Teubner Studienbücher

Physik Elektrotechnik

Bourne/Kendall: **Vektoranalysis**

227 Seiten. DM 15,80

Heber/Weber: **Grundlagen der Quantenphysik**

Band 1: Quantenmechanik. VI, 158 Seiten. DM 12,80

Band 2: Quantenfeldtheorie. VI, 178 Seiten. DM 13,80

Vertrieb nur in der BRD und West-Berlin

Lautz: **Elektromagnetische Felder**

Ein einführendes Lehrbuch. 180 Seiten. DM 15,80

Leonhard: **Statistische Analyse linearer Regelsysteme**

266 Seiten. DM 18,80

Leonhard: **Regelung in der elektrischen Antriebstechnik**

216 Seiten. DM 22,—

Mayer-Kuckuk: **Physik der Atomkerne**

Eine Einführung. 2. Aufl. 288 Seiten. DM 19,80

Walcher: **Praktikum der Physik**

366 Seiten. DM 22,—

Mechanik

Becker: **Technische Strömungslehre**

Eine Einführung in die Grundlagen und technischen Anwendungen der Strömungsmechanik. 3. Aufl. 144 Seiten. DM 11,80

Becker/Piltz: **Übungen zur Technischen Strömungslehre**

120 Seiten. DM 10,80

Magnus: **Schwingungen**

Eine Einführung in die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen. 2. Aufl. 251 Seiten. DM 18,80 (LAMM)

Magnus/Müller: **Grundlagen der Technischen Mechanik**

300 Seiten. DM 24,— (LAMM)

Müller/Magnus: **Übungen zur Technischen Mechanik**

Informatik

Hotz: **Informatik: Rechenanlagen**

Struktur und Entwurf, 136 Seiten. DM 12,80 (LAMM)

Kandzia/Langmaack: **Informatik: Programmierung**

234 Seiten. DM 18,80 (LAMM)

Wirth: **Systematisches Programmieren**

Eine Einführung. 160 Seiten. DM 14,80 (LAMM)

Regelung in der elektrischen Antriebstechnik

Von Dr.-Ing. W. Leonhard
o. Professor an der Technischen Universität Braunschweig

1974. Mit 195 Bildern

B. G. Teubner Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Werner Leonhard

Geboren 1926 in Weiden/Oberpfalz. Von 1946 bis 1951 Studium der Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Stuttgart. Von 1951 bis 1954 Mitarbeiter und Assistent am Institut für Theorie der Elektrotechnik der Technischen Hochschule Stuttgart (Prof. Dr. W. Bader). 1954 Promotion zum Dr.-Ing. an der Technischen Hochschule Stuttgart. Von 1954 bis 1958 bei Westinghouse Electric Corp., Pittsburgh/USA. Von 1959 bis 1963 bei Siemens-Schuckert-Werke, Erlangen. Seit 1963 o. Professor für Regelungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig.

ISBN 978-3-519-06102-1 ISBN 978-3-322-94747-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-322-94747-5

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege, der Speicherung und Auswertung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei Verwertung von Teilen des Werkes, dem Verlag vorbehalten.

Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den Verlag gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© B. G. Teubner, Stuttgart 1974

Satz: H. Aschenbroich, Stuttgart

Umschlaggestaltung: W. Koch, Stuttgart

Vorwort

Elektrische Antriebe spielen als elektromechanische Energiewandler bei allen Transport- und Produktionsvorgängen eine wichtige Rolle. Von besonderer Bedeutung ist dabei ihre leichte Steuer- und Regelbarkeit, die es ermöglicht, den als Folge der technischen Rationalisierung steigenden Ansprüchen an die Flexibilität und Präzision der Antriebsaggregate gerecht zu werden.

Umgekehrt hat in der Vergangenheit aber auch die Regelungstechnik durch Forderungen aus dem Bereich elektrischer Antriebe wesentliche Impulse erhalten, die dazu führten, daß neuartige Regelverfahren entwickelt und in die Praxis eingeführt werden konnten. Dabei war auch der Gesichtspunkt maßgebend, daß Antriebe – im Gegensatz z.B. zu verfahrenstechnischen Regelstrecken – wohlbekannte Strukturen und gut definierte dynamische Eigenschaften aufweisen.

In den letzten Jahren ist das Gebiet der geregelten elektrischen Antriebe durch die Fortschritte der Halbleitertechnik und Leistungselektronik stark in Fluß gekommen; völlig neue Möglichkeiten, vor allem bei kommutatorlosen Regelantrieben, wurden erschlossen. Diese Entwicklungsphase wird noch einige Jahre andauern; zum gegenwärtigen Zeitpunkt zeichnet sich noch kein neuer stationärer Zustand ab.

Das vorliegende Buch umfaßt den Inhalt einer Vorlesung, die der Verfasser seit 1963 an der Technischen Universität Braunschweig entwickelt hat. Es kennzeichnet den gegenwärtigen Stand der Technik ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Manche interessanten Details mußten weggelassen werden; dies bedeutet aber nicht unbedingt einen Nachteil, da Details erfahrungsgemäß auch am schnellsten veralten. Auswahl und Anordnung des Stoffes erfolgten vorwiegend unter didaktischen Gesichtspunkten.

Voraussetzung für das Verständnis sind Grundkenntnisse über elektrische Maschinen und Regelungstechnik, wie sie üblicherweise im Pflichtteil eines Studiums der Elektrotechnik erworben werden. Für weitergehende Einzelheiten wird auf entsprechende Lehrbücher verwiesen. Der Text ist jedoch genügend abgerundet, um auch für ein Selbststudium oder zur Vertiefung und Auffrischung geeignet zu sein.

Beim Aufbau der Vorlesung haben mich über die Jahre hinweg verschiedene Mitarbeiter des Instituts für Regelungstechnik wirksam unterstützt, zuletzt vor allem die Herren Dipl.-Ing. F. Maurer, H. Theuerkauf und H. Eisenack. Einige für das Verständnis besonders wichtige graphische Darstellungen gehen auf von ihnen ausgearbeitete Rechenprogramme zurück; außerdem haben sie verschiedene Themen als Studien- und Diplomarbeiten betreut. Die Zeichnungen wurden auch diesmal von Frau H. Haahtela, das Manuskript von Frau M. Niedner mit Umsicht und Sorgfalt angefertigt.

Allen Beteiligten möchte ich für ihre Unterstützung sehr herzlich danken.

Inhalt

Einleitung	9
1. Einige Grundlagen aus der Mechanik	
1.1. Impulssatz	11
1.2. Trägheitsmoment	12
1.3. Einfluß eines Drehzahlwandlers	14
1.4. Leistung und Arbeit	15
1.5. Bestimmung des Trägheitsmomentes einer Maschine mit dem Auslaufversuch	16
2. Diskussion der Bewegungsgleichung	
2.1. Allgemeine Form der Bewegungsgleichung	18
2.2. Stationäre Kennlinien verschiedener Motoren und Arbeitsmaschinen . . .	20
2.3. Stabile und instabile Betriebspunkte	23
3. Integration der vereinfachten Bewegungsgleichung	
3.1. Lösung der linearisierten Bewegungsgleichung	25
3.1.1. Leeranlauf eines Motors mit Nebenschlußkennlinie	26
3.1.2. Anlauf des Motors mit drehzahlproportionalem Lastmoment .	28
3.1.3. Belastung eines leerlaufenden Motors	28
3.1.4. Anfahrvorgang mit Stufenanlasser	29
3.2. Analytische Lösung der nichtlinearen Bewegungsgleichung	31
3.3. Numerische oder graphische Integration	33
4. Erwärmung elektrischer Maschinen	
4.1. Leistungsverluste und Temperaturgrenzen	36
4.2. Erwärmung eines homogenen Körpers	37
4.3. Verschiedene Betriebsarten	40
4.3.1. Dauerbetrieb	40
4.3.2. Kurzzeitbetrieb	40
4.3.3. Periodischer Aussetzbetrieb	41
5. Fremderregte Gleichstrommaschine	
5.1. Allgemeines	43
5.2. Differentialgleichung und Blockschaltbild	44
5.3. Stationäre Kennlinien bei Anker- und Feldsteuerung	46
5.3.1. Ankersteuerung	47
5.3.2. Feldsteuerung	48
5.3.3. Kombinierte Anker-Feld-Steuerung	51
5.4. Dynamisches Verhalten bei konstantem Erregerfluß	52

6. Gleichstrom-Reihenschlußmotor	
6.1. Dynamisches Blockschaltbild	56
6.2. Stationäres Betriebsverhalten	59
7. Regelung einer fremderregten Gleichstrommaschine	
7.1. Aufgabenstellung	62
7.2. Strom-Drehzahl-Regelung im Ankerspannungsbereich	64
7.3. Strom-Drehzahl-Regelung im Feldschwächbereich	68
7.4. Speisung eines fremderregten Gleichstrommotors aus einem rotierenden Umformer	71
8. Stromrichter als Leistungsstellglied	
8.1. Stromrichterventil, Thyristor	73
8.2. Netzgeführter Stromrichter in Einphasen-Brückenschaltung	77
8.3. Drehstrom-Brückenschaltung	89
8.4. Regelkreis mit Stromrichter als Stellglied	96
8.5. Stromrichter mit reduzierter Steuerblindleistung	99
9. Gleichstrom-Regelantriebe mit Stromrichterspeisung	
9.1. Gleichstromantrieb mit netzgeführtem Stromrichter	101
9.2. Gleichstrom-Umrichter mit Zwangskommutierung	107
10. Drehstrom-Asynchronmaschine	
10.1. Der symmetrische Asynchronmotor im nichtstationären Betrieb	112
10.2. Stationärer Betrieb bei Speisung des Motors mit sinusförmigen symmetrischen Drehspannungen	121
10.2.1. Ständerstrom, Kreisdiagramm	121
10.2.2. Stationäres Drehmoment, Wirkungsgrad	126
10.2.3. Vergleich mit praktischen Motorkennwerten	130
10.2.4. Anlauf des Asynchronmotors	131
10.3. Dynamisches Verhalten bei Speisung mit eingprägten Spannungen	133
10.4. Stationärer Betrieb bei Speisung mit unsymmetrischen sinusförmigen Drehspannungen	143
10.4.1. Symmetrische Komponenten	143
10.4.2. Einphasen-Asynchronmotor	146
10.4.3. Einphasige Senk-Bremsschaltung	148
10.4.4. Unsymmetrische Anfahrtschaltung	149
11. Regelung eines Asynchron-Motors	
11.1. Umrichter zur Speisung eines Drehstrommotors mit veränderlicher Frequenz	152
11.1.1. Direkt-Umrichter	152
11.1.2. Pulswechselrichter (Unterschwingungs-Wechselrichter)	154

11.2. Drehzahlregelung des Asynchronmotors mit eingepprägtem sinusförmigen Ständerstrom und Schlupfbegrenzung	157
11.3. Drehzahlregelung eines Asynchronmotors unter Verwendung von Feldkoordinaten	165
12. Regelung einer Drehstrommaschine mit eingeschränktem Drehzahl-Stellbereich	
12.1. Ständergespeiste Drehstrommaschine mit feldabhängiger Stromregelung im Läuferkreis	174
12.2. Drehstrommotor mit ungesteuertem Gleichrichter im Rotorkreis	181
12.2.1. Untersynchrone Stromrichter-Kaskade	182
12.2.2. Krämer-Kaskade	183
13. Synchronmaschine mit polradabhängiger Stromregelung im Ständerkreis . . .	185
14. Einige Anwendungsbeispiele	
14.1. Lineare Lageregelung mit festem Bezugspunkt	194
14.2. Lineare Lageregelung mit beweglichem Bezugspunkt	197
14.2.1. Digitale Drehzahlregelung	197
14.2.2. Schlingen- und Abstandsregelung	198
14.3. Zeitoptimale Lageregelung mit festem Zielpunkt	202
14.4. Lageregelung mit bewegtem Zielpunkt	204
Literatur	209
Sachverzeichnis	214

Verzeichnis der wichtigsten Symbole

1. Alle Gleichungen sind Größengleichungen, d.h., jede physikalische Größe ist das Produkt aus einer Einheit und einem (von der gewählten Einheit abhängigen) Zahlenwert.

2. Kennzeichnung durch Schreibweise

$u(t), i(t)$, usw. Augenblickswerte
 $\bar{u}, \bar{U}_g, \bar{i}, \bar{I}_g$ Mittelwerte
 U, I Effektivwerte
 $\tilde{U}, \tilde{i}$ komplexe Zeigergrößen bei sinusförmigen Vorgängen
 $U(p) = L(u(t))$ Laplace-Transformierte (Bildfunktionen)

$u(t)$ komplexe Vektoren (bei Drehfeldmaschinen)
 $^1u(t)$ Vektor in besonderem Koordinatensystem
 $\tilde{U}, \bar{U}(p), \bar{u}(t)$ konjugiert komplexe Größen

3. Besondere Symbole

A Oberfläche
a Strombelag
b Beschleunigung
Induktion
Feldschwächfaktor
C elektrische oder thermische Kapazität
D Dämpfungsfaktor
e induzierte Spannung
f Frequenz, Kraft
 f_a Antriebskraft
 f_w Widerstandskraft
F(p) Übertragungsfunktion
G Gewicht
g Erdbeschleunigung
i Strom
 i_a, i_e Anker-, Erregerstrom
 i_g, i_w Gleich-, Wechselstrom
 i_R, i_S Rotor-, Ständerstrom
L Induktivität
 L_a, L_e Anker-, Erregerinduktivität
 L_R, L_S Rotor-, Ständerinduktivität
 ℓ Länge
M Masse, Gegeninduktivität
m Drehmoment
 m_a Antriebsdrehmoment
 m_b Beschleunigungsdrehmoment

m_k Kippmoment
 m_w Widerstandsmoment
N Windungszahl
 N_R, N_S Rotor-, Ständerwindungszahl
n Drehzahl
 P_w, P_b Wirk-, Blindleistung
 $p = \sigma + j\omega$ komplexe Frequenzvariable
R elektrischer Widerstand
 R_w, R_b Wirk-, Blindwiderstand
S Torsionssteifigkeit
s Schlupf, Weg
 s_k Kippschlupf
T Zeitkonstante, Periodendauer
 T_a, T_e Anker-, Erregerzeitkonstante
 T_m, T_{mk} Anlaufzeitkonstante
 T_ϑ thermische Zeitkonstante
t Zeit
u Spannung
 u_a, u_e Anker-, Erregerspannung
 u_R, u_S Rotor-, Ständerspannung
v Geschwindigkeit
w Arbeit, Energie
y Admittanz
z Impedanz

8 Verzeichnis der wichtigsten Symbole

α	Wärme-Übergangszahl, Zündwinkel	σ_R, σ_S	Rotor-, Ständer-Streuziffer
γ	Spezifisches Gewicht, Löschwinkel, Konstante ($2\pi/3$)	$\tau = \omega t$	normierte Zeit
ϵ	mechanischer Drehwinkel	Φ	magnetischer Fluß
η	Wirkungsgrad	φ	Phasenwinkel
Θ	Trägheitsmoment	ψ	Spulenfluß
ϑ	Temperatur, Durchflutung	ψ_R, ψ_S	Rotor-, Ständer-Spulenfluß
μ_0	Permeabilitätskonstante	$\omega = 2\pi n$	Winkelgeschwindigkeit
σ	Streuziffer	$\omega = 2\pi f$	Kreisfrequenz
		$\alpha, \beta, \delta, \left. \begin{matrix} \epsilon, \xi, \lambda, \\ \mu, \xi, \rho \end{matrix} \right\}$	Winkelkoordinaten