

J.Dirba, K.Ketners

# **ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS**

OTRAIS IZDEVUMS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2009

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.

534 lappuses, 421 ilustrācija, 33 bibliogrāfiskie nosaukumi

Recenzenti:

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

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

Izdots saskaņā ar RTU Enerģētikas institūta Padomes 2009.g. 5. marta lēmumu, protokols Nr. 32 ( 66 ).

© Rīgas Tehniskā universitātē, 2009

© Jānis Dirba, Kārlis Ketners

ISBN 978-9984-32-556-9

## 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 priekšvārda un astoņām nodaļām: elektrisko mašīnu vēsture un to klasifikācija; līdzstrāvas mašīnas; transformatori; maiņstrāvas mašīnu teorijas kopīgi jautājumi; asinhronās mašīnas; sinhronās mašīnas; maiņstrāvas elektrisko mašīnu strāvas diagrammas; 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 nekā divdesmit tipu mašīnām. Lielāka uzmanība šeit veltīta mikromašīnām, ko plaši izmanto dažādās automātiskās regulēšanas sistēmās, kā arī tādām mašīnām, kurās pēdējos gadu desmitos vērojamā elektronikas un mašīnu integrācija izpaužas spilgtāk, piemēram, ventiļdzinēji.

Salīdzinot ar grāmatas pirmo izdevumu, šis izdevums papildināts ar vairākiem jautājumiem, piemēram, elektrisko mašīnu strāvu diagrammas (hodogrāfi), kā arī plašāk aplūkoti ventiļdzinēju teorijas jautājumi.

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

Autori pateicas par vērtīgajiem norādījumiem, ko sniedza recenzenti: LZA akadēmiķis, profesors, Dr.habil. sc. ing. Leonīds Ribickis un Latvijas Jūras akadēmijas profesors Dr. sc. ing. Aleksandrs Gasparjans, grāmatu sagatavojot otrajam izdevumam.

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

# SATURS

PRIEKŠVārds	3
<b>1. ELEKTRISKO MAŠĪNU VĒSTURE UN TO KLASIFIKĀCIJA</b>	<b>11</b>
1.1. Elektrisko mašīnu attīstības vēsture	11
1.2. Elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un to klasifikācija	16
<b>2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS</b>	<b>22</b>
2.1. Līdzstrāvas mašīnas darbības princips un uzbūve	22
2.2. Līdzstrāvas mašīnu enkura tinumi	30
2.2.1. Vispārīgi norādījumi	30
2.2.2. Vienkāršs cilpas tinums	31
2.2.3. Salikts cilpas tinums	37
2.2.4. Vienkāršs viļņa tinums	39
2.2.5. Salikts viļņa tinums	42
2.2.6. Viļņa tinums ar dīko sekciju	43
2.2.7. Mākslīgi noslēgts viļņa tinums	44
2.2.8. Tinuma simetrijas noteikumi	45
2.2.9. Izlīdzinošie savienojumi	46
2.2.10. Kombinēts tinums	50
2.2.11. Enkura tinumu praktiskā izveidošana	52
2.2.12. Enkura tinuma tipa izvēle	54
2.3. Enkura tinuma EDS	55
2.4. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskais lauks	58
2.4.1. Magnētiskā ķēde un tās aprēķins	58
2.4.2. Enkura reakcija	62
2.4.3. Enkura reakcijas ietekmes samazināšana	65
2.5. Līdzstrāvas mašīnu komutācija	66
2.5.1. Dzirksteļošanas ceļoņi	66
2.5.2. Komutācijas procesa fizikālā aina	68
2.5.3. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni	72
2.6. Līdzstrāvas ģeneratori	78
2.6.1. Vispārīgi jautājumi	78
2.6.2. Neatkarīgas ierosmes ģenerators	81
2.6.3. Paralēlas ierosmes ģenerators	84
2.6.4. Virknes ierosmes ģenerators	87
2.6.5. Jauktas ierosmes ģenerators	87
2.6.6. Līdzstrāvas ģeneratoru paralēla darbība	89
2.7. Līdzstrāvas dzinēji	92
2.7.1. Vispārīgi norādījumi	92
2.7.2. Dzinēja momentu vienādojums	93
2.7.3. Dzinēja rotācijas frekvence	94

2.7.4.	Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte	95
2.7.5.	Līdzstrāvas dzinēju palaišana	97
2.7.6.	Paralēlas ierosmes dzinējs	99
2.7.7.	Virknes ierosmes dzinējs	104
2.7.8.	Jauktas ierosmes dzinējs	108
2.7.9.	Līdzstrāvas dzinēju bremsēšana	109
2.8.	Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas	111
2.8.1.	Ģeneratori ar strauji krītošu ārējo raksturlīkni	111
2.8.2.	Elektromašīnu pastiprinātāji	114
2.8.3.	Līdzstrāvas tahogeneratori	116
2.8.4.	Unipolārie ģeneratori	117
2.8.5.	Līdzstrāvas vadāmi dzinēji	119
2.8.6.	Līdzstrāvas magnetohidrodinamiskās mašīnas	122
<b>3.</b>	<b>TRANSFORMATORI</b>	<b>124</b>
3.1.	Vispārīgas ziņas par transformatoriem	124
3.1.1.	Pamatdefinīcijas	124
3.1.2.	Transformatoru tipi	125
3.1.3.	Transformatoru nominālie lielumi	127
3.1.4.	Transformatora darbības princips	127
3.2.	Transformatora tukšgaitas režīms	132
3.2.1.	Vispārīgi norādījumi	132
3.2.2.	Fizikālie procesi transformatora tukšgaitā	133
3.2.3.	Ideāla transformatora tukšgaita	135
3.2.4.	Reāla transformatora tukšgaita	139
3.2.5.	Transformatora tukšgaitas zudumi	141
3.2.6.	Ekvivalentā shēma un tukšgaitas mēģinājums	142
3.2.7.	Tinumu savienojumu shēmas un grupas	144
3.3.	Transformatora īsslēguma režīms	151
3.3.1.	Vispārīgi norādījumi	151
3.3.2.	Fizikālie procesi transformatora īsslēgumā	152
3.3.3.	Reducētais transformators	154
3.3.4.	Īsslēgtā transformatora ekvivalentā shēma un īsslēguma trīsstūris	156
3.3.5.	Īsslēguma mēģinājums	158
3.4.	Transformatora darbība slodzes režīmā	161
3.4.1.	Fizikālie procesi slogotā transformatorā un vektoru diagrammas	161
3.4.2.	Transformatora pamatvienādojumi	163
3.4.3.	Transformatora ekvivalentās shēmas	165
3.4.4.	Slogota transformatora sprieguma izmaiņa	168
3.4.5.	Transformatora lietderības koeficients	171
3.4.6.	Transformatora sprieguma regulēšana	173

3.5. Transformatoru paralēla darbība	177
3.5.1. Paralēlas darbības nosacījumi	177
3.5.2. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem transformācijas koeficientiem	178
3.5.3. Transformatoru paralēla darbība ar dažādām tinumu savienojumu grupām	182
3.5.4. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem īsslēguma spriegumiem	183
3.6. Autotransformatori un daudztinumu transformatori	185
3.6.1. Autotransformatori	185
3.6.2. Daudztinumu transformatori	190
3.7. Trīsfāžu transformatoru nesimetriskie darba režīmi	196
3.7.1. Vispārīgi norādījumi	196
3.7.2. Ekvivalentās shēmas un pretestības nullsecības strāvām	199
3.7.3. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/\Delta - 11$	203
3.7.4. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y_0/\Delta - 11$	207
3.7.5. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/Y_0 - 0$	209
3.7.6. Nesimetriskas slodzes ietekme uz transformatoru darbību	213
3.8. Pārejas procesi transformatoros	215
3.8.1. Transformatora pieslēgšana tīklam	215
3.8.2. Transformatora pēkšņais īsslēgums	218
3.8.3. Elektrodinamiskie spēki	221
3.9. Transformatoru magnētvasdi	225
3.9.1. Transformatoros izmantojamie elektrotehniskie tēraudi	225
3.9.2. Magnētvasdu konstrukcijas	226
3.9.3. Trīsfāžu transformatoru serdes uzmagnezēšanas īpatnības	232
3.9.4. Transformatora magnētiskās ķēdes aprēķins	234
3.10. Transformatoru tinumi	234
3.10.1. Tinumu tipi un konstrukcijas	237
3.10.2. Izolācijas galvenie mezgli un detaļas	244
3.10.3. Tinumu un izolācijas materiāli	247
3.11. Transformatoru izolācija	249
3.11.1. Faktori, kas iedarbojas uz izolāciju	249
3.11.2. Izolācijas klasifikācija	251
3.11.3. Pārspriegumi transformatoros	251
3.11.4. Izolācijas konstrukcijas pamattipi	266
3.11.5. Izolācijas pilnveidošanas virzieni	276
3.11.6. Sauso transformatoru izolācija	279

3.12.	Transformatoru silšana un dzesēšana	279
3.12.1.	Silšana, siltumpāreja un transformatora pieļaujamās temperatūras	279
3.12.2.	Transformatoru dzesēšanas sistēmas	281
3.12.3.	Eļļas transformatoru dzesēšanas sistēmu palīgierīces	285
3.13.	Speciālas nozīmes transformatori	289
3.13.1.	Mērtransformatori	289
3.13.2.	Taisngriežu iekārtu transformatori	291
3.13.3.	Metināšanas transformatori	298
3.13.4.	Elektroniskajās ierīcēs, automātikā un sakaru sistēmās izmantojamie transformatori	299
3.13.5.	Fāžu skaita un frekvences pārveidošanas transformatori	301
<b>4.</b>	<b>MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU TEORIJAS KOPIĢI JAUTĀJUMI</b>	<b>304</b>
4.1.	Maiņstrāvas mašīnu pamattipi un to uzbūve	304
4.1.1.	Maiņstrāvas mašīnu pamattipi	304
4.1.2.	Asinhrono mašīnu uzbūve	305
4.1.3.	Sinhrono mašīnu uzbūve	307
4.2.	Rotējošais magnētiskais lauks	309
4.3.	Maiņstrāvas tinumu EDS	311
4.3.1.	Tinuma EDS pamatharmonika	311
4.3.2.	EDS augstākās harmonikas	318
4.3.3.	EDS formas uzlabošana	319
4.4.	Maiņstrāvas mašīnu tinumi	324
4.4.1.	Maiņstrāvas tinumu pamattipi	324
4.4.2.	Trīsfāžu vesela skaitļa tinumi	326
4.4.3.	Trīsfāžu daļskaitļa tinumi	331
4.4.4.	Trīsfāžu vienslāņa tinumi	334
4.4.5.	Daži tinumi ar fāžu skaitu $m \neq 3$	337
4.5.	Maiņstrāvas mašīnu tinumu magnetizējošie spēki	339
4.5.1.	Spoles, spoļu grupas un fāzes MS	339
4.5.2.	Daudzfāžu tinumu MS	347
4.6.	Maiņstrāvas mašīnu induktīvās pretestības	355
<b>5.</b>	<b>ASINHRONĀS MAŠĪNAS</b>	<b>360</b>
5.1.	Asinhronās mašīnas darbības princips un darba režīmi	360
5.2.	Spriegumu un strāvu vienādojumi	362
5.3.	Ekvivalentās shēmas	365
5.4.	Asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības, zudumi un lietderības koeficients	368
5.5.	Asinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments un raksturlīknes	369
5.5.1.	Elektromagnētiskais moments un dzinēja darbības stabilitāte	369
5.5.2.	Dzinēja raksturlīknes	372



5.6. Trīsfāžu asinhrono dzinēju palaišana	375
5.6.1. Vispārīgi norādījumi	375
5.6.2. Asinhrono dzinēju ar fāžu rotoru palaišana	376
5.6.3. Īsslēgtu asinhrono dzinēju palaišana	377
5.6.4. Īsslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturlīknēm	379
5.7. Asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana	381
5.7.1. Vispārīgi norādījumi	381
5.7.2. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot statora tinumam pievadītā sprieguma frekvenci	382
5.7.3. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot polu pāru skaitu	382
5.7.4. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot slīdi	384
5.8. Asinhrono dzinēju bremzēšanas režīmi	387
5.9. Vienfāzes asinhronie dzinēji	389
5.9.1. Vienfāzes asinhrono dzinēju teorijas pamatjautājumi	389
5.9.2. Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi	393
5.10. Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi	398
5.10.1. Vispārīgi norādījumi	398
5.10.2. Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriskiem spriegumiem	399
5.10.3. Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriju rotora ķēdē	402
5.11. Speciālas nozīmes asinhronās mašīnas	404
5.11.1. Indukcijas regulators un fāzes regulators	404
5.11.2. Asinhronais frekvences pārveidotājs	406
5.11.3. Asinhronais ģenerators ar pašierosmi	407
5.11.4. Vadāms asinhronais dzinējs	409
5.11.5. Asinhronie dzinēji ar masīvu rotoru	411
5.11.6. Griežtransformatori	411
5.11.7. Selsini	413
5.11.8. Lineārie asinhronie dzinēji	415
5.11.9. Asinhronie tahogeneratori	418
<b>6. SINHRONĀS MAŠĪNAS</b>	<b>420</b>
6.1. Sinhrono mašīnu darbības princips	420
6.2. Sinhronās mašīnas magnētiskais lauks un enkura reakcija	421
6.3. Sinhrono ģeneratoru spriegumu vienādojumi	427
6.4. Sinhrono ģeneratoru vektoru diagrammas	429
6.5. Sinhrono ģeneratoru raksturlīknes	430
6.6. Praktiskā EDS diagramma	434
6.7. Sinhrono mašīnu paralēla darbība	435
6.7.1. Sinhronizācijas paņēmieni	435
6.7.2. Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments	438
6.7.3. Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu aktīvo jaudu. Leņķa	439

raksturlīknes	
6.7.4. Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu ierosmes strāvu. U veida raksturlīknes	442
6.8. Sinhronie dzinēji	444
6.8.1. Vispārīgi norādījumi	444
6.8.2. Sinhrono dzinēju darba raksturlīknes	445
6.8.3. Sinhrono dzinēju palaišana un rotācijas frekvences regulēšana	446
6.9. Sinhrono mašīnu svārstības	448
6.10. Pārejas procesi sinhronajās mašīnās	456
6.10.1. Vispārīgi norādījumi	456
6.10.2. Fizikālie procesi ģeneratorā pēkšņā īsslēguma laikā	456
6.10.3. Pēkšņā īsslēguma strāvas	460
6.11. Sinhrono ģeneratoru nesimetriska slodze	469
6.11.1. Vispārīgi norādījumi	469
6.11.2. Tiešās, pretējas un nullsecības strāvas un pretestības	469
6.11.3. Nesimetrisko režīmu ietekme uz sinhrono ģeneratoru darbību	471
6.11.4. Sinhrono ģeneratoru nesimetriskie īsslēgumi	472
6.12. Speciālas nozīmes sinhronās mašīnas	476
6.12.1. Sinhronās mašīnas ar pastāvīgajiem magnētiem	476
6.12.2. Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliemi	478
6.12.3. Induktormašīnas	480
6.12.4. Ventilģzinēji	484
6.12.5. Sinhronie reaktīvie dzinēji	492
6.12.6. Histerēzes dzinēji	494
6.12.7. Soģu dzinēji	496
<b>7. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU STRĀVAS DIAGRAMMAS</b>	<b>498</b>
7.1. Vispārīgi norādģjumi	498
7.2. Asinhronās mašģnas riŅķa diagramma	498
7.3. Sinhrono mašģnu strāvas diagrammas	507
7.4. Sinhrono ventilģzinģju strāvas diagrammas	513
<b>8. ELEKTROMAŠģNU PĀRVEIDOTĀGI UN MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠģNAS</b>	<b>517</b>
8.1. Elektromašģnu pārveidotģji	517
8.1.1. Divenkuru pārveidotģji	517
8.1.2. Lģdzstrāvas vienkura pārveidotģji	517
8.1.3. MaiŅstrāvas – lģdzstrāvas vienkura pārveidotģji	519
8.2. MaiŅstrāvas kolektormašģnas	521
8.2.1. Trģsfģžu kolektormašģnas	521
8.2.2. Vienfģzes maiŅstrāvas kolektordzinģji	527
<b>LITERATģRAS SARAKSTS</b>	<b>532</b>