

Otto Justus

# **Dynamisches Verhalten elektrischer Maschinen**

Eine Einführung in die numerische Modellierung  
mit PSPICE

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 94 Bildern



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Grundlegende Differentialgleichungen</b>	<b>1</b>
1.1	Allgemeines	1
1.2	Spannungen an einer Spule	1
1.3	Inneres Drehmoment, innere Kraft	3
1.4	Beschleunigungsmoment, Beschleunigungskraft	4
1.4.1	Beispiele für das Widerstandsmoment $M_W$	5
1.4.2	Beispiele für das Massenträgheitsmoment $J$	6
1.5	Erwärmung	6
1.6	Lösung von Differentialgleichungen	7
<b>2</b>	<b>Schaltvorgänge an ruhenden Spulen</b>	<b>10</b>
2.1	Einzelspule	10
2.1.1	Lineare Spule an Gleichspannung	11
2.1.2	Lineare Spule an Wechselspannung	16
2.1.3	Nichtlineare Magnetisierungskennlinien	17
2.1.4	Einschalten einer nichtlinearen Gleichstromspule	20
2.1.5	Messung der Spulenkennwerte	21
2.1.6	Nichtlineare Spule an Wechselspannung	23
2.1.7	Spule mit Hystereseverlusten	25
2.2	Induktiv gekoppelte Spulen	31
2.2.1	Bezogene Größen	32
2.2.2	Magnetische Energie des Hauptfeldes	35
2.3	Technischer Transformator	36
<b>3</b>	<b>Geradlinige Bewegungen in einem Schütz</b>	<b>39</b>
3.1	Kräfte in einem Schütz	39
3.1.1	Die magnetische Kraft $F_m$	40
3.1.2	Die Federkraft $F_\lambda$	41
3.1.3	Die Dämpfungskraft $F_d$	42
3.1.4	Die Beschleunigungskraft $F_b$	42
3.2	Gleichungssystem	43
3.3	Beispiel: Gleichstromschütz	43
3.4	Beispiel: Wechselstromschütz	45
<b>4</b>	<b>Drehmomente einfacher Maschinen</b>	<b>48</b>
4.1	Reaktionsdrehmoment	48
4.2	Stator- und Rotorstrom als Verursacher eines Drehmoments	49
4.3	Anwurfmotor	51

<b>5 Gleichstrommaschine</b>	55
5.1 Der Ankerkreis	57
5.2 Der Erregerkreis	58
5.3 Gleichstrommaschine mit konstanter Fremderregung	59
5.4 Gleichstrom-Reihenschlußmaschine	67
5.5 Gleichstrom-Doppelschlußmaschine	74
<b>6 Betriebsmöglichkeiten der Gleichstrommaschine</b>	81
6.1 Leonard-Umformer	81
6.2 Regelung der Motordrehzahl	85
6.3 Antriebssystem mit Unwucht	88
6.4 Einphasen-Reihenschlußmotor	90
6.5 Selbsterregter Gleichstromgenerator	93
<b>7 Komplexe Raumvektoren</b>	100
7.1 Koordinatentransformation	102
7.2 Transformation einer Differentialgleichung	103
7.3 Wichtige Koordinatensysteme für Drehfeldmaschinen	103
7.4 Drehfeld einer Zweiphasenmaschine	105
7.5 Numerische Lösung komplexer Differentialgleichungen	107
7.6 Kondensatormotor	111
7.6.1 Anlaßkondensator	117
7.6.2 Betriebskondensator	120
<b>8 Dreiphasen-Wicklungen</b>	122
8.1 Größen der zweiphasigen Modellmaschine	123
8.2 Größen des Nullsystems	125
8.3 Rücktransformation	126
8.4 Leistung und Drehmoment	127
<b>9 Asynchronmaschine am symmetrischen Drehstromnetz</b>	130
9.1 Gleichungssystem	130
9.2 Berechnung eines Hochlaufvorganges	134
9.3 Stationärer Betrieb	139
9.4 Läufergespeiste Drehstrom-Nebenschlußmaschine	144
9.5 Mehrfachkäfigläufer	146

<b>10 Asynchronmaschine am beliebigen Netz</b>	151
10.1 Asynchronmaschine als achtpolige Übertragungseinheit	153
10.2 Kurzschlußanftanlauf	156
10.3 Gleichstrombremsung	158
10.4 Steinmetz-Schaltung mit Kondensator	160
10.5 Stern-Dreieck-Anlassen	162
10.6 Asynchronmaschine am ruhenden Frequenzumformer	164
<b>11 Selbsterregter Asynchrongenerator</b>	167
<b>12 Drehstrom-Synchronmaschine</b>	174
12.1 Aufbau der Maschine	174
12.2 Gleichungssystem	175
12.3 Drehstrom-Synchronmaschine als Motor	178
12.4 Drehstrom-Synchronmaschine als Generator	182
12.5 Stationärer Betrieb am symmetrischen Drehstromnetz	184
<b>13 Stoßkurzschluß</b>	188
13.1 Erhaltung des magnetischen Spulenflusses	188
13.2 Stromverlauf in verlustlosen Spulen	189
13.3 Klemmenkurzschlüsse	193
13.3.1 Dreipoliger Kurzschluß	193
13.3.2 Einpoliger Kurzschluß	196
13.3.3 Zweipoliger Kurzschluß mit N-Leiter	198
13.3.4 Zweipoliger Kurzschluß ohne N-Leiter	200
13.3.5 Zusammenfassung	201
<b>14 Thermisches Verhalten elektrischer Maschinen</b>	202
14.1 Erwärmung durch Verluste	202
14.2 Elektrische Maschine als homogener Körper	202
14.3 Thermisches RC-Netzwerk	204
14.4 Berechnungsbeispiel	205
<b>15 Analoge Modellbildung mit PSpice</b>	209
15.1 Programmstruktur einer Schaltungsdatei	209
15.2 Analyse des Zeitverhaltens	218
15.3 PSpice-Beispiel für ein analoges Modell	219
15.4 Analyse des stationären Verhaltens	226
15.5 Graphischer Post-Prozessor PROBE	228
<b>Literatur</b>	230
<b>Sachwortverzeichnis</b>	231