

Inhalt

Vorwort — V

Hans-Dieter Stölting und Carsten Fräger

- 1 Einleitung Elektrische Kleinantriebe — 1**
 - 1.1 Allgemeines — 1
 - 1.1.1 Wirtschaftliche Bedeutung der Kleinantriebe — 1
 - 1.1.2 Kennzeichen kostengünstiger elektrischer Kleinantriebe — 1
 - 1.1.3 Kennzeichen hochwertiger Kleinantriebe — 4
 - 1.2 Das elektromagnetische Antriebssystem — 4
 - 1.3 Die Antriebskomponenten — 6
 - 1.3.1 Motoren — 6
 - 1.3.2 Elektronische Schaltungen — 10

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

- 2 Magnetkreis, Permanentmagnete, Kraft- und Drehmomenterzeugung — 19**
 - 2.1 Magnetfeld in elektrischen Maschinen — 19
 - 2.2 Zusammenhänge im Magnetfeld, Fluss und Flussverkettung — 20
 - 2.3 Magnetischer Kreis — 20
 - 2.3.1 Unverzweigter magnetischer Kreis — 21
 - 2.3.2 Verzweigter magnetischer Kreis — 21
 - 2.4 Ferromagnetische Materialien für Kleinmotoren — 23
 - 2.5 Permanentmagnete — 23
 - 2.5.1 Entwicklung der Magnetmaterialien und des maximalen Energieprodukts — 24
 - 2.5.2 Magnetische Eigenschaften der Permanentmagnete — 25
 - 2.5.3 Reale Magnetkreise mit Permanentmagneten — 35
 - 2.5.4 Permanentmagnetwerkstoffe für Hysteresemotoren — 39
 - 2.5.5 Aufmagnetisierung und Stabilisierung von Permanentmagneten — 40
 - 2.6 Kraft- und Drehmomenterzeugung in elektrischen Maschinen — 41
 - 2.6.1 Entstehung der Kräfte und Drehmomente — 41
 - 2.6.2 Berechnung der Kräfte und Drehmomente — 46

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

- 3 Kommutatormotoren – Allgemeines und Kommutatorsystem — 52**
 - 3.1 Übersicht — 52
 - 3.2 Kontaktsystem — 55
 - 3.2.1 Bestandteile des Kontaktsystems — 55
 - 3.2.2 Aufbau der Kommutatoren — 56

- 3.3 Ankerstromkommutierung — 58
- 3.3.1 Kommutierungsvorgang allgemein — 58
- 3.3.2 Qualitative Beschreibung des Kommutierungsvorgangs — 61
- 3.3.3 Zusammensetzung und Eigenschaften des Bürstenkörpers — 67
- 3.4 Funkentstörung bei Kommutatormotoren — 70
- 3.5 Geräuschverhalten — 71

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

4 Dauermagneterregte Gleichstrom-Kommutatormotoren — 72

- 4.1 Konstruktiver Aufbau — 72
- 4.1.1 Ständer — 72
- 4.1.2 Läufer — 73
- 4.1.3 Kommutierungssystem — 74
- 4.1.4 Lager — 75
- 4.1.5 Motoren mit eisenlosem Läufer — 76
- 4.2 Stationäres Betriebsverhalten — 78
- 4.2.1 Betriebskennlinien — 78
- 4.2.2 Wirkungsgrad — 81
- 4.2.3 Betriebsweise — 83
- 4.3 Dynamisches Betriebsverhalten — 84

Andreas Möckel, Tobias Heidrich und Heinz Weißmantel

5 Kommutatorreihenschlussmotoren, Universalmotoren — 89

- 5.1 Bezeichnung — 89
- 5.2 Charakteristische Merkmale — 91
- 5.3 Prinzipielles Betriebsverhalten — 94
- 5.3.1 Beschreibung der vereinfachten Anordnung — 94
- 5.3.2 Gleichstrombetrieb — 95
- 5.3.3 Wechselstrombetrieb — 96
- 5.4 Auslegung der Ständerwicklung für den Betrieb als Universalmotor — 99
- 5.5 Drehzahlstellung — 100
- 5.5.1 Anforderungen an die Drehzahl — 100
- 5.5.2 Spannungsstellung mit Transformator — 100
- 5.5.3 Ohmsche Widerstände zur Drehzahlstellung — 101
- 5.5.4 Wicklungsanzapfung — 102
- 5.5.5 Drehzahlstellung durch elektronische Stellglieder — 102
- 5.5.6 Stillsetzen des Motors — 104
- 5.5.7 Drehrichtungsumkehr — 105

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

6	Asynchronmotoren, Induktionsmotoren — 106
6.1	Eigenschaften — 106
6.2	Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 107
6.3	Ausführungsarten — 109
6.3.1	Aufbau — 109
6.3.2	Blechschnitt — 111
6.3.3	Rotor — 112
6.4	Schaltungs- und Ausführungsarten der Ständerwicklung — 114
6.4.1	Dreisträngige Motoren für Dreiphasen-Anschluss — 114
6.4.2	Dreisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensator — 115
6.4.3	Zweisträngige Motoren für Einphasen-Anschluss mit Kondensatorhilfsstrang — 117
6.5	Wirkungsweise — 121
6.5.1	Asynchron-Drehstrommotoren — 121
6.5.2	Asynchron-Wechselstrommotoren mit Kondensator-Hilfsstrang — 126
6.5.3	Asynchron-Wechselstrommotoren mit Widerstandshilfsstrang — 135
6.5.4	Feldoberwellen — 137
6.6	Reversierbetrieb — 138
6.6.1	Vertauschen von Haupt- und Hilfsstrang — 138
6.6.2	Umkehr der Stromrichtung in einem Strang — 139
6.7	Drehzahlstellen bei Asynchronmotoren — 139
6.7.1	Polumschaltung — 139
6.7.2	Änderung des Schlupfs bzw. der Rotorfrequenz — 141
6.7.3	Frequenzänderung — 143
6.8	Spannungsumschaltung — 145
6.9	Spaltpolmotor — 146
6.9.1	Einsatzgebiete — 146
6.9.2	Wirkungsprinzip — 147
6.9.3	Ausführungsarten — 148
6.9.4	Betriebskennlinien — 149
6.9.5	Änderung der Drehrichtung — 149
6.9.6	Änderung der Drehzahl — 150

Carsten Fräger und Hans-Dieter Stölting

7	Synchronmotoren und -generatoren — 151
7.1	Eigenschaften — 151
7.1.1	Drehzahlverhalten — 151
7.1.2	Lastwinkel — 152
7.2	Einsatzgebiete, Anwendungsbeispiele — 153
7.3	Ausführungsarten — 154

7.3.1	Synchronmotoren mit Magnetläufern —	158
7.3.2	Hysteresemotor —	165
7.3.3	Reluktanzmotor —	167
7.3.4	Permanentmagneterregte Motoren mit anisotropem Läufer —	170
7.3.5	Synchron-Klauenpolgenerator mit elektrischer Erregung —	172
7.4	Betriebsverhalten Synchronmotor mit Kondensatorhilfsstrang —	176
7.4.1	Symmetrischer Betrieb dreisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang —	176
7.4.2	Symmetrischer Betrieb zweisträngiger Motor mit Kondensatorhilfsstrang —	177
7.4.3	Komplexe Spannungsgleichungen einsträngiger Betrieb —	178
7.4.4	Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, symmetrische Wicklung —	179
7.4.5	Komplexe Spannungsgleichungen mit Kondensatorhilfsstrang, quasisymmetrische Wicklung —	183
7.5	Anlauf von Permanentmagnet-Synchronmotoren ohne Anlaufkäfig —	184
7.6	Reversierbetrieb —	186
7.7	Drehzahlstellen, Drehzahlregelung bei der Synchronmaschine —	187

Wolfgang Amrhein

8	Bürstenlose Permanentmagnetmotoren mit Block- und Sinuskommutierung —	188
8.1	Einleitung —	188
8.1.1	Definitionen —	188
8.1.2	Verwandtschaften zu anderen Motorarten —	189
8.2	Konstruktive Besonderheiten und resultierende Applikationen —	192
8.2.1	Ausführung und Auswahl der Statorwicklung —	195
8.2.2	Ausführung und Auswahl der Permanentmagnetbauformen —	202
8.2.3	Ausführung und Auswahl der Motorbauform —	207
8.3	Mathematische Modellierung des permanentmagneterregten Synchronmotors —	213
8.3.1	Einfaches Maschinenmodell —	213
8.3.2	Zweisträngiges Ersatzmodell für die feldorientierte Steuerung —	216
8.3.3	Feldschwächbetrieb —	221
8.3.4	Aus der Spannungsgleichung gewonnene Übertragungsfunktion —	222
8.3.5	Beispiel für eine feldorientierte Regelung —	225
8.3.6	Flussbasiertes Maschinenmodell —	226
8.4	Elektronische Unterdrückung von Drehmomentschwankungen —	228
8.4.1	Motor mit Mittelpunktanschluss der Wicklung —	229
8.4.2	Motor ohne Mittelpunktanschluss der Wicklung —	230

- 8.4.3 Praktische Ausführung einer Korrekturstromspeisung — 231
- 8.5 Entmagnetisierung der Permanentmagnete — 233
- 8.6 Motorkennlinien — 236

Wolfgang Amrhein und Johannes Schmid

- 9 Geschaltete Reluktanzmotoren — 238**
 - 9.1 Grundlagen — 239
 - 9.1.1 Energiewandlung und Drehmomentbildung — 241
 - 9.1.2 Radialkraftbildung — 244
 - 9.2 Mathematisches Modell — 245
 - 9.3 Typische Kennfelder — 247
 - 9.4 Leistungselektronik und Ansteuerung — 249
 - 9.4.1 Schaltzustände der Leistungselektronik — 250
 - 9.5 Motorischer und generatorischer Betrieb — 253
 - 9.6 Stromformung — 254

Marcus Herrmann und Thomas Roschke

- 10 Elektromagnetische Schrittantriebe — 256**
 - 10.1 Überblick — 256
 - 10.2 Bauformen von Schrittmotoren — 257
 - 10.3 Betriebsverhalten des Schrittmotors — 263
 - 10.3.1 Der Schrittmotor als Teil eines Antriebssystems — 263
 - 10.3.2 Schrittwinkel und Rotorausrichtung — 265
 - 10.3.3 Drehzahl — 268
 - 10.3.4 Drehmoment — 269
 - 10.3.5 Reibung und Positioniergenauigkeit — 273
 - 10.3.6 Schritt-Zeit-Verlauf — 274
 - 10.3.7 Betriebsbereiche und Grenzkennlinien — 277
 - 10.3.8 Ersatzmodell des Schrittmotors — 280
 - 10.4 Ansteuerung von Schrittmotoren — 282
 - 10.4.1 Ansteuerregime (Softwareeinfluss) — 282
 - 10.4.2 Elektrische Beschaltung von Schrittmotoren (Hardwareeinfluss) — 289
 - 10.5 Dynamik und Bewegungsabläufe — 297
 - 10.5.1 Dynamik von Schrittmotor und Antriebssystem — 297
 - 10.5.2 Typische Bewegungsabläufe — 298
 - 10.5.3 Referenzpunktbestimmung und Anschlagerkennung — 300
 - 10.5.4 Resonanzfrequenzen — 302
 - 10.6 Auswahlkriterien und Spezifikation für die Anwendung — 305

Axel Mertens

- 11 Leistungselektronik und Regler für Kleinantriebe — 306**
 - 11.1 Einleitung — 306

11.2	Elektronische Stellelemente —	306
11.2.1	Analoge Stellelemente —	307
11.2.2	Grundprinzip schaltender Stellelemente —	308
11.2.3	Leistungselektronische Bauelemente —	309
11.2.4	Gleichstromsteller —	317
11.2.5	Wechselrichter —	322
11.2.6	Dreiphasiger Wechselrichter —	323
11.2.7	Diodengleichrichter —	328
11.2.8	Gesteuerte Gleichrichter —	330
11.2.9	Wechselstromsteller —	333
11.3	Regler —	335
11.3.1	Regelung der Gleichstrommaschine —	336
11.3.2	Regelung eines Permanentmagnet-Synchronmotors —	347
11.3.3	Regelung eines Asynchronmotors/Induktionsmotors —	353

Thomas Bertolini und Thomas Fuchs

12	Schwingungen und Geräusche —	358
12.1	Einführung —	358
12.1.1	Relevanz der Geräuscentwicklung elektrischer Antriebe —	358
12.1.2	Grundsätzliches zur Geräuscentstehung in elektromechanischen Systemen —	358
12.2	Geräuscentwicklung bei elektrischen Kleinantrieben —	359
12.2.1	Mechanisch verursachte Wechselkräfte —	359
12.2.2	Elektromotorisch verursachte Wechselkräfte —	362
12.3	Messung, Analyse und Prüfung von Geräuschen und Schwingungen —	363
12.3.1	Messmittel nach aktuellem Stand der Technik —	363
12.3.2	Vorgehensweise zur Analyse und Prüfung von Geräuschen —	365
12.4	Hören und Hörempfinden —	372
12.4.1	Bewertungskurven —	373
12.4.2	Psychoakustische Größen —	374

Andreas Wagener

13	Elektromagnetische Verträglichkeit bei elektrischen Kleinantrieben —	376
13.1	Einführung in die EMV —	376
13.2	Rechtlicher Rahmen —	377
13.2.1	Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) —	378
13.2.2	Niederspannungsrichtlinie —	378
13.2.3	EMV-Richtlinie —	378
13.3	Elektromagnetische Kopplungen bei elektrischen Kleinantrieben —	380
13.3.1	Leitungsgebundene Störungen —	381

13.3.2	Kapazitive Kopplungen —	381
13.3.3	Induktive Kopplungen —	383
13.3.4	Galvanische Kopplung —	383
13.4	Funkausbreitung —	385
13.5	Typische Beobachtungen bei elektrischen Antrieben —	385
13.5.1	Störungen durch Schaltvorgänge und Funkenbildung —	385
13.5.2	Überspannung am Gerät durch elektrostatische Aufladung —	387
13.5.3	Überspannung durch unbeabsichtigte Schaltvorgänge —	388
13.6	EMV-Effekte im Überblick —	388
13.6.1	Störfestigkeit —	389
13.6.2	Störaussendung —	390
13.7	Messverfahren zur Bewertung der EMV —	391
13.8	Funktionserdung als Basis —	393
13.8.1	Schutzerdung —	394
13.8.2	Funktionserdung —	394
13.9	Räumliche Anordnung von Leitungen —	395
13.10	Entstörung durch Filter und Schirmung —	396
13.10.1	Kapazitive Filter —	397
13.10.2	Kombinierte Filter —	398
13.10.3	Schirmung und Gehäuse —	399
13.11	Entstörung eines DC-Motors —	400
13.11.1	Störverhalten bei unterschiedlicher Leitungslänge —	400
13.11.2	Entstörung des Motors über ein Vorschaltfilter —	405
13.12	Schutzmaßnahmen für elektronische Schaltungen —	405
13.12.1	Überspannungseffekte – Auswirkungen und Abhilfe —	405
13.12.2	LatchUp-Effekt —	408
13.12.3	Abhilfemaßnahmen —	409
13.12.4	Robuste Signalkodierung am Beispiel von Quadratursignalen —	411

Formelzeichen und Formelschreibweise — 415

Tabellenverzeichnis — 419

Abbildungsverzeichnis — 421

Die Autoren — 437

Literatur — 441

Stichwortverzeichnis — 457