

Ministerium für Bildung und Wissenschaft der Ukraine
Staatshochschule
"Nationale Bergbauuniversität der Ukraine"



E. Nolle, A. Beshta

Elektrische Maschinen und Antriebe

Lehrbuch

Dnipropetrovsk
NBU
2013

УДК 621.313
ББК 31.261
Б 57

Рекомендовано до видання вченою радою Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (протокол № 6 від 2 липня 2013 р.)

Рецензенти:

Л.В. Дубинець, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри автоматизованого електроприводу (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна);

О.В. Садовой, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри електрообладнання, проректор з наукової роботи (Дніпродзержинський державний технічний університет).

Nolle E.

B 57 Elektrische Maschinen und Antriebe: Lehrbuch / E. Nolle, A. Beshta. – D.: Nationale Bergbauuniversität, 2013. – 232 p.

ISBN 978 – 966 – 350 – 418 – 6

Alle Rechte werden vorbehalten, wie z. B. die der Übersetzung, des Nachdruckes und/oder der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus. Kein Teil des Buches darf ohne schriftliche Genehmigung der Autoren in irgendeiner Form (digital, Fotokopie, Mikrofilm, o. a.) reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Dies gilt auch für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle.

УДК 621.313
ББК 31.261

ISBN 978 – 966 – 350 – 418 – 6

© Є. Нолле, О. Бешта, 2013
© Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013

Inhaltsverzeichnis:	Seite
Vorwort	7
1 Grundlagen	8
1.1 Grundgleichungen der Elektrotechnik	8
1.2 Elektrische Netzwerke	10
1.2.1 Grundelemente der Elektrotechnik	10
1.2.2 Elektrische Netzwerke	10
1.2.3 Die Kirchhoff'schen Sätze	12
1.3 Wechselstromnetzwerke	13
1.3.1 Symbolische Methode	13
1.3.2 Der komplexe Widerstand	14
1.3.3 Ortskurven	14
1.3.4 Die komplexe Leistung	15
1.4 Magnetischer Kreis	15
1.4.1 Materie im Magnetfeld	15
1.4.2 Streu- und Nutzfluss	18
1.4.3 Das Hopkinson'sche Gesetz	18
1.5 Leiterwerkstoffe für elektrische Maschinen	20
1.5.1 Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	21
1.6 Isolierstoffe für elektrische Maschinen	21
1.6.1 Temperaturklassen	21
1.6.2 Montsinger'sche Regel	22
2 Transformatoren	23
2.1 Aufbau	23
2.1.1 Transformatorkern	24
2.1.2 Wicklung	26
2.1.3 Kühlung	27
2.1.4 Konstruktionsteile	27
2.2 Wirkungsweise	28
2.2.1 Idealer Transformator	28
2.3 Ersatzschaltung	29
2.3.1 Leerlauf und Magnetisierung	29
2.3.2 Kurzgeschlossener Transformator	31
2.3.3 Ersatzschaltung des realen Transformators	32
2.4 Betrieb	34
2.4.1 Betriebsverhalten	34
2.4.2 Realer Leerlauf	34
2.4.3 Kurzschluss	36
2.5 Bestimmung der Ersatzschaltung	37
2.6 Sonderausführungen	39
2.6.1 Drehstromtransformatoren	39
2.6.2 Spartransformatoren	42
2.6.3 Kleintransformatoren	43
2.6.4 Leistungsübertrager mit Ferritkernen	44
3 Asynchronmaschinen	46
3.1 Aufbau	46

3.1.1	Stator mit Drehstromwicklung	46
3.1.2	Rotor	47
3.1.3	Konstruktionsteile	48
3.2	Wirkungsweise	48
3.2.1	Magnetische Drehfelder	48
3.2.2	Wirkungsweise	51
3.3	Ersatzschaltung	53
3.3.1	Leerlauf	53
3.3.2	Stillstand oder Kurzschluss	54
3.3.3	Ersatzschaltung für allgemeine Belastung	55
3.3.4	Vereinfachte Ersatzschaltung der Asynchronmaschine	56
3.4	Betrieb	57
3.4.1	Zeigerdiagramm und Ortskurve	57
3.4.2	Belastungskennlinien und Kloß'sche Formel	59
3.4.3	Anlauf am starren Netz	62
3.4.4	Betrieb am realen Netz	68
3.4.5	Betrieb am Umrichter	69
3.5	Bestimmung der Ersatzschaltung	74
3.6	Sonderausführungen	76
3.6.1	Asynchrongeneratoren	76
3.6.2	Einphasenmotoren	79
4	Synchronmaschinen	86
4.1	Aufbau	86
4.1.1	Stator mit Drehstromwicklung	86
4.1.2	Läufer	87
4.1.3	Konstruktionsteile	89
4.1.4	Klemmenbezeichnung	90
4.1.5	Hilfseinrichtungen	90
4.2	Wirkungsweise	91
4.3	Ersatzschaltung	92
4.3.1	Leerlauf	92
4.3.2	Kurzschluss	93
4.3.3	Ersatzschaltung der Synchronmaschine	94
4.4	Betrieb	95
4.4.1	Inselbetrieb der Synchronmaschine	95
4.4.2	Netzbetrieb der Synchronmaschine	96
4.4.3	Einschalten am starren Netz	101
4.4.4	Betrieb am Netz	103
4.4.5	Betrieb am Umrichter	104
4.5	Bestimmung der Ersatzschaltung	104
4.5.1	Induktiver Volllastpunkt, Potierreaktanz	104
4.5.2	Kenngrößen der Ersatzschaltung	106
4.6	Sonderausführungen	106
4.6.1	Schenkelpolmaschinen	106
4.6.2	Permanent erregte Synchronmaschine	109
4.6.3	Stromrichteromotor	112
4.6.4	Torquemotoren	112
4.6.5	Drehstromlinearmotoren	113
4.6.6	Wechselstrom-Synchronmotoren	114

4.6.7	Drehstromlichtmaschine	117
4.6.8	Reluktanzmotor	118
5	Stromwendermaschinen	122
5.1	Aufbau	122
5.1.1	Stator	122
5.1.2	Rotor mit Stromwender	124
5.1.3	Konstruktionsteile	125
5.1.4	Klemmenbezeichnung und Erregungsart	125
5.1.5	Hilfseinrichtungen	127
5.2	Wirkungsweise	127
5.2.1	Grundgesetze	127
5.2.2	Generatorbetrieb	128
5.2.3	Motorbetrieb	128
5.2.4	Ankerquerfeld	129
5.3	Ersatzschaltung	131
5.4	Betrieb	132
5.4.1	Fremd erregte Gleichstrommaschine	132
5.4.2	Reihenschlusserregter Gleichstrommotor	134
5.4.3	Stromversorgung von Gleichstrommaschinen	136
5.5	Bestimmung der Ersatzschaltung	139
5.5.1	Widerstände	139
5.5.2	Leerlaufversuch	140
5.6	Sonderausführungen	140
5.6.1	Permanent erregte Gleichstrommotoren	141
5.6.2	Universalmotor	141
5.6.3	Gleichstrommotoren mit eisenlosem Anker	144
6	Sonstige elektrische Maschinen	148
6.1	Elektronikmotoren	148
6.1.1	Einpulsiger Elektronikmotor	148
6.1.2	Zweipulsiger Elektronikmotor	149
6.1.3	Vierpulsiger Elektronikmotor	149
6.2	Schrittmotoren	150
6.2.1	Wechselpoltyp oder Heteropolarmotor	151
6.2.2	Gleichpoltyp oder Homopolarmotor	152
6.2.3	Dynamische Momentkennlinie	153
6.2.4	Lineare Schrittmotoren	154
6.3	Unipolarmaschine	155
6.4	Transversalflussmaschine	156
6.5	Piezoelektrische Motoren	159
6.5.1	Piezoelektrische Aktoren	159
6.5.2	Nanoschrittmotor	160
6.5.3	Piezoelektrischer Ultraschallmotor	160
7	Dynamische Vorgänge	163
7.1	Kinematische Grundgleichungen	163
7.2	Quasistationäre Antriebsaufgabe	164
7.2.1	Vorbetrachtung zur allgemeinen Antriebsaufgabe	164
7.2.2	Vereinfachte Antriebsaufgabe	166

7.2.3	Allgemeine quasistationäre Antriebsaufgabe	167
7.2.4	Anwendungsbeispiele	168
7.3	Dynamische Vorgänge	171
7.3.1	The equation of motion of electric drive with elastic mechanical coupling	171
7.3.2	Dynamic model of the separately excited DC motor	175
7.3.3	Dynamic model of AC motor	177
7.3.4	Dynamic model of synchronous machine	186
7.3.5	Basic performance criteria of speed control	188
7.3.6	Principles of regulation	191
7.3.7	Speed control system for DC motors	196
7.3.8	Speed control system for AC motors	199
8	Verluste und Erwärmung	203
8.1	Verluste	203
8.1.1	Verlustarten	203
8.1.2	Wirkungsgrad	204
8.2	Verlustbewertung und Wirtschaftlichkeit	205
8.3	Erwärmung und Kühlung	207
8.3.1	Grundelemente der thermischen Analyse	207
8.4	Wärmeschaltbilder für elektrische Maschinen	210
8.4.1	Vollständiges Wärmeschaltbild des Kleintransformators	210
8.4.2	Vollständiges Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine	212
8.4.3	Vereinfachtes Wärmeschaltbild des Kleintransformators für den stationären Betrieb	213
8.4.4	Vereinfachtes Wärmeschaltbild der Asynchronmaschine für transiente Vorgänge	214
8.4.5	Einkörpermodell für die Abkühlung	216
8.5	Beispiele für Erwärmungsvorgänge in elektrischen Maschinen	217
8.5.1	Endübertemperaturen des Kleintransformators EI 84b	217
8.5.2	Temperaturverlauf beim Dauerbetrieb einer Asynchronmaschine	218
8.5.3	Kurzzeitbetrieb einer Asynchronmaschine	218
8.5.4	Abkühlung der Asynchronmaschine	220
8.5.5	Kurzzeitbetrieb der Asynchronmaschine mit Sonderwicklung für erhöhte Sättigung	221
9	Normung	222
9.1	Normmotoren und Baugröße (nur rotierende Maschinen)	222
9.2	Bauformen (nur rotierende Maschinen)	224
9.3	Schutzarten (allg.)	225
9.4	Kühlungsarten (allg.)	226
9.4.1	Ruhende Wandler, Transformatoren, Drosseln	226
9.4.2	Rotierende Maschinen	227
9.5	Betriebsarten (allg.)	229
9.6	Drehrichtung (nur rotierende Maschinen)	230
9.7	Wirkungsgradklassen (nur rotierende Maschinen)	230
9.8	Temperaturklassen (allg.)	231
10	Anhang	233
10.1	Quellen	233
10.2	Literaturhinweise	233
10.3	Wichtige Normen und Bestimmungen	234

Vorwort

Ausgehend vom Aufbau und der Funktionsweise der wichtigsten ruhenden und elektromechanischen Energiewandler wird deren Betriebsverhalten beschrieben. Dazu wird gezeigt, wie man aus meist einfachen Messungen im Prüffeld geeignete Ersatzschaltungen entwerfen kann.

Diese lassen sich für die praktisch besonders wichtigen stationären Betriebszustände meist einfach algebraisch auswerten, so dass das Betriebsverhalten durch kompakte Gleichungen, übersichtliche Zeigerdiagramme und/oder praxisgerechte Betriebskennlinien dargestellt und beschrieben werden kann.

Darüber hinaus werden aber auch Lösungen für den wichtigsten transienten Fall des quasistationären Betriebes in Form einer Differentialgleichung 1. Ordnung angegeben.

Und schließlich wird der allgemeine Fall dynamischer Vorgänge behandelt, der i. d. R. die Lösung von Differentialgleichungssystemen höherer Ordnung erfordert. Dieser Abschnitt wurde von Prof. A. Beshta von der National Mining University Dnipropetrovsk verfasst und ist im Original in englischer Sprache gedruckt.

In einem eigenen Kapitel wird ebenfalls auf die unterschiedlichen Verlustarten, deren Kapitalisierung und die Erwärmung der elektrischen Maschinen eingegangen. Gerade Letzteres wird wegen der immer höheren Anforderungen an die optimale Materialausnutzung und den wirtschaftlichen Betrieb der Maschinen zunehmend wichtiger.

Abschließend werden auch wichtige Vorgaben und Rahmenbedingungen für die Elektrischen Maschinen durch die derzeit aktuellen Normen kurz angesprochen.

Sersheim, 2013, Eugen Nolle

Bemerkung:

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Prof. h. c. (NBU) Dr.-Ing. Nikolaus Neuberger, der einen Großteil des verwendeten Bildmaterials erstellt hat.

Нолле Євген
Бешта Олександр Степанович

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА ПРИВОДИ

Навчальний посібник

(Німецькою та англійською мовами)

Видано за редакцією авторів.

Підп. до друку 21.06.2013. Формат 30×42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 12,9.
Обл.-вид. арк. 12,9. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному ВНЗ «Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.