

J.Dirba, K.Ketners

# **ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS**

RTU Izdevniecība  
Rīga 2007

UDK 621.313.(075.8)

Grāmatā aplūkoti elektrisko mašīnu un transformatoru uzbūves principi un konstrukcijas, teorijas jautājumi stacionāros un pārejas procesos, kā arī analizēti to darba režīmi un ekspluatācijas īpašības.

Grāmata paredzēta elektroenerģētikas, elektromehānikas un elektrotehnoloģiju virzienu studentiem un speciālistiem.

517 lappuses, 408 ilustrācijas 31 bibliogrāfiskie nosaukumi

Recenzenti:

Latvijas Zinātņu akadēmijas korespondētājloceklis,  
profesors, Dr.habil. sc. ing. L.Ribickis

Latvijas Jūras akadēmijas prof. Dr. sc. ing. A.Gasparjans

Izdots saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta Padomes 2007.g.7.jūnija lēmumu, protokols Nr. 24 (58).

Rīgas Tehniskā universitātē, 2007  
Jānis Dirba, Kārlis Ketners

ISBN 978-9984-32-457-9

## PRIEKŠVārds

Elektriskās mašīnas ir bāzes priekšmets elektroenerģētikas un elektromehānikas speciālistu sagatavošanā. Bez dziļām zināšanām elektrisko mašīnu laukā nav iespējams produktīvi darboties daudzās ar elektrotehniku saistītajās profesijās.

Šajā grāmatā transformatori kā statiski elektromagnētiski aparāti bez rotējošām daļām, tradicionāli tiek aplūkoti kopā ar elektriskajām mašīnām, kurās ir kustīgas daļas, jo plašākā nozīmē tām visām ir vienāds darbības princips. Tāpēc daudzus sarežģītus jautājumus vieglāk izprast, aplūkojot transformatorus, un tad pāriet pie sarežģītākām maiņstrāvas mašīnām (rotējošām, lineārām un citām).

Grāmata sastāv no ievada, kur apskatīta elektrisko mašīnu vēsture, to vispārīgs raksturojums un klasifikācija un sešām nodaļām: līdzstrāvas mašīnas, transformatori, maiņstrāvas mašīnu teorijas kopīgi jautājumi; asinhronās mašīnas; sinhronās mašīnas; elektromašīnu pārveidotāji un maiņstrāvas kolektormašīnas. Šajās nodaļās aplūkoti attiecīgo mašīnu gan stacionārie darba režīmi, gan pārejas procesi, tāpat arī simetriskie un ekspluatācijā biežāk sastopamie nesimetriskie režīmi. Katras nodaļas beigās dots materiāls par attiecīgo speciālās nozīmes elektrisko mašīnu uzbūvi, darbības principu un izmantošanu, kopā vairāk neka divdesmit tipu mašīnām. Lielāka uzmanība šeit veltīta mikromašīnām, ko plaši izmanto dažādās automātiskās regulēšanas sistēmās, kā arī tādām mašīnām, kurās pēdējos gadu desmitos vērojama elektronikas un mašīnu integrācija izpaužas spilgtāk, piemēram, ventiļdzinēji.

Grāmatas saturs atbilst Rīgas Tehniskajā universitātē īstenojamo programmu prasībām elektroenerģētikas, elektromēhanikas un elektrotehnoloģiju virzienos.

Autori pateicas par vērtīgajiem norādījumiem grāmatas recenzentiem: LZA korespondētājloceklim, profesoram, Dr.habil. sc. ing. Leonīdam Ribickim un Latvijas Jūras akadēmijas profesoram Dr. sc. ing. Aleksandram Gasparjanam

Piezīmes un priekšlikumus šīs grāmatas satura uzlabošanai lūdzam sūtīt J.Dirbam, RTU Enerģētikas un elektrotehnikas fakultātē, Kronvalda bulvārī 1, Rīga, LV 1010.

# SATURS

PRIEKŠVĀRDS	9
1. ELEKTRISKO MAŠĪNU VĒSTURE UN TO KLASIFIKĀCIJA	11
1.1. Elektrisko mašīnu attīstības vēsture	11
1.2. Elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un to klasifikācija	17
2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS	23
2.1. Līdzstrāvas mašīnas darbības princips un uzbūve	23
2.2. Līdzstrāvas mašīnu enkura tinumi	31
2.2.1. Vispārīgi norādījumi	31
2.2.2. Vienkāršs cilpas tinums	32
2.2.3. Salikts cilpas tinums	38
2.2.4. Vienkāršs viļņa tinums	40
2.2.5. Salikts viļņa tinums	43
2.2.6. Viļņa tinums ar dīko sekciju	44
2.2.7. Mākslīgi noslēgts viļņa tinums	45
2.2.8. Tinuma simetrijas noteikumi	46
2.2.9. Izlīdzinošie savienojumi	47
2.2.10. Kombinēts tinums	51
2.2.11. Enkura tinumu praktiskā izveidošana	53
2.2.12. Enkura tinuma tipa izvēle	55
2.3. Enkura tinuma EDS	56
2.4. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskais lauks	60
2.4.1. Magnētiskā ķēde un tās aprēķins	61
2.4.2. Enkura reakcija	64
2.4.3. Enkura reakcijas ietekmes samazināšana	67
2.5. Līdzstrāvas mašīnu komutācija	68
2.5.1. Dzirksteļošanas cēloņi	68
2.5.2. Komutācijas procesa fizikālā aina	70
2.5.3. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni	74
2.6. Līdzstrāvas ģeneratori	80
2.6.1. Vispārīgi jautājumi	80
2.6.2. Neatkarīgas ierosmes ģenerators	83
2.6.3. Paralēlas ierosmes ģenerators	87
2.6.4. Virknes ierosmes ģenerators	89
2.6.5. Jauktas ierosmes ģenerators	90
2.6.6. Līdzstrāvas ģeneratoru paralēlā darbība	92
2.7. Līdzstrāvas dzinēji	95
2.7.1. Vispārīgi norādījumi	95
2.7.2. Dzinēja momentu vienādojums	97
2.7.3. Dzinēja rotācijas frekvence	98

2.7.4.	Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte	98
2.7.5.	Līdzstrāvas dzinēju palaišana	100
2.7.6.	Paralēlas ierosmes dzinējs	102
2.7.7.	Virknes ierosmes dzinējs	107
2.7.8.	Jauktas ierosmes dzinējs	111
2.7.9.	Līdzstrāvas dzinēju bremsēšana	112
2.8.	Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas	115
2.8.1.	Ģeneratori ar strauji krītošu ārējo raksturliķni	115
2.8.2.	Elektromašīnu pastiprinātāji	117
2.8.3.	Līdzstrāvas tahogeneratori	119
2.8.4.	Unipolārie ģeneratori	120
2.8.5.	Līdzstrāvas vadāmi dzinēji	122
2.8.6.	Līdzstrāvas magnetohidrodinamiskās mašīnas	126
3.	TRANSFORMATORI	128
3.1.	Vispārīgas ziņas par transformatoriem	128
3.1.1.	Pamatdefinīcijas	128
3.1.2.	Transformatoru tipi	129
3.1.3.	Transformatoru nominālie lielumi	131
3.1.4.	Transformatora darbības princips	131
3.2.	Transformatora tukšgaitas režīms	136
3.2.1.	Vispārīgi norādījumi	136
3.2.2.	Fizikālie procesi transformatora tukšgaitā	137
3.2.3.	Ideāla transformatora tukšgaita	139
3.2.4.	Reāla transformatora tukšgaita	143
3.2.5.	Transformatora tukšgaitas zudumi	145
3.2.6.	Ekvivalentā shēma un tukšgaitas mēģinājums	146
3.2.7.	Tinumu savienojumu shēmas un grupas	148
3.3.	Transformatora īsslēguma režīms	156
3.3.1.	Vispārīgi norādījumi	156
3.3.2.	Fizikālie procesi transformatora īsslēgumā	157
3.3.3.	Reducētais transformators	159
3.3.4.	Īsslēgtā transformatora ekvivalentā shēma un īsslēguma trīsstūris	161
3.3.5.	Īsslēguma mēģinājums	164
3.4.	Transformatora darbība slodzes režīmā	166
3.4.1.	Fizikālie procesi slogotā transformatorā un vektoru diagrammas	166
3.4.2.	Transformatora pamatvienādojumi	169
3.4.3.	Transformatora ekvivalentās shēmas	171
3.4.4.	Slogota transformatora sprieguma izmaiņa	174
3.4.5.	Transformatora lietderības koeficients	177
3.4.6.	Transformatora sprieguma regulēšana	179
3.5.	Transformatoru paralēla darbība	183

3.5.1. Paralēlas darbības nosacījumi	183
3.5.2. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem transformācijas koeficientiem	183
3.5.3. Transformatoru paralēla darbība ar dažādām tinumu savienojumu grupām	189
3.5.4. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem īsslēguma spriegumiem	190
3.6. Autotransformatori un daudztinumu transformatori	192
3.6.1. Autotransformatori	192
3.6.2. Daudztinumu transformatori	196
3.7. Trīsfasu transformatoru nesimetriskie darba režīmi	202
3.7.1. Vispārīgi norādījumi	202
3.7.2. Ekvivalentās shēmas un pretestības nullsecības strāvām	205
3.7.3. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/\Delta - 11$	209
3.7.4. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y_0/\Delta - 11$	213
3.7.5. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/Y_0 - 0$	216
3.7.6. Nesimetriskas slodzes ietekme uz transformatoru darbību	219
3.8. Pārejas procesi transformatoros	221
3.8.1. Transformatora pieslēgšana tīklam	221
3.8.2. Transformatora pēkšņais īsslēgums	224
3.8.3. Elektrodinamiskie spēki	227
3.9. Transformatoru magnētvasdi	231
3.9.1. Transformatoros izmantojamie elektrotehniskie tēraudi	231
3.9.2. Magnētvasdu konstrukcijas	233
3.9.3. Trīsfasu transformatoru serdes uzmagnezizēšanas īpatnības	239
3.9.4. Transformatora magnētiskās ķēdes aprēķins	241
3.10. Transformatoru tinumi	244
3.10.1. Tinumu tipi un konstrukcijas	244
3.10.2. Izolācijas galvenie mezgli un detaļas	251
3.10.3. Tinumu un izolācijas materiāli	254
3.11. Transformatoru izolācija	256
3.11.1. Faktori, kas iedarbojas uz izolāciju	256
3.11.2. Izolācijas klasifikācija	258
3.11.3. Pārspriegumi transformatoros	258
3.11.4. Izolācijas konstrukcijas pamattipi	273
3.11.5. Izolācijas pilnveidošanas virzieni	283
3.11.6. Sauso transformatoru izolācija	286
3.12. Transformatoru silšana un dzesēšana	286
3.12.1. Silšana, siltumpāreja un transformatora pieļaujamās temperatūras	286

3.12.2.	Transformatoru dzesēšanas sistēmas	288
3.12.3.	Eļļas transformatoru dzesēšanas sistēmu palīgierīces	292
3.13.	Speciālas nozīmes transformatori	296
3.13.1.	Mērtransformatori	296
3.13.2.	Taisngriežu iekārtu transformatori	298
3.13.3.	Metināšanas transformatori	305
3.13.4.	Elektroniskajās ierīcēs, automātikā un sakaru sistēmās izmantojamie transformatori	306
3.13.5.	Fāžu skaita un frekvences pārveidošanas transformatori	308
4.	MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU TEORIJAS KOPĪGI JAUTĀJUMI	311
4.1.	Maiņstrāvas mašīnu pamattipi un to uzbūve	311
4.1.1.	Maiņstrāvas mašīnu pamattipi	311
4.1.2.	Asinhrono mašīnu uzbūve	312
4.1.3.	Sinhrono mašīnu uzbūve	314
4.2.	Rotējošais magnētiskais lauks	316
4.3.	Maiņstrāvas tinumu EDS	318
4.3.1.	Tinuma EDS pamatharmonika	318
4.3.2.	EDS augstākās harmonikas	325
4.3.3.	EDS formas uzlabošana	326
4.4.	Maiņstrāvas mašīnu tinumi	331
4.4.1.	Maiņstrāvas tinumu pamattipi	331
4.4.2.	Trīsfāžu vesela skaitļa tinumi	333
4.4.3.	Trīsfāžu daļskaitļa tinumi	338
4.4.4.	Trīsfāžu vienslāņa tinumi	341
4.4.5.	Daži tinumi ar fāžu skaitu $m \neq 3$	344
4.5.	Maiņstrāvas mašīnu tinumu magnetizējošie spēki	346
4.5.1.	Spoles, spoļu grupas un fāzes MS	346
4.5.2.	Daudzfāžu tinumu MS	354
4.6.	Maiņstrāvas mašīnu induktīvās pretestības	362
5.	ASINHRONĀS MAŠĪNAS	367
5.1.	Asinhronās mašīnas darbības princips un darba režīmi	367
5.2.	Spriegumu un strāvu vienādojumi	370
5.3.	Ekvivalentās shēmas	373
5.4.	Asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības, zudumi un lietderības koeficients	375
5.5.	Asinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments un raksturliķnes	377
5.5.1.	Elektromagnētiskais moments un dzinēja darbības stabilitāte	377
5.5.2.	Dzinēja raksturliķnes	379
5.6.	Trīsfāžu asinhrono dzinēju palaišana	381
5.6.1.	Vispārīgi norādījumi	381
5.6.2.	Asinhrono dzinēju ar fāžu rotoru palaišana	382

5.6.3.	Īsslēgtu asinhrono dzinēju palaišana	383
5.6.4.	Īsslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturlīknēm	385
5.7.	Asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana	387
5.7.1.	Vispārīgi norādījumi	387
5.7.2.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot statora tinumam pievadītā sprieguma frekvenci	388
5.7.3.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot polu pāru skaitu	388
5.7.4.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot slīdi	390
5.8.	Asinhrono dzinēju bremsēšanas režīmi	393
5.9.	Vienfāzes asinhronie dzinēji	396
5.9.1.	Vienfāzes asinhrono dzinēju teorijas pamatjautājumi	396
5.9.2.	Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi	400
5.10.	Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi	405
5.10.1.	Vispārīgi norādījumi	405
5.10.2.	Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriskiem spriegumiem	405
5.10.3.	Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriju rotora ķēdē	409
5.11.	Speciālas nozīmes asinhronās mašīnas	411
5.11.1.	Indukcijas regulators un fāzes regulators	411
5.11.2.	Asinhronais frekvences pārveidotājs	413
5.11.3.	Asinhronais ģenerators ar pašierosmi	414
5.11.4.	Vadāms asinhronais dzinējs	416
5.11.5.	Asinhronie dzinēji ar masīvu rotoru	418
5.11.6.	Grieztransformatori	418
5.11.7.	Selsini	420
5.11.8.	Lineārie asinhronie dzinēji	423
5.11.9.	Asinhronie tahogeneratori	425
6.	<b>SINHRONĀS MAŠĪNAS</b>	428
6.1.	Sinhrono mašīnu darbības princips	428
6.2.	Sinhronās mašīnas magnētiskais lauks un enkura reakcija	429
6.3.	Sinhrono ģeneratoru spriegumu vienādojumi	435
6.4.	Sinhrono ģeneratoru vektoru diagrammas	437
6.5.	Sinhrono ģeneratoru raksturlīknes	438
6.6.	Praktiskā EDS diagramma	441
6.7.	Sinhrono mašīnu paralēla darbība	442
6.7.1.	Sinhronizācijas paņēmieni	442
6.7.2.	Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments	445
6.7.3.	Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu aktīvo jaudu. Leņķa raksturlīknes	447
6.7.4.	Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu ierosmes strāvu. U veida raksturlīknes	449
6.8.	Sinhronie dzinēji	451

