang beim Lastheben.....	177
14.1.1.2	Verzögerungsvorgang beim Lastheben.....	179
14.1.1.3	Lastheben mit konstanter Geschwindigkeit.....	180
14.1.1.4	Beschleunigungsvorgang beim Lastsenken.....	181
14.1.1.5	Verzögerungsvorgang beim Lastsenken.....	182
14.1.1.6	Lastsenken mit konstanter Geschwindigkeit.....	183
14.2	Spindelantrieb .....	184
14.3	Drehtischantrieb .....	193
14.4	Kurbeltrieb .....	202
14.5	Wickelantrieb.....	207
14.6	Antriebe in der Verfahrenstechnik und Umwelttechnik .....	215
<b>15</b>	<b>Wahl von Motor, Zwischenkreiskondensator und Bremswiderstand .....</b>	<b>217</b>
15.1	Rechenschema zur manuellen Berechnung von Antrieben .....	218
15.2	Demoprogramm zur Motorauswahl.....	222
15.2.1	Programmbeschreibung .....	222
15.3	Auslegung einer Kondensatorbatterie.....	226
15.4	Auslegung eines Bremswiderstands.....	227
<b>Anhang</b>	.....	<b>231</b>
<b>1</b>	<b>Gleichungen.....</b>	<b>231</b>
1.1	Physikalische Grundgleichungen.....	231
1.1.1	Wichtige Definitionen, Umrechnungen und Konstanten .....	232
1.2	Allgemeine Gleichungen für die Berechnung der Antriebsleistung.....	232
1.3	Allgemeine Gleichungen zur Berechnung von Antriebsmomenten.....	233
1.4	Arbeit .....	233
1.5	Antriebsleistung für Metallbearbeitungsmaschinen .....	235
1.5.1	Spezifische Schnittkräfte verschiedener Metalle .....	236
1.6	Antriebsleistung in der Verfahrenstechnik .....	238
1.7	Reibung .....	239
1.8	Effektives Moment .....	240
1.9	Massenträgheitsmomente von Körpern .....	241
1.10	Trägheitsmomente von Anwendungen.....	242
<b>2</b>	<b>v,t-Diagramme .....</b>	<b>246</b>
2.1	v,t-Diagramm mit linearem Verlauf der Geschwindigkeit beim Beschleunigen und Verzögern .....	246
2.2	v,t-Diagramm für minimales Moment .....	247
2.3	v,t-Diagramm mit $\sin^2$ -förmigem Verlauf der Geschwindigkeit beim Beschleunigen und Verzögern .....	247

<b>3</b>	<b>Wirkungsgrade, Reibwerte und Dichte .....</b>	<b>248</b>
3.1	Wirkungsgrade von Übertragungselementen .....	248
3.2	Reibwerte .....	248
3.2.1	Reibwerte für Lagerreibung .....	248
3.2.2	Reibwerte für Spindeln .....	248
3.2.3	Beiwerte für Spurkranz- und Seitenreibung .....	249
3.2.4	Reibwerte verschiedener Werkstoffpaarungen .....	249
3.2.5	Hebelarm der Rollreibung für verschiedene Werkstoffpaarungen .....	249
3.3	Dichte $\rho$ verschiedener Stoffe .....	250
3.4	Querkräfte .....	250
<b>4</b>	<b>Motorlisten .....</b>	<b>251</b>
4.1	Asynchrondrehstrommotor für Netzbetrieb .....	252
4.1.1	Vierpolige IE2-Drehstrommotoren MH, 50 Hz Bemessungsdaten 0,75 kW... 45 kW .....	252
4.2	Asynchrondrehstrommotor für Inverterbetrieb .....	254
4.2.1	Vierpolige IE1-Drehstrommotoren MD, 50 Hz Bemessungsdaten 0,12 kW... 22 kW .....	254
4.3	Servo-Asynchronmotor – Bemessungsdaten .....	257
4.3.1	Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....	257
4.3.2	Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet, IP54 .....	259
4.3.3	Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet, IP23s .....	262
4.3.4	Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....	264
4.3.5	Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet .....	270
4.4	Servo-Synchronmotor – Bemessungsdaten .....	274
4.4.1	Inverter-Netzanschluss 400 V, selbstbelüftet .....	274
4.4.2	Inverter-Netzanschluss 400 V, fremdbelüftet .....	280
<b>Literatur .....</b>	<b>285</b>	
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>287</b>	