



Jānis Dirba  
Kārlis Ketners

# ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS

Jānis Dirba, Kārlis Ketners

# **ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS**

Mācību grāmata

RTU Izdevniecība  
Rīga 2022



**Dirba, J., Ketners, K. Elektriskās mašīnas.** Rīga, RTU Izdevniecība, 2022. – 424 lpp.  
Trešais izdevums.

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.

Recenzenti:

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

Latvijas Jūras akadēmijas profesors, *Dr. sc. ing.* A. Gasparjans

Redaktore Dzintra Birnbauma

Maketētāja un datorgrafiķe Baiba Puriņa

Vāka dizains Paula Lore

Vāka foto no Rīgas HES arhīva

Vāka dizainam izmantots Rīgas HES ģeneratora fragmenta foto

ISBN 978-9934-22-734-9 (pdf)

ISBN 978-9934-22-733-2 (print)

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2022

© Jānis Dirba, Kārlis Ketners, 2022

# PRIEKŠVārds

## trešajam izdevumam

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

Elektriskās mašīnas, īpaši lieljaudas ģeneratori un transformatori, būtiski ietekmē elektroapgādes drošumu kopumā. Pastiprinātai uzmanībai, kas tiek veltīta visiem energosistēmas elementiem, ir vairāki iemesli. Pirmkārt, pieaug to agregātu daļa, kas nokalpojuši normatīvos paredzēto laiku. Otrkārt, elektroenerģijas brīvais tirgus pastiprina konkurenci starp elektroenerģijas ražošanas, pārvades un sadales kompānijām. Šis apstāklis savukārt liek paaugstināt ražošanas rentabilitāti, samazināt ekspluatācijas izdevumus un pēc iespējas pagarināt agregātu kalpošanas laiku.

Konkurence elektroenerģijas lietotājiem ļauj izvirzīt augstas prasības elektroapgādes kvalitātei un drošumam. Taču šīs prasības ir pretrunā uzstādīto iekārtu kalpošanas laika pagarināšanai, un kompromisa lēmuma atrašana nav vienkārša.

Grāmata sastāv no priekšvārda un astoņām nodaļām: elektrisko mašīnu vēsture un to klasifikācija; līdzstrāvas mašīnas; transformatori; maiņstrāvas mašīnu teorijas kopīgie jautājumi; asinhronās mašīnas; sinhronās mašīnas; maiņstrāvas elektrisko mašīnu strāvas diagrammas; elektromašīnu pārveidotāji un maiņstrāvas kolektormašīnas. Šajās nodaļās aplūkoti gan attiecīgo mašīnu stacionārie darba režīmi, gan pārejas procesi, tāpat arī simetriskie un ekspluatācijā biežāk sastopamie nesimetriskie režīmi.

Katras nodaļas beigās atrodamas ziņas par attiecīgo speciālās nozīmes elektrisko mašīnu uzbūvi, darbības principu un izmantošanu, kopā vairāk par divdesmit mašīnām. Īpaša uzmanība veltīta mikromašīnām, ko plaši izmanto dažādās automātiskās regulēšanas sistēmās, kā arī tādām mašīnām, kurās pusvadītāju un mikroprocesoru tehnikas un mašīnu integrācija izpaužas spilgtāk, piemēram, ventiļdzinējiem.

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

Autori pateicas par vērtīgajiem norādījumiem, kurus devuši recenzenti LZA akadēmiķis, profesors, *Dr. habil. sc. ing.* Leonīds Ribickis un Latvijas Jūras akadēmijas profesors, *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Gasparjans.

Autori

# SATURS

<b>PRIEKŠVārds.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ELEKTRISKO MAŠĪNU VĒSTURE UN TO KLASIFIKĀCIJA.....</b>	<b>10</b>
1.1. Elektrisko mašīnu attīstības vēsture .....	10
1.2. Elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un to klasifikācija.....	14
<b>2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS .....</b>	<b>19</b>
2.1. Līdzstrāvas mašīnas darbības princips un uzbūve.....	19
2.2. Līdzstrāvas mašīnu enkura tinumi .....	26
2.2.1. Vispārīgi norādījumi .....	26
2.2.2. Vienkāršs cilpas tinums.....	27
2.2.3. Salikts cilpas tinums.....	32
2.2.4. Vienkāršs viļņa tinums .....	34
2.2.5. Salikts viļņa tinums .....	36
2.2.6. Viļņa tinums ar dīko sekciju .....	37
2.2.7. Mākslīgi noslēgts viļņa tinums.....	38
2.2.8. Tinuma simetrijas noteikumi.....	39
2.2.9. Izlīdzinošie savienojumi .....	39
2.2.10. Kombinēts tinums.....	43
2.2.11. Enkura tinumu praktiskā izveidošana .....	44
2.2.12. Enkura tinuma tipa izvēle.....	45
2.3. Enkura tinuma EDS.....	46
2.4. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskais lauks.....	49
2.4.1. Magnētiskā ķēde un tās aprēķins .....	49
2.4.2. Enkura reakcija.....	52
2.4.3. Enkura reakcijas ietekmes samazināšana .....	55
2.5. Līdzstrāvas mašīnu komutācija .....	56
2.5.1. Dzirksteļošanas ceļoņi.....	56
2.5.2. Komutācijas procesa fizikālā aina .....	57
2.5.3. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni .....	60
2.6. Līdzstrāvas ģeneratori.....	65
2.6.1. Vispārīgi jautājumi .....	65
2.6.2. Neatkarīgas ierosmes ģenerators .....	67
2.6.3. Paralēlas ierosmes ģenerators.....	70
2.6.4. Virknes ierosmes ģenerators .....	72
2.6.5. Jauktas ierosmes ģenerators.....	72
2.6.6. Līdzstrāvas ģeneratoru paralēla darbība .....	73
2.7. Līdzstrāvas dzinēji.....	76
2.7.1. Vispārīgi norādījumi.....	76

2.7.2.	Dzinēja momentu vienādojums.....	77
2.7.3.	Dzinēja rotācijas frekvence.....	78
2.7.4.	Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte.....	79
2.7.5.	Līdzstrāvas dzinēju palaišana.....	80
2.7.6.	Paralēlas ierosmes dzinējs.....	81
2.7.7.	Virknes ierosmes dzinējs.....	86
2.7.8.	Jauktas ierosmes dzinējs.....	88
2.7.9.	Līdzstrāvas dzinēju bremsēšana.....	89
2.8.	Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas.....	91
2.8.1.	Ģeneratori ar strauji krītošu ārējo raksturliķni.....	91
2.8.2.	Elektromašīnu pastiprinātāji.....	93
2.8.3.	Līdzstrāvas tahoģeneratori.....	94
2.8.4.	Unipolārie ģeneratori.....	95
2.8.5.	Līdzstrāvas vadāmi dzinēji.....	96
2.8.6.	Līdzstrāvas magnetohidrodinamiskās mašīnas.....	99

### **3. TRANSFORMATORI..... 101**

3.1.	Vispārīgas ziņas par transformatoriem.....	101
3.1.1.	Pamatdefinīcijas.....	101
3.1.2.	Transformatoru tipi.....	102
3.1.3.	Transformatoru nominālie lielumi.....	103
3.1.4.	Transformatora darbības princips.....	104
3.2.	Transformatora tukšgaitas režīms.....	107
3.2.1.	Vispārīgi norādījumi.....	107
3.2.2.	Fizikālie procesi transformatora tukšgaitā.....	108
3.2.3.	Ideāla transformatora tukšgaita.....	109
3.2.4.	Reāla transformatora tukšgaitas režīms.....	112
3.2.5.	Transformatora tukšgaitas zudumi.....	114
3.2.6.	Transformatora ekvivalentā shēma un tukšgaitas mēģinājums.....	115
3.2.7.	Tinumu savienojumu shēmas un grupas.....	116
3.3.	Transformatora īsslēguma režīms.....	120
3.3.1.	Vispārīgi norādījumi.....	120
3.3.2.	Fizikālie procesi transformatora īsslēgumā.....	122
3.3.3.	Reducētais transformators.....	124
3.3.4.	Īsslēgtā transformatora ekvivalentā shēma un īsslēguma trīsstūris.....	125
3.3.5.	Īsslēguma mēģinājums.....	127
3.4.	Transformatora darbība slodzes režīmā.....	129
3.4.1.	Fizikālie procesi slogotā transformatorā un vektoru diagrammas.....	129
3.4.2.	Transformatora pamatvienādojumi.....	131
3.4.3.	Transformatora ekvivalentās shēmas.....	133
3.4.4.	Slogota transformatora sprieguma izmaiņa.....	135
3.4.5.	Transformatora lietderības koeficients.....	137
3.4.6.	Transformatora sprieguma regulēšana.....	138

3.5. Transformatoru paralēla darbība .....	141
3.5.1. Paralēlas darbības nosacījumi .....	141
3.5.2. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem transformācijas koeficientiem .....	142
3.5.3. Transformatoru paralēla darbība ar dažādām tinumu savienojumu grupām .....	145
3.5.4. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem īsslēguma spriegumiem .....	146
3.6. Autotransformatori un daudztinumu transformatori .....	148
3.6.1. Autotransformatori .....	148
3.6.2. Daudztinumu transformatori .....	152
3.7. Transformatoru nesimetriskie darba režīmi .....	157
3.7.1. Vispārīgi norādījumi .....	157
3.7.2. Ekvivalentās shēmas un pretestības nullsecības strāvām .....	159
3.7.3. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/\Delta$ -11 .....	162
3.7.4. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $\Delta/Y_0$ -11 .....	165
3.7.5. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu $Y/Y_0$ -0 .....	168
3.7.6. Nesimetriskas slodzes ietekme uz transformatoru darbību .....	170
3.8. Pārejas procesi transformatoros .....	172
3.8.1. Transformatora pieslēgšana tīklam .....	172
3.8.2. Transformatora pēkšņais īsslēgums .....	174
3.8.3. Elektrodinamiskie spēki .....	176
3.9. Transformatoru magnētvasdi .....	180
3.9.1. Transformatoros izmantojamie elektrotehniskie tēraudi .....	180
3.9.2. Magnētvasdu konstrukcijas .....	181
3.9.3. Trīsfāžu transformatoru serdes magnetizēšanas īpatnības .....	185
3.9.4. Transformatora magnētiskās ķēdes aprēķins .....	187
3.10. Transformatoru tinumi .....	189
3.10.1. Tinumu tipi un konstrukcijas .....	189
3.10.2. Izolācijas galvenie mezgli un detaļas .....	195
3.10.3. Tinumu un izolācijas materiāli .....	197
3.11. Transformatoru izolācija .....	200
3.11.1. Faktori, kas iedarbojas uz izolāciju .....	200
3.11.2. Izolācijas klasifikācija .....	201
3.11.3. Pārspriegumi transformatoros .....	201
3.11.4. Izolācijas konstrukciju pamattipi .....	212
3.11.5. Izolācijas pilnveidošanas virzieni .....	223
3.11.6. Sauso transformatoru izolācija .....	225
3.12. Transformatoru silšana un dzesēšana .....	226
3.12.1. Silšana, siltumpāreja un transformatora pieļaujamās temperatūras .....	226



3.12.2. Transformatoru dzesēšanas sistēmas.....	227
3.12.3. Eļļas transformatoru dzesēšanas sistēmu palīgierīces .....	231
3.13. Speciālas nozīmes transformatori .....	235
3.13.1. Mērtransformatori.....	235
3.13.2. Taisngriežu iekārtu transformatori.....	237
3.13.3. Metināšanas transformatori.....	242
3.13.4. Elektroniskajās ierīcēs, automātikā un sakaru sistēmās izmantojamie transformatori .....	243
3.13.5. Fāžu skaita un frekvences pārveidošanas transformatori .....	245
<b>4. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU TEORIJAS KOPĪGI JAUTĀJUMI .....</b>	<b>247</b>
4.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi un to uzbūve .....	247
4.1.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi .....	247
4.1.2. Asinhrono mašīnu uzbūve.....	247
4.1.3. Sinhrono mašīnu uzbūve.....	250
4.2. Rotējošais magnētiskais lauks .....	252
4.3. Maiņstrāvas tinumu EDS .....	253
4.3.1. Tinuma EDS pamatharmonika .....	253
4.3.2. EDS augstākās harmonikas.....	258
4.3.3. EDS formas uzlabošana .....	259
4.4. Maiņstrāvas mašīnu tinumi.....	262
4.4.1. Maiņstrāvas tinumu pamattipi.....	262
4.4.2. Trīsfāžu vesela skaitļa tinumi.....	263
4.4.3. Trīsfāžu daļskaitļa tinumi .....	268
4.4.4. Trīsfāžu vienslāņa tinumi.....	270
4.4.5. Daži tinumi ar fāžu skaitu $m \neq 3$ .....	273
4.5. Maiņstrāvas mašīnu tinumu magnetizējošie spēki .....	275
4.5.1. Spoles, spoļu grupas un fāzes MS.....	275
4.5.2. Daudzfāžu tinumums.....	281
4.6. Maiņstrāvas mašīnu induktīvās pretestības .....	287
<b>5. ASINHRONĀS MAŠĪNAS.....</b>	<b>291</b>
5.1. Asinhronās mašīnas darbības princips un darba režīmi .....	291
5.2. Spriegumu un strāvu vienādojumi.....	293
5.3. Ekvivalentās shēmas .....	295
5.4. Asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības, zudumi un lietderības koeficients.....	297
5.5. Asinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments un raksturliknes.....	298
5.5.1. Elektromagnētiskais moments un dzinēja darbības stabilitāte .....	298
5.5.2. Dzinēja raksturliknes .....	300
5.6. Trīsfāžu asinhrono dzinēju palaišana.....	302
5.6.1. Vispārīgi norādījumi.....	302
5.6.2. Asinhrono dzinēju ar fāžu rotoru palaišana .....	303

5.6.3.	Īsslēgtu asinhrono dzinēju palaišana.....	304
5.6.4.	Īsslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturliķnēm .....	305
5.7.	Asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana .....	307
5.7.1.	Vispārīgi norādījumi .....	307
5.7.2.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot statora tinumam pievadītā sprieguma frekvenci .....	307
5.7.3.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot polu pāru skaitu.....	308
5.7.4.	Rotācijas frekvences regulēšana, mainot slīdi .....	309
5.8.	Asinhrono dzinēju bremzēšanas režīmi.....	311
5.9.	Vienfāzes asinhronie dzinēji.....	313
5.9.1.	Vienfāzes asinhrono dzinēju teorijas pamatjautājumi.....	313
5.9.2.	Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi.....	316
5.10.	Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi .....	320
5.10.1.	Vispārīgi norādījumi .....	320
5.10.2.	Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriskiem spriegumiem.....	320
5.10.3.	Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriju rotora ķēdē .....	322
5.11.	Speciālas nozīmes asinhronās mašīnas .....	324
5.11.1.	Indukcijas regulators un fāzes regulators.....	324
5.11.2.	Asinhronais frekvences pārveidotājs .....	326
5.11.3.	Asinhronais ģenerators ar pašierosmi .....	327
5.11.4.	Vadāms asinhronais dzinējs.....	328
5.11.5.	Asinhronie dzinēji ar masīvu rotoru .....	330
5.11.6.	Griežtransformatori.....	330
5.11.7.	Selsini.....	332
5.11.8.	Lineārie asinhronie dzinēji.....	334
5.11.9.	Asinhronie tahogeneratori .....	336

## **6. SINHRONĀS MAŠĪNAS ..... 338**

6.1.	Sinhrono mašīnu darbības princips .....	338
6.2.	Sinhronās mašīnas magnētiskais lauks un enkura reakcija .....	339
6.3.	Sinhrono ģeneratoru sprieguma vienādojumi.....	343
6.4.	Sinhrono ģeneratoru vektoru diagrammas.....	345
6.5.	Sinhrono ģeneratoru raksturliķnes.....	346
6.6.	Praktiskā EDS diagramma.....	349
6.7.	Sinhrono mašīnu paralēla darbība.....	350
6.7.1.	Sinhronizācijas paņēmieni .....	350
6.7.2.	Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments .....	352
6.7.3.	Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu aktīvo jaudu. Leņķa raksturliķnes.....	353
6.7.4.	Ģenerators paralēla darbība ar mainīgu ierosmes strāvu. U veida raksturliķnes .....	355
6.8.	Sinhronie dzinēji .....	357

6.8.1. Vispārīgi norādījumi .....	357
6.8.2. Sinhrono dzinēju darba raksturliknes.....	358
6.8.3. Sinhrono dzinēju palaišana un rotācijas frekvences regulēšana .....	359
6.9. Sinhrono mašīnu svārstības .....	360
6.10. Pārejas procesi sinhronajās mašīnās .....	365
6.10.1. Vispārīgi norādījumi .....	365
6.10.2. Fizikālie procesi ģeneratorā pēkšņā īsslēguma laikā .....	366
6.10.3. Pēkšņā īsslēguma strāvas .....	369
6.11. Sinhrono ģeneratoru nesimetriska slodze .....	375
6.11.1. Vispārīgi norādījumi .....	375
6.11.2. Tiesās, pretējās un nullsecības strāvas un pretestības .....	375
6.11.3. Nesimetrisko režīmu ietekme uz sinhrono ģeneratoru darbību .....	376
6.11.4. Sinhrono ģeneratoru nesimetriskie īsslēgumi .....	377
6.12. Speciālas nozīmes sinhronās mašīnas .....	380
6.12.1. Sinhronās mašīnas ar pastāvīgajiem magnētiem .....	380
6.12.2. Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliem .....	382
6.12.3. Induktormāšīnas .....	384
6.12.4. Ventiļdzinēji .....	387
6.12.5. Sinhronie reaktīvie dzinēji .....	392
6.12.6. Histerēzes dzinēji .....	394
6.12.7. Soļu dzinēji .....	395
<b>7. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU STRĀVAS DIAGRAMMAS.....</b>	<b>397</b>
7.1. Vispārīgi norādījumi .....	397
7.2. Asinhronās mašīnas riņķa diagramma .....	397
7.3. Sinhrono mašīnu strāvas diagrammas .....	405
7.4. Sinhrono ventiļdzinēju strāvas diagrammas .....	409
<b>8. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI UN MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS .....</b>	<b>412</b>
8.1. Elektromašīnu pārveidotāji .....	412
8.1.1. Divenkuru pārveidotāji .....	412
8.1.2. Līdzstrāvas vienkura pārveidotāji .....	412
8.1.3. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāji .....	414
8.2. Maiņstrāvas kolektormāšīnas .....	415
8.2.1. Trīsfāžu kolektormāšīnas .....	415
8.2.2. Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji .....	420

# 1. ELEKTRISKO MAŠĪNU VĒSTURE UN TO KLASIFIKĀCIJA

## 1.1. ELEKTRISKO MAŠĪNU ATTĪSTĪBAS VĒSTURE

Lai pietiekami dziļi izprastu jebkuru zinību nozari, jāzina tās vēsture.

Elektrisko mašīnu attīstības sakuma posmā līdzstrāvas ģeneratori un dzinēji tika aplūkoti atsevišķi. Tāpēc arī to attīstības vēsturi līdz 19. gadsimta septiņdesmitajiem gadiem, kad sāka plaši izmantot elektrisko mašīnu apgriežamības principu, lietderīgi apskatīt atsevišķi.

1821. gadā angļu fiziķis Maikls Faradejs demonstrēja ierīci, kurā vads, pa kuru plūst līdzstrāva, rotē ap magnētu. Tādējādi tika parādīta iespēja izveidot elektrisko dzinēju. Minētā ierīce būtībā kalpoja par unipolarās mašīnas prototipu.

M. Faradeja atklājumam bija milzīga loma tehnikas attīstībā, jo tas parādīja, kā mehānisko enerģiju var pārveidot elektriskajā un otrādi. Tomēr tā praktiskajā īstenošanā nācās pārvarēt zināmas tehniskas problēmas: pagāja aptuveni 40 gadi līdz tika izveidots darba spējīgs ģenerators un vēl 20 gadi, kad tapa rūpniecībā izmantojams elektriskais dzinējs. Gan ģenerators, gan dzinēja – šo mūsdienu civilizācijas ļoti svarīgu elementu – darbības princips kļuva acīmredzams, pateicoties tam, ka tika atklāta elektromagnētiskās indukcijas parādība.

Vēlākajos gados tika radītas daudzas ierīces elektriskās enerģijas pārvēršanai mehāniskajā. Tā 1823. gadā P. Barlou piedāvāja dzinēju, kas sastāvēja no rata un pastāvīgā magnēta. Tāpat kā M. Faradeja dzinējā, slidošo kontaktu nodrošināja dzīvsudrabā ievietots vads, kas pievienots vārpstai. Dzinēja barošanu nodrošināja ķīmiskie elementi. 1824. gadā franču fiziķis F. Arago novēroja, ka, griežot vara disku virs magnētadatas, tā sāk griezties diska rotācijas virzienā. Šo parādību varēja izskaidrot pēc elektromagnētiskās indukcijas likuma atklāšanas.

M. Faradeja atklājumam nebija gadījuma raksturs. To sagatavoja daudzu fiziķu paveiktie darbi. 1799. gadā itāļu zinātnieks A. Volta izveidoja elektroķīmisko ģeneratoru, kas sastāvēja no vara un cinka diskām, starp kurām novietotas skābē samitrinātas starplikas. Krievu akadēmiķis V. Petrovs 1802. gadā izveidoja bateriju no 4200 vara un cinka plāksnītēm. Baterijas EDS bija vienāds ar 1700 V, un tas ļāva novērot elektrisko loku. Eksperimenti ar elektrisko loku ļāva izpētīt elektriskās strāvas radītā magnētiskā lauka un siltuma iedarbību.

1820. gadā franču zinātnieki Ž. Bio un F. Savārs formulēja likumu, kas noteica strāvas iedarbību uz magnētu. Šajā pašā gadā dāņu fiziķis M. Erstedts publicēja darbu, kurā aprakstīja magnētadatas kustību elektriskās strāvas ietekmē, bet F. Arago izgudroja solenoīdu. 1821. gadā M. Devi atklāja vadītspējas atkarību no temperatūras un vada materiāla. Vācu fiziķa G. Oma pētījumu rezultāti (Oma likums) tika publicēti 1827. gadā.

Elektriskas un magnētiskas dabas parādības tika novērotas jau daudz agrāk. Pirmo

darbu, kas bija veltīts elektrībai “Par magnētu, magnētiskiem ķermeņiem un Zemi kā lielu magnētu” 1600. gadā uzrakstīja angļu zinātnieks U. Džilberts. Viņš pirmais sāka lietot terminu “elektrība”. Vācu fiziķis O. Gērike 1650. gadā aprakstīja pirmo berzes elektrisko mašīnu, kurā sēra lode rotācijas laikā tika elektrizēta, to berzējot ar plaukstām. 1785. gadā franču fiziķis Š. Kulons formulēja elektrisko lādiņu un magnētu polu mijiedarbības likumu.

Angļu fiziķis M. Faradejs, veicot tūkstošiem eksperimentu, 1831. gadā demonstrēja “magnētisma spēju pārvērsties elektrībā”, tādējādi atklājot elektromagnētiskās indukcijas likumu. Savos eksperimentos viņš izšķīra divu veidu indukcijas, kad strāvu inducē strāva (volteletriskā indukcija) un kad strāvu inducē ar magnēta palīdzību (magnetoelētriskā indukcija). Tomēr vēlāk viņš atzina, ka nav būtiskas atšķirības starp minētajiem indukcijas veidiem.

Izcili svarīgs M. Faradeja darbos bija priekšstats par elektromagnētisko lauku. Viņš arī pirmais ieviesa jēdzienu magnētiskās spēka līnijas.

M. Faradejs – kalēja dēls no Londonas priekšpilsētas, grāmatu iesējējs, vēlāk laborants ķīmijas laboratorijā – kļuva par ievērojamāko personu elektromehānikā. Viņš tika ievēlēts par biedru 68 akadēmijās un zinātniskās biedrībās, uzrakstīja daudzus zinātniskus un populārzinātniskus darbus, vienlaikus saglabājot vienkāršību un pieticību.

M. Faradeja darba turpinātājs, viņa tautietis Dž. K. Maksvels rakstīja, ka viņš tikai pārtulkojis M. Faradeja idejas matemātiskā formā.

1832. gadā krievu fiziķis E. Lencs formulēja likumu, kas nosaka inducētā EDS virzienu, kā arī elektrisko mašīnu apgriežamības principu. Vēlāk, 1838. gadā, viņš praktiski demonstrēja iespēju līdzstrāvas mašīnu darbināt gan ģeneratora, gan dzinēja režīmā.

Elektromehānikas attīstības sākotnējā posmā konstruktīvus risinājumus ietekmēja tvaika mašīnās iegūtā pieredze. Tā, piemēram, amerikāņu fiziķis Dž. Henrijs 1831. gadā piedāvāja dzinēju, kura kustīgais elektromagnēts periodiski pievilkās un atgrūdās no pastāvīgajiem magnētiem, noslēdzot un pārtraucot galvanisko elementu baterijas ķēdi. Tomēr lielākas perspektīvas ieguva rotējošās elektriskās mašīnas.

1834. gadā akadēmiķis B. Jakobi aprakstīja elektrisko dzinēju, kas darbojās, pateicoties elektromagnētu pievilkšanās un atgrūšanās spēkam. Šajā dzinējā bija divas elektromagnētu grupas: viena rotējoša, bet otra – nekustīga. Lai mainītu nekustīgo magnētu polaritāti, izmantoja komutatoru, kas sastāvēja no gredzeniem ar izolācijas starplikām. Četrpolu mašīnā bija četras vara un četras izolācijas starplikas. Slidošais kontakts īstenojās caur gredzeniem un rotācijas laikā mainījās strāvas virziens kustīgo elektromagnētu tinumos. Dzinēja barošanai izmantoja galvaniskos elementus.

Jau 1832. gadā franču izgudrotāji brāļi Piksi, balstoties uz M. Faradeja darbiem, konstruēja ģeneratoru ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem. Nekustīgajās spolēs, magnētiem rotējot, inducējās mainīgs EDS. Tas bija viens no pirmajiem maiņstrāvas ģeneratoriem. Tomēr tajā laikā maiņstrāva vēl nebija radusi praktisku izmantošanu, un kā taisngrieži tika izmantoti mehāniskie komutatori.

Pirmās elektriskās mašīnas ar pašierosmi tapa pēc 1867. gada, kad vācu elektroteh-



niķis V. Sīmens to īstenoja virknes ierosmes ģeneratoram. Pirmos patentus pašierosmes elektriskajām mašīnām 1854. gadā saņēma S. Horts un 1856. gadā A. Jedliks. 1870. gadā vācu zinātnieks Z. Gramms patentēja pašierosmes ģeneratoru ar gredzenveida enkuru.

10 gadus pirms Z. Gramma enkuru ar gredzenveida tinumu patentēja A. Pacinotti, bet nespēja rast tam pielietojumu. Gredzenveida enkuru pieņemts saukt par Pacinotti-Gramma enkuru, bet sadalītu tinumu par Gramma tinumu.

1873. gadā F. Gefners-Alteneks un V. Sīmens radīja elektrisko mašīnu ar veltņenkuru, kam bija visi mūsdienu līdzstrāvas mašīnai raksturīgie elementi. Z. Gramma mašīnas enkura tinums, kas uztīts uz toroidālas serdes netika plaši izmantots, jo EDS inducējās tikai pret poliem vērstā vijuma ārējā daļā. V. Sīmensa konstrukcijas enkura abas vijuma puses novietotas uz enkura serdes ārējās, pret poliem vērstās, daļas. Tāpēc vara izmantošana šādā tinumā ir augstāka. Uzlabojas arī mašīnas izgatavošanas tehnoloģiskums.

1880. gadā amerikāņu izgudrotājs T. Edisons ieteica līdzstrāvas mašīnas enkura serdi izgatavot no tērauda loksniem, kas savā starpā izolētas, t. i., šihētū, šajā pašā gadā izgudrotājs H. Maksims dzesēšanas uzlabošanai ieteica mašīnas enkuru sadalīt atsevišķās paketēs. 1884. gadā tika izgudrots kompensācijas tinums, bet 1885. gadā – papildpoli, kas uzlabo līdzstrāvas mašīnas komutāciju.

Līdz 19. gadsimta septiņdesmitajiem gadiem līdzstrāvas elektriskā enerģija galvenokārt tika izmantota apgaismei, bet maiņstrāva praktiski netika izmantota.

Krievu izgudrotājs P. Jabločkovs 1876. gadā konstruēja maiņstrāvas ģeneratoru un izveidoja pasaulē pirmo vienfāzes transformatoru ar nenoslēgtu tērauda serdi. Šis ierīces izmantoja maiņstrāvas loka spuldžu barošanai ielu un telpu apgaismošanai. P. Jabločkovs bija pirmais, kas maiņstrāvu izmantoja praktiskajā elektrotehnikā. 1882. gadā L. Golārs un E. Gibs izgudroja transformatoru ar izbīdāmu serdi, ar kuras palīdzību var regulēt spriegumu. Brāļi Hopkinsi Anglijā 1884. gadā radīja vienfāzes transformatoru ar noslēgtu serdi un jauktu zemākā un augstākā sprieguma tinumu novietojumu. 1885. gadā ungāru elektriķi O. Blati, M. Deri un K. Cipernovskis radīja apvalktransformatoru un stienstransformatoru ar augsti tehniskiem ekonomiskajiem rādītājiem. Viņi arī pirmie ieviesa terminu “transformators”. Eļļas dzesēšanu transformatoros pirmais lietoja D. Svinbergs.

Elektroenerģētika 19. gadsimta septiņdesmitajos astoņdesmitajos gados spēra ievērojamus soļus savā attīstībā. 1879. gadā V. Sīmens Berlīnes izstādē demonstrēja pirmo elektrificēto dzelzceļu. Vienfāzes maiņstrāvas sistēma deva iespēju pārvadīt enerģiju lielā attālumā, tomēr tā nevarēja atrisināt elektroenerģijas lietošanas problēmu rūpniecībā, jo vienfāzes dzinējiem bija zemi enerģētiskie rādītāji. Turklāt tiem nebija palaišanas momenta.

19. gs. astoņdesmito gadu beigās itāļu fiziķis G. Ferrāriss un H. Tesla radīja divfāžu maiņstrāvas dzinēju. Tajā rotējošo magnētisko lauku radīja divas spoles, kas telpā nobīdītas par 90°, arī tajās plūstošās strāvas nobīdītas fāzē par 90°. 1889. gadā izcilais elektrotehniķis M. Daļivo-Dobrovoļskis piedāvāja trīsfāžu maiņstrāvas sistēmu un izveidoja pirmo trīsfāžu asinhrono dzinēju un transformatoru. 1889. gada pavasarī tika izgatavots pirmais trīsfāžu asinhronais dzinējs ar īsslēgtu rotoru. Vēlāk sāka ražot lielākas jaudas

dzinējus gan ar īsslēgtu, gan ar fāžu rotoru.

Sākumā trīsfāžu transformators tika izgatavots ar radiālu tinumu novietojumu, bet 1891. gadā M. Daļivo-Dobrovoļskis patentēja trīsfāžu transformatoru ar vienā plaknē paralēli novietotiem stieņiem. Šādu transformatoru konstrukciju izmanto arī mūsdienās.

Aptuveni 20. gadsimta vidū sākās elektrisko mašīnu ciešāka integrācija ar izpildmehānismiem, vadības elementiem, magnētiskajiem pastiprinātājiem un pusvadītāju pārveidotājiem. Attīstījās arī speciālo elektrisko mašīnu ražošana. Parādījās elektromašīnu pastiprinātāji, soļu dzinēji, impulsu ģeneratori, magnetohidrodinamiskās un citas unikālas elektriskās mašīnas. Mazliet vēlāk tapa pirmie bezkontakta līdzstrāvas dzinēji (ventiļdzinēji), kas pavēstīja par elektrisko mašīnu un elektronikas integrāciju.

Uzsākot savu vēsturi ar mašīnām, kurās enerģijas elektromehāniska pārveidošana notika elektriskajā laukā, elektromehānika 19. un 20. gadsimtā sasniedza izcilus rezultātus ar mašīnām, kurās enerģijas pārveidošana notiek magnētiskajā laukā. Vienlaikus ar jaunu elektrisko mašīnu rašanos attīstījās un pilnveidojās arī enerģijas elektromehāniskās pārveidošanas teorija. Jāatzīmē, ka gandrīz visi 18. un 19. gadsimta izcilākie fiziķi, piemēram, M. Lomonosovs, A. Ampērs, G. Oms, Dž. Džouls, E. Lencs, H. Helmholcs un citi ir devuši lielu ieguldījumu elektrotehnikas attīstībā.

Īpaši nopelni elektromagnētiskās teorijas attīstībā pieder Dž. K. Maksvelam, kas 1873. gadā savā darbā "Traktāts par elektrību un magnētismu" izklāstīja elektromagnētiskā lauka matemātisko teoriju. Maksvela vienādojumi kalpo par fundamentālu pamatu elektromehāniskās enerģijas pārveidošanas teorijai. Liela nozīme elektrisko mašīnu teorijas attīstībā bija arī profesoru N. Umova un Dž. Poitinga darbiem.

Pirmo teorētisko darbu, kas veltīts elektrisko mašīnu projektēšanai, uzrakstīja E. Arnolds 1891. gadā. Savu praktisko darbību E. Arnolds sāka Rīgas Krievu-Baltijas elektrotehniskajā rūpnīcā un Rīgas Politehniskajā institūtā.

Svarīga loma transformatoru un vienfāzes dzinēju teorijas attīstībā bija G. Ferrāriša darbiem (1893. gads). Transformatoru un trīsfāžu asinhrono dzinēju projektēšanas pamatu radīšanā lieli nopelni bija M. Daļivo-Dobrovoļskim. Daudz darbu 19. gadsimta beigās transformatoru teorijai veltīja arī G. Kanna, Ben-Ešenberg un citi zinātnieki.

Asinhronās mašīnas riņķa diagrammu ieteica izmantot A. Heilands 1894. gadā, bet precizēto diagrammu M. Osnos 1900. gadā. Minētās diagrammas matemātisko pamatojumu deva K. Krūgs 1907. gadā.

Liela nozīme elektrisko mašīnu teorijas attīstībā bija simboliskai (kompleksai) piekārstu formai, ko ieviesa K. Šteinmetcs 1897. gadā un simetrisko komponentu metodei, ko 20. gadsimta divdesmitajos gados ieviesa C. L. Forteskjū.

Divdesmitā gadsimta trīsdesmitajos gados, pateicoties E. Arnolda, K. Šteinmetca, K. Krūga, V. Tolvinska un citu zinātnieku darbiem, elektrisko mašīnu stacionāro darba režīmu teorija jau bija pietiekami dziļi izstrādāta.

Pirmie darbi, kas veltīti pārejas procesiem elektriskajās mašīnās, parādījās pagājušā gadsimta divdesmitajos–četrdesmitajos gados. Pie tiem jāpieskaita R. Parka, A. Goreva, G. Krona un G. Petrova darbi. Elektrisko mašīnu pārejas procesu teorija ieguva vēl

straujāku attīstību sešdesmitajos–astoņdesmitajos gados, pateicoties plašai datortehnikas izmantošanai. Šis apstākļis ļāva aplūkot stacionāros režīmus kā atsevišķu pārejas procesu gadījumu un pietuvoties elektrisko mašīnu automatizētās projektēšanas sistēmu izveidei.

21. gadsimtā inženieriem un pētniekiem, kas darbojas elektromehānikas jomā, jārada tādas elektriskās mašīnas, kas maksimāli apmierina patērētāju prasības, ir ekonomiskas un draudzīgas apkārtējai videi.

Prognozes rāda, ka 21. gadsimtā, pateicoties zinātnes, tehnikas un tehnoloģiju attīstībai, aizvien vairāk ražos elektriskās mašīnas ar augstiem enerģētiskiem un masas gabarītu rādītājiem. Notiks vēl dziļāka elektrisko mašīnu un jaunās paaudzes elektronisko ierīču integrācija. Tas ļaus paplašināt elektrisko mašīnu funkcionālās iespējas, uzlabot vadības efektivitāti un optimizēt visu enerģijas pārveidošanas procesu.

Straujā mikroprocesoru un pusvadītāju tehnikas attīstība ļaus efektīvi risināt jautājumus, kas saistīti ar regulējamu elektrodzinēju sintēzi ar iepriekš izdotām un maināmām raksturlielņiem. Šī problēma ir visai aktuāla sakarā ar elektropiedziņas agregātu lielo dažādību un nepieciešamību kardināli uzlabot situāciju elektroenerģijas taupīšanā.

Mūsdienų elektromehānika ir daudzfunkcionāla. Tā aptver elektroenerģijas ražošanu, transportēšanu, sadali un pārveidošanu citos enerģijas veidos.

## 1.2. ELEKTRISKO MAŠĪNU VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS UN TO KLASIFIKĀCIJA

Elektriskās mašīnas jāuzskata par elektroiekārtu svarīgākajiem elementiem. Tās izmanto kā elektriskās enerģijas avotus (ģeneratorus) un patērētājus, t. i., dzinējus, kas darbina visdažādākos mehānismus.

Elektriskās mašīnas, kas pārveido mehānisko enerģiju elektroenerģijā, sauc par *ģeneratoriem*. Tos darbina tvaika turbīnas, gāzturbīnas vai hidroturbīnas, iekšdedzes un cita veida primārie dzinēji. Elektriskās mašīnas, kas veic elektriskās enerģijas pārveidošanu mehāniskajā, sauc par *elektrodzinējiem*.

Elektriskās mašīnas izmanto arī strāvas veida pārveidošanai, piemēram, maiņstrāvas pārveidošanai līdzstrāvā, kā arī sprieguma, frekvences, fāžu skaita pārveidošanai. Tādas mašīnas sauc par *elektromašīnu pārveidotājiem*.

Elektriskās mašīnas var ģenerēt arī reaktīvo jaudu un darboties kā *elektromašīnu kompensatori*.

Elektromehāniskie signālu pārveidotāji var ģenerēt, pārveidot un pastiprināt dažādus signālus. Šādus pārveidotājus kā elektriskās mikromašīnas izmanto dažādās automātiskās regulēšanas sistēmās.

Elektriskajā mašīnā ir divas galvenās sastāvdaļas: rotējošā daļa – rotors un nekustīgā daļa – stators, kuras vienu no otras atdala gaisa sprauga.

Enerģijas pārveidošana elektriskajās mašīnās notiek ar magnētiskā lauka starpniecību, kura pastiprināšanai statorā un rotorā izmanto magnētiska materiāla serdes, pa kurām noslēdzas magnētiskā plūsma. Lai mainīgu magnētisko lauku gadījumā ierobežotu

virpuļstrāvas, serdes izveido no savstarpēji izolētām elektrotehniskā tērauda loksņēm. Statora iekšējā un rotora ārējā virsmā izveidotajās rievās ievieto tinumus, pa kuriem plūst elektriskā strāva. Magnētqvads un tinumi pieder pie elektriskās mašīnas aktīvajām daļām. Pārējās mašīnas konstruktīvās daļas nodrošina tai nepieciešamo stingrumu, stiprību, dzesēšanu un iespēju griezties u. c.

Pie elektriskajām mašīnām pieskaita arī transformatorus. *Transformatori* ir statiskas elektromagnētiskas ierīces, kas kalpo vienas primārās maiņstrāvas sistēmas pārveidošanai citā – sekundārā – ar citiem parametriem, nemainot frekvenci. Kaut arī transformatoros nav rotējošo daļu, tos aplūko kopā ar rotējošām elektriskajām mašīnām, jo plašākā skatījumā to darbības principi un teorijas pamatjautājumi ir līdzīgi.

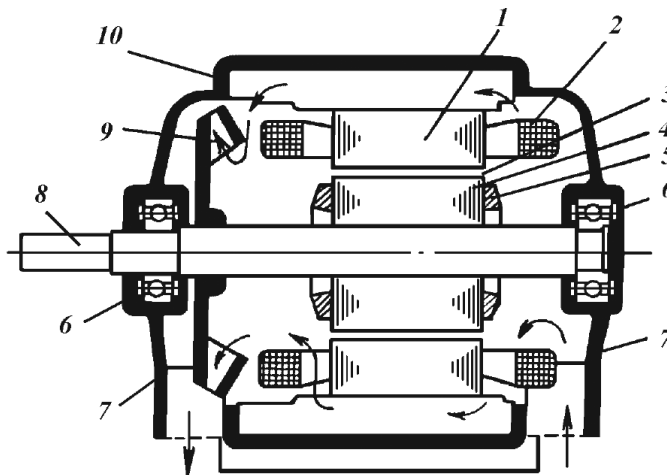
Atkarībā no tā, kādu strāvu ģenerē vai patērē elektriskā mašīna, izšķir maiņstrāvas un līdzstrāvas mašīnas.

Maiņstrāvas elektriskās mašīnas sīkāk iedala sinhronajās, asinhronajās un kolektormašīnās. Pie maiņstrāvas mašīnām pieskaita arī transformatorus.

Pēc fāžu skaita izšķir vienfāzes un daudzfāžu maiņstrāvas mašīnas, no kurām visbiežāk lieto trīsfāžu mašīnas. Līdzstrāvas mašīnu raksturīga daļa ir kolektors, kas ģeneratoros maiņspriegumu pārveido līdzspriegumā, bet līdzstrāvas dzinējos – otrādi.

Atkarībā no jaudas elektriskās mašīnas nosacīti var iedalīt šādās grupās: līdz 0,5 kW – mikromašīnas; 0,5–20 kW – mazjaudas; 20–250 kW – vidējas jaudas un virs 250 kW – lieljaudas mašīnas.

Elektriskajām mašīnām salīdzinājumā ar citiem enerģijas pārveidotājiem ir būtiskas priekšrocības. Tām ir ļoti augsts lietderības koeficients, kura vērtība lieljaudas mašīnām sasniedz 90–99 %, bet mazjaudas mašīnām 70–80 %. Elektriskajām mašīnām ir maza īpatnējā masa (masa uz jaudas vienību), tās ir relatīvi lētas, vienkārši regulējamas un



1.1. att. Rotējošas elektriskās mašīnas uzbūves sistēma:

1 – stators; 2 – statora tinums; 3 – gaisa sprauga; 4 – rotors; 5 – rotora tinums; 6 – gultņi; 7 – gultņu vairogņi; 8 – vārpsta; 9 – ventilators; 10 – korpusa.

apkalpojamas.

Katrai elektriskajai mašīnai ir nominālie dati, t. i., elektromagnētiskie rādītāji, kas raksturo tās darba apstākļus. Pie nominālajiem rādītājiem pieskaita jaudu, spriegumu, strāvu, rotācijas frekvenci u. c.

Par elektriskās mašīnas nominālo jaudu sauc jaudu, ko mašīna (no silšanas viedokļa) var attīstīt bezavārijas darbā tai noteiktajā kalpošanas laikā. Elektriskajiem dzinējiem par nominālo jaudu pieņem lietderīgo mehānisko jaudu uz vārpstas. Maiņstrāvas ģeneratoriem un transformatoriem par nominālo jaudu pieņem pilno elektrisko jaudu uz spailēm.

Visdažādāko elektrisko mašīnu darbības princips pamatojas uz elektromagnētiskās indukcijas parādību un elektromagnētisko spēku darbību. Ņemot vērā minētās parādības, Oma, Džoula, Lenca un citus elektromehānikas likumus, var iegūt pamatsakarības starp lielumiem, kas raksturo elektriskās mašīnas darbību.

1.2. attēlā parādīti divi magnēta poli, kas rada magnētisko lauku. Magnētiskajā laukā starp poliem novietots vads, kura šķērsriezums attēlots ar apli.

Ja vadu pārvieto, piemēram, no kreisās puses uz labo, tad saskaņā ar elektromagnētiskās indukcijas parādību tajā inducējas EDS:

$$e = BlV, \quad (1.1.)$$

kur  $B$  – magnētiskā lauka indukcija vietā, kurā atrodas vads;

$l$  – vada aktīvais garums;

$V$  – vada kustības relatīvais ātrums attiecībā pret magnētisko lauku, perpendikulāri magnētiskā lauka spēka līnijām.

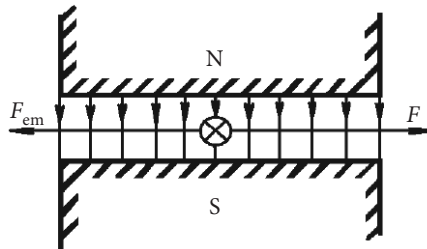
EDS virzienu, kas inducējas vadā, var noteikt pēc labās rokas likuma (1.3. att.). Šis likums paskaidrots gadījumam, kad vads pārvietojas attiecībā pret magnētisko lauku.

Ja vada galiem pieslēdz pretestību, tad noslēgtajā ķēdē plūst strāva  $i$ . Strāvas virziens, kas 1.2. attēlā parādīts ar krustiņu, sakrīt ar inducētā EDS virzienu.

Strāvas  $i$  un magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskais spēks:

$$F_{em} = Bil. \quad (1.2.)$$

Spēka  $F_{em}$  virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma (1.4. att.).



1.2. att. Vienkāršots elektromehāniskās enerģijas pārveidotāja modelis.



Vienmērīgā kustībā uz vadu darbojas ārējs spēks  $F$ , kas līdzsvaro elektromagnētisko spēku  $F_{em}$ :

$$F = F_{em}. \quad (1.3.)$$

Pareizinot vienādojuma (1.3.) abas puses ar ātrumu  $V$ , iegūstam:

$$F \cdot V = F_{em} \cdot V. \quad (1.4.)$$

Ievietojot šī vienādojuma labajā pusē  $F_{em}$  no izteiksmes (1.2.) un  $V$  no izteiksmes (1.1.), iegūstam:

$$F \cdot V = e i. \quad (1.5.)$$

No vienādojuma (1.5.) redzams, ka ģeneratorā mehāniskā enerģija pārveidojas elektriskajā enerģijā (mehāniskā jauda vienāda ar elektrisko jaudu). Jaudu, ko ģenerators atdod ārējā ķēdē, var noteikt no spriegumu vienādojuma:

$$u = e - i R, \quad (1.6.)$$

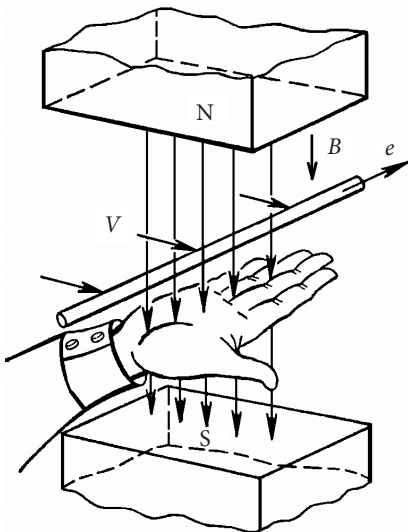
kur  $u$  – spriegums uz ārējās pretestības spailēm;

$R$  – vada pretestība.

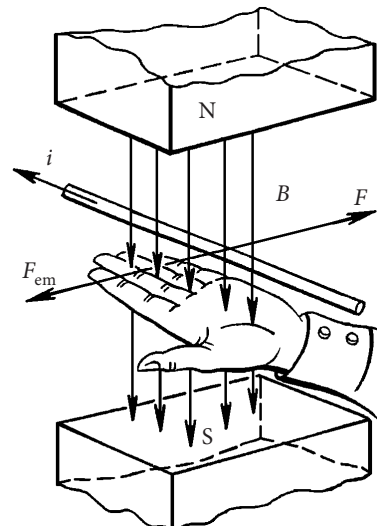
Pareizinot vienādojumu (1.6.) ar strāvu  $i$ , varam rakstīt:

$$u i = e i - i^2 R, \quad (1.7.)$$

kur  $i^2 R$  – elektriskie zudumi vadā.



1.3. att. EDS virziena noteikšana pēc labās rokas likuma.



1.4. att. Spēka virziena noteikšana pēc kreisās rokas likuma.

Iepriekš aplūkotā elektriskā mašīna var darboties arī kā dzinējs, t. i., pārveidot elektrisko enerģiju mehāniskajā. Ja vadam pievadām spriegumu  $u$  tā, lai strāva  $i$  tajā saglabātu 1.2. attēlā norādīto virzienu, uz vada iedarbosies elektromagnētiskais spēks, kura virzienu var noteikt pēc kreisās rokas likuma. Šis spēks pārvietos vadu pa kreisi. Pārvietojoties magnētiskajā laukā, tajā inducējas EDS  $e$ , kas šajā gadījumā vērstas pretī strāvai  $i$ . Par to var pārliecināties, pielietojot labās rokas likumu. Tādējādi pievadītajam spriegumam  $u$  jālīdzsvaro EDS  $e$  un sprieguma kritums  $iR$ , t. i.,

$$u = e + iR. \quad (1.8.)$$

No spriegumu vienādojuma var pāriet pie jaudu vienādojuma, pareizinot to ar strāvu  $i$ :

$$u i = e i + i^2 R. \quad (1.9.)$$

Šajā vienādojumā  $i^2 R$  – elektriskie zudumi vadā, bet  $e i$  – tā pievadītās elektriskās jaudas  $u i$  daļa, kura pārvēršas mehāniskajā jaudā  $F_{em} V$ , jo, ņemot vērā izteiksmes (1.1.) un (1.2.), varam rakstīt:

$$e i = B l V i = F_{em} V. \quad (1.10.)$$

Jaudu  $e i$  sauc par mašīnas elektromagnētisko jaudu.

No iegūtajām sakarībām var secināt, ka jebkura elektriskā mašīna ir apgriezeniska, t. i., to var darbināt gan kā ģeneratoru, gan kā dzinēju.

## 2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS

### 2.1. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS DARBĪBAS PRINCIPS UN UZBŪVE

Līdzstrāvas mašīnas plaši izmanto kā ģeneratorus un dzinējus.

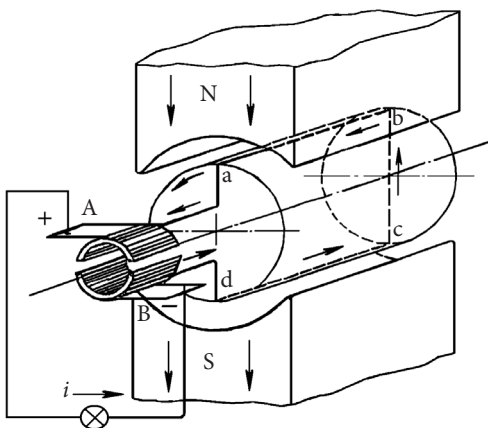
Starp diviem poliem N un S atrodas mašīnas rotējošā daļa – enkurs. Enkura griešanai izmanto primāro dzinēju, piemēram, turbīnu vai iekšdedzes dzinēju. Enkurs sastāv no tērauda cilindra, uz kura novietots tinums (rāmītis) a b c d. Tinuma gali pievienoti divām plāksnītēm, kas izolētas viena no otras un veido vienkāršotu kolektoru. Uz kolektora novietotas sukas A un B, caur kurām ģeneratoram tiek pieslēgta slodze. Mašīnas darbības laikā kolektors griežas, bet sukas paliek nekustīgas.

Pieņemsim, ka enkurs rotē pretēji pulksteņa rādītāju kustības virzienam. Tad tinumā inducēsies EDS, kura virziens uzrādīts 2.1. att., bet tā skaitlisko lielumu nosaka formula (1.1.).

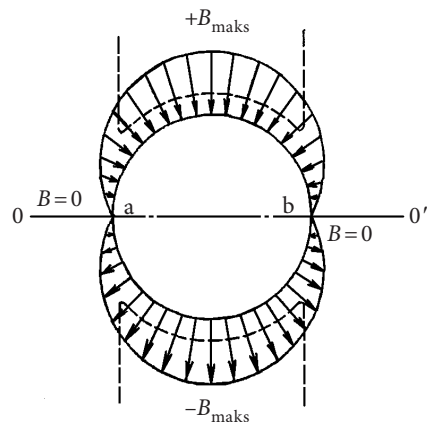
No izteiksmes (1.1.) redzams, ja  $V = const$  un  $l = const$ , tad EDS lielumu un formu nosaka tikai indukcija  $B$  gaisa spraugā starp enkuru un poliem. Indukcijas sadalījums pa enkura aploci ir nevienmērīgs. Zem pola vidus indukcijai ir maksimāla vērtība, bet tuvāk pola malām tā samazinās (2.2. att.).

Līniju  $00'$ , kas atdala polu zonas un iet caur enkura centru, sauc par ģeometrisko neitrāli. Magnētiskā indukcija uz ģeometriskās neitrāles punktos a un b ir vienāda ar nulli. Enkuram griežoties, tinums magnētiskajā laukā ieņem dažādus stāvokļus. Tāpēc atbilstoši mainīgām indukcijas vērtībām arī tinumā inducējas mainīgs EDS. Ja indukcijas sadalījums, piemēram, ir sinusoidāls, tad arī EDS un strāva ir sinusoidāli.

Sukas un kolektors pārvērš maiņstrāvu pulsējošā, t. i., nemainīgā pēc virziena. 2.1. attēlā parādītajā tinuma stāvoklī strāva ģeneratora ārējā ķēdē plūst no sukas A (+) uz suku B (-). Tad, kad enkurs pagriezīsies par  $180^\circ$ , strāvas virziens tinumā mainīsies uz

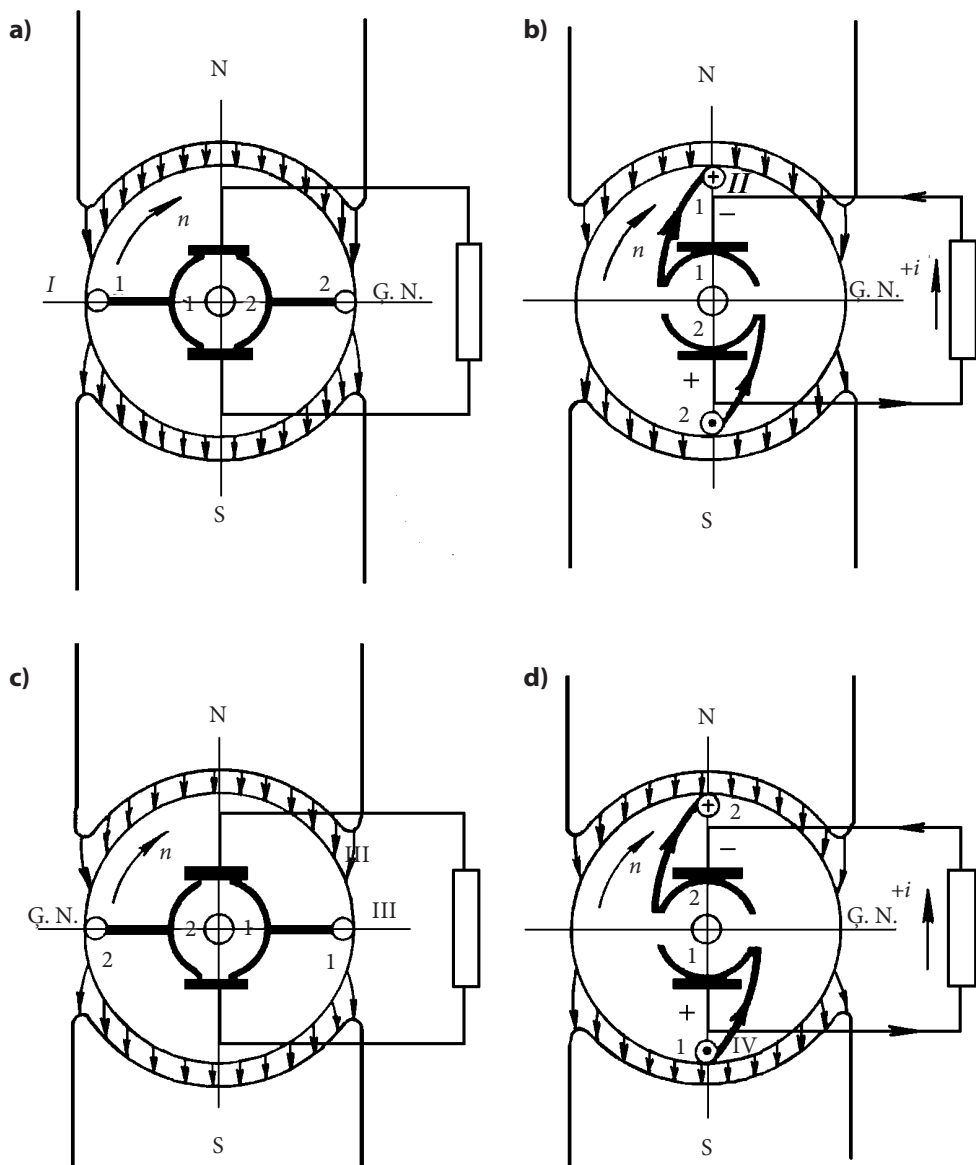


2.1. att. Līdzstrāvas ģeneratora vienkāršots modelis.



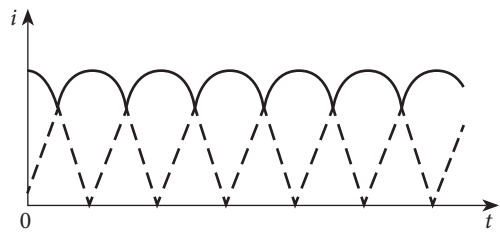
2.2. att. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā.

pretējo. Tomēr strāvas virziens un suku polaritāte ārējā ķēdē nemainās, jo brīdī, kad strāva tinumā izmaina virzienu, mainās arī kolektora plāksnītes zem sukām. Tādējādi zem augšējās suku vienmēr atrodas plāksnīte, kas savienota ar vadu zem ziemeļpola, bet zem apakšējās suku – plāksnīte, kas savienota ar vadu zem dienvidpola (2.3. att.). No teiktā var secināt, ka kolektors ar sukām darbojas kā taisngriezis.



2.3. att. Līdzstrāvas ģeneratora darbības princips.

Strāvas un sprieguma pulsāciju ģenerators ārējā ķēdē var samazināt, palielinot sekciju skaitu enkura tinumā. Attiecīgi jāpalielina arī kolektora plāksnīšu skaits, un katras sekcijas gali jāpievieno attiecīgajam plāksnīšu pārim. Piemēram, lietojot 16 sekcijas un kolektora plāksnītes, strāvas pulsācija ārējā ķēdē jau kļūst maznozīmīgāka (2.4. att.).



2.4. att. Iztaisnotās strāvas grafiks.

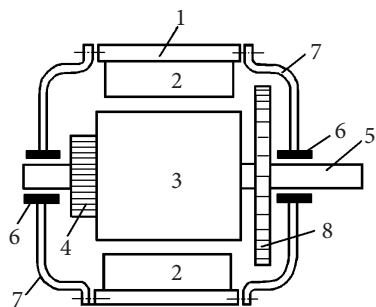
Līdzstrāvas elektriskās mašīnas paredzētas darbam dažādos apstākļos, tāpēc to atsevišķiem mezgliem var būt dažāda konstrukcija, tomēr to uzbūves shēma ir vienāda (2.5. att.).

Līdzstrāvas mašīna sastāv no nekustīgās daļas – statora un rotējošās daļas – enkura. Stators sastāv no statnes, kuras iekšpusē stiprinās galvenie un papildpoli ar tinumiem. Galvenie poli kalpo pamatplūsmas radīšanai, bet papildpoli – komutācijas uzlabošanai.

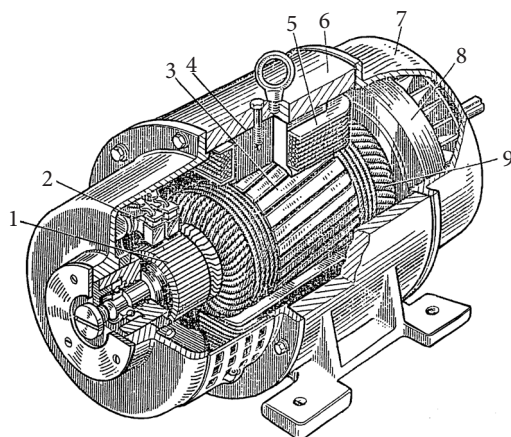
Enkurs sastāv no vārpstas, serdes, tinuma un kolektora. Vārpstas gali balstās gultņos, kas savukārt novietoti vairogos. Mašīnu dzesēšanas uzlabošanai parasti izmanto ventilatoru.

2.6. attēlā parādīta līdzstrāvas elektriskās mašīnas uzbūve. Apskatīsim tās atsevišķus mezglus.

**Statne.** Statne (2.7. att.) kalpo polu un gultņu vairogu stiprināšanai. Turklāt caur statni noslēdzas mašīnas galvenā magnētiskā plūsma, tāpēc to izgatavo no tērauda, t. i., no materiāla ar pietiekamu mehānisko stiprību un augstu magnētisko caurlaidību. Mašīnas stiprināšanai pie pamatnes ir izveidotas ķetnas. Statnes virspusē ir oskrūve

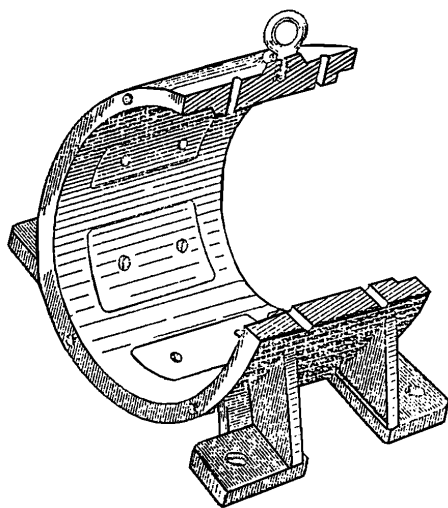


2.5. att. Līdzstrāvas mašīnas konstruktīvā shēma: 1 – statne; 2 – galvenie poli; 3 – enkura serde; 4 – kolektors; 5 – vārpsta; 6 – gultnis; 7 – gultņa vairogs; 8 – ventilators.

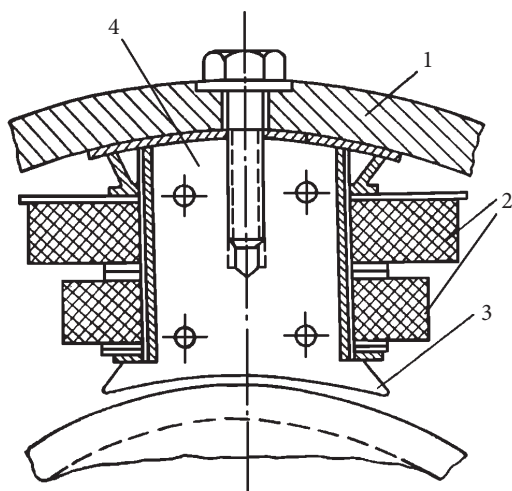


2.6. att. Līdzstrāvas mašīnas uzbūve: 1 – kolektors; 2 – sukas; 3 – enkura serde; 4 – galvenā pola serde; 5 – ierosmes spole; 6 – statne; 7 – gultņa vairogs; 8 – ventilators; 9 – enkura tinums.





2.7. att. Līdzstrāvas mašīnas statne.



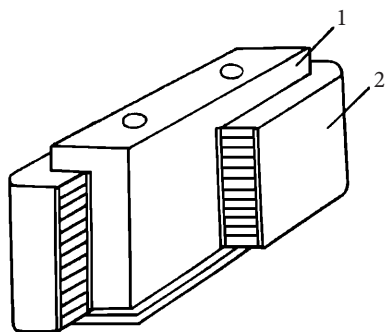
2.8. att. Galvenais pols: 1 – statne; 2 – ierosmes tinuma spoles; 3 – polu uzgalis; 4 – pola serde.

mašīnas pacelšanai. Mazas un vidējas jaudas mašīnām statne izveidota kā vesela tērauda lējuma konstrukcija vai sametināta no lokšņu tērauda. Lielās mašīnās statni veido no atsevišķiem elementiem, kas atvieglo montāžu un transportēšanu.

**Galvenie poli.** Līdzstrāvas mašīnās magnētisko plūsmu rada ierosmes tinuma magnetizējošais spēks (MS). Ierosmes tinums sastāv no spolēm, kas novietotas uz galveno polu serdes (2.8. att.). Serde izveidota no 1–2 mm biežām tērauda loksnēm, kas sapresētas un savilkta ar tapskrūvēm. Šāda konstrukcija samazina zudumus serdē un silšanu no virpuļstrāvām, kuras, enkuram griežoties, izraisa magnētiskās indukcijas pulsācija polu uzgaļos.

Polus statnei piestiprina ar bultskrūvēm vai tapskrūvēm. Ierosmes tinuma spolēs izmanto vara vadus, ko uztin uz karkasa. Dažreiz spoles sadala vairākās daļās, atstājot starp tām ventilācijas kanālus.

**Papildpoli.** Papildpolus parasti izmanto mašīnās ar jaudu, kas lielāka par 1 kW. To lietošanas mērķis – samazināt dzirksteļošanu zem sukām.



2.9. att. Papildpols: 1 – serde; 2 – spole.

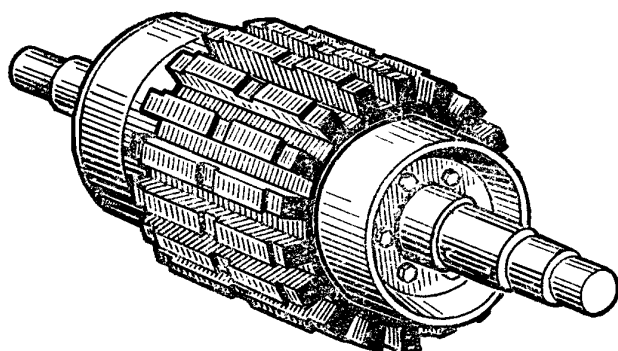
Papildpols (2.9. att.) sastāv no serdes 1 un spoles 2. Serde izgatavota kā monolīta tērauda konstrukcija. Indukciju papildpolu serdē izvēlas samērā mazu, tāpēc virpuļstrāvas tajā praktiski neinducējas. Papildpolus novieto starp galvenajiem poliēm un stiprina pie statnes ar bultskrūvēm. Spoli veido no izolēta vara vada ar šķērsriezumu, kas aprēķināts mašīnas darba strāvai, jo papildpolu tinums tiek slēgts virknē ar enkura tinumu.

**Enkurs.** Līdzstrāvas mašīnas enkurs sastāv no vārpstas, serdes, tinuma un kolektora. Serdi (2.10. att.) veido no štancētām elektrotehniskā tērauda loksnēm (2.11. att.). Lokšņu biezums 0,35–0,5 mm. Lokšnes ir savstarpēji izolētas. Parasti to dara, virsmas lakojojot.

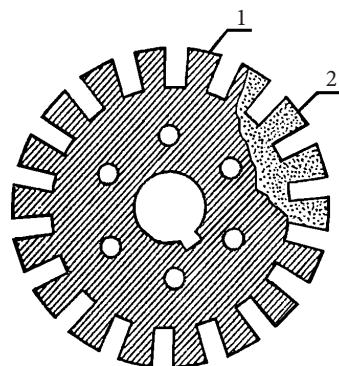
Lokšņu paketi saspiegtā stāvoklī uz vārpstas notur ar piespiedplāksnēm. Šāda serdes konstrukcija ļauj samazināt enerģijas zudumus no virpuļstrāvām, kas rodas no serdes pārmagnetizēšanās, tai rotējot magnētiskajā laukā. Lai uzlabotu mašīnas dzesēšanu, jau lokšņu štancēšanas laikā serdē izveido ventilācijas kanālus. Enkura tinumu novieto serdes rievās (2.12. att.).

Enkura tinumu veido no apaļiem vai taisnstūrveida vara vadiem, tos rūpīgi izolējot no serdes. Rievas var būt atvērtas (2.13. att. a) vai pusaizvērtas (2.13. att. b). Atvērtas rievas lieto vidējas un lielas jaudas, bet pusaizvērtas – mazas jaudas mašīnām. Enkura tinums sastāv no sekcijām, kuru galus piestiprina (parasti pielodē) pie kolektora plāksnītēm.

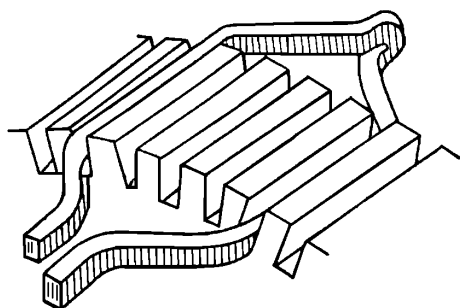
Vadu nostiprināšanai rievās izmanto getinaksa vai tekstolīta ķīļus (2.13. att.). Mazas jaudas mašīnās ķīļus nelieto, bet to funkciju pilda bandāža. Lai bandāža neizvirzītos ārpus enkura gabarītiem, to novieto speciālās gropēs uz enkura virsmas (sk. 2.10. att.). Bandāžai



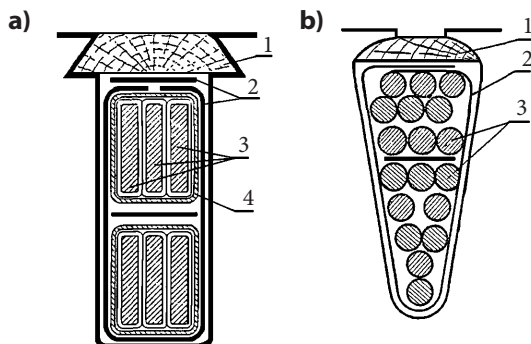
2.10. att. Enkurs bez tinuma.



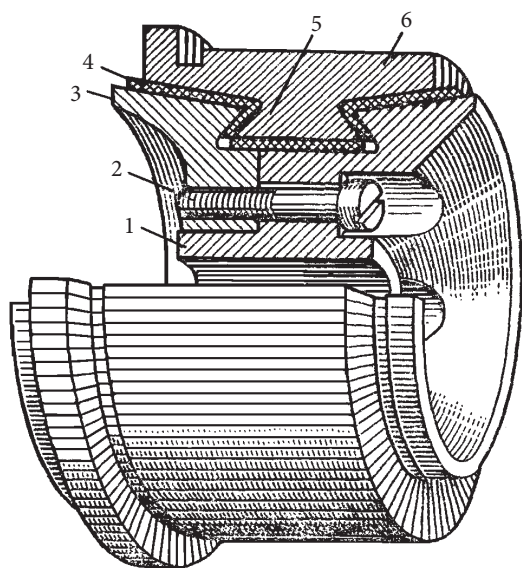
2.11. att. Enkura serdes loksne: 1 – tērauds; 2 – izolācija.



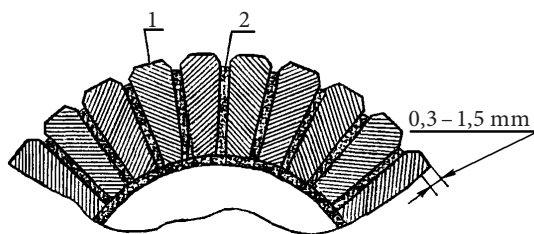
2.12. att. Enkura tinuma novietojums rievās.



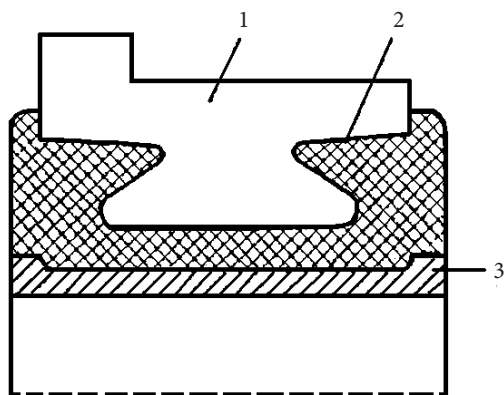
2.13. att. Enkura rievas: a – atvērta; b – pusaizvērta: 1 – ķīlis; 2 – elektrokartons; 3 – tinuma vadi; 4 – izolācijas lente.



2.14. att. Kolektora uzbūve: 1 – kolektora korpusis; 2 – bultskrūve; 3 – piespiedgredzens; 4 – izolācija (mikanīts); 5 – bezdelīgas aste; 6 – plāksnīte.



2.15. att. Kolektora plāksnišu (1) un izolācijas starpliku (2) novietojums.



2.16. att. Kolektors ar plastmasas korpusu: 1 – kolektora plāksnīte; 2 – plastmasa; 3 – tērauda bukse.

parasti lieto tērauda stiepli, to uzstina tieši uz enkura virsmas. Tinuma frontālo savienojumu stiprināšanai tāpat izmanto stieples bandāžu.

**Kolektors.** Līdzstrāvas mašīnas kolektoru (2.14. att.) izgatavo no auksti velmēta vara plāksnītēm. Lai tās savstarpēji izolētu, parasti izmanto mikanītu. Pie plāksnītes izciļņiem pielodē enkura tinuma sekciju galus. Kolektora plāksnišu apakšējai malai ir bezdelīgas astes forma. Tāda konstrukcija tiek izmantota plāksnišu nostiprināšanai ar piespiedgredzeniem.

Plāksnišu izolācijai no gredzeniem parasti arī izmanto mikanītu. Lai mikanīta plāksnītes, kas atrodas starp kolektora plāksnītēm, neizvirzītos ārpus plāksnītēm, tām nodilstot, un neizraisītu suku vibrāciju un pastiprinātu dzirksteļošānu, starp plāksnītēm frēzē līdz 1,5 mm dziļas gropes (2.15. att.).

Mazas jaudas mašīnām kolektora plāksnītes iepresē plastmasas korpusā (2.16. att.).

Plastmasa šajā gadījumā kalpo gan plāksnišu nostiprināšanai, gan kā izolācijas materiāls. Tādas konstrukcijas izgatavošana ir visai vienkārša, taču to var izmantot tikai rotācijas frekvencēm līdz  $10\,000\text{ min}^{-1}$ .

**Suku mezgls.** Suku mezgls sastāv no suku traversas (2.17. att.) un suktura (2.18. att.).

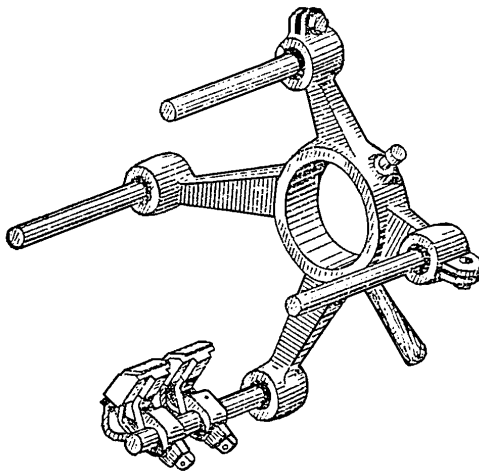
Traversu parasti piestiprina pie gultņu vairoga un tikai lielas jaudas mašīnās pie statnes. Pirksti, uz kuriem piestiprināts sukturis, tiek izolēti no traversas. Uz katra pirksta novieto sukturu komplektu. Pirkstu skaits parasti ir vienāds ar galveno polu skaitu.

Sukturis (2.18. att.) sastāv no aptveres 1, kurā novieto sukas 2, un suku piespiešanas mehānisma 3.

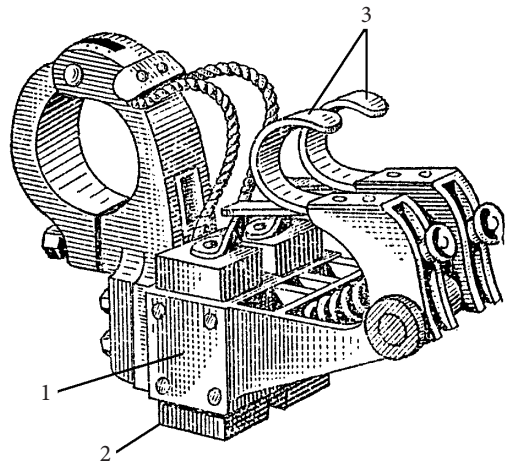
Visas vienas polaritātes sukas savieno savā starpā ar kopni, kuru pievieno mašīnas izvadēm. Viens no līdzstrāvas mašīnas drošas darbības svarīgākajiem nosacījumiem ir labs kontakts starp sukām un kolektoru. Tāpēc mašīnā suku mezgls ir viens no nozīmīgākajiem. Atsperēm, kas piespiež sukas pie kolektora, jābūt attiecīgi noregulētām, jo pārmērīgs spiediens izraisa pātrinātu suku nodilumu, bet nepietiekams – pastiprinātu dzirksteļošanu.

Bez iepriekš minētajām detaļām mašīnā ir divi gultņu vairogi. Līdzstrāvas mašīnās parasti izmanto lodīšu vai rullišu ritgultņus, un tikai retos gadījumos, piemēram, lai samazinātu troksni, izmanto slīdgultņus.

Mašīnas enkura, ierosmes un citu tinumu galus pievieno izvadu panelim vai kārbai, kuru novieto uz statnes, bet mazas jaudas mašīnās – uz priekšējā gultņu vairoga (no kolektora puses).



2.17. att. Suktura traversa.



2.18. att. Sukturis: 1 – aptvere; 2 – sukas; 3 –piespiedmehānisms.

## 2.2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU ENKURA TINUMI

### 2.2.1. Vispārīgi norādījumi

Līdzstrāvas mašīnas darbības nodrošināšanai nepieciešami vismaz divi tinumi: ierosmes tinums un enkura tinums. Pirmais no tiem mašīnā rada galveno magnētisko plūsmu, bet otrs piedalās enerģijas pārveidošanas procesā. Izņēmums ir magnetoelektriskās līdzstrāvas mašīnas, kurās ir enkura tinums, bet ierosmes lauku rada pastāvīgie magnēti.

Enkura tinumu veido vadi, kas noteiktā secībā savienoti savā starpā un pievienoti kolektoram.

Tinuma pamatelements ir sekcija, kurā var būt viens vai vairāki vijumi un kura pievienota divām kolektora plāksnītēm. Sekcijai ir aktīvās malas – tās, kas atrodas rievās, un frontālie savienojumi (pieser daļas) – tās, kas savieno savā starpā aktīvās daļas. Enkuram rotējot, sekcijas aktīvajās daļās inducējas EDS.

Vienam polam atbilstošo enkura aploces daļu sauc par polu iedaļu  $\tau$  (2.19. att.) un aprēķina pēc formulas:

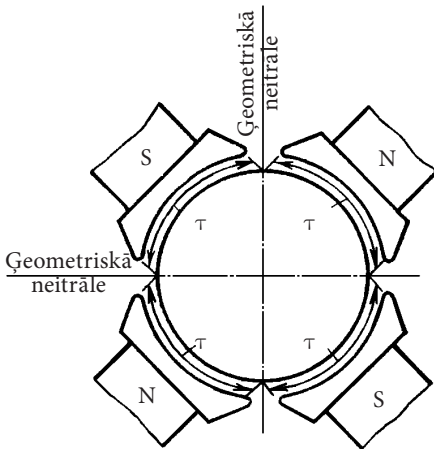
$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (2.1.)$$

kur  $D$  – enkura diametrs;

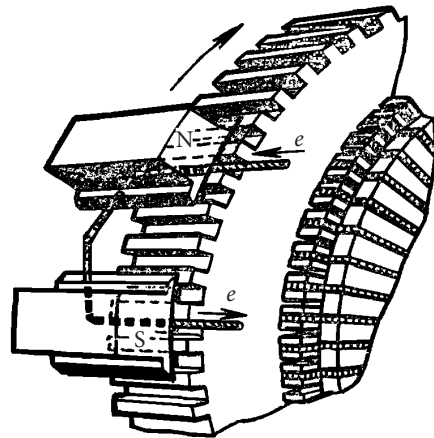
$2p$  – galveno polu skaits.

Lai EDS, kas inducējas sekcijas aktīvajās malās, summētos un darbotos saskaņoti, sekcijas rievās jānovieto tā, lai tās platumus pēc iespējas sakristu ar pola iedaļu (2.20. att.).

Sekcijas rievās novieto divos slāņos tā, lai viena tās aktīvā mala atrastos vienas rievas augšējā slānī, bet otra – citas rievas apakšējā slānī (sk. 2.12. att.). Vienas sekcijas augšējā mala un citas sekcijas apakšējā mala, kas atrodas vienā rievā, veido elementāro rievu  $Z_e$ . Reāla rievā var sastāvēt no vairākām elementārām (2.21. att.).



2.19. att. Polu iedaļa.



2.20. att. Tinuma aktīvo daļu novietojums.

Tā kā katrai sekcijai ir divas aktīvās malas, tai atbilst viena elementārā rievā. Sekcijas galus pievieno kolektora plāksnītēm, turklāt katrai plāksnītei pievieno vienas sekcijas sākumu un nākamās sekcijas beigas, t. i., katrai sekcijai atbilst viena kolektora plāksnīte. Tāpēc enkura tinumam ir spēkā šāda vienādība:

$$S = Z_e = K,$$

kur  $S$  – enkura tinuma sekciju skaits;

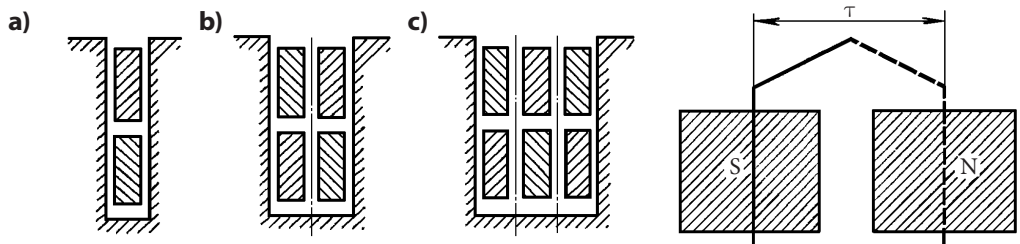
$K$  – kolektora plāksnīšu skaits.

Lai ērtāk un uzskatāmāk attēlotu tinumu, pieņemts cilindrisko enkuru kopā ar tinumu nosacīti izklāt plaknē un visus vadu savienojumus parādīt ar taisnām līnijām (2.22. att.). Tādu tinuma shēmu sauc par izvērsto.

Atkarībā no tā, kādā secībā enkura tinuma sekcijas izvietotas rievās un sekciju gali pievienoti kolektora plāksnītēm, izšķir šādus tinumu tipus: vienkāršs cilpas, salikts cilpas, vienkāršs viļņa, salikts viļņa un kombinēts tinums.

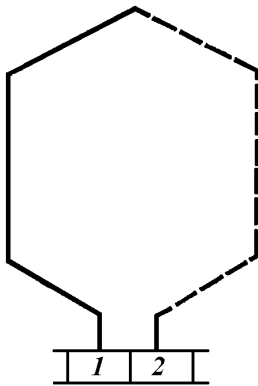
### 2.2.2. Vienkāršs cilpas tinums

Vienkāršā cilpas tinumā katras sekcijas galus pievieno blakus esošām kolektora plāksnītēm. 2.23. attēlā parādīta cilpas tinuma vienvijuma, bet 2.24. attēlā – divvijumu sekcija.

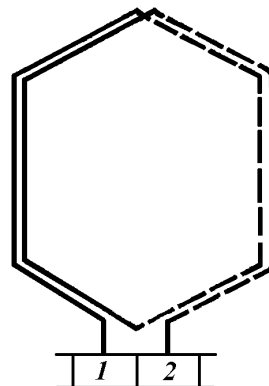


2.21. att. Elementārās rievās: a – viena elementārā rievā; b – divas elementārās rievās; c – trīs elementārās rievās.

2.22. att. Tinuma sekcijas attēlošana.



2.23. att. Vienvijuma cilpas tinuma sekcija.



2.24. att. Divvijumu cilpas tinuma sekcija.

Novietojot sekcijas enkura rievās, katras nākamās sekcijas sākumu pievieno iepriekšējās sekcijas beigām, pakāpeniski pārvietojoties pa enkura un kolektora virsmu tā, lai, apejot apkārt, tiek ieliktas visas tinuma sekcijas. Rezultātā pēdējās sekcijas beigas tiek pievienotas pirmās sekcijas sākumam un tinums ir noslēgts.

2.25. attēlā parādīta vienkārša cilpas tinuma daļa un tinuma soļi, t. i., attālumi starp sekciju malām. Attālumu starp vienas sekcijas aktīvajām malām sauc par tinuma pirmo soli  $y_1$ . Par tinuma otro soli  $y_2$  sauc attālumu starp vienas sekcijas beigu malu un tai sekojošās sekcijas sākuma malu. Kolektora solis  $y_k$  ir attālums starp sekcijas sākumu un beigām uz kolektora virsmas. Tinuma soļus  $y_1, y_2$  un  $y$  mēra ar elementāro rievu skaitu, bet  $y_k$  – ar kolektora plāksnīšu skaitu.

No 2.25. attēla redzams, ka tinuma rezultējošais solis

$$y = y_1 - y_2. \quad (2.2.)$$

Tinumu, kura daļa parādīta 2.25. attēlā a, sauc par nekrustotu, bet 2.25. attēlā b parādīto – par krustotu.

Kā izriet no definīcijas, vienkāršā cilpas tinumā katras sekcijas sākumu un beigas pievieno blakus esošām kolektorplāksnītēm, tāpēc

$$y = y_k = \pm 1.$$

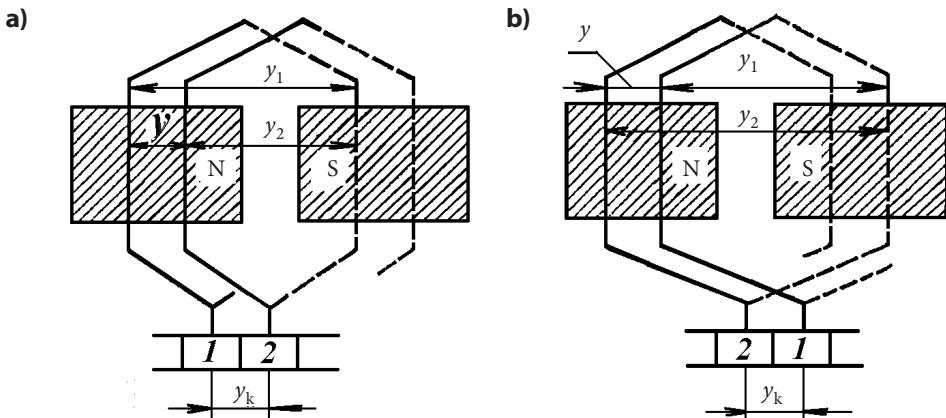
Šajā izteiksmē plus zīme atbilst nekrustotam, bet mīnus zīme – krustotam tinumam. Lai noteiktu visus vienkārša cilpas tinuma soļus, pietiek aprēķināt pirmo soli  $y_1$ :

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon, \quad (2.3.)$$

kur  $\varepsilon$  – korekcijas lielums, kas mazāks par 1 un kuru pieskaita vai atņem, lai  $y_1$  būtu vesels skaitlis.

Izmantojot formulu (2.2.), var noteikt tinuma otro soli:

$$y_2 = y_1 \pm y = y_1 \pm 1.$$



2.25. att. Vienkārša cilpas tinuma soļi: a – nekrustots tinums; b – krustots tinums.

Noskaidrosim vienkārša cilpas tinuma izveidošanas īpatnības, apskatot konkrētu piemēru. Pieņemsim, ka  $2p=4$ ,  $S=K=Z=Z_e=12$ . Tinums nekrustots.

Nosakām tinuma soļus:

$$\text{pirmais solis} \quad y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{12}{4} = 3;$$

$$\text{otrais solis} \quad y_2 = y_1 - y = 3 - 1 = 2.$$

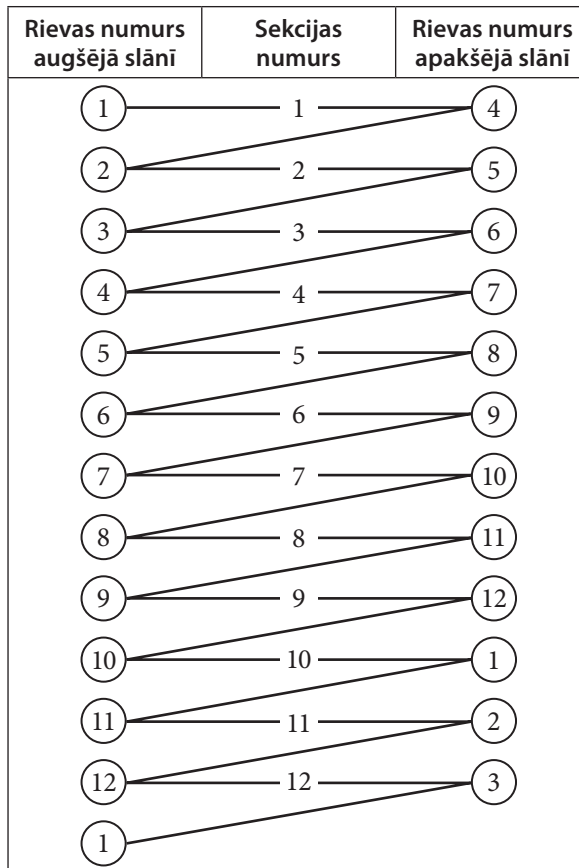
Pirms uzsākt tinuma izvērstās shēmas izveidi, jānorāda:

- visām enkura rievām un sekcijām piešķiram numurus, turklāt sekcijas numurs sakrīt ar tās rievas numuru, kurā atrodas sekcijas augšējā mala;
- sekciju aktīvās malas, kas atrodas rievas augšējā slānī, attēlojam ar nepārtrauktām līnijām, bet aktīvās malas, kas atrodas rievas apakšējā slānī, – ar pārtrauktām.

Tinuma izvērstās shēmas ērtākai izveidei vispirms jā sastāda savienojumu tabula (2.1. tabula). Tabulā horizontālās līnijas attēlo sekcijas, bet slīpās – savienojumu secību.

Ja tinuma soļi aprēķināti pareizi, tabulā attēlojas visas sekciju augšējā un apakšējā slāņa aktīvās malas. Turklāt no tabulas redzams, ka savienojumi sākas no pirmās rievas (augšējā slāņa) un noslēdzas arī pirmajā rievā, t. i., tinums tiek noslēgts.

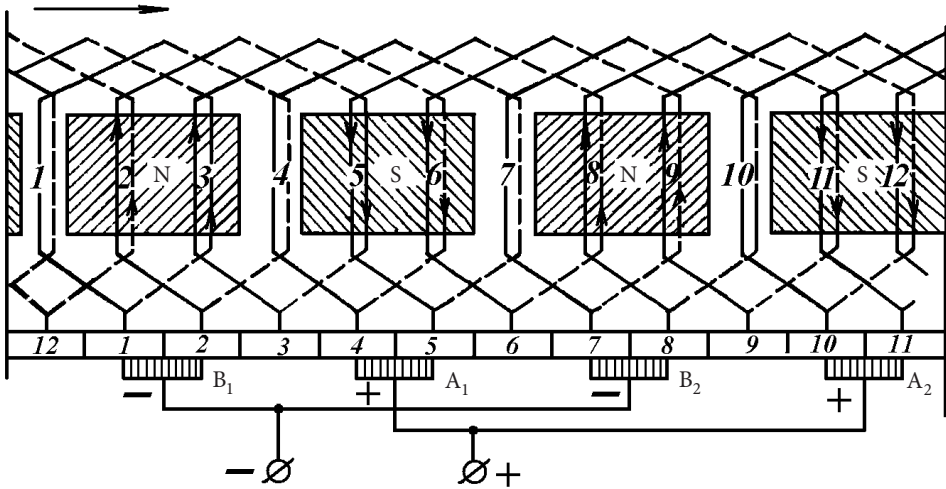
2.1. tabula. Savienojumu tabula



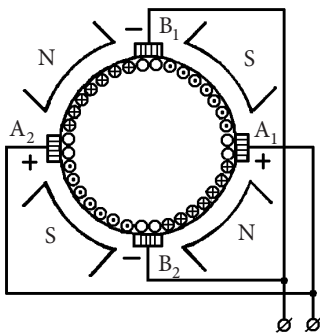


Tinuma izvērsto shēmu (2.26. att.) veido šādā secībā. Vispirms atzīmē rievu numurus un polu kontūras. Pieņem, ka poli atrodas virs enkura. Pola platumu izvēlas aptuveni vienādu ar  $0,8\tau$ . Tad attēlo kolektora plāksnītes un ieviek shēmā pirmo sekciju, kuras aktīvās malas atrodas 1. un 4. rievā. Kolektora plāksnītes, ar kurām savienoti minētās sekcijas gali, arī atzīmē ar numuriem 1 un 2. Numurus piešķir arī visām pārējām plāksnītēm un secīgi ieviek visas pārējās sekcijas. Pēdējai sekcijai jānoslēdz tinums (sk. savienojumu no 3. uz 1. rievu).

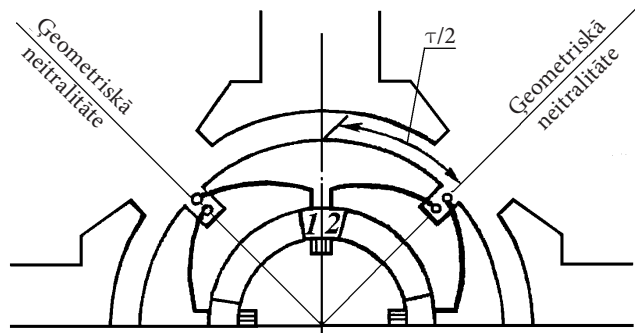
Tagad shēmā uz kolektora novieto sukās. Attālumam starp tām jābūt vienādam ar pola iedaļu, t. i.,  $K/2p$  kolektora plāksnīšu iedaļas. Novietojot sukās uz kolektora, jāvadās no šādiem apsvērumiem. Pieņemsim, ka elektriskais kontakts starp enkuru un ārējo ķēdi notiek nevis caur kolektoru un sukām, bet caur nosacītām sukām, kas slīd pa enkura virsmu (2.27. att.). Tādā gadījumā mašīnas maksimālais EDS atbilst nosacīto suku stāvoklim uz ģeometriskās neitralēs (sk. 2.3. apakšnodaļu). Bet sakarā ar to, ka kolektora



2.26. att. Vienkārša divslāņu cilpas tinuma izvērsta shēma ( $2p = 4, Z_e = 12$ ).



2.27. att. Nosacīto suku novietojums.



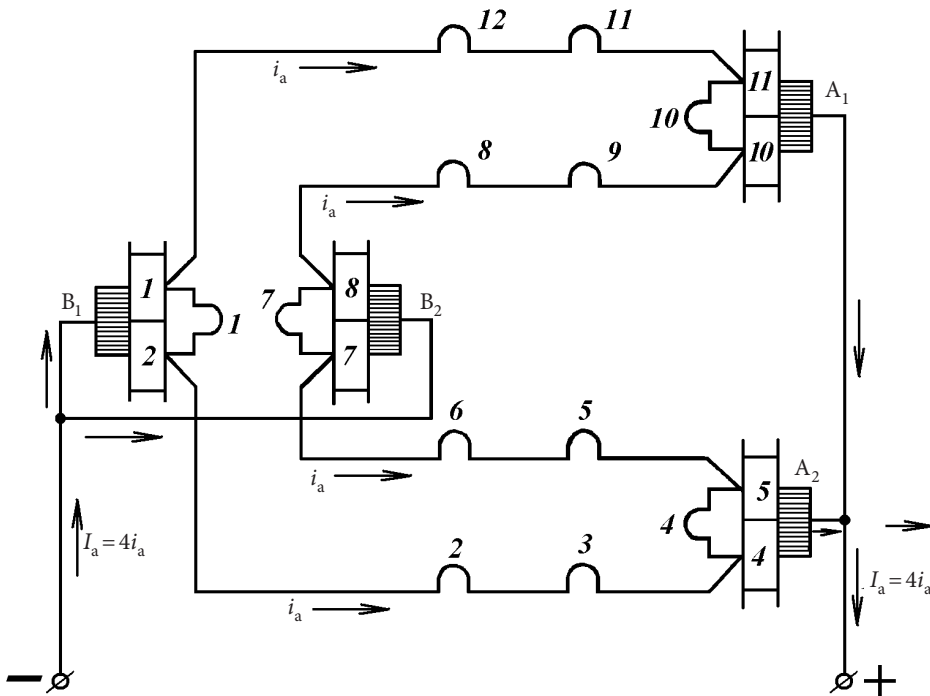
2.28. att. Reālo suku novietojums.

plāksnītes, pie kurām pievienotas sekcijas, nobīdītas attiecībā pret šo sekciju aktīvajām malām aptuveni par  $\pi/2$  (2.28. att.), pārejot uz reālām sukām, tās jānovieto uz galveno polu asīm (sk. 2.26. att.).

Pieņemsim, ka mašina darbojas ģenerators režīmā un tās enkurs rotē virzienā no kreisās uz labo pusi. EDS un strāvas virzienu sekciju aktīvajās malās nosaka pēc labās rokas likuma. Šis apstākļi ļauj izvēlēties suku polaritāti. Sukām  $A_1$  un  $A_2$  ir “+” polaritāte, bet sukām  $B_1$  un  $B_2$  “-” polaritāte. Vienas polaritātes suku savieno savā starpā un pievieno mašīnas izvadspailēm (2.29. att.).

Apskatot vienkārša cilpas tinuma izvērsto shēmu, var secināt, ka tā sastāv no četriem paralēliem zariem un katrā no tiem vairākas sekcijas ar vienādu strāvas virzienu slēgtas virknē. Sekciju sadalījums pa paralēliem zariem parādīts tinuma elektriskajā shēmā (2.29. att.). Šī shēma iegūta no tinuma izvērstās shēmas šādā secībā. Vispirms attēlo suku un kolektora plāksnītes, kas pie tām pieskaras. Tad sāk apiet sekcijas, sākot ar pirmo. Tālāk seko otrā un trešā sekcija, kuras veido vienu paralēlo zaru. Šajā brīdī pirmā sekcija ar suku palīdzību ir saslēgta īsi. Tādā veidā apiet visu tinumu. Rezultātā var pārliectināties, ka šis tinums sastāv no četriem paralēliem zariem. Turklāt katrā paralēlā zarā ir divas virknē slēgtas sekcijas.

Sekcijās inducētie EDS viena paralēlā zara ietvaros summējas, bet, tā kā visi zari savā starpā savienoti paralēli, visa tinuma EDS vienāds ar viena paralēlā zara EDS. Enkura tinuma kopējā strāva  $I_a$  veidojas kā summa no atsevišķo zaru strāvām



2.29. att. 2.26. attēlā parādītā tinuma elektriskā shēma.

$$I_a = 2ai_a,$$

kur  $i_a$  – viena paralēlā zaru strāva;  
 $2a$  – paralēlo zaru skaits.

Vienkāršā cilpas tinumā paralēlo zaru skaits vienmēr vienāds ar galveno polu skaitu.

$$2a = 2p.$$

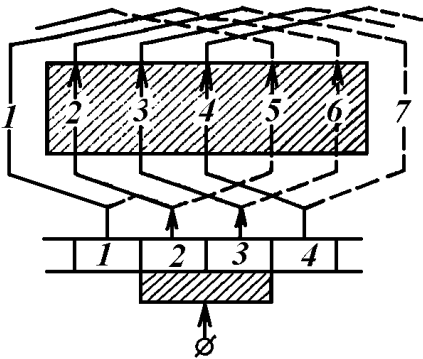
Enkura tinuma paralēlo zaru skaits un strāva nosaka līdzstrāvas mašīnas galvenos parametrus, proti, sprieguma un strāvas lielumu.

### 2.2.3. Salikts cilpas tinums

Vienkāršā cilpas tinumā paralēlo zaru skaits ir vienāds ar galveno polu skaitu. Tāpēc gadījumos, kad nepieciešams izveidot tinumu ar lielāku paralēlo zaru skaitu, lai iegūtu lielāku jaudu, piemēram, zemsprieguma mašīnās, būtu jāpalielina polu skaits. Tas savukārt nelabvēlīgi ietekmē mašīnas izmērus un izmaksas. Lai iegūtu enkura tinumu ar lielu paralēlo zaru skaitu, izmanto saliktu cilpas tinumu. Tāds tinums būtībā sastāv no vairākiem vienkāršiem cilpas tinumiem. Saliktam cilpas tinumam paralēlo zaru skaitu aprēķina šādi:

$$2a = 2pm,$$

kur  $m$  – saliktajā tinumā ietilpstošo vienkāršo cilpas tinumu skaits.



2.30. att. Salikta cilpas tinuma sekciju novietojums.

Suku platumu saliktā cilpas tinumā izvēlas tā, lai tās pārklātu vismaz  $m$  kolektora plāksnītes. Šajā gadījumā  $m$  vienkāršie tinumi ar suku palīdzību tiek saslēgti paralēli. 2.30. attēlā parādīta salikta cilpas tinuma daļa ar  $m=2$ . Lai sukas savienotu šos tinumus, nākas viena tinuma malas un kolektora plāksnītes izvērst un to starpā izvietot otra tinuma malas un plāksnītes. Tāpēc salikta tinuma enkura rezultējošais solis un kolektora solis, salīdzinot ar vienkāršu tinumu, palielinās  $m$  reizes

$$y_k = y = m.$$

Tinuma pirmo soli  $y_1$  saliktam tinumam aprēķina tāpat kā vienkāršam (sk. izteiksmi (2.3.)).

Apskatīsim salikta cilpas tinuma piemēru ar  $2p=4$ ,  $S=K=Z=Z_e=16$ ,  $m=2$ .

Nosakām tinuma soļus:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{4} = 4;$$

$$y = y_k = m = 2;$$

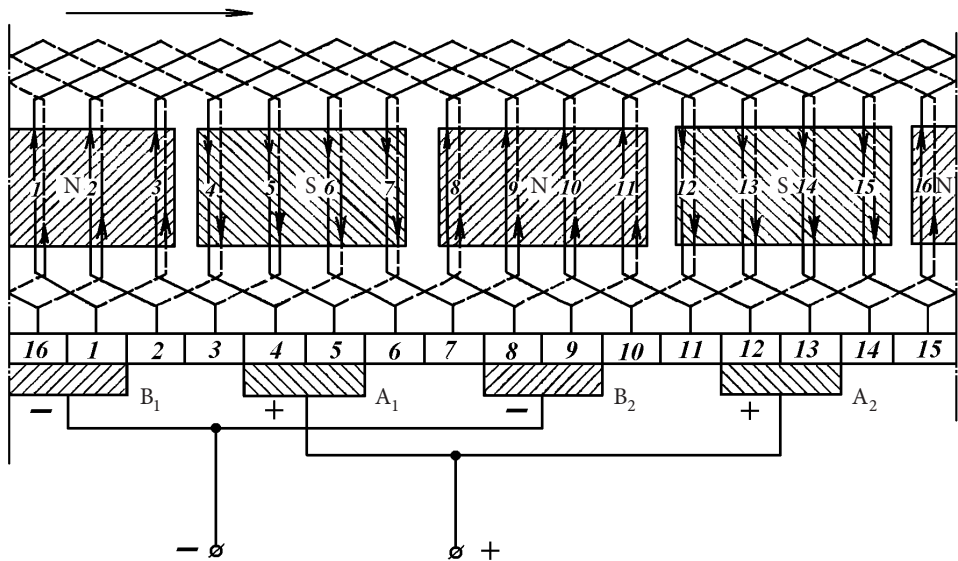
$$y_2 = y_1 - y = 4 - 2 = 2.$$

Vispirms, tāpat kā iepriekšējā piemērā, sastādām savienojumu tabulu (2.2. tabula).

Tad izvērstajā shēmā (2.31. att.) novietojam viena vienkāršā tinuma sekcijas (ar nepāra numuriem: 1, 3, 5 utt.). Šo sekciju galus pievienojam nepāra kolektora plāksnītēm. Tālāk shēmā parādām otra vienkāršā tinuma sekcijas (ar pāra numuriem: 2, 4, 6 utt.).

2.2. tabula. Savienojumu tabula

Pirmais tinums			Otrais tinums		
rievas numurs augšējā slānī	sekcijas numurs	rievas numurs apakšējā slānī	rievas numurs augšējā slānī	sekcijas numurs	rievas numurs apakšējā slānī
1	1	5	2	2	6
3	3	7	4	4	8
5	5	9	6	6	10
7	7	11	8	8	12
9	9	13	10	10	14
11	11	15	12	12	16
13	13	1	14	14	2
15	15	3	16	16	4
1			2		



2.31. att. Salikta cilpas tinuma izvērstā shēma ( $2p = 4, Z_e = 16; m = 2$ ).

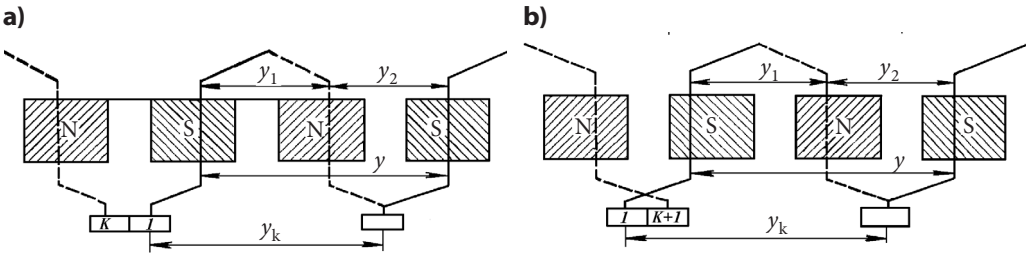
Suku novietojums un polaritātes noteikšana šajā gadījumā notiek tāpat kā vienkāršam tinumam. Jāpiebilst, ka suku platums jāizvēlas tā, lai pārklātu vismaz divas kolektora plāksnītes. Paralēlo zaru skaits apskatītajā tinumā

$$2a = 2pm = 4 \cdot 2 = 8.$$

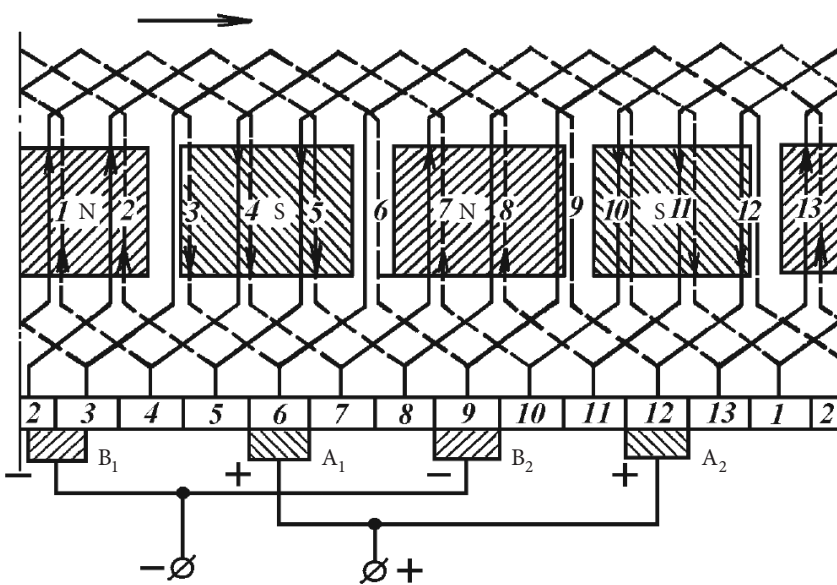
### 2.2.4. Vienkāršs viļņa tinums

Vienkāršu viļņa tinumu iegūst, savienojot virknē sekcijas, kas atrodas zem dažādiem polu pāriem. Sekciju gali šādā tinumā tiek pievienoti kolektora plāksnītēm, kas cita no citas atrodas attālumā  $y_k = y \approx 2\tau$ .

Vienreiz aejot apkārt enkuram, pievienoto sekciju skaits vienāds ar mašīnas polu pāru skaitu. Turklāt pēdējās sekcijas beigas pievieno plāksnītei, kas atrodas blakus izejas plāksnītei. Tinumu sauc par nekrustotu, ja pēdējās sekcijas beigas pievienotas plāksnītei, kas atrodas pa kreisi no izejas plāksnītes (2.32. att. a), un par krustotu, ja pa labi no izejas plāksnītes (2.32. att. b).



2.32.att. Vienkārša viļņa tinuma shēmas: a – nekrušots tinums; b – krušots tinums.



2.33. att. Vienkārša viļņa tinuma izvērsta shēma ( $2p = 4, Z_e = 13$ ).

Veicot pilnu apli ap kolektoru, notiek pārvietošanās par  $y_k p$  plāksnītēm, nonākot pie plāksnītes, kas atrodas blakus izejas plāksnītei. Tāpēc spēkā ir vienādība

$$y_k p = K \pm 1,$$

no kuras izriet, ka kolektora solis un arī tinuma rezultējošais solis ir vienāds ar

$$y_k = y = \frac{K \pm 1}{p}. \quad (2.4.)$$

Mīnusa zīme atbilst nekrustotam, bet plusa zīme – krustotam tinumam. Praksē krustoto tinumu gandrīz neizmanto, jo tam nepieciešams lielāks vara patēriņš.

Pirmo tinuma soli  $y_1$  nosaka no izteiksmes (2.3.), bet otro aprēķina šādi:

$$y_2 = y - y_1.$$

Aplūkosim vienkārša viļņa tinuma piemēru ar  $2p = 4$ ,  $S = K = Z = Z_e = 13$ .

Aprēķinām tinuma soļus:

$$y_k = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{13 - 1}{2} = 6;$$

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;$$

$$y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3.$$

Sastādām sekciju savienojumu tabulu (2.3. tabula) un sākam veidot izvērsto tinuma shēmu.

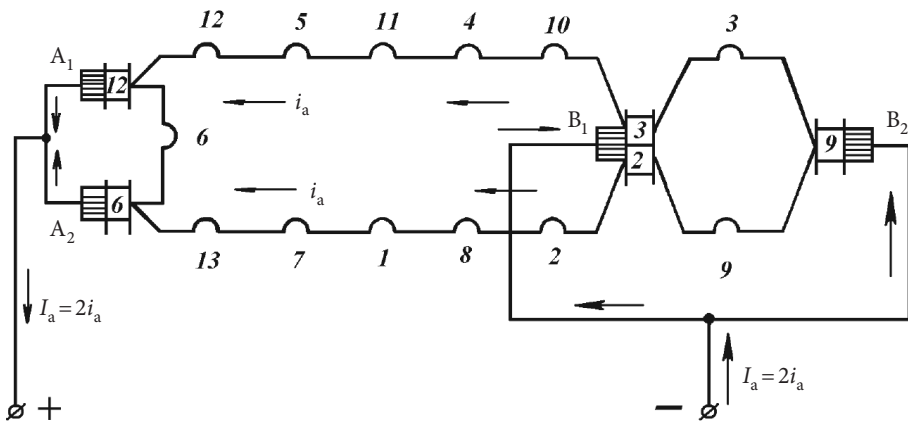
Pirmo reizi apejot enkuru, novietojam 1. un 7. sekciju (2.33. att.). Enkura apiešanu turpina, līdz visas 13 sekcijas novietotas rievās un tinums ir noslēgts. Jāatzīmē, ka dotajā enkura stāvoklī 3. un 6. sekcija caur sukām ir išslēgtas.

Nosakām suku polaritāti un izpildām tinuma elektrisko shēmu (2.34. att.). No shēmas redzams, ka tinums sastāv no diviem paralēliem zariem ( $2a = 2$ ). Šī īpatnība raksturīga vienkāršam viļņa tinumam: neatkarīgi no polu skaita mašīnā ir divi paralēlie zari.

No apskatāmām shēmām redzams, ka katra paralēlā zara sekcijas vienmērīgi sadalītas zem visiem

2.3. tabula. Savienojumu tabula

Rievas numurs augšējā slānī	Sekcijas numurs	Rievas numurs apakšējā slānī
1	1	4
7	7	10
13	13	3
6	6	9
12	12	2
5	5	8
11	11	1
4	4	7
10	10	13
3	3	6
9	9	12
2	2	5
8	8	11
1		



2.34. att. 2.33. attēlā parādītā tinuma elektriskā shēma.

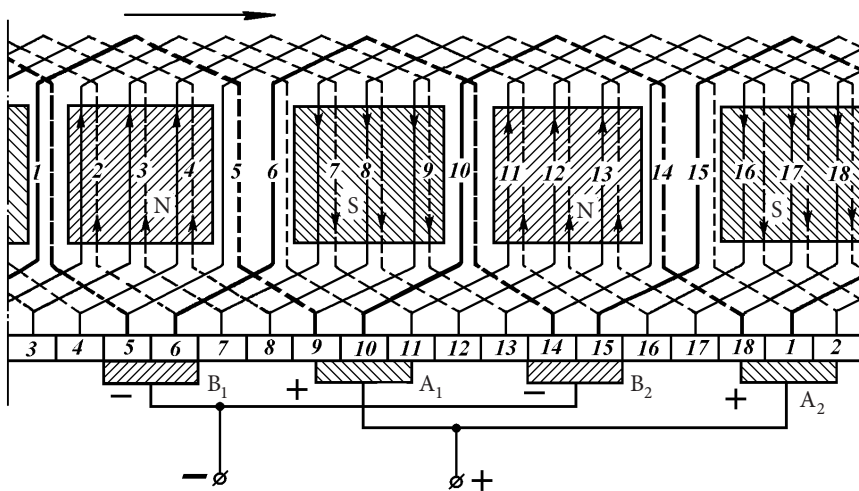
mašīnas poliem. Būtībā šādam tinumam varētu lietot tikai divas suku, piemēram,  $A_2$  un  $B_2$ . Tomēr tādā gadījumā būtu izjaukta tinuma simetrija, jo vienā paralēlā zarā būtu 7, bet otrā 6 sekcijas. Tāpēc mašīnā parasti uzstāda tik suku, cik ir galveno polu. Tas jau bez minētajām priekšrocībām ļauj samazināt strāvas lielumu uz vienu suku, kā arī samazināt kolektora izmērus.

### 2.2.5. Salikts viļņa tinums

Vairāki vienkārši viļņa tinumi, kas ievietoti viena enkura rievās, veido saliktu viļņa tinumu. Tā kā vienkārša viļņa tinumā ir divi paralēlie zari, tad saliktā tinumā

$$2a = 2m,$$

kur  $m$  – vienkārša viļņa tinumu skaits.



2.35. att. Salikta viļņa tinumu izvērsta shēma ( $2p = 4, Z_e = 18, m = 2$ ).

Saliktu viļņa tinumu veido tāpat kā vienkāršu. Atšķirība ir tikai rezultējošā un kolektora soļa noteikšanā:

$$y = y_k = \frac{K \pm m}{p}. \quad (2.5.)$$

Vienkāršie viļņa tinumi, kas veido salikto, savā starpā tiek savienoti paralēli ar suku palīdzību. To platumam, tāpat kā salikta cilpas tinuma gadījumā, jābūt tādā, lai pārklātu vismaz  $m$  kolektora plāksnītes. 2.35. attēlā parādīts salikta viļņa tinuma piemērs.

### 2.2.6. Viļņa tinums ar diko sekciju

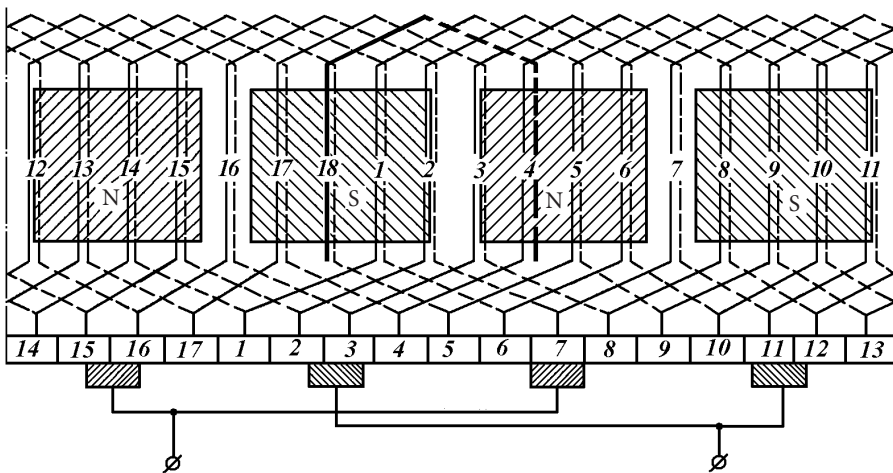
No izteiksmes (2.4.), kas dota vienkārša viļņa tinuma kolektora soļa noteikšanai, redzams, ka viļņa tinumu, ja polu pāru skaits ir pāra skaitlis, var izveidot tikai ar nepāra kolektora plāksnīšu skaitu. Piemēram, ja četrpolu mašīnas enkura tinumā ir 18 sekcijas, tad to savienošanai nepieciešamas arī 18 kolektora plāksnītes. Tādā gadījumā kolektora solis

$$y_k = \frac{18-1}{2}$$

ir daļskaitlis un tinums nav reāli izpildāms. Ja tāds tinums tomēr ir jāizveido, jārikojas šādi: kolektora plāksnīšu skaitu samazina par vienu ( $K=17$ ), bet vienu sekciju atstāj dīkā, t. i., tās galus nepievieno kolektoram. Tad kolektora solis ir

$$y_k = \frac{17-1}{2} = 8.$$

Izpildot tādu tinumu, rievās novieto visas 18 sekcijas. Tad vienai no sekcijām nogriež galus, bet pārējās 17 pievieno kolektora plāksnītēm saskaņā ar aprēķināto kolektora soli  $y_k=8$ . 2.36. attēlā parādīta tinuma izvērstā shēma, kurā dīkā sekcija izcelta ar treknām līnijām.



2.36. att. Izvērstā shēma viļņa tinumam ar diko sekciju.



## 2.2.7. Mākslīgi noslēgts viļņa tinums

Mākslīgi noslēgto viļņa tinumu izveido gadījumos, kad mašīnas vajadzīgo parametru nodrošināšanai jāizvēlas viļņa tinums, bet enkura rievu un kolektora plāksnīšu skaits to neļauj izdarīt.

Piemēram, ja četrpolu mašīnai ir 12 rievas un arī 12 kolektora plāksnītes, tad vienkāršo viļņa tinumu nevar izveidot, jo kolektora solis ir daļskaitlis.

Vienkāršo viļņa tinumu šajā gadījumā var izveidot, ja tas sastāv no 13 sekcijām un 13 kolektora plāksnītēm. Tad

$$y_k = \frac{13-1}{2} = 6.$$

Bet, tā kā mašīnā ir tikai 12 rievas un 12 kolektora plāksnītes, iespējamas tikai 12 sekcijas. Šādā gadījumā izmanto mākslīgi noslēgto tinumu, kurā trūkstošo 13. sekciju un kolektora plāksnīti aizvieto ar vadu, kas noslēdz tinumu.

Aprēķinot tinuma soļus mākslīgi noslēgtam tinumam, rievu un kolektora plāksnīšu skaitu palielina par vienu salīdzinājumā ar reālo. Tādā veidā apskatāmajā piemērā, aprēķinot tinuma soļus, jāpieņem  $Z = 13$  un  $K = 13$ . Tad tinuma soļi ir:

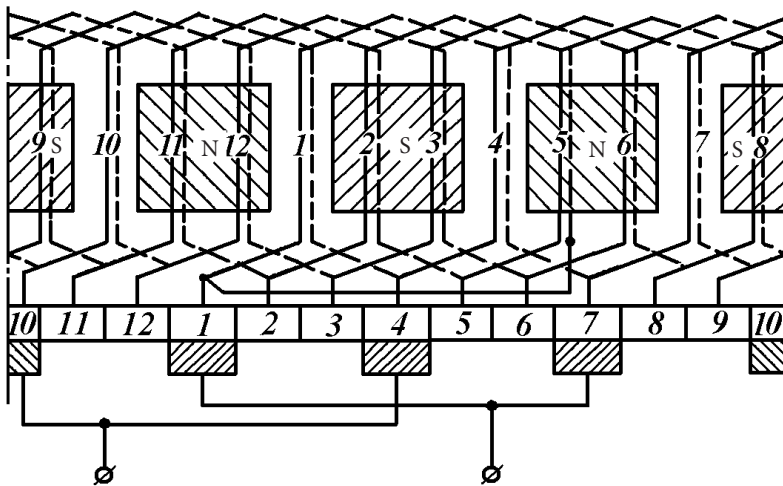
$$y_1 = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;$$

$$y_k = \frac{13-1}{2} = 6.$$

Jāpiebilst, ka, ikreiz apejot enkuru izvērstā tinuma shēmā (2.37. att.), kad novieto  $p$  sekcijas, to kolektora soļi mainās: vienai sekcijai ir pilns kolektora solis  $y_k$ , bet otrai samazināts par vienu kolektora iedaļu:

$$y'_k = y_k - 1.$$

Kad novietota pēdējā sekcija, tās beigas ar vadu savieno ar pirmās sekcijas sākumu.



2.37. att. Mākslīgi noslēgta viļņa tinuma izvērstā shēma ( $2p = 4$ ,  $S = 12$ ,  $K = 12$ ,  $y_1 = 3$ ,  $y_k = 6$ ,  $y'_k = 5$ ).

### 2.2.8. Tinuma simetrijas noteikumi

Enkura tinumu sauc par simetrisku, ja tā paralēlajiem zariem ir vienāda elektriskā pretestība un tajos inducējas vienāds EDS.

Nesimetriskā tinumā strāvas paralēlos zaros sadalās nevienmērīgi, pārslogojot vienus un nepilnīgi slogojot citus zarus. Rezultātā elektriskie zudumi tinumā pieaug, bet mašīnas lietderīgā jauda samazinās.

Tinums ir simetrisks, ja tiek ievēroti simetrijas noteikumi.

Pirmais noteikums nosaka, lai katrā paralēlā zarā būtu vienāds sekciju skaits. Šo noteikumu var izpildīt tikai tad, ja sekciju skaits uz katru paralēlo zaru pāri ir vesels skaitlis:

$$\frac{S}{a} = \text{vesels skaitlis.} \quad (2.6.)$$

Otrais noteikums paredz, lai vienā paralēlo zaru pāri ietilpstošo sekciju skaits arī būtu vesels skaitlis:

$$\frac{Z}{a} = \text{vesels skaitlis,} \quad (2.7.)$$

kur  $Z$  – enkura reālo rievu skaits.

Trešais simetrijas noteikums prasa, lai katrs tinuma paralēlo zaru pāris būtu vienādi novietots attiecībā pret polu sistēmu. To var izpildīt, ja

$$\frac{2p}{a} = \text{vesels skaitlis.} \quad (2.8.)$$

Saliktam cilpas tinumam  $2a = 2pm$  vai  $a = pm$ . Ievietojot to formulā (2.8.), iegūstam:

$$\frac{2p}{a} = \frac{2p}{pm} = \frac{2}{m} = \text{vesels skaitlis.}$$

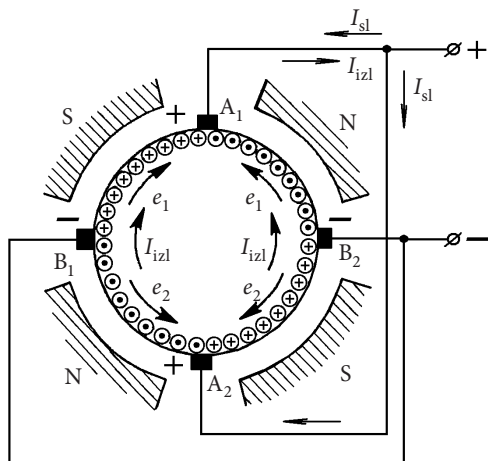
Tas nozīmē, ka simetrisks salikts cilpas tinums iespējams tikai gadījumā, ja  $m = 2$ .

### 2.2.9. Izlīdzinošie savienojumi

Tomēr, pat izpildot visus simetrijas noteikumus, EDS, kas inducējas daudzpolu mašīnu tinumu atsevišķos paralēlajos zaros, parasti nav vienādi. Tam par iemeslu kalpo magnētiskās sistēmas asimetrija, kā rezultātā atsevišķo polu magnētiskās plūsmas ir dažādas. Asimetrija rodas no dažādiem defektiem mašīnas izgatavošanas laikā: defekti statnes lējumā, nekvalitatīva polu montāža, nepareizi centrēts enkurs (dažāds gaisa spraugas lielums zem dažādiem poliem) u. c. Atkarībā no izmantotā enkura tinuma tipa magnētiskā asimetrija mašīnas darbību ietekmē dažādi.

Viļņa tinumos katra paralēlā zara sekcijas vienmērīgi novietojas zem visiem mašīnas poliem. Tāpēc magnētiskā asimetrija nenoved pie dažādiem EDS paralēlos zaros, jo tā vienādi ietekmē visus zarus.

Cilpas tinumos viena paralēlā zara sekcijas novietotas zem viena polu pāra. Tāpēc magnētiskās asimetrijas rezultātā paralēlo zaru EDS ir atšķirīgi un rodas izlīdzinošās strāvas. Piemēram, ja EDS  $e_1$  un  $e_2$  (2.38. att.) nav vienādi, tad arī suku  $A_1$  un  $A_2$  potenciāli nav vienādi.



2.38.att. Izlīdzinošās strāvas vienkāršā cilpas tinuma paralēlos zarus.

Tā kā sukas savā starpā savienotas ar vadu, tinumā plūdis izlīdzinošā strāva  $I_{iz}$ . Ja  $e_1 > e_2$ , strāva  $I_{iz}$  ārējā ķēdes daļā plūst no sukas  $A_1$  uz suku  $A_2$ . Gadījumā, kad EDS visos četros tinuma paralēlos zarus nav vienāds, izlīdzinošā strāva plūst arī  $B_1$  un  $B_2$  suku ķēdē. Izlīdzinošās strāvas, uzklājoties slodzes strāvai, izraisa paralēlo zaru nevienmērīgu slogošanu. Tas savukārt palielina mašīnas silšanu. Bez tam, palielinoties strāvas blīvumam zem atsevišķām sukām, var jūtami palielināties dzirksteļošana uz kolektora. Tā 2.38. attēlā pārslogota ir suku  $A_2$ , kurā izlīdzinošā strāva summējas ar slodzes strāvu. Izlīdzinošās strāvas vērtība nav atkarīga

no slodzes. Tāpēc tā neizzūd arī tukšgaitā.

Lai samazinātu suku nevienmērīgu noslodzi, vienkāršos cilpas tinumos savā starpā savieno enkura tinuma punktus, kuru potenciāliem teorētiski jābūt vienādiem. Izlīdzinošās strāvas šajā gadījumā cirkulē tinuma iekšienē, neizejot suku ķēdē.

Minētos savienojumus izveido no vara vadiem, un tos sauc par pirmās kārtas izlīdzinošajiem savienojumiem vai izlīdzinātājiem. Praktiski pieejamie punkti savienojumu izveidei tinumā ir sekciju pievienošanas vietās kolektoram vai frontālos savienojumos pretējā pusē.

Punktu skaits, kuriem vienādi potenciāli, mašīnā ir vienāds ar polu pāru skaitu ( $p = a$ ). Attālumu starp blakusesošiem punktiem ar vienādiem potenciāliem sauc par potenciālsoli un apzīmē  $y_{iz}$ . Ja izlīdzinātājus novieto kolektora pusē, potenciālsoli mēra kolektora iedaļās:

$$y_{iz} = \frac{K}{a} = \frac{K}{p}. \quad (2.9)$$

Maksimālais izlīdzinātāju skaits (pilns komplekts), ko var izmantot, ir:

$$N_{iz} = \frac{K}{a}. \quad (2.10)$$

Tomēr izlīdzinātāju pilnu komplektu izmanto tikai lielas jaudas mašīnās, piemēram, velmēšanas iekārtu dzinējos. Lai samazinātu vara patēriņu, parasti lieto tikai daļu no izlīdzinātāju pilnā komplekta. Piemēram, nelielas jaudas četrpolu mašīnās lieto 3–4 izlīdzinātājus (2.39. att.). To šķērsgriezuma laukums ir 0,25–0,5 no enkura tinuma vadu šķērsgriezuma.

Saliktie cilpas un viļņa tinumi veidojas no vienkāršajiem tinumiem, kuri ar suku palīdzību tiek saslēgti paralēli. Tomēr nodrošināt vienādu kontaktu ar katru vienkāršo tinumu praktiski nav iespējams. Tāpēc strāvas starp atsevišķiem tinumiem sadalās ne-

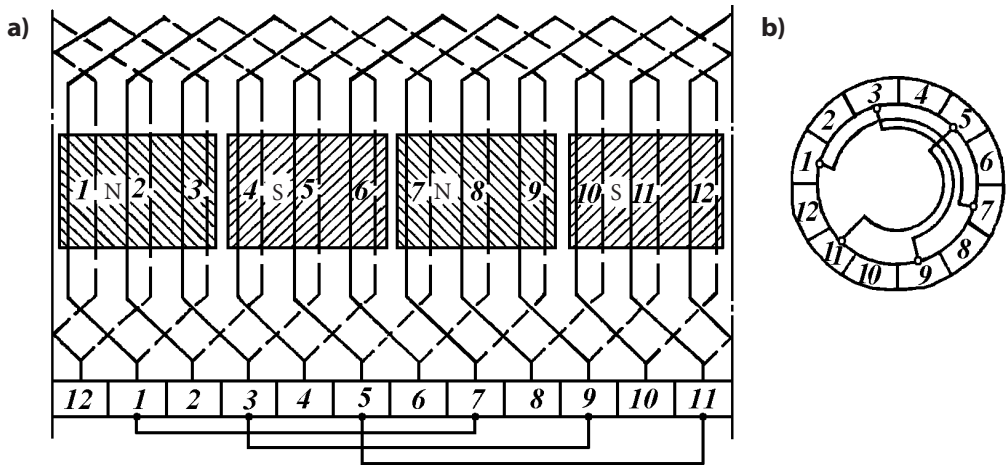
vienmēri, tas rada potenciāla nevienmērigu sadalījumu un pastiprinātu dzirksteļošanu uz kolektora.

Lai novērstu šo nevēlamo parādību, lieto otrās kārtas izlīdzinošos savienojumus, ar kuriem vienkāršos tinumus teorētiski vienādu potenciālu punktos savieno savā starpā.

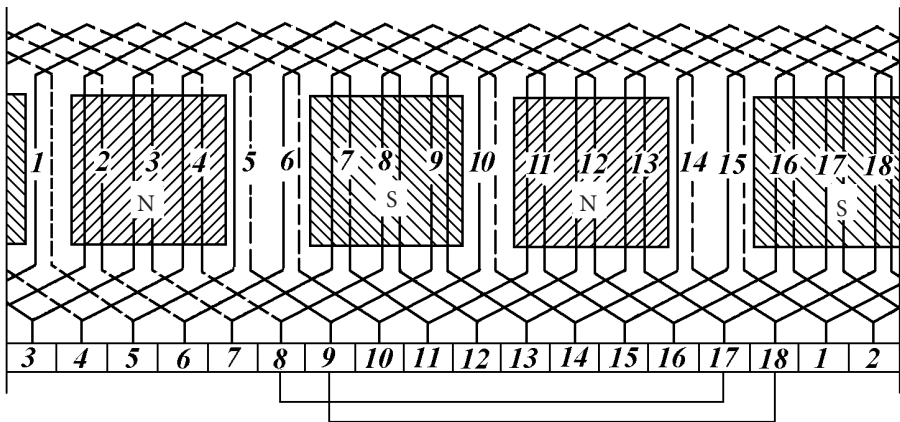
2.40. attēlā redzama salikta viļņa tinuma izvērstā shēma, kurā parādīti otrās kārtas izlīdzinātāji. Tie savieno vienādu potenciālu kolektora plāksnītes, kas nobīdītas potenciālsolo attālumā:

$$y_{iz} = \frac{K}{a} = \frac{18}{2} = 9.$$

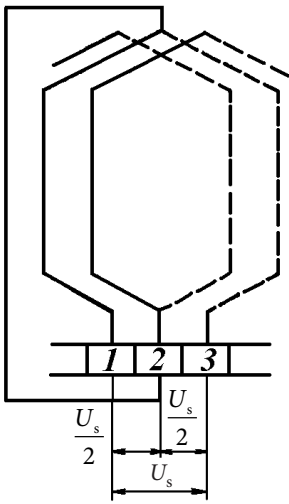
Astoto kolektora plāksnīti savieno ar septiņpadsmito, devīto ar astoņpadsmito utt. (shēmā parādīti tikai divi izlīdzinātāji). Izlīdzinātāju pilnu komplektu nosaka izteiksme (2.10.). Taču praksē parasti pilnu izlīdzinātāju komplektu neuzstāda.



2.39. att. Pirmās kārtas izlīdzinošie savienojumi: a – tinuma izvērstā shēma; b – skats no kolektora puses.



2.40. att. Otrās kārtas izlīdzinošie savienojumi saliktā viļņa tinumā.

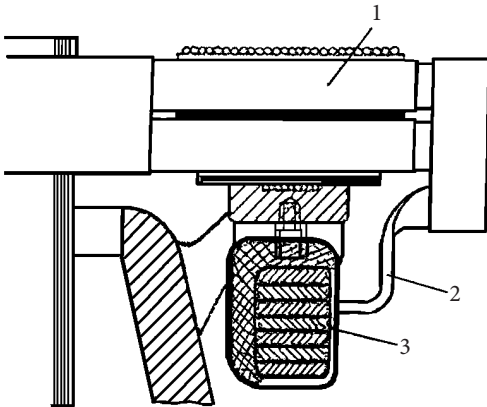


2.41. att. Otrās kārtas izlīdzinošie savienojumi saliktā cilpas tinumā.

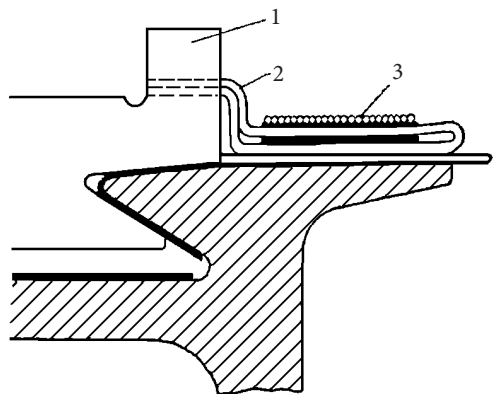
Saliktos cilpas tinumos otrās kārtas izlīdzinātājus izveido tā, kā parādīts 2.41. attēlā. Tā kā šajā gadījumā katras vienkārša tinuma sekcijas gali pievienoti kolektora plāksnītēm, vienu izlaižot (1 un 3), kolektora plāksnīte, kas atrodas starp tām, daļa sekcijas spriegumu divās daļās. Lai nodrošinātu vienmērīgu sprieguma sadalījumu starp plāksnītēm, jāpanāk, lai šie spriegumi dalītos vienādās daļās. Šim nolūkam tinumā izmanto otrās kārtas izlīdzinātājus, ar kuriem sekcijas viduspunktu kolektoram pretējā pusē savieno ar kolektora plāksnīti, kas atrodas starp sekcijas galiem (sk. 2.41. att.). Jāatzīmē, ka šādu savienojumu izveidošanā rodas grūtības, jo jāsavieno punkti, kas atrodas enkura abos galos, un jāveido speciālas spraugas starp vārpstu un enkura serdi.

Tādējādi var secināt, ka saliktos viļņa tinumos lieto tikai otrās kārtas izlīdzinātājus, bet saliktos cilpas tinumos – gan pirmās, gan otrās kārtas izlīdzinātājus.

Izlīdzinātāju pievienošanai izmanto gredzenus ar izvadiem uz frontālo savienojumu attiecīgajiem punktiem (2.42. att.) vai dakšveida savienojumus kolektora pusē (2.43. att.). Gredzenus parasti izmanto tad, ja izlīdzinātāju skaits nav liels un to šķērsriezuma laukums ir ievērojams. Dakšveida savienojumus lieto, ja ir daudz izlīdzinātāju ar nelielu šķērsriezuma laukumu.



2.42. att. Gredzenveida izlīdzinošo savienojumu izveidošana kolektorā pretējā pusē:  
1 – frontālie savienojumi;  
2 – atzarojumi;  
3 – izlīdzinošais gredzens.



2.43. att. Izlīdzinošo savienojumu izveidošana no kolektora puses:  
1 – kolektora plāksnīte;  
2 – izlīdzinošā dakša;  
3 – bandāža.

## 2.2.10. Kombinēts tinums

Kombinēts tinums apvieno cilpas un viļņa tinumus, kuri novietoti vienās rievās un pievienoti vienam kolektoram. Šāda tinuma sekcija parādīta 2.44. attēlā. Tā kā vienkāršie tinumi ir divslāņu, tad kombinēts tinums rievās tiek novietots četros slāņos un katrai kolektora plāksnītei tiek pievienoti četri vadi.

Kombinēto tinumu lieto lielas jaudas mašīnās. Tā galvenā priekšrocība ir tā, ka šis tinums neprasa izlīdzinošos savienojumus. 2.45. attēlā parādīta kombinētā tinuma principiālā shēma. Tinuma soļus abiem tinumiem, kas veido kombinēto, izvēlas vienādus

$$y_{1c} = y_{1v}$$

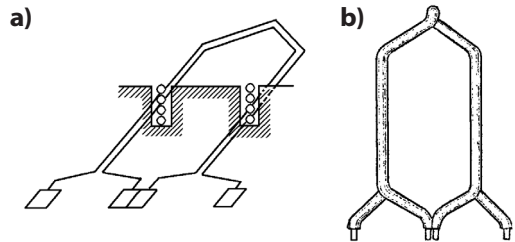
Kombinētā tinuma solis vienāds ar šo soļu summu

$$y_{1c} + y_{1v} = \frac{Z_e}{2p} + \frac{Z_e}{2p}$$

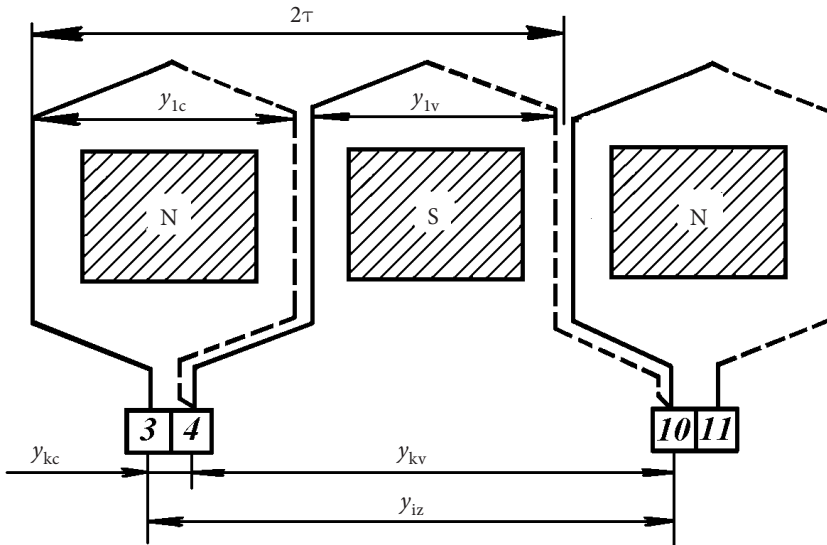
Tā kā  $Z_e = K$ , tad

$$y_{1c} + y_{1v} = \frac{K}{p} = y_{iz}$$

t. i., tinuma solis vienāds ar potenciālsoli (sk. (2.9.)). Tas nozīmē, ka tās kolektora plāksnītes, kuras vajadzētu savienot ar izlīdzinātājiem, tiek savienotas ar sekcijām, tāpēc šim tinumam izlīdzinošie savienojumi nav vajadzīgi.

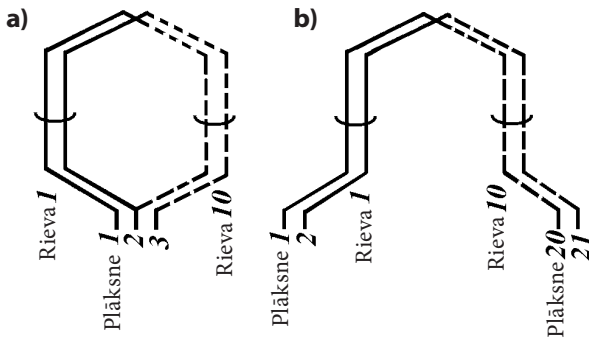


2.44. att. Kombinētā tinuma sekcija:  
a – izvietojums rievās; b – atsevišķa sekcija.



2.45. att. Kombinētā tinuma shēma.

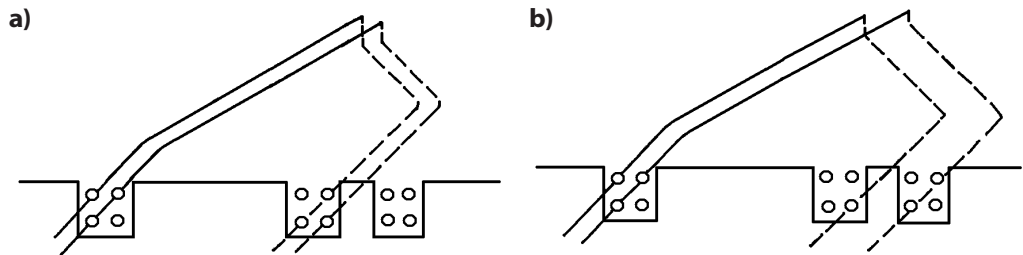
## 2.2.11. Enkura tinumu praktiskā izveidošana



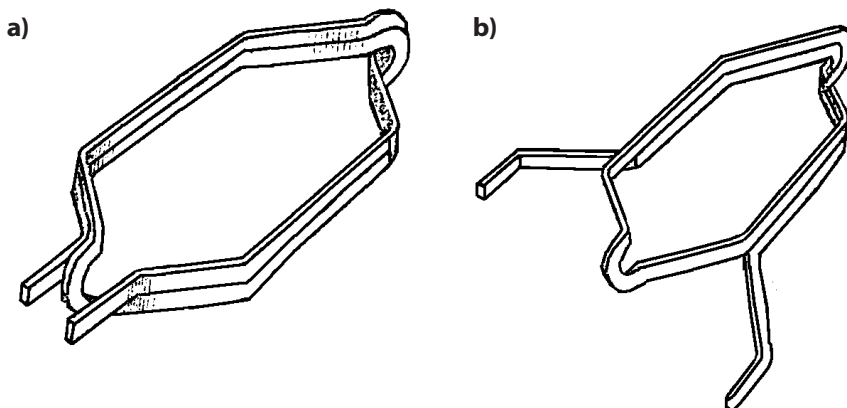
2.46. att. Enkura tinuma praktiskās shēmas:  
a – cilpas tinums; b – viļņa tinums.

shēmā, nosaka tinuma soļus. Izmantojot šādas shēmas, izgatavo sekcijas vai spoles, novietojot tās rievas un pievienojot kolektora plāksnītēm. Arī izlīdzinošo savienojumu shēmas parasti nezīmē, bet dod tikai to savienojumu tabulas.

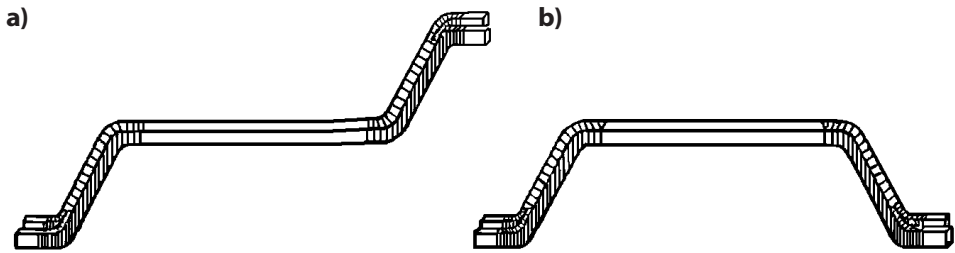
Enkura tinuma izgatavošanai nav nepieciešams attēlot pilnu izvērsto shēmu, bet var izmantot praktisko shēmu (2.46. att.), kurā parāda sekcijas, kuru aktīvās malas atrodas vienā tās rievē. Šajā shēmā uzrāda secību, kādā sekcijas pievieno kolektora plāksnītēm. Ar lokiem apzīmētas malas, kuras var izolēt kopā, t. i., apvienot vienā spolē. Rievu un kolektora plāksnīšu numuri, kas uzrādīti praktiskajā



2.47. att. Vienādsekciju (a) un pakāpjveida sekciju (b) enkura tinums.



2.48. att. Divvijumu stingrās sekcijas: a – cilpas tinums; b – viļņa tinums.



2.49. att. Viļņa (a) un cilpas (b) tinuma pussekcija.

Līdz šim, apskatot līdzstrāvas mašīnas enkura tinumus, tika uzskatīts, ka visām sekcijām ir vienādi izmēri. Tādus tinumus sauc par vienādsekciju tinumiem. To izgatavošana ir ļoti ērta, īpaši, ja enkuram ir atvērtās rievas. Šādā gadījumā sekcijas, kas atrodas vienā rievā, ar izolācijas palīdzību tiek apvienotas vienā spolē. Bet ir iespējama arī cita tinuma konstrukcija – pakāpju, kurā sekcijām ir dažāds platums. Šajā tinumā dažas sekciju malas atrodas vienā rievā, bet citas dažādās rievās (2.47. att.).

Pakāpju tinumu izgatavošana ir sarežģītāka un tos izmanto lielas jaudas mašīnās, nodrošinot labākus apstākļus suku kontakta darbībai (sk. 2.5.3. apakšnodaļu).

Kā jau norādīts iepriekš, ja vijumu skaits sekcijās nav liels, tās veido no apaļiem vai taisnstūrveida vara vadiem. Tādām stingrām sekcijām iepriekš piešķir vajadzīgo formu (2.48. att.) un parasti novieto enkura atvērtās rievās. Gadījumā, ja enkuram ir pusatvērtas rievas, stingrās sekcijas veido no divām pussekcijām (2.49. att.).

Nelielas jaudas mašīnās ar pusatvērtām rievām tinumu veido no apaļvadiem. Šādu tinumu sekcijas parasti sastāv no liela vijumu skaita, kurus pa vienam, diviem saliek rievā (neregulāra kārtojuma tinums).

### 2.2.12. Enkura tinuma tipa izvēle

Tinuma tipa izvēli nosaka gan tehniska, gan ekonomiska rakstura prasības. Tinumam jānodrošina vajadzīgā EDS un strāvas vērtība. Turklāt jācenšas izvēlēties tinumu ar mazāku izlīdzinošo savienojumu skaitu.

Enkura rievu ekonomisku izmantošanu raksturo rievas aizpildījuma koeficients:

$$k_r = \frac{S_v}{S_r},$$

kur  $S_v$  – visu vienā rievā novietoto vadu šķērsgriezuma laukums;

$S_r$  – vienas rievas šķērsgriezuma laukums.

Ja rievā novietoto vadu skaits ir liels, relatīvi lielu tās daļu aizņem izolācija. Tāpēc parasti cenšas izvēlēties tinumu ar minimālu vadu skaitu rievā.

Analīze parāda, ka aktīvo vadu skaits tinumā ir proporcionāls tā paralēlo zaru skaitam. Tāpēc ar vienādiem pārējiem noteikumiem priekšroka būtu dodama tinumam ar mazāku paralēlo zaru skaitu. Izejot no šādiem apsvērumiem, vispirms apskatāms



vienkāršs viļņa tinums, kuram vienmēr ir tikai divi paralēlie zari ( $a=1$ ). Turklāt šim tinumam nav nepieciešami izlīdzinošie savienojumi. Tomēr šā tinuma izmantošanu ierobežo daži faktori:

- pieļaujama strāvas lielums vienā paralēlā zarā mašīnās bez kompensācijas tinuma parasti nedrīkst pārsniegt 350 A, bet mašīnās ar kompensācijas tinumu – 500 A (sk. 2.4.3. apakšnodaļu);
- maksimālais spriegums starp divām blakusesošām kolektora plāksnītēm lielas jaudas mašīnās nedrīkst pārsniegt 25–28 V, vidējas jaudas – 30–35 V un mazas jaudas mašīnām – 50–60 V.

Pārsniedzot šīs sprieguma vērtības, uz kolektora var veidoties riņķveida loks, kas ir visai bīstams mašīnas darbībai.

Ja vienkāršu viļņa tinumu izmantot nevar, apskata citus tinumu tipus ar lielāku paralēlo zaru skaitu, piemēram, saliktu viļņa tinumu. Izvēloties tinuma tipu, parasti tos apskata un izvērtē šādā secībā:

- 1) vienkāršs viļņa tinums;
- 2) salikts viļņa tinums;
- 3) vienkāršs cilpas tinums;
- 4) salikts cilpas tinums;
- 5) kombinēts tinums.

Ieteicams, lai strāvas lielums tinuma paralēlajā zarā nepārsniegtu 250–350 A. To prasa rievu un kolektora plāksniņu racionāls izvietojums. Bez tam lielākām strāvas vērtībām grūti nodrošināt apmierinošas komutācijas apstākļus. Vienkāršu cilpas tinumu izmanto zemsprieguma mašīnās ar lielām enkura strāvas vērtībām. Vienkārši viļņa tinumi pieļauj samērā nelielas enkura strāvas, jo tajos  $2a=2$ . Turklāt tajos nav nepieciešami izlīdzinošie savienojumi.

Saliktos tinumus izmanto lielas jaudas mašīnās, kad nepieciešams izveidot daudz paralēlo zaru, kā arī mašīnās ar smagiem komutācijas apstākļiem.

### 2.3. ENKURA TINUMA EDS

EDS, kas inducējas enkura tinumā, nosaka formula (1.1.)

$$e = Blv.$$

Magnētiskā indukcija gaisa spraugā starp polu uzgaļiem un enkura virsmu ir mainīga. Parasti līdzstrāvas mašīnās tās sadalījumu attēlo līkne ABCD, kuras forma ir tuva trapecītei (2.50. att.). Laukums, kuru norobežo šī līkne un abscisu ass, ir proporcionāls magnētiskai plūsmai zem viena pola.

Tā kā indukcijas vērtība polu iedaļas robežās mainās, EDS noteikšanai lietderīgi izmantot vidējo indukciju  $B_{vid}$ , kas skaitliski vienāda ar taisnstūra AB'C'D augstumu, kas aprēķināts tā, lai laukumi ABCD un AB'C'D būtu vienādi. Tad EDS vidējā vērtība, kas inducējas vadā uz enkura virsmas, ir:

$$E_{\text{vid}} = B_{\text{vid}} l V.$$

Enkura tinums sastāv no  $N$  aktīviem vadiem, tomēr visa tinuma EDS nosaka vadu skaits vienā paralēlā zarā, kurā virknē slēgti  $N/2a$  vadi. Tāpēc enkura tinuma EDS var aprēķināt pēc formulas:

$$E_a = \frac{N}{2a} E_{\text{vid}} = \frac{N}{2a} B_{\text{vid}} l V, \quad (2.11.)$$

kur  $V$  – enkura aploces lineārais ātrums, m/s:

$$V = \frac{\pi D n}{60};$$

$l$  – enkura garums, m;

$n$  – enkura rotācijas frekvence,  $\text{min}^{-1}$ ;

$D$  – enkura diametrs, m.

Enkura aploces garumu var izteikt šādi

$$\pi D = \tau 2p,$$

tad

$$V = \frac{2\tau p n}{60}.$$

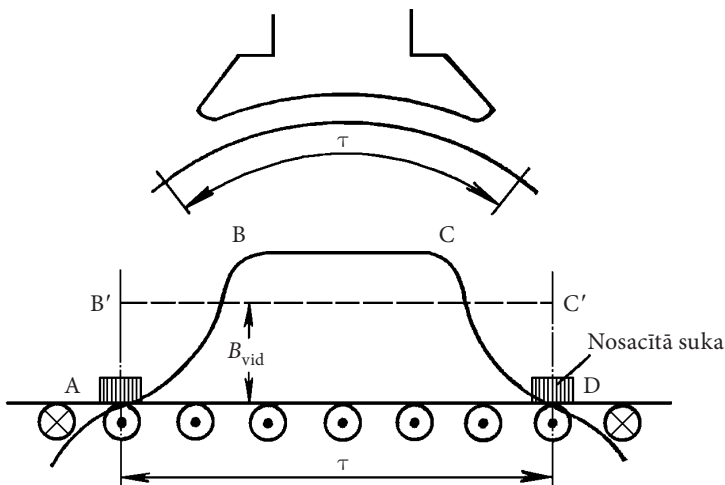
Ievietojot šo izteiksmi formulā (2.11.), iegūstam:

$$E_a = B_{\text{vid}} l \frac{\tau 2p n}{60} \frac{N}{2a}.$$

Reizinājums  $l\tau$  ir laukums, caur kuru plūst viena pola magnētiskā plūsma (2.51. att.), tāpēc

$$B_{\text{vid}} l\tau = \Phi,$$

kur  $\Phi$  – magnētiskā plūsma gaisa spraugā zem viena pola.



2.50. att. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā.

Rezultātā iegūstam:

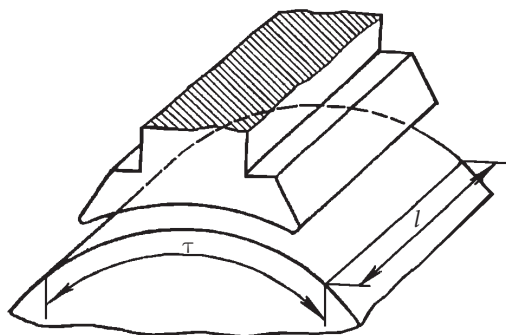
$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = c_e \Phi n, \quad (2.12.)$$

kur  $c_e$  – katrai mašīnai nemainīgs koeficients:

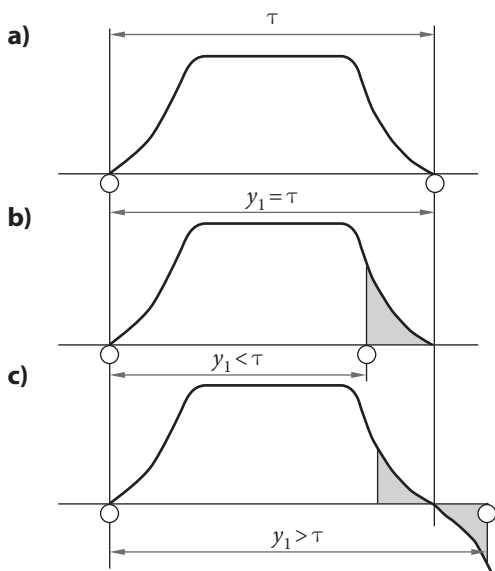
$$c_e = \frac{pN}{60a}. \quad (2.13.)$$

Ja ģenerators enkura rotācijas frekvenci uztur nemainīgu, EDS ir atkarīgs tikai no magnētiskās plūsmas saķēdējuma ar enkura tinuma sekcijām.

2.52. attēlā a parādīta enkura virsmas daļa un viena sekcija, kuras pirmais solis viēnāds ar pola iedaļu ( $y_1 = \tau$ ). Šajā gadījumā visa pola plūsma tiek saķēdēta ar sekciju,



2.51. att. Enkura tinuma EDS noteikšana.



2.52. att. Tinuma soļa ietekme uz inducētā EDS lielumu: a – pilns solis; b – saīsināts solis; c – pagarināts solis.

un tajā inducētais EDS ir maksimāls. Ja tinuma pirmais solis ir mazāks par pola iedaļu ( $y_1 < \tau$ ), sekcija tiek saķēdēta tikai ar daļu no pola plūsmas (2.52. att. b). Tāpēc sekcijā ar saīsinātu soli EDS ir mazāks salīdzinājumā ar iepriekšējo gadījumu. Enkura EDS tāpat samazinās, ja tinuma sekcijas izveido ar pagarinātu soli ( $y_1 > \tau$ ), jo tādā gadījumā sekciju šķēļ plūsmas, kas vērstas pretējos virzienos, un rezultējošā plūsma samazinās (2.52. att. c). Turklāt, veidojot sekcijas ar pagarinātu soli, pieaug vara patēriņš. Tāpēc praksē izmanto tikai sekcijas ar pilnu un saīsinātu soli.

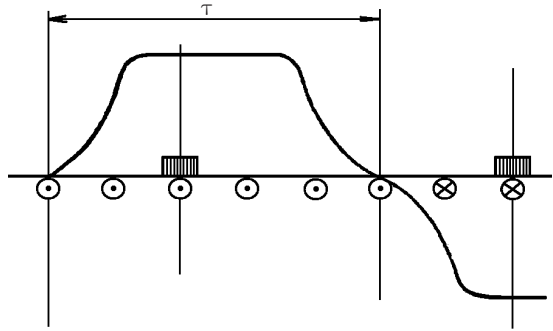
Enkura tinuma EDS lielumu ietekmē arī suku novietojums uz kolektora. Šī jautājuma noskaidrošanai vēlreiz izmantosim nosacīto suku jēdzienu (sk. 2.2.2. apakšnodaļu).

2.50. attēlā suku novietotas uz ģeometriskās neitrāles, tāpēc EDS virzieni visos vados, kas ietilpst paralēlā zarā, sakrīt. Tātad arī visa tinuma EDS iegūst, summējot vienā paralēlā zarā ietilpstošo sekciju EDS.

Ja nosacītās suku nobīdītas no ģeometriskās neitrāles (2.53. att.), tad paralēlā zarā izrādās ieslēgti enkura tinuma vadi ar dažādiem EDS virzieniem, kas ir par iemeslu visas mašīnas EDS samazināšanai.

Tāpēc var secināt, ka EDS maksimā-

lā vērtība ir, ja sukas atrodas uz ģeometriskās neitrāles. Kā tika norādīts 2.2.2. apakšnodaļā, tādām nosacīto suku stāvoklim uz enkura atbilst reālo suku stāvoklis uz kolektora pret galveno polu vidu.



2.53. att. Suku nobīdes ietekme uz mašīnas EDS.

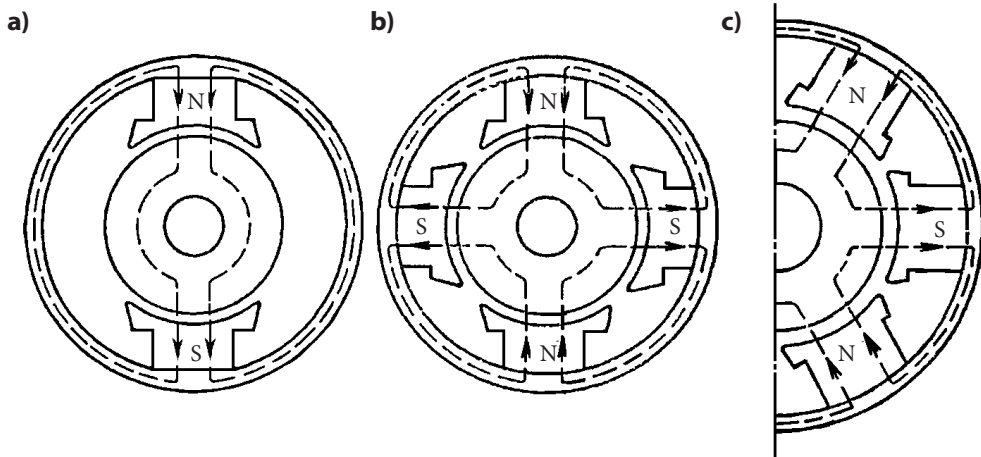
## 2.4. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS MAGNĒTISKAIS LAUKS

### 2.4.1. Magnētiskā ķēde un tās aprēķins

Mašīnas magnētisko lauku tukšgaitā rada ierosmes tinuma MS. Magnētiskā plūsma noslēdzas pa atsevišķiem magnētiskās sistēmas elementiem (statni, polu serdēm un uzgaļiem, gaisa spraugu, enkuru), kas veido mašīnas magnētisko ķēdi.

2.54. attēlā parādītas līdzstrāvas mašīnu magnētiskās sistēmas ar dažādu galveno polu skaitu. Visos gadījumos magnētiskā sistēma veido sazarotu simetrisku ķēdi. Katra pola magnētiskā plūsma sadalās divās daļās un virzās uz blakus poliem. Katra no šīm divām daļām iziet cauri visiem magnētiskās ķēdes posmiem.

2.55. attēlā parādīta četrpolu mašīnas magnētiskās ķēdes aprēķinu daļa ar šādiem



2.54. att. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskās sistēmas: a – divpolu; b – četrpolu; c – sešpolu.

posmiem: gaisa sprauga  $\delta$ , zobu slānis  $h_z$ , enkura serde  $L_a$ , polu serdes  $h_p$  un statora jūgs  $L_j$ .

Magnētiskā plūsma ir proporcionāla magnetizējošam spēkam  $F$  un apgriezti proporcionāla magnētiskās ķēdes visu posmu magnētisko pretestību summai  $\sum r_m$

$$\Phi = \frac{F}{\sum r_m}. \quad (2.14.)$$

No izteiksmes (2.12.) var noteikt galvenās magnētiskās plūsmas lielumu gaisa spraugā, kas nepieciešama uzdotā EDS inducēšanai enkura tinumā:

$$\Phi = \frac{60a E_a}{pN n}. \quad (2.15.)$$

Magnētiskās ķēdes aprēķina pamatzdevums ir noteikt ierosmes tinuma MS, kas mašīnā nodrošina vajadzīgo magnētisko plūsmu. Tā kā mašīnas magnētiskās ķēdes posmi atšķiras gan materiāla, gan izmēru ziņā, MS aprēķina katram posmam atsevišķi: gaisa spraugai  $F_\delta$ , zobu slānim  $F_z$ , enkura serdei  $F_a$ , polu serdēm  $F_p$  un statora jūgam (statnei)  $F_j$ .

Saskaitot kopā visu posmu MS, iegūst ierosmes tinuma MS:

$$F_f = F_\delta + F_z + F_a + F_p + F_j. \quad (2.16.)$$

Magnētiskās ķēdes aprēķinu daļa ietver divus polus, tāpēc arī apskatāmo ierosmes tinuma MS aprēķina polu pārim.

Jānorāda, ka magnētiskās plūsmas  $\Phi$ , ko rada  $F_p$  noteikšanu veic mašīnas tukšgaitas režīmam. Kā tiks parādīts turpmāk (sk. 2.4.3. apakšnodaļu), vajadzīgā EDS inducēšanai slodzes režīmā šo MS nāksies nedaudz palielināt.

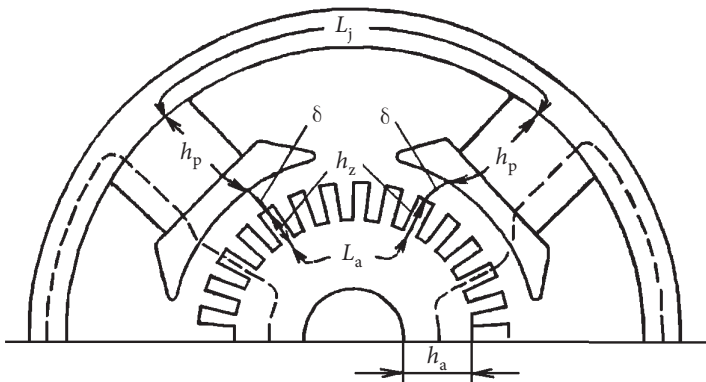
Gaisa spraugas MS nosaka pēc izteiksmes:

$$F_\delta = 2 \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta k_\delta, \quad (2.17.)$$

kur  $B_\delta$  – maksimālā indukcija gaisa spraugā;

$\delta$  – gaisa sprauga;

$k_\delta$  – gaisa spraugas koeficients, kas ievēro magnētiskās pretestības palielinā-



2.55. att. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskā ķēde.

šanas no enkura rievu ietekmes ( $k_\delta > 1$ );

$\mu_0$  – gaisa magnētiskā caurlaidība ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

Pārējo magnētiskās ķēdes posmu MS noteikšanai izmanto formulu:

$$F_x = H_x l_x,$$

kur  $H_x$  – magnētiskā lauka intensitāte, ko nosaka no magnetizēšanas līknēm;

$l_x$  – magnētiskās ķēdes posma garums.

Magnētiskā indukcija atsevišķos ķēdes posmos ir:

$$B_x = \frac{\Phi_x}{S_x},$$

kur  $\Phi_x$  – magnētiskā plūsma attiecīgajā posmā;

$S_x$  – posma šķēsgriezuma laukums.

Saskaņā ar 2.55. attēlu:

$$F_f = 2 \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta k_\delta + 2H_z h_z + H_a L_a + 2H_p h_p + H_j L_j. \quad (2.18.)$$

Ja galveno polu uzgaļos novieto kompensācijas tinumu (sk. 2.4.3. apakšnodaļu), tad bez minētajiem pieciem ķēdes posmiem apskata arī polu uzgaļu zobu slāni.

Magnētiskās ķēdes dažādu posmu MS ir dažādi un atkarīgi no to magnētiskās pretestības lieluma. Vislielākā magnētiskā pretestība ir gaisa spraugai. Pārējo feromagnētisko posmu magnētiskā pretestība lielā mērā atkarīga no tērauda piesātinājuma pakāpes. Vislielākā piesātinājuma pakāpe ir enkura zobu slānī, tāpēc arī šī posma magnētiskā pretestība ir lielāka salīdzinājumā ar citiem ķēdes feromagnētiskajiem posmiem.

Aprēķinātais ierosmes tinuma MS uz polu pāri nosaka vijumu skaitu vienā pola spolē:

$$W_f = \frac{F_f}{2i_f}, \quad (2.19.)$$

kur  $i_f$  – ierosmes tinuma strāva.

Paralēlas ierosmes mašīnām ar jaudu no 10 līdz 100 kW ierosmes strāva parasti ir no 3,5 % līdz 1 % no mašīnas nominālās strāvas, bet ar jaudu no 1 līdz 10 kW – 7–3,5 % robežās.

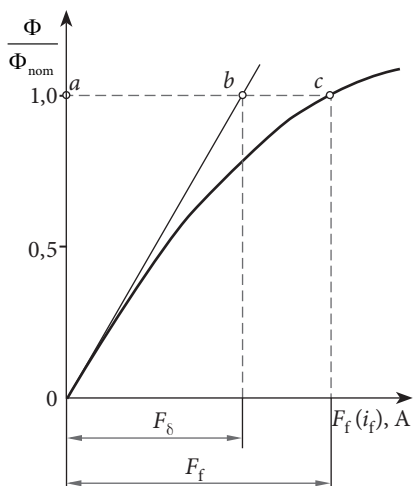
Virtnes ierosmes tinumā ierosmes strāva ir vienāda ar enkura strāvu.

Aprēķinot magnētisko ķēdi dažādām magnētiskās plūsmas  $\Phi$  vērtībām, var uzzīmēt mašīnas magnetizēšanas līkni  $\Phi = f(F_f)$  vai arī  $\Phi = f(i_f)$  (2.56. att.).

Magnetizēšanas līknes sākuma lineārā daļa atbilst nepiesātinātai magnētiskai sistēmai, kad magnētiskās ķēdes feromagnētisko posmu MS ir ļoti mazi salīdzinājumā ar gaisa spraugas MS. Tāpēc, novelkot pieskari magnetizēšanas līknes sākuma daļai, šī pieskare attēlo sakarību  $\Phi = f(F_\delta)$ .

Mašīnas magnētiskās ķēdes piesātinājuma pakāpi var raksturot ar piesātinājuma koeficientu (sk. 2.56. att.):

$$k_M = \frac{F_f}{F_\delta} = \frac{ac}{ab}. \quad (2.20.)$$



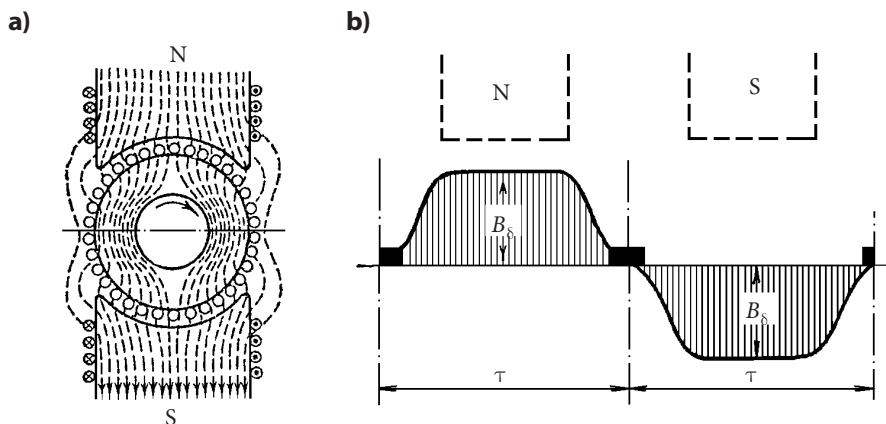
2.56. att. Mašīnas magnetizēšanas līkne.

Jo lielāks  $k_M$  (lielāka indukcijas vērtība atsevišķos magnētiskās ķēdes posmos), jo intensīvāk izmantoti magnētiskie materiāli, t. i., mazāki mašīnas izmēri, masa un izmaksas. Tomēr ievērojami palielināt  $k_M$  vērtību nav vēlams, jo tad palielinās ierosmes tinuma izmēri un līdz ar to arī visas mašīnas izmēri, kā arī palielinās elektriskie zudumi ierosmes tinumā. Tāpēc elektriskās mašīnas parasti projektē un izgatavo ar vidēju piesātinājuma pakāpi ( $k_M = 1,25-1,75$ ).

## 2.4.2. Enkura reakcija

Līdzstrāvas mašīnas tukšgaitas režīmā ( $I_a = 0$ ) darbojas tikai ierosmes tinuma magnetizējošais spēks  $F_p$ , kas rada simetrisku magnētiskā lauka sadalījumu pret polu asi (2.57. att.).

Slodzes režīmā enkura tinumā plūst strāva, kas arī rada attiecīgo MS. Magnētiskā lauka sadalījums, ko rada enkura MS, parādīts 2.58. attēlā. No attēla redzams, ka enkura tinuma MS vērstas pa suku līniju. MS sasniedz maksimālo vērtību uz suku līnijas (1. līkne 2.58. attēlā b), bet uz polu ass vienāds ar nulli. Tomēr indukcijas sadalījums gaisa spraugā sakrīt ar enkura MS sadalījumu tikai polu uzgaļu robežās. Starppolu telpā indukcija strauji samazinās (2. līkne 2.58. attēlā b), jo šeit magnētiskā pretestība ir lielāka.



2.57. att. Mašīnas magnētiskais lauks tukšgaitas režīmā: a – polu magnētiskais lauks; b – indukcijas sadalījums gaisa spraugā.

Enkura MS ir atkarīgs no aktīvo vadu skaita uz pola iedaļu  $\tau$  un strāvas lieluma  $i_a$  tajos:

$$F_a = \frac{N}{\pi D} i_a \tau, \quad (2.21.)$$

kur  $N/\pi D$  – vadu skaits uz enkura aploces garuma vienību;

$i_a$  – strāvas lielums enkura tinuma vienā paralēlā zarā.

Apzīmējot  $(N/\pi D)i_a = A$ , iegūsim:

$$F_a = A\tau. \quad (2.22.)$$

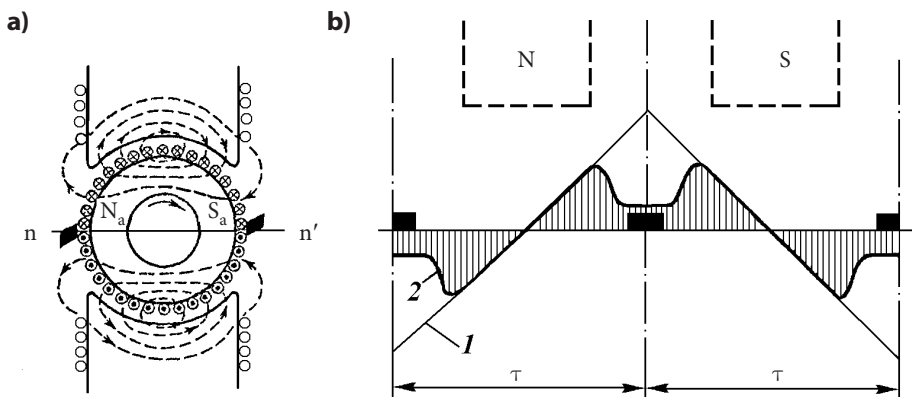
Formulā  $A$  – enkura lineārā noslodze, t. i., MS daļa uz vienu enkura aploces garuma vienību. Lineārās noslodzes vērtība atkarībā no mašīnas jaudas mainās plašās robežās – no 65 līdz 700 A/cm.

Tādā veidā slogotā līdzstrāvas mašīnā vienlaikus darbojas ierosmes MS  $F_f$  un enkura tinuma MS  $F_a$ .

Enkura tinuma MS ietekmi uz mašīnas galveno magnētisko lauku sauc par enkura reakciju. Tā izkropļo mašīnas galveno lauku, padarot to nesimetrisku pret polu asīm.

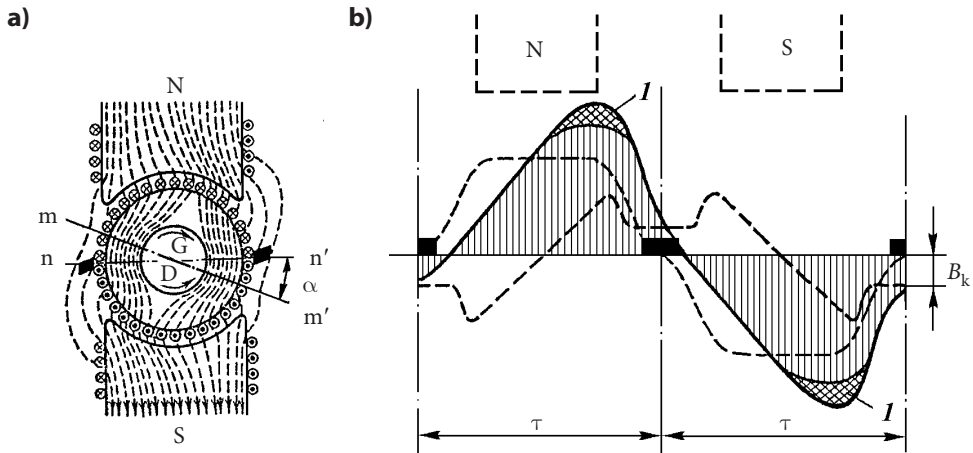
2.59. attēlā parādīts līdzstrāvas ģeneratora rezultējošā lauka sadalījums, ja tā rotors griežas pulksteņa rādītāju kustības virzienā. Tāds pats lauka sadalījums dzinējam atbilst arī gadījumā, ja rotors griežas pretējā virzienā.

Ja mašīnas magnētiskā sistēma nav piesātināta, tad enkura reakcija tikai izkropļo rezultējošo lauku, nemainot tā lielumu. Vienā pola malā un zobu slānī zem tās enkura reakcijas un ierosmes MS virzieni sakrīt, tāpēc šī magnētiskās ķēdes daļa tiek uzmagnetizēta. Otrā pola malā notiek magnētiskās ķēdes atmagnetizēšana. Turklāt rezultējošā magnētiskā plūsma it kā tiek pagriezta attiecībā pret polu asīm un fizikālā neitrāle  $mm'$  (līnija, kas iet caur enkura punktiem, kur indukcija vienāda ar nulli) nobīdās pret ģeometrisko neitrāli  $nn'$  par leņķi  $\alpha$  (2.59. att.). Rezultējošā lauka izkropļojuma pakāpe un arī fizikālās neitrāles novirze ir atkarīga no mašīnas slodzes. Līdzstrāvas ģeneratorā fizikālā neitrāle novirzās enkura griešanās virzienā, bet dzinēja režīmā – pretēji griešanās virzienam.



2.58. att. Enkura magnētiskais lauks (a) un indukcijas sadalījums gaisa spraugā (b).

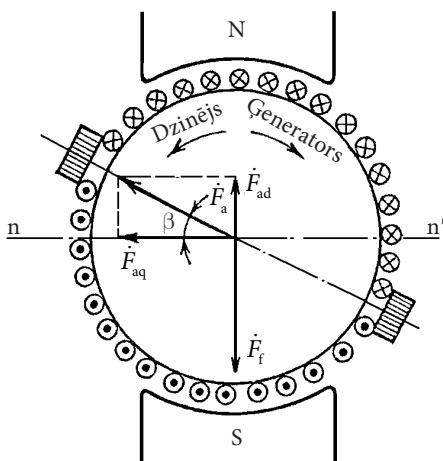




2.59. att. Rezultējošais magnētiskais lauks (a) un indukcijas sadalījums gaisa spraugā (b).

Rezultējošā lauka izkropļošana negatīvi ietekmē mašīnas darbību. Pirmkārt, tā pasliktina komutācijas apstākļus un palielina dzirksteļošānu (sk. 2.5. apakšnodaļu). Otrkārt, kā redzams 2.59. attēlā b, indukcija gaisa spraugā sadalās nevienmērīgi un nesimetriski, būtiski palielinoties zem uzmagnetizētās pola malas. Rezultātā to sekciju, kuras nokļūst minētajā zonā, EDS pieaug. Tas noved pie sprieguma palielināšanās starp blakus kolektora plāksnītēm. Pārslodzes gadījumā minētais spriegums var pārsniegt pieļaujamās robežas un starp plāksnītēm izveidojas elektriskais loks. Normāla mašīnas darbība tiek traucēta.

Izklāstītās enkura reakcijas darbības sekas attiecināmas uz mašīnām ar nepiesātinātu magnētisko ķēdi. Lielākai daļai mašīnu magnētiskā sistēma vairāk vai mazāk ir piesātināta. Tādā gadījumā vienā pola malā uzmagnetizēšana notiek mazākā mērā nekā atmagnetizēšana otrā malā.



2.60. att. Enkura MS sadalīšana divās komponentēs.

No vienas puses, tas labvēlīgi ietekmē indukcijas sadalījumu gaisa spraugā, padarot to vienmērīgāku, jo maksimālā indukcija samazinās par iesvītroto laukumu 1 (sk. 2.59. att. b). No otras puses, rezultējošā magnētiskā plūsma samazinās. Rezultātā ģeneratoriem samazinās EDS un spriegums uz spailēm, bet dzinējos krītas griezes moments.

Enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pastiprinās, ja suku tiek nobīdīts no ģeometriskās neitrāles. Tas izskaidrojams ar to, ka reizē ar suku nobīdi nobīdās arī enkura MS vektors (2.60. att.). Turklāt enkura MS bez šķērskomponentes satur arī garenkomponenti  $F_{ad}$ , kas sakrīt ar polu asi.

Ja mašina darbojas ģeneratora režīmā un sukas nobīda griešanās virzienā, komponente  $F_{ad}$  darbojas pretī ierosmes tinuma  $MS$   $F_f$  un samazina mašīnas galveno magnētisko plūsmu. Sukas nobīdot pretēji enkura griešanās virzienam,  $MS$   $F_{ad}$  un  $F_f$  darbojas saskaņoti, un tas noved pie nelielas mašīnas magnētiskās plūsmas palielināšanās.

Dzinēja režīmā suku nobīde izraisa pretēju reakciju. Piemēram, ja sukas nobīda enkura griešanās virzienā, magnetizējošie spēki  $F_{ad}$  un  $F_f$  darbojas saskaņoti.

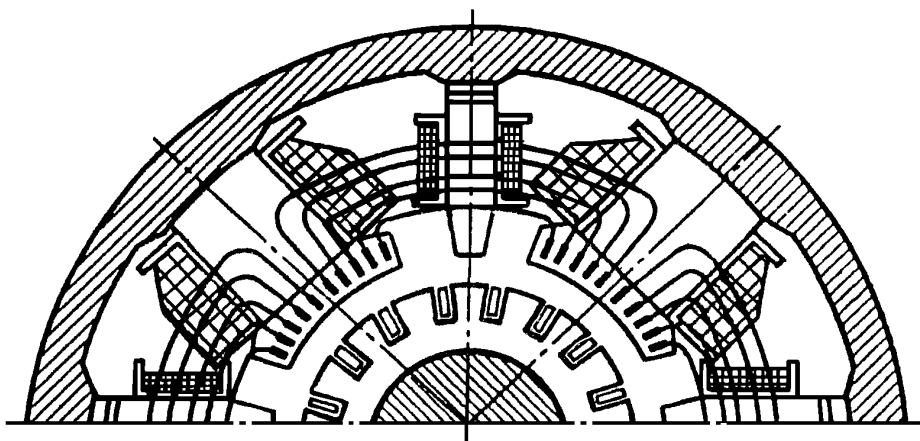
### 2.4.3. Enkura reakcijas ietekmes samazināšana

Enkura reakcijas negatīvās ietekmes mazināšanai, kā arī vispārīgai komutācijas procesa uzlabošanai (sk. 2.5.3. apakšnodaļu), līdzstrāvas mašīnās izmanto papildpolus, kurus uzstāda starp galvenajiem poliem. Papildpoli rada magnētisko plūsmu, kas ģeometriskās neitrāles zonā vērsta pretī enkura reakcijas plūsmai. Papildpolu tinumus slēdz virknē ar enkura tinumu, lai, mainoties enkura strāvai, mainītos arī papildpolu tinuma strāva.

Visefektīvāk indukcijas sadalījuma izkropļojumu gaisa spraugā var novērst, lietojot kompensācijas tinumu. Kompensācijas tinumu novieto galveno polu uzgaļos izveidotās rievās (2.61. att.) un ieslēdz virknē ar enkura tinumu tā, lai to radītie  $MS$  būtu vērsti viens otram pretī.

Līdzstrāvas mašīnā ar kompensācijas tinumu magnētiskais lauks, pārejot no tukšgaitas uz slodzes režīmu, praktiski nemainās. Tomēr kompensācijas tinums sarežģī mašīnas konstrukciju un sadārdzina to. Tāpēc kompensācijas tinumu izmanto tikai lielas jaudas mašīnās, sākot ar 150 kW jaudu, un tādās, kas darbojas ar lielām slodzes svārstībām.

Enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība mašīnā tiek kompensēta, palielinot ierosmes tinuma  $MS$ . Pieredze rāda, ka tukšgaitas režīmam aprēķinātais ierosmes tinuma  $MS$  jāpalielina aptuveni par 15–30 %. To panāk, palielinot vijumu skaitu polu spolēs salīdzinājumā ar pēc formulas (2.19.) aprēķināto.



2.61. att. Līdzstrāvas mašīnas statne ar kompensācijas tinumu.

## 2.5. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU KOMUTĀCIJA

### 2.5.1. Dzirksteļošanas cēloņi

Līdzstrāvas mašīnā suku un kolektors veido slīdošo kontaktu. Suku kontakta laukumu izvēlas, izejot no mašīnas strāvas un konkrētai suku markai pieļaujamā strāvas blīvuma.

Ja suka nepieguļ kolektoram visā laukumā, atsevišķās vietās rodas paaugstināts strāvas blīvums, kas izraisa dzirksteļošanu. Tāpat dzirksteļošanu var izraisīt palielināta strāva, kas plūst caur visu suku.

Iemeslus, kas izsauc dzirksteļošanu, var nosacīti iedalīt mehāniskos, potenciālos un komutācijas iemeslos.

Pie mehāniska rakstura iemesliem pieder: nepietiekams suku spiediens uz kolektoru, nepareiza suku konfigurācija, nelīdzena un netīra kolektora virsma un tā mešana, starplāksnīšu izolācijas izbīdīšanās, nekvalitatīvi traversu, pirkstu un sukturu stiprinājumi u. c.

Dzirksteļošana, kas saistīta ar potenciāliem iemesliem, rodas tad, ja spriegums starp blakus esošām kolektora plāksnītēm pārsniedz pieļaujamo robežu. Šādos gadījumos dzirksteļošana ir sevišķi bīstama, jo var izraisīt elektriskā loka rašanos uz kolektora.

Komutācijas iemesli saistīti ar fizikālajiem procesiem, kas notiek mašīnā, enkura tinuma sekcijām pārejot no viena paralēlā zara otrā.

Iepriekš minētais dzirksteļošanas iemeslu iedalījums ir nosacīts. Parasti dzirksteļošanu izraisa iemeslu komplekss.

Dzirksteļošanas iemeslu noskaidrošana jāsāk ar mehāniskiem iemesliem, jo tos ir vieglāk atklāt, veicot kolektora un suku aparāta apskati un pārbaudi. Vislielākās grūtības

2.4. tabula. Dzirksteļošanas pakāpes

Pakāpe	Dzirksteļošanas pakāpes raksturojums	Kolektora un suku stāvoklis
1	Dzirksteļošanas nav	Apdeguma pazīmes uz kolektora un sukām nav novērojamas
$1\frac{1}{4}$	Vāja punktveida dzirksteļošana zem nelielas sukas daļas	
$1\frac{1}{2}$	Vāja dzirksteļošana zem sukas lielākās daļas	Uz sukām un kolektora parādās apdeguma pēdas. Uz kolektora tās viegli notīrāmas ar benzīnu
2	Dzirksteļošana zem visas sukas. Pieļaujama tikai īslaicīgu pārslodžu gadījumā	Uz kolektora parādās apdeguma pēdas tumšā krāsā, kuras neizzūd, tīrot ar benzīnu
3	Ievērojama dzirksteļošana zem visas sukas, dzirkstelēm izlidojot ārpusē. Pieļaujama īslaicīgi tikai tiešās palaišanas vai reversa laikā	Ievērojamas kolektora krāsas izmaiņas un apdeguma pazīmes, kas neizzūd, tīrot ar benzīnu, kā arī suku apdegšana

rada ar komutācijas iemesliem saistītu dzirksteļošanas iemeslu atklāšana. Suku kontakta darbību būtiski ietekmē kolektora virsmas stāvoklis. Ilgas darbības laikā uz kolektora virsmas sarežģītu elektroķīmisku procesu rezultātā izveidojas plāna siltumizturīga plēvīte ar palielinātu stiprību. Parasti šai plēvītei ir tumši brūna krāsa. Plēvītes izveidošanās veicina mašīnas darbību bez dzirksteļošanas.

Līdzstrāvas mašīnas izgatavošanas laikā panāk un ieregulē darbību praktiski bez dzirksteļošanas. Tomēr mašīnas ekspluatācijas laikā, sukām un kolektoram nodilstot, iespējama neliela dzirksteļošana, kas mašīnai nav bīstama.

Gadījumos, kad parādās ievērojama dzirksteļošana, mašīna ir jāaptur, lai noskaidrotu dzirksteļošanas iemeslus un tos novērstu. Dzirksteļošanu pieņemts novērtēt ar pakāpēm. Katras pakāpes raksturojums dots 2.4. tabulā. Līdzstrāvas mašīnu dzirksteļošana nominālos darba režīmos nedrīkst pārsniegt pakāpi 1 ½.

## 2.5.2. Komutācijas procesa fizikālā aina

Līdzstrāvas mašīnas enkuram griežoties, tā kolektora plāksnītes periodiski nonāk kontaktā ar sukām. Turklāt sukas pāreja no vienas kolektora plāksnītes uz otru rada attiecīgās sekcijas pārslēgšanu citā paralēlā zarā un strāvas virziena maiņu tajā. Šo procesu kopumā pieņemts saukt par līdzstrāvas mašīnas komutāciju. Sekciju, kurā notiek komutācija, sauc par komutējamo sekciju, bet laika sprīdi, kurā tā notiek – par komutācijas periodu  $T_k$ . Šo laiku mēra sākot no brīža, kad kolektora plāksnīte saskaras ar suku, līdz mirklim, kad šī saskarsme beidzas:

$$T_k = \frac{60 b_s}{Kn b_k}, \quad (2.23.)$$

kur  $K$  – kolektora plāksnīšu skaits;

$n$  – enkura rotācijas frekvence;

$b_s$  – sukas platums;

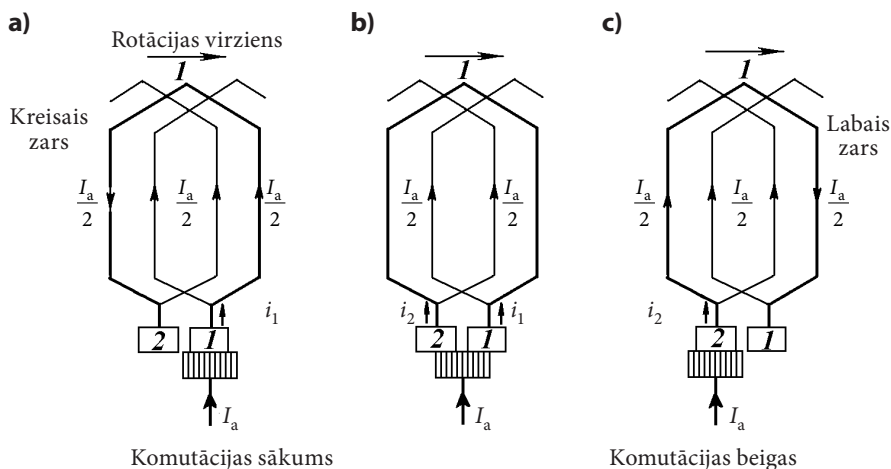
$b_k$  – attālums starp blakus esošo kolektora plāksnīšu viduspunktiem (kolektora iedaļa).

Apskatīsim komutācijas procesu, ja sukas atrodas uz ģeometriskās neitrāles, un pieņemot, ka komutējamā sekcijā komutācijas perioda laikā neinducējas EDS un sukas platums vienāds ar kolektora iedaļu.

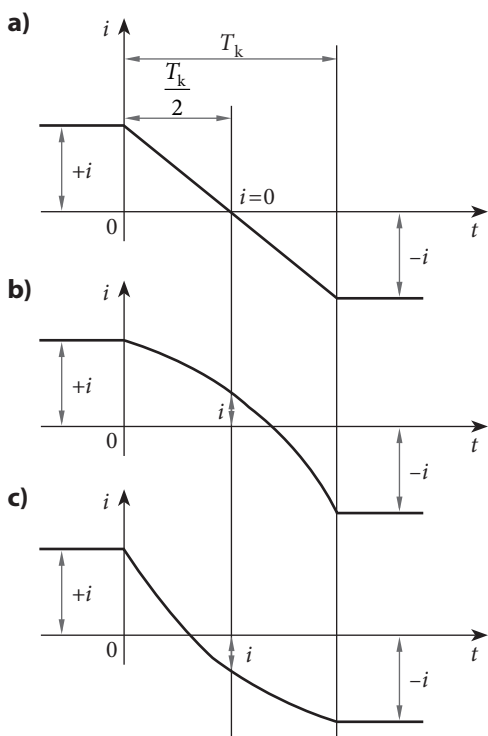
Komutācijas sākuma mirklī (2.62. att. a) suka pieskaras tikai plāksnītei 1, komutējamā sekcija 1 pieder kreisajam paralēlajam zaram, un strāva tajā vienāda ar  $i = I_a/2$ . Tālāk plāksnīte 1 pakāpeniski noskrien no sukas un tās vietā nāk plāksnīte 2. Rezultātā komutējamā sekcija tiek noslēgta īsi (2.62. att. b), un strāva tajā pakāpeniski samazinās. Tas izskaidrojams ar to, ka strāvas  $i_1$  un  $i_2$  plāksnītēs 1 un 2 ir apgriezti proporcionālas pretestībām starp suku un attiecīgajām plāksnītēm  $R_{s1}$  un  $R_{s2}$ :

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{R_{s2}}{R_{s1}}.$$

Komutējamā sekcijā strāva  $i$  vienāda ar strāvas  $i_1$  un  $i_2$  starpību.



2.62. att. Enkura tinuma sekcijas komutācijas process: a – komutācijas sākums; b – sekcija išslēgta; c – komutācijas beigas.



2.63. att. Lineāra (a), kavēta (b) un forsēta (c) komutācija.

perioda laikā paliek nemainīgs. Tas izskaidrojams ar to, ka, mainoties saskares laukumam, proporcionāli mainās arī strāva.

Reālos mašīnas darbības apstākļos komutācijas process notiek daudz sarežģītāk. Komutācijas periods ir ļoti mazs un ilgst  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  sekundes. Strāvai mainoties ar tik lielu

Pakāpeniski samazinoties plāksnītes 1 kontaktam ar suku, pretestība  $R_{s1}$  pieaug, bet strāva  $i_1$  samazinās. Tajā pašā laikā suka pāriet uz plāksnīti 2. Turklāt pretestība  $R_{s2}$  samazinās un strāva  $i_2$  pieaug. Brīdī, kad suku kontaktvirsmas ar abām kolektora plāksnītēm ir vienādas, arī  $R_{s1} = R_{s2}$  un komutējamā sekcijā strāva  $i$  kļūst vienāda ar nulli, jo  $i_1 = i_2$  vai  $i = i_1 - i_2 = 0$ . Komutācijas perioda beigās suka pilnībā pāriet uz plāksnīti 2 (2.62. att. c), bet strāva  $i$  sasniedz vērtību  $I_a/2$ . Tikai tās virziens, salīdzinot ar komutācijas perioda sākumu, ir mainījies uz pretējo, un komutējamā sekcija tagad atrodas tinuma labajā paralēlajā zarā.

Tādējādi komutācijas perioda laikā strāva komutējamā sekcijā mainās no  $+i$  līdz  $-i$ , bet tās maiņas grafiks attēlojams ir taisne (2.63. att. a). Šādu komutāciju sauc par lineāru.

Lineāra komutācija ir visvēlamākā, jo strāvas blīvums zem suku visa komutācijas

ātrumu, komutējamā sekcijā inducējas ievērojams pašindukcijas EDS:

$$e_L = -L_s \frac{di}{dt}, \quad (2.24.)$$

kur  $L_s$  – sekcijas induktivitāte.

Parasti katrā enkura rievā atrodas vairākas aktīvās malas, kas pieder dažādām sekcijām. Turklāt šīs sekcijas vienlaikus komutējas (2.64. att.). Jāņem vērā, ka parasti sukas platums ir lielāks par kolektora iedaļu un tāpēc katra suka noslēdz vairākas sekcijas.

Tā kā komutējamo sekciju malas atrodas vienā rievā, tad vienas sekcijas mainīgā magnētiskā plūsma inducē savstarpējās indukcijas EDS citās sekcijās.

$$e_M = -M_s \frac{di}{dt}, \quad (2.25.)$$

kur  $M_s$  – savstarpējā induktivitāte.

Abi minētie EDS komutējamā sekcijā veido rezultējošo

$$e_r = e_L + e_M,$$

kas kavē strāvas izmaiņu sekcijā un tiek saukts par reaktīvo EDS. Turklāt sakarā ar to, ka enkura reakcija izkropļo mašīnas magnētisko lauku un uz ģeometriskās neitrāles tā sasniedz zināmu vērtību  $B_k$  (sk. 2.59att.), komutējamā sekcijā inducējas EDS no ārējā lauka:

$$e_k = B_k 2lW_s V, \quad (2.26.)$$

kur  $l$  – sekcijas aktīvo malu garums;

$V$  – enkura aploces lineārais ātrums;

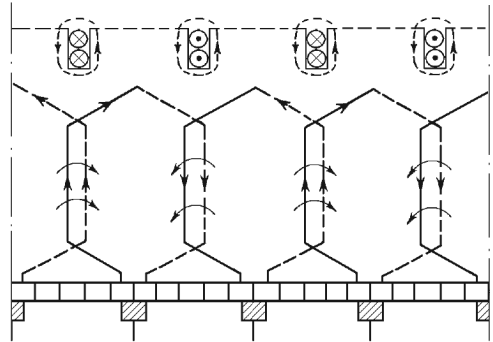
$W_s$  – sekcijas vijumu skaits.

Tādējādi komutējamā sekcijā inducējas EDS  $\Sigma e = e_r + e_k$ .

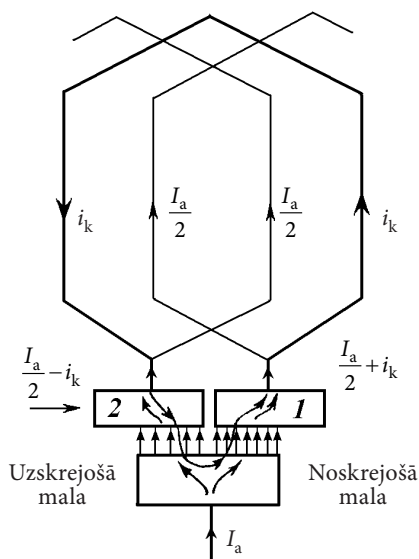
Ja mašīnā nav papildpolu, tad EDS  $e_r$  un  $e_k$  darbojas saskaņoti un komutējamā sekcijā rada papildstrāvu  $i_k$ , kas izraisa strāvas  $i$  izmaiņas aizkavēšanos. Tas izskaidrojams ar to, ka strāvu  $i_k$  galvenokārt izraisa reaktīvais EDS, kas, kā zināms, darbojas preti strāvas izmaiņai elektriskajā ķēdē.

Tāpēc brīdī, kad suka vienādi pārklāj plāksnītes 1 un 2, strāva komutējamā sekcijā nav vienāda ar nulli, bet sasniedz šādu vērtību vēlāk, un komutācija kļūst kavēta. Šim gadījumam atbilstošais grafiks parādīts 2.63. attēlā b.

Papildstrāva  $i_k$  noslēdzas komutējamā sekcijā caur suku kontaktu (sk. 2.65. att.). Tas noved pie tā, ka strāvas blīvums zem uzskrejošās sukas malas samazinās, bet zem noskrejošās malas palielinās un komutācijas perioda beigās var sasniegt ievērojamu lielumu,



2.64. att. Savstarpējās indukcijas EDS.



2.65. att. Strāvas blīvums zem suku kavētas komutācijas gadījumā.

kas savukārt palielina dzirksteļošanas iespējas. Situāciju vēl pasliktina tas, ka išslēgtā komutējamā sekcija tiek pārtraukta ar noskrejošo suku malu, zem kuras ir palielināts strāvas blīvums, un papildstrāvas uzkrātā magnētiskā lauka enerģija izlādējas dzirksteļu (loka) veidā. Šajā ziņā nedaudz forsēta komutācija (2.63. att. c), kad palielināts strāvas blīvums vērojams, komutējamo sekciju saslēdzot īsi, ir pieņemamāka nekā kavēta.

Pieaugot mašīnas slodzei, palielinās sekciju strāva un enkura reakcijas darbība. Kā redzams no izteiksmēm (2.24.–2.26.), tādā gadījumā pieaug arī EDS  $e_r$ ,  $e_k$ , strāva  $i_k$  un pastiprinās dzirksteļošana.

### 2.5.3. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni

Līdzstrāvas mašīnu neapmierinošas komutācijas galvenais iemesls ir papildstrāva:

$$i_k = \frac{\sum e}{\sum R_k},$$

kur  $\sum R_k$  – elektrisko pretestību summa papildstrāvai.

$\sum R_k$  ietver sevī sekciju un to savienojumu pretestību, suku un kolektora plāksnīšu pārejas kontakta pretestību un pašu suku pretestību. No šīm pretestībām vislielākā ir suku pārejas kontakta pretestība  $R_s$ , tāpēc aptuveni var pieņemt, ka

$$i_k = \frac{\sum e}{R_s}.$$

No šīs formulas redzams, ka samazināt strāvu  $i_k$  un tātad uzlabot komutāciju var, samazinot  $\sum e$  vai palielinot  $R_s$ .

Tāpēc, no komutācijas viedokļa, lietderīgi izmantot cietās suku (ogles-grafīta, grafīta un elektrografītētās), jo tām ir lielāka pārejas pretestība. Tomēr šādām sukām pieļaujama strāvas blīvums ir mazāks. Šis apstāklis prasa palielināt suku kontakta laukumu, pagarinot kolektoru. Turklāt cietākas suku veicina ātrāku kolektora nodilumu. Tāpēc suku ar relatīvi lielu pretestību izmanto tikai mašīnās ar lielu spriegumu un nelielu strāvu.

Vispārīgās lietošanas līdzstrāvas mašīnās parasti izmanto grafīta suku, smagiem komutācijas apstākļiem – ogles-grafīta vai elektrografītētās, bet zemsprieguma (līdz 30 V) mašīnās – vara vai bronzas-grafīta suku.

Kopējo EDS, kas inducējas komutējamā sekcijā, var samazināt ar dažādiem paņē-

mieniem.

Komutāciju ietekmē sukuas platums. Jo platāka suka, jo vairāk kolektora plāksnīšu tā pārklāj un vairāk sekciju vienlaikus komutējas. Tas palielina savstarpējās indukcijas EDS  $e_M$ . Tomēr nav ieteicams izmantot pārāk šauras sukuas, jo vajadzīgās kontaktvirsmas nodrošināšanai nākas palielināt sukuas garumu un tātad arī kolektora garumu. Ieteicams lietot sukuas, kas pārklāj 2–3 kolektora plāksnītes.

Reaktīvā EDS lielums komutējamā sekcijā ir atkarīgs arī no enkura tinuma tipa. Ja tinumu izveido ar saīsinātu soli ( $y_1 < \tau$ ), tad vienlaikus komutējamo sekciju malas atrodas dažādās rievās (2.66. att.), tāpēc savstarpējās indukcijas EDS samazināsies.

Tādā veidā, lietojot enkura tinumu ar saīsinātu soli, kā arī pakāpjveida tinumu (sk. 2.47. att.), var uzlabot komutāciju.

Reaktīvā EDS lielumu var vājināt, samazinot sekcijas induktivitāti  $L_s$ . To var panākt, samazinot sekcijas vijumu skaitu  $W_s$ , jo  $L_s$  ir proporcionāla  $W_s^2$ , kā arī izveidojot atvērtas un seklas enkura rievas. Tomēr šādā gadījumā mašīnas ekonomiskie rādītāji pasliktinātos. Tāpēc ir izdevīgāk komutācijas zonā radīt tādu magnētisko indukciju, kas komutējamā sekcijā inducētu ārējā lauka EDS  $e_k$ , vienādu ar reaktīvo EDS  $e_r$  un vērstu pretēji tam. Tādā gadījumā rezultējošais EDS komutējamā sekcijā varētu būt vienāds ar nulli un komutācija būtu lineāra.

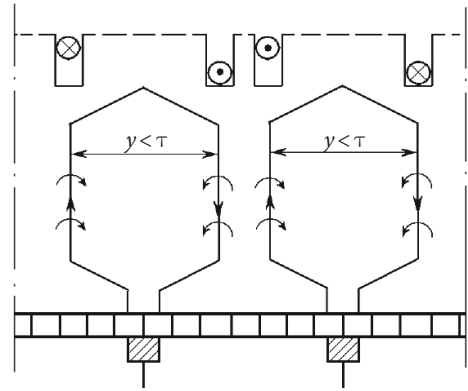
Lai komutācijas zonā radītu šādu indukciju, līdzstrāvas mašīnās ar jaudu virs 1 kW izmanto papildpolus, kurus novieto starp galvenajiem poliēm (2.67. att.).

Parasti papildpolu MS izvēlas par 15–30 % lielāku nekā enkura reakcijas MS, tas ir,  $F_{pp} = (1,15 - 1,3)F_a$ . Ja papildpolu MS izvēlas vēl lielāku, tad komutējamā sekcijā plūdis strāva, kas vērsta pretī sekcijas darba strāvai.

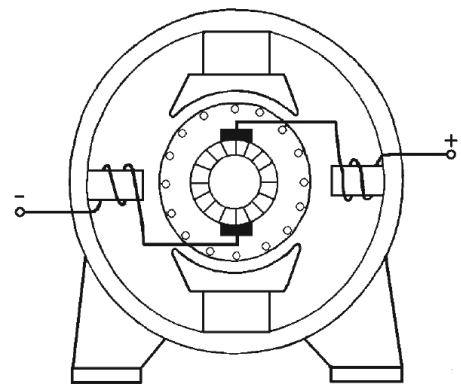
Tādā gadījumā komutācija ir forsēta, jo strāva sekcijā sasniedz nulles vērtību laikā, kas mazāks par  $T_k/2$  (sk. 2.63. att. c). Arī strāvas blīvums zem sukuas sadalās nevienmērīgi (sk. 2.68. att.). Stipri forsētas komutācijas gadījumā iespējama dzirksteļošana zem sukuas uzskrejošās malas.

Lai, mašīnas slodzei mainoties, notiktu reaktīvā EDS kompensācija, papildpolu tinumu ieslēdz virknē ar enkura tinumu (2.67. att.).

Papildpola polāritātei ģeneratorā jābūt

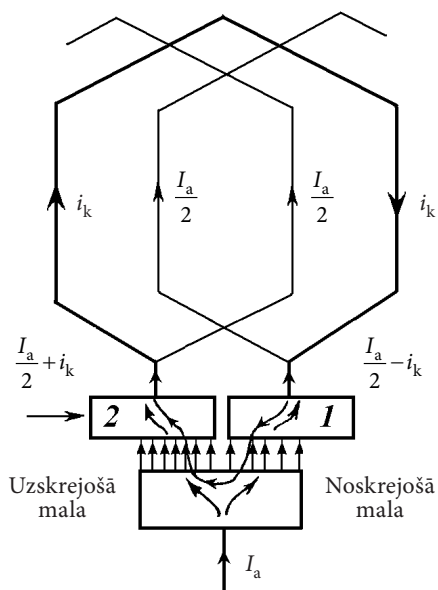


2.66. att. Tinuma soļa ietekme uz reaktīvo EDS.

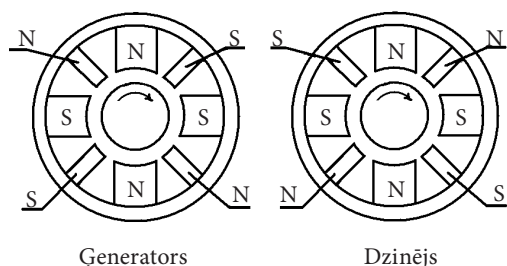


2.67. att. Papildpolu slēgums.

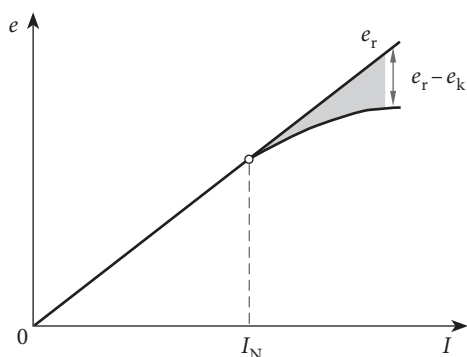




2.68. att. Strāvas blīvums zem sukas forsētas komutācijas gadījumā.



2.69. att. Papildpolu polaritāte dzinēja un ģeneratora režīmā.



2.70. att. Komutējamās sekcijas EDS izmaiņa atkarībā no slodzes strāvas.

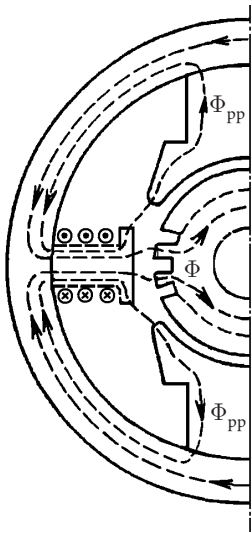
tādai pašai kā aiz tā rotācijas virzienā sekojošam galvenam polam, bet dzinējā – otrādi (2.69. att.).

Papildpoli parasti nodrošina apmierinošu komutāciju apstākļos, kad mašīnas strāva nepārsniedz nominālo. Pārslozdes gadījumā papildpolu magnētiskā ķēde piesātinās, reaktīvais EDS  $e_r$  turpina pieaugt proporcionāli slodzes strāvai, bet piesātinājumu dēļ ārējā lauka radītā EDS  $e_k$  palielināšanās nedaudz aizkavējas (2.70. att.).

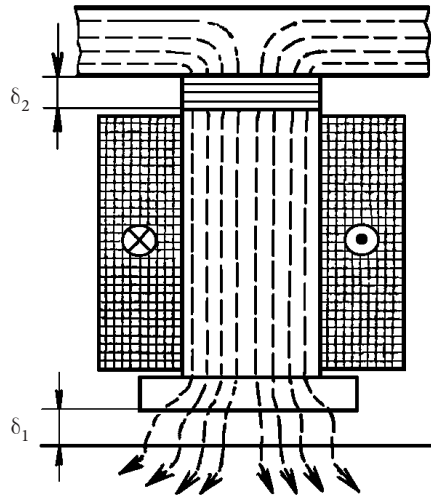
Rezultātā komutējamās sekcijās parādās EDS  $\Sigma e = e_r - e_k$ , un komutācija palēninās. Papildpola serdes piesātinājumu veicina izkliedes plūsma  $\Phi_{pp}$ , kas noslēdzas caur galveno polu serdēm un statni (2.71. att.). Lai šo izkliedes plūsmu samazinātu un panāktu lineārāku papildpolu plūsmas atkarību no slodzes strāvas, gaisa spraugu sadala divās daļās:  $\delta_1$  – starp enkuru un papildpola serdi un  $\delta_2$  – starp pola serdi un statni (2.72. att.). Šajā gadījumā sprauga  $\delta_2$  samazina izkliedes plūsmu  $\Phi_{pp}$ . Spraugu  $\delta_2$  veido, izmantojot starpliku no nemagnētiska materiāla.

Parasti līdzstrāvas mašīnās uzstādīto papildpolu skaits ir vienāds ar galveno polu skaitu. Izņēmumu veido speciālas nozīmes mašīnas, kurās papildpolu skaits var būt divas reizes mazāks nekā galveno polu skaits.

Mašīnās ar jaudu līdz 1 kW papildpolus nelieto. Šajās mašīnās komutācijas zonā nepieciešamās indukcijas radīšanai un reaktīvā EDS kompensēšanai sukas nobīda no ģeometriskās neitrāles  $nn'$  par leņķi  $\beta$  ģeneratoros rotācijas virzienā, bet dzinējos – pretēji rotācijas virzienam (2.73. att.). Sukas jānobīda tālāk aiz fizi-



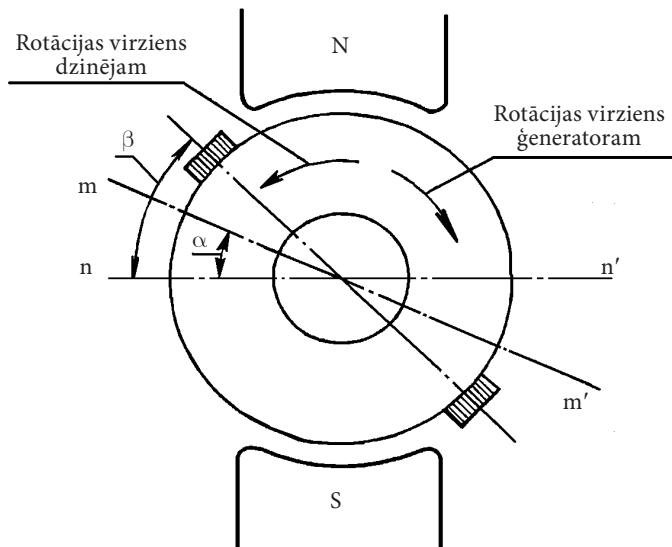
2.71. att. Papildpolu izkliedes plūsma.



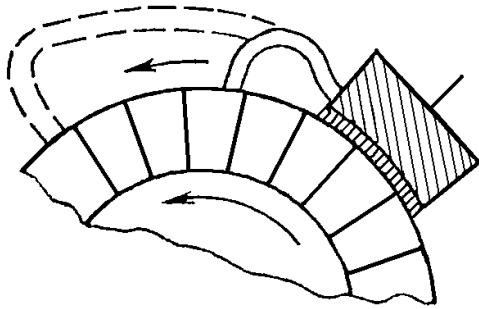
2.72. att. Papildpola spraugas sadalīšana divās daļās.

kālās neitrāles  $mm'$  tā, lai komutējamās sekcijās inducētos pietiekams EDS reaktīvā EDS kompensēšanai. Bet fizikālās neitrāles stāvoklis, mainoties slodzei, arī mainās. Tāpēc sukas parasti novieto vienā fiksētā stāvoklī, kas atbilst mašīnas vidējai slodzei ilgstošā režīmā.

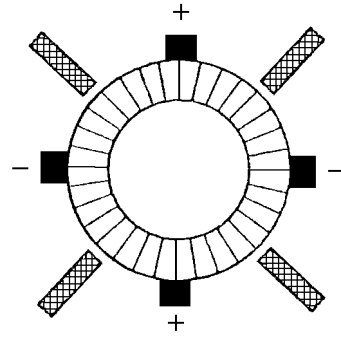
Jāatzīmē, ka, nobīdot sukas no ģeometriskās neitrāles, pastiprinās enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība.



2.73.att. Suku nobīde no ģeometriskās neitrāles.



2.74. att. Elektriskā loka izstiepšana.



2.75. att. Barjeru izvietošana starp sukām.

Mašīnām, kurām paredzēta rotācijas virziena maiņa (reverss), suku nobīde nav pieļaujama, jo, mainoties rotācijas virzienam, mainās arī fizikālās neitrāles nobīdes virziens. Tāpēc šādās mašīnās suku novieto uz ģeometriskās neitrāles.

Ievērojamas pārslodzes vai išslēguma gadījumā līdzstrāvas mašīnas komutācijai ir izteikti kavēti raksturs. Šādos gadījumos zem noskrejošās suku malas veidojas elektriskais loks. Tā kā kolektors rotē, loks mehāniski tiek izstiepts (2.74. att.).

Reizē ar mašīnas pārslodzi pastiprinās enkura reakcijas darbība un magnētiskā lauka sadalījums gaisa spraugā kļūst nevienmērīgs (sk. 2.59. att. b). Rezultātā spriegums starp blakus esošām kolektora plāksnītēm pieaug un var pārsniegt pieļaujamo. Tas viss veicina elektriskā loka veidošanos uz kolektora. Elektriskais loks var aptvert visu kolektora aploci un pāriet uz mašīnas korpusu. Tas ir ļoti bīstams stāvoklis un var izraisīt mašīnas avāriju.

Papildpoli un kompensācijas tinums mazina loka rašanās iespējas uz kolektora, bet nelabvēlīgos apstākļos pilnībā to novērst nevar. Tāpēc, lai pasargātu enkura tinumu no loka iedarbības, mašīnās ar biežām pārslodzēm starp kolektoru un tinumu izveido izolējošu ekrānu. Turklāt mašīnās uz kolektoru virza gaisa strūklu, kas loku novirza uz gultņu vairoga pusi. Lai radītu šķēršļus loka izplatībai, starp dažādas polaritātes sukām izveido barjeras no izolācijas materiāla (2.75. att.). Vislielākā bīstamība tam, ka uz kolektora izveidosies loks, ir išslēguma gadījumā. Šādā gadījumā ir svarīgi laikus pārtraukt mašīnas elektrisko ķēdi. Šim nolūkam enkura tinuma ķēdē ieslēdz ātrdarbīgus automātslēdzus.

Sakarā ar to, ka līdzstrāvas mašīnas komutācija saistīta ar visai sarežģītiem procesiem, praktiski nav iespējams iepriekš veikt tās precīzu aprēķinu, piemēram, nosakot papildpolu spraugu  $\delta_2$ . Tāpēc aprēķinu rezultātus bieži nākas koriģēt, veicot komutācijas eksperimentālu iestatīšanu.

## 2.6. LĪDZSTRĀVAS ĢENERATORI

### 2.6.1. Vispārīgi jautājumi

Atkarībā no ierosmes lauka radīšanas veida līdzstrāvas mašīnas iedala mašīnās ar elektromagnētisko un magnetoelektrisko ierosmi.

Mašīnās ar elektromagnētisko ierosmi galveno lauku rada ierosmes tinums, kas var būt ieslēgts pēc dažādām shēmām. Atkarībā no shēmas šādus ģeneratorus iedala neatkarīgas ierosmes un pašierosmes ģeneratoros.

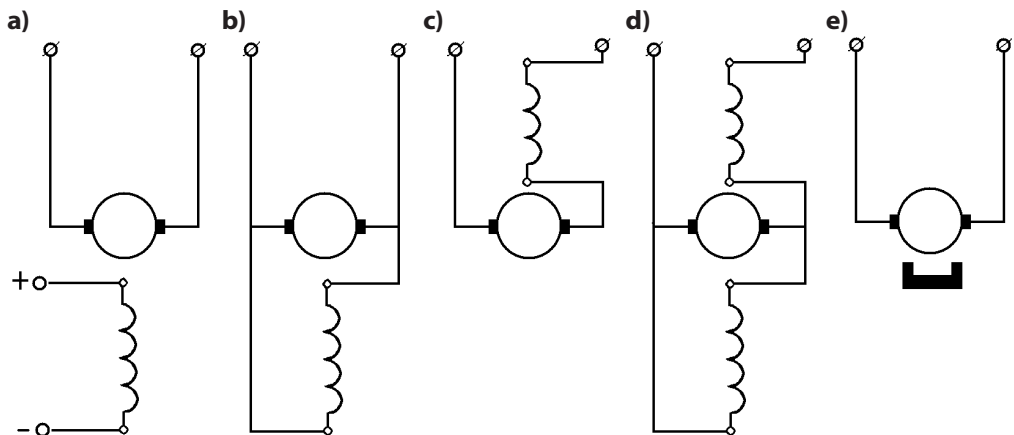
Neatkarīgas ierosmes ģeneratoros (2.76. att. a) ierosmes tinumu baro neatkarīgs līdzstrāvas avots, piemēram, akumulatoru baterija vai taisngriezis. Pašierosmes mašīnās ierosmes tinums tiek barots no enkura spailēm, un atkarībā no tā, kā ierosmes tinums slēgts ar enkura tinumu, izšķir:

- paralēlas ierosmes ģeneratori, kuriem ierosmes tinums pieslēgts paralēli enkura spailēm (2.76. att. b);
- virknes ierosmes ģeneratori, kuriem ierosmes tinums un enkura tinums slēgti virknē (2.76. att. c);
- jauktas ierosmes ģeneratori, kuriem ir divi ierosmes tinumi, no kuriem viens slēgts virknē, bet otrs paralēli enkura tinumam (2.76. att. d).

Ģeneratorus ar magnetoelektrisko ierosmi izgatavo ar pastāvīgo magnētu poliēm bez ierosmes tinuma (2.76. att. e).

Līdzstrāvas ģeneratora darbības laikā tā enkura tinumā inducējas EDS  $E_a$ . Pieslēdzot slodzi, enkura tinumā plūst strāva  $I_a$ , bet spriegumam uz ģeneratora spailēm spēkā ir vienādojums:

$$U = E_a - I_a \Sigma R. \quad (2.27.)$$



2.76. att. Neatkarīgas ierosmes (a), paralēlas ierosmes (b), virknes ierosmes (c), jauktas ierosmes (d) un magnetoelektriskas ierosmes (e) līdzstrāvas ģeneratoru shēmas.

Šeit kopējā pretestība  $\Sigma R$  vispārīgā gadījumā sastāv no enkura ķēdes visu posmu pretestībām:

$$\Sigma R = R_a + R_{pp} + R_k + R_v + R_s, \quad (2.28.)$$

kur  $R_a$  – enkura tinuma pretestība;  
 $R_{pp}$  – papildpolu tinuma pretestība;  
 $R_k$  – kompensācijas tinuma pretestība;  
 $R_v$  – virknes ierosmes tinuma pretestība;  
 $R_s$  – suku kontaktpretestība.

Ja mašīnā nav kāda no minētiem tinumiem, tad izteiksmē (2.28.) attiecīgā pretestība neietilpst.

Generators enkuru griež primārais dzinējs, kas uz vārpstas rada griezes momentu  $M_1$ . Tukšgaitas režīmā, kad  $I_a = 0$ , enkura griešanai nepieciešams relatīvi mazs griezes moments  $M_0$  (tukšgaitas moments), kas tiek patērēts berzes pārvarēšanai.

Pieslēdzot ģeneratoram slodzi, enkura tinuma vadus parādās strāva  $i_a = I_a/2a$ . Šie vadi atrodas magnētiskā laukā un uz tiem darbojas elektromagnētiskie spēki (2.77. att.):

$$F_{em} = B_{vid} l i_a,$$

kur  $B_{vid}$  – vidējā indukcijas vērtība gaisa spraugā;  
 $l$  – enkura garums.

Pēc kreisās rokas likuma nosakot šo spēku virzienu, var pārliecināties, ka to radītais elektromagnētiskais griezes moments  $M$  vērsti pretēji primārā dzinēja momentam  $M_1$ .

Momenta  $M$  vērtību aprēķina pēc formulas:

$$M = F_{em} \frac{DN}{2} = B_{vid} l i_a \frac{DN}{2},$$

kur  $N$  – aktīvo vadu skaits enkura tinumā.

Nemot vērā, ka  $i_a = I_a/2a$ ,  $\pi D = 2p\tau$ , bet plūsma  $\Phi = B_{vid} l \tau$ , iegūstam:

$$M = B_{vid} l \frac{I_a}{2a} \frac{2p\tau}{2\pi} N = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c_m \Phi I_a, \quad (2.29.)$$

kur  $c_m = \frac{pN}{2\pi a}$  – katrai mašīnai nemainīgs koeficients.

Tādējādi, ja rotācijas frekvence ir nemainīga ( $n = const$ ), primārā dzinēja griezes momentu  $M_1$  līdzsvaro mašīnas tukšgaitas moments  $M_0$  un elektromagnētiskais moments

$$M_1 = M_0 + M. \quad (2.30.)$$

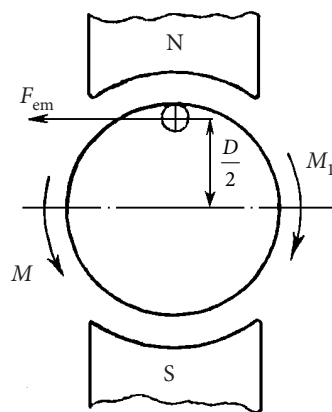
Izteiksmes (2.27.) un (2.30.) ir attiecīgi līdzstrāvas ģenerators sprieguma un momentu vienādojums stacionāram darba režīmam.

Elektriskās mašīnas darba režīmu, kādam tā paredzēta un kādā var normāli darboties visu paredzēto laiku, sauc par nominālo darba režīmu. To raksturo tādi parametri kā nominālā jauda  $P_N$ , nominālais spriegums  $U_N$ , nominālā strāva  $I_N$ , nominālā rotācijas frekvence  $n_N$  u. c.

Par ģeneratora darbības īpatnībām spriež pēc tā raksturlīknēm, kuras attēlo sakarības starp minētajiem pamatlielumiem. Tā kā ģeneratori parasti darbojas ar nemainīgu rotācijas frekvenci, tad, arī apskatot raksturlīknes, pieņem  $n = \text{const}$ .

Ģeneratoru galvenās raksturlīknes ir šādas:

- tukšgaitas raksturlīkne – ģeneratora sprieguma atkarība no ierosmes stāvas tukšgaitas režīmā,  $U_0 = f(i_f)$ , ja  $I = 0$  un  $n = \text{const}$ ;
- slodzes raksturlīkne – ģeneratora sprieguma atkarība no ierosmes strāvas slodzes režīmā,  $U = f(i_f)$ , ja  $I = \text{const} \neq 0$  un  $n = \text{const}$ ;
- ārējā raksturlīkne – ģeneratora sprieguma atkarība no slodzes strāvas,  $U = f(I)$ , ja  $R_f = \text{const}$  un  $n = \text{const}$ ;
- regulēšanas raksturlīkne – ierosmes strāvas atkarība no slodzes strāvas, ja spriegums uz ģeneratora spailēm tiek uzturēts nemainīgs,  $i_f = f(I)$ , ja  $U = \text{const}$  un  $n = \text{const}$ .



2.77. att. Ģeneratora elektromagnētiskais moments.

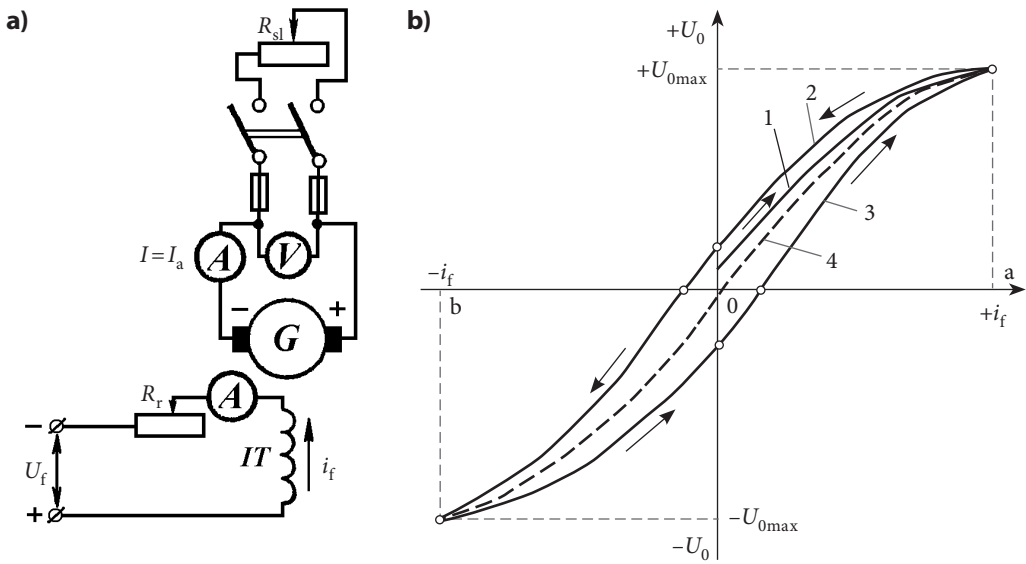
## 2.6.2. Neatkarīgas ierosmes ģenerators

Neatkarīgas ierosmes ģeneratora elektriskā shēma parādīta 2.78. attēlā a. Ierosmes ķēdē ieslēgtais reostats  $R_r$  paredzēts ierosmes strāvas un tātad arī ģeneratora sprieguma regulēšanai. Ierosmes tinums tiek barots no akumulatora baterijas, taisngrieža vai cita ģeneratora, kuru tādā gadījumā sauc par ierosinātāju.

**Tukšgaitas raksturlīkne.** Uzņemot tukšgaitas raksturlīkni, slodze ir atslēgta ( $I = 0$ ). Ieregulē nominālo rotācijas frekvenci un uztur to nemainīgu visa eksperimenta laikā. Tad pakāpeniski palielina ierosmes strāvu no nulles līdz vērtībai  $+i_f = 0a$ , kad  $U \approx 1,15U_N$ . Tā uzņem likni 1 (2.78. att. b). Samazinot ierosmes strāvu līdz nullei, izmaina polaritāti un atkal to palielina līdz  $-i_f = 0b$ , un iegūst likni 2. Mēģinājumu turpina pretējā virzienā, t. i., samazina ierosmes strāvu no  $-i_f$  līdz 0 un atkal palielina līdz  $+i_f$ . Rezultātā iegūst likni 3, kas kopā ar likni 2 veido histerēzes cilpu. Novelkot vidējo līniju starp liknēm 2 un 3, iegūstam ģeneratora aprēķinu tukšgaitas raksturlīkni 4.

Šis raksturlīknes lineārā daļa atbilst nepiesātinātai magnētiskai ķēdei. Turpinot palielināt strāvu  $i_f$ , mašīna piesātinās, un raksturlīkne kļūst nelineāra. Sakarība  $U_0 = f(i_f)$  citā mērogā atkārtο mašīnas magnetizēšanas raksturlīkni (sk. 2.4.1. apakšnodaļu).

**Slodzes raksturlīkne.** Šī raksturlīkne attēlo sakarību starp spriegumu uz ģeneratora spailēm un ierosmes strāvu, ja slodzes strāva un rotācijas frekvence ir nemainīga.

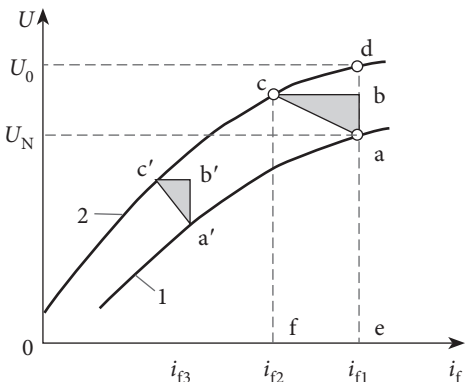


2.78. att. Neatkarīgas ierosmes ģenerators shēma (a) un tukšgaitas raksturlikne (b).

Šādos apstākļos spriegums uz ģenerators spailēm ir mazāks nekā EDS, kas aprēķināts pēc izteiksmes (2.27). Tāpēc slodzes raksturlikne 1 atrodas zemāk par tukšgaitas raksturlikni 2 (2.79. att.). Ja no punkta *a*, kas atbilst nominālajam spriegumam, uz augšu atliek nogriezni  $ab = I_a \Sigma R$  un novelk horizontālu nogriezni *bc* līdz krustpunktam ar tukšgaitas raksturlikni, iegūst reaktīvo trīsstūri *abc*.

Ģeneratoram darbojoties tukšgaitas režīmā ar ierosmes strāvu  $i_{f1}$ , spriegums uz spailēm  $U_0 = de$ , bet, pieslēdzot slodzi un nemainot ierosmi, spriegums krītas līdz  $U_N = ae$ . Sprieguma samazināšanās šajā gadījumā notiek divu iemeslu dēļ: pirmkārt, dēļ sprieguma krituma enkura ķēdē un, otrkārt, enkura reakcijas atmagnetizējošās darbības dēļ. Zinot sprieguma kritumu enkura ķēdē  $I_a \Sigma R$ , var noteikt slodzes režīmam atbilstošo EDS:

$$E = U + I_a \Sigma R.$$



2.79. att. Neatkarīgas ierosmes ģenerators slodzes raksturlikne.

Šis EDS 2.79. attēlā parādīts ar nogriezni *be*. Ģeneratora EDS slodzes režīmā ir mazāks nekā tukšgaitas režīmā ( $be < de$ ). Tas izskaidrojams ar enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību. Kvantitatīvi to var novērtēt ar nogriezni *bc*. Tukšgaitā EDS radišanai nepieciešama mazāka ierosmes strāva ( $i_{f2} < i_{f1}$ ). Tāpēc nogrieznis *fe* atbilst ierosmes strāvai, kas nepieciešama enkura reakcijas atmagnetizējošās darbības kompensēšanai.

Reaktīvā trīsstūra malas nosaka faktorus, kuri izraisa ģenerators sprieguma samazi-

nāšanos slodzes režīmā: ab – spriegumu kritumu enkura ķēdē un bc – enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību. Reaktīvais trijstūris a'b'c' konstruēts citai ierosmes strāvas vērtībai ( $i_{f3}$ ). Trīsstūra mala a'b' ir palikusi nemainīga a'b' = ab, jo slodzes strāva ir nemainīga, bet nogrieznis b'c' ir samazinājies, salīdzinot ar bc, tā kā, samazinoties ierosmes strāvai, krītas arī magnētiskās ķēdes piesātinājums un enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība.

**Ārējā raksturlīkne.** Šī raksturlīkne attēlo sakarību starp ģenerators spriegumu un slodzes strāvu. Uzņemot minēto raksturlīkni, ģeneratoru griež ar nominālo rotācijas frekvenci. Vispirms iestata nominālo režīmu ( $U = U_N, I = I_N$ ), tad slodzi samazina līdz tukšgaitai ( $I = 0$ ). Regulēšanas reostata  $R_r$  pretestību ierosmes ķēdē šajā laikā nemaina.

Neatkarīgas ierosmes ģenerators ārējā raksturlīkne parādīta 2.80. attēlā a. Spriegums uz ģenerators spailēm, slodzei pieaugot, samazinās sakarā ar enkura reakcijas atmagnetizējošās darbības pastiprināšanos un sprieguma krituma palielināšanos enkura ķēdē.

Ārējās raksturlīknes slīpumu pret abscisu asi novērtē ar nominālo sprieguma izmaiņu, noņemot slodzi

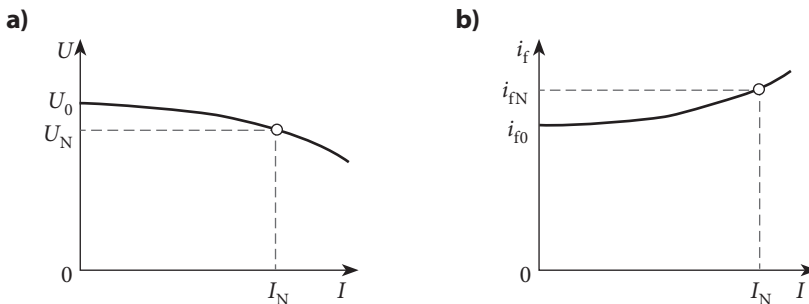
$$\Delta U_N = \frac{U_0 - U_N}{U_N} 100 \% \quad (2.31.)$$

Parasti neatkarīgas ierosmes ģeneratoriem  $\Delta U_N = 5 - 10 \%$ .

**Regulēšanas raksturlīkne.** Raksturlīkne  $i_f = f(I)$  parāda, kā jāregulē ierosmes tinuma strāva, lai, slodzei mainoties, spriegums uz ģenerators spailēm paliktu nemainīgs.

Ģenerators tukšgaitā iestata tādu ierosmes strāvu  $i_{f0}$ , kas nodrošina nominālo spriegumu uz spailēm. Tad pakāpeniski palielina slodzi, vienlaikus palielinot ierosmes strāvu, lai saglabātos  $U = const$  (2.80. att. b).

Neatkarīgas ierosmes ģenerators galvenais trūkums saistīts ar to, ka tā ierosmes tinuma barošana nepieciešams atsevišķs avots. Priekšrocību vidū jāmin ārējās raksturlīknes pietiekams stingrums un iespēja regulēt spriegumu plašā diapazonā.



2.80. att. Neatkarīgas ierosmes ģenerators ārējā (a) un regulēšanas (b) raksturlīkne.



### 2.6.3. Paralēlas ierosmes ģenerators

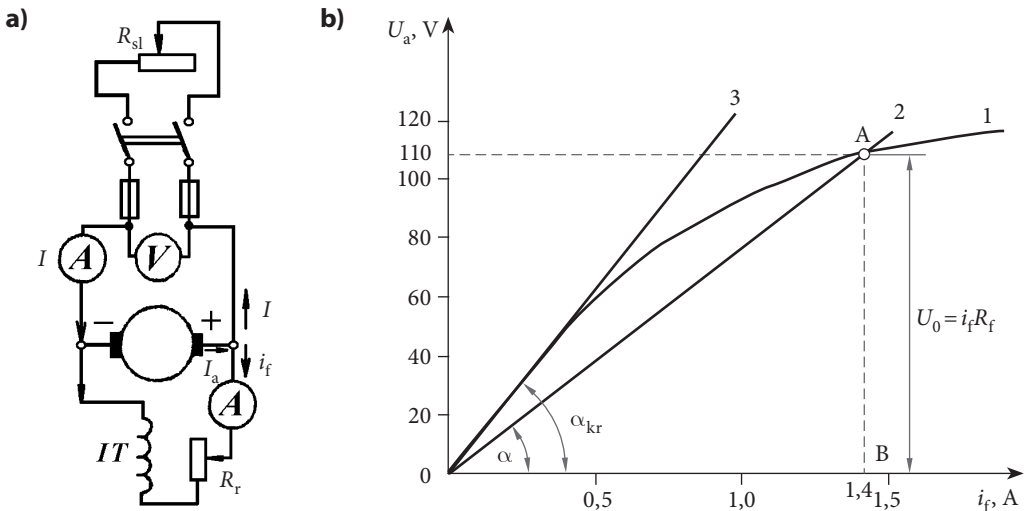
Līdzstrāvas ģeneratoru pašierosme balstās uz to magnētiskās ķēdes spēju saglabāt paliekošo magnētismu 2–3 % robežās no pilnās plūsmas.

Paliekošā magnētiskā plūsma inducē enkura tinumā nelielu EDS, kas ierosmes tinumā rada ierosmes strāvu  $i_f$ . Ja ierosmes tinuma MS radītā plūsma sakrīt ar paliekošo plūsma, polu kopējā plūsma palielinās. Tas savukārt izraisa EDS pieaugumu un jaunu ierosmes strāvas palielināšanos. Šis process turpinās tik ilgi, kamēr ģeneratora enkura EDS kļūst vienāds ar sprieguma kritumu ierosmes ķēdē, t. i.,  $i_f R_f = U_0$ .

2.81. attēlā a parādīta paralēlas ierosmes ģeneratora shēma, bet 2.81. attēlā b tukšgaitas raksturlīkne (likne 1) un sprieguma kritums ierosmes tinumā (taisne 2). Krustpunkts A atbilst pašierosmes procesa beigām, jo šajā punktā  $U_0 = i_f R_f$ .

Taisnes  $i_f R_f = f(i_f)$  slīpuma leņķis  $\alpha$  pret abscisu asi ir proporcionāls ierosmes ķēdes pretestībai  $R_f$ . Palielinot ierosmes ķēdes pretestību, tiek sasniegta vērtība, kad taisne  $i_f R_f = f(i_f)$  pārvēršas par tukšgaitas raksturlīknes pieskari (taisne 3). Turpinot palielināt pretestību  $R_f$  ģeneratora pašierosināšanās nav iespējama.

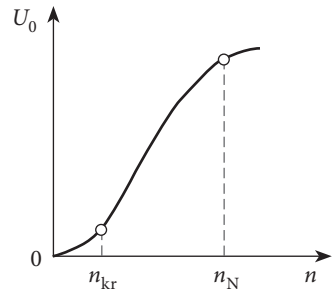
Jāatzīmē, ka ģeneratora pašierosināšanās iespējama tikai tad, ja enkura rotācijas frekvence sasniedz kritisko vērtību  $n_{kr}$ . Šis nosacījums izriet no ģeneratora pašierosmes raksturlīknes  $U_0 = f(n)$ , ja  $R_f = const$  (2.82. att.). No šīs raksturlīknes redzams, ka mazām rotācijas frekvencēm ( $n < n_{kr}$ ) spriegums pieaug lēni, jo to pamatā nosaka paliekošā magnētisma plūsma. Rotācijas frekvencei sasniedzot nominālo vērtību, sprieguma pieaugums samazinās. Tas izskaidrojams ar mašīnas magnētiskās ķēdes piesātināšanos. Kritiskās rotācijas frekvences  $n_{kr}$  vērtība ir atkarīga no ierosmes pretestības  $R_f$  lieluma un, tai pieaugot, arī  $n_{kr}$  palielinās.



2.81. att. Paralēlas ierosmes ģeneratora shēma (a) un tukšgaitas raksturlīkne (b).

Tādējādi ģenerators pašierosmes process iespējams, izpildot šādus nosacījumus:

- mašīnas magnētiskajā sistēmā jābūt paliekošam magnētismam;
- ierosmes tinums jāpievieno enkuram tā, lai radītā magnētiskā plūsma sakristu ar paliekošā magnētisma plūsmu;
- ierosmes ķēdes pretestībai jābūt mazākai par kritisko;
- enkura rotācijas frekvencei jābūt lielākai par kritisko.



2.82.att. Pašierosmes raksturliktne.

Paralēlas ierosmes ģenerators slodzes un regulēšanas raksturliktne praktiski neatšķiras no neatkarīgas ierosmes ģenerators attiecīgajām raksturliktnēm.

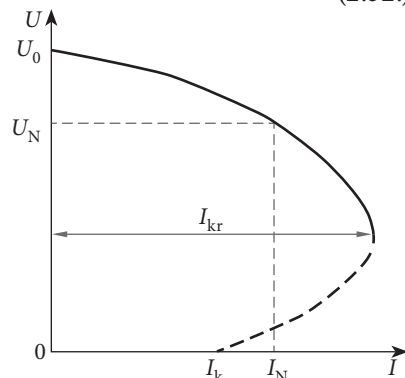
**Ārējā raksturliktne.** Paralēlas ierosmes ģenerators ārējā raksturliktne (2.83. att.) ir mazāk cieta salīdzinājumā ar neatkarīgas ierosmes ģenerators likni. Tas izskaidrojams ar to, ka bez tiem iemesliem, kas izraisa sprieguma samazināšanos neatkarīgas ierosmes ģenerators (enkura reakcija un sprieguma kritums enkura ķēdē), darbojas vēl trešais iemesls – ierosmes strāvas samazināšanās, kuru izraisa sprieguma samazināšanās un kā sekas arī ierosmes strāvas samazināšanās. Ar to izskaidrojams arī tas apstāklis, ka, pakāpeniski samazinot slodzes pretestību, strāva pieaug līdz kritiskai vērtībai  $I_{kr}$  un tad, neskatoties uz pretestības samazināšanu, sāk samazināties.

Beidzot īsslēguma strāva ir mazāka par nominālo  $I_k < I_N$  (sk. 2.83. att.). Šāda aina izskaidrojama ar to, ka, pieaugot strāvai  $I$ , pieaug arī enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība un samazinās ierosmes strāva. Mašīnas magnētiskā ķēde kļūst nepiesātināta, tāpēc neliela slodzes pretestības samazināšanās izraisa strauju EDS samazināšanos. Tā kā strāvas lielumu nosaka spriegums uz ģenerators spailēm un slodzes pretestība:

$$I = \frac{U}{R_{sl}}, \tag{2.32.}$$

tad, ja  $I < I_{kr}$ ,  $U$  krītas lēnāk nekā  $R_{sl}$ , un strāva  $I$  pieaug. Turklāt, kad strāva  $I$  sasniedz kritisko vērtību, turpmāka slodzes pretestības samazināšanās izraisa arī strāvas  $I$  samazināšanos. Šajā gadījumā spriegums  $U$  samazinās ātrāk nekā  $R_{sl}$ . Tādējādi šim ģenerators īsslēgums nav bīstams.

Paralēlas ierosmes ģenerators plaši izmanto līdzstrāvas iekārtās, jo to darbības nodrošināšanai nav nepieciešams neatkarīgs ierosmes tinuma barošanas avots. Nominālā sprieguma izmaiņa šiem ģenerators sastāda 10–30 %.



2.83. att. Paralēlas ierosmes ģenerators ārējā raksturliktne.

## 2.6.4. Virknes ierosmes ģenerators

Virknes ierosmes ģeneratoram (2.84. att. a) ierosmes strāva ir vienāda ar slodzes strāvu, tāpēc tā īpašības kopumā ilustrē ārējā raksturlīkne (2.84. att. b). Pārējās raksturlīknes var uzņemt, pieslēdzot ģeneratoru neatkarīgai ierosmei.

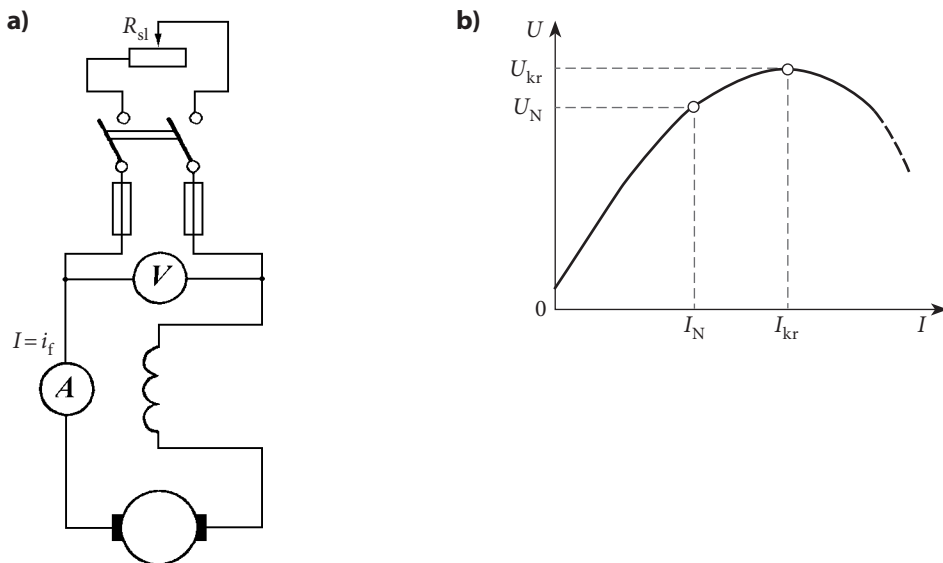
Ģeneratora tukšgaitā EDS ir neliels, jo bez ierosmes strāvas to nosaka tikai paliekošā magnētisma plūsma. Pieslēdzot slodzi, parādās ierosmes strāva  $i_f = I$  un spriegums uz ģeneratora spailēm sāk pieaugt līdz robežai, ko nosaka magnētiskās ķēdes piesātinājums. Slodzei pieaugot, spriegums samazinās, jo enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība un sprieguma kritums enkura ķēdē turpina pieaugt.

Tāpēc, ka spriegums uz spailēm jūtami mainās atkarībā no slodzes, virknes ierosmes ģeneratorus izmanto reti.

## 2.6.5. Jauktas ierosmes ģenerators

Jauktas ierosmes ģeneratoram ir divi ierosmes tinumi, kas enkura tinumam slēgti virknē un paralēli (2.85. att. a). Magnētisko plūsmu galvenokārt nodrošina paralēlais tinums, bet virknes tinums, kas slēgts saskaņoti ar paralēlo (to radītās plūsmas sakrīt), kalpo, lai iegūtu cietākas ārējās raksturlīknes.

Tukšgaitā ģeneratorā darbojas tikai paralēlās ierosmes tinums, jo  $I = 0$ . Pieslēdzot slodzi, virknes ierosmes tinumā arī plūst strāva, kas uzmagnetizē mašīnu un pilnībā kompensē enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību un sprieguma kritumu enkura



2.84. att. Virknes ierosmes ģeneratora shēma (a) un ārējā raksturlīkne (b).

ķēdē. Tādējādi var panākt, lai spriegums uz ģenerators spailēm būtu gandrīz nemainīgs (līkne 1 2.85. attēlā b).

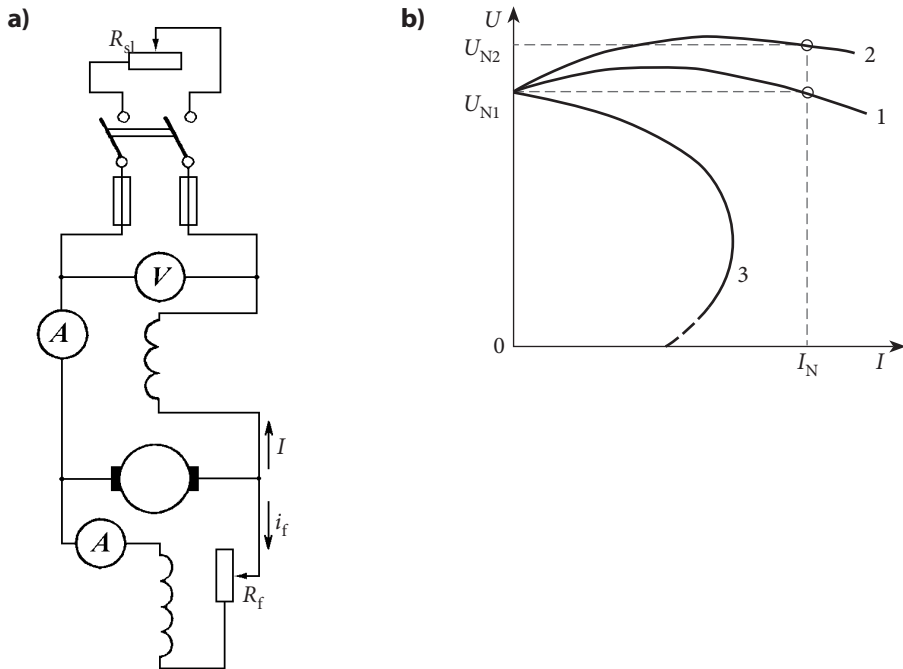
Ja nepieciešams kompensēt arī sprieguma kritumu līnijā līdz patērētājiem, to panāk, palielinot vijumu skaitu virknes ierosmes tinumā (līkne 2).

Jauktas ierosmes ģeneratoram ar tinumu pretslēgumu var iegūt strauji krītošu ārējo raksturlīkni (līkne 3). Līknes raksturs izskaidrojams ar virknes ierosmes tinuma atmag-netizējošo darbību attiecībā pret paralēlās ierosmes tinumu.

Ģeneratorus ar saskaņotu tinumu slēgumu izmanto spēka iekārtu barošanai, ja slo-dze ir mainīga. Tinumu pretslēgumu izmanto speciālas nozīmes mašīnās, piemēram, metināšanas ģeneratoros.

### 2.6.6. Līdzstrāvas ģeneratoru paralēla darbība

Lielas jaudas patērētāju barošanai līdzstrāvas ģeneratorus parasti slēdz paralēli. To kopējai jaudai ar zināmu rezervi jāatbilst patērētāju jaudai. Vairāku ģeneratoru uzstādī-šana viena vietā palielina elektroapgādes drošumu un ļauj efektīvāk izmantot agregātus. Tā, slodzei samazinoties, daļu ģeneratoru var apturēt un atslēgt, bet pārējiem nodrošināt tādu darba režīmu, kurā lietderības koeficienta vērtība ir tuva maksimālai.



2.85. att. Jauktas ierosmes ģenerators shēma (a) un ārējās raksturlīknes (b).

Slēdzot ģeneratorus paralēlam darbam, jāizpilda šādi nosacījumi:

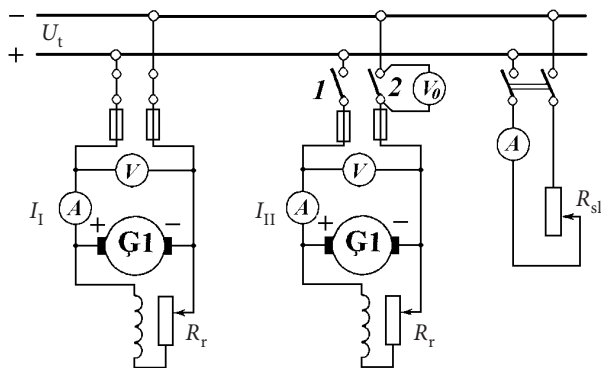
- pieslēdzamā ģeneratora EDS jābūt vienādam ar tīkla spriegumu ( $E_0 = U_t$ );
- pieslēdzamā ģeneratora spaiļu polaritātei jāatbilst tīkla polaritātei.

2.86. attēlā parādīta divu paralēlas ierosmes ģeneratoru paralēlas darbības slēguma shēma.

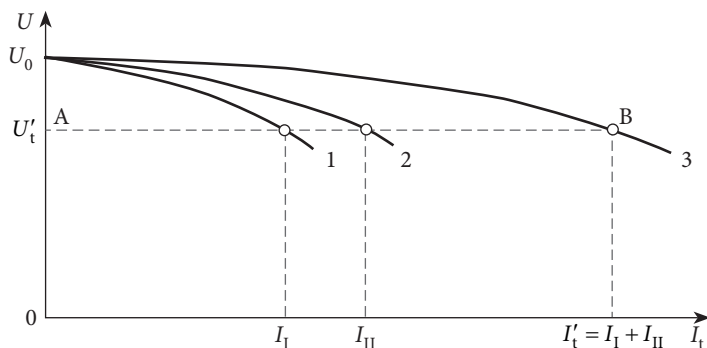
Pieņemsim, ka ģenerators Ģ1 darbojas un rada uz kopnēm spriegumu  $U_t$ . Lai šim kopnēm pieslēgtu otru ģeneratoru Ģ2, rīkojas šādi: iegriež ģeneratora enkuru līdz nominālai rotācijas frekvencei, tad, noslēdzot slēdža kontaktu 1, ierosina ģeneratoru līdz  $E_0 = U_t$ . Ja ģeneratora spaiļu un tīkla kopņu polaritāte ir saskaņota, voltmetrs  $V_0$  rāda nulli. Tādā gadījumā var noslēgt slēdža otro kontaktu. Bet, tā kā  $E_0 = U_t$ , ģenerators turpinās darboties tukšgaitā ( $I_{II} = 0$ ):

$$I_{II} = \frac{E_0 - U_t}{\sum R_{II}}. \quad (2.33.)$$

Lai noslogotu otru ģeneratoru, nepieciešams palielināt tā EDS. To var izdarīt, palielinot ierosmes strāvu. Bet, lai tīkla spriegums tādā gadījumā paliktu nemainīgs, nepieciešams vienlaikus samazināt ierosmes strāvu ģeneratoram Ģ1.



2.86. att. Paralēlas ierosmes ģeneratoru paralēlas darbības shēma.



2.87. att. Slodzes sadalījums starp paralēli slēgtiem ģeneratoriem.

Slodzei mainoties, strāva  $I_I$  un  $I_{II}$  starp ģeneratoriem sadalās atbilstoši to ārējām raksturliņņēm. 2.87. attēlā liknes 1 un 2 attēlo ģeneratoru Ģ1 un Ģ2 ārējās raksturliņnes, bet likne 3 – kopējo ārējo raksturliņni  $U_t = f(I_t)$ , kur  $I_t = I_I + I_{II}$  – tīkla strāva. Pieņemsim, ka tīkla strāva  $I_t = I_t'$ , tad spriegums uz abu ģeneratoru spailēm ir vienāds ar  $U_t'$ . Novelkot taisni AB, atrodam ģeneratoru strāvas  $I_I$  un  $I_{II}$ . No 2.87. attēla redzams, ka  $I_{II} > I_I$ . Tas nozīmē, ka ģenerators ar cietāku ārējo raksturliņni uzņem lielāku slodzi.

Paralēlās darbības laikā divu ģeneratoru slodzes strāvas nosaka izteiksmes:

$$I_I = \frac{E_1 - U_t}{\sum R_I},$$

$$I_{II} = \frac{E_2 - U_t}{\sum R_{II}}.$$

Ja abu ģeneratoru EDS ir vienādi, t. i.,  $E_1 = E_2$ , tad:

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{\sum R_{II}}{\sum R_I}, \quad (2.34.)$$

un strāvas starp ģeneratoriem sadalās apgriezti proporcionāli to enkura ķēdes pretestībām.

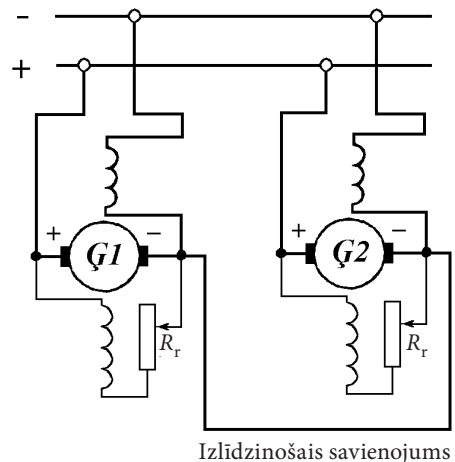
Risinot kopā vienādojumu (2.34.) un vienādojumu  $I_t = I_I + I_{II}$ , iegūstam:

$$I_I = I_t \frac{\sum R_{II}}{\sum R_I + \sum R_{II}};$$

$$I_{II} = I_t \frac{\sum R_I}{\sum R_I + \sum R_{II}}. \quad (2.35.)$$

Ja nepieciešams atslotot vienu no ģeneratoriem, piemēram, Ģ2, tad pakāpeniski samazina tā EDS līdz lielumam  $E_{II} = U_t$ . Tad saskaņā ar (2.33.)  $I_{II} = 0$ .

Slēdzot paralēlam darbam jauktas ieroses savienojums, kas savieno enkuru tinumu vienādas polaritātes spaiļes (2.88. att.). Bez šāda savienojuma ģeneratori darbojas nestabili. Ja kādu iemeslu dēļ nedaudz pieaug viena ģenerators EDS, pieaug tā strāva, kas savukārt atkal palielina EDS, strāvu utt. Rezultātā viens ģenerators darbojas ar pārslodzi, bet otrs nav nepilnībā noslogots. Lietojot izlīdzinošo savienojumu, EDS pieaugums rada strāvas pieaugumu arī otra ģenerators virknes ierosmes tinumā, un slodze starp ģeneratoriem sadalās vienmērīgi.



2.88. att. Jauktas ierosmes līdzstrāvas ģeneratoru paralēlās darbības shēma

## 2.7. LĪDZSTRĀVAS DZINĒJI

### 2.7.1. Vispārīgi norādījumi

Jebkura elektriskā mašina ir apgriezeniska, t. i., to var darbināt gan kā ģeneratoru, gan kā dzinēju. Tāpēc, ja līdzstrāvas mašīnu pieslēdz tīklam, tad ierosmes un enkura tinumos plūst strāva. Magnētiskās plūsmas un enkura strāvas mijiedarbības rezultātā uz dzinēja enkuru darbojas elektromagnētiskais griezes moments  $M$ . Šis moments nav bremsējošs, kā tas ir ģeneratorā, bet sakrīt ar rotācijas virzienu (2.89. att.).

Dzinēja darbības laikā tā enkurs griežas magnētiskā laukā, tāpēc tā tinumā inducējas EDS  $E_a$ , kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma. Dzinējā šis EDS vērsts pretī enkura strāvas  $I_a$  virzienam, tāpēc bieži to sauc arī par pret-EDS (2.90. att.).

Dzinējam pievadītais spriegums  $U$  kompensē enkura pret-EDS un sedz sprieguma kritumu enkura ķēdes pretestībā:

$$U = E_a + I_a \sum R. \quad (2.36.)$$

No izteiksmes (2.36.) iegūstam:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum R}. \quad (2.37.)$$

Reizinot vienādojuma (2.36.) abas puses ar  $I_a$ , iegūstam jaudas vienādojumu:

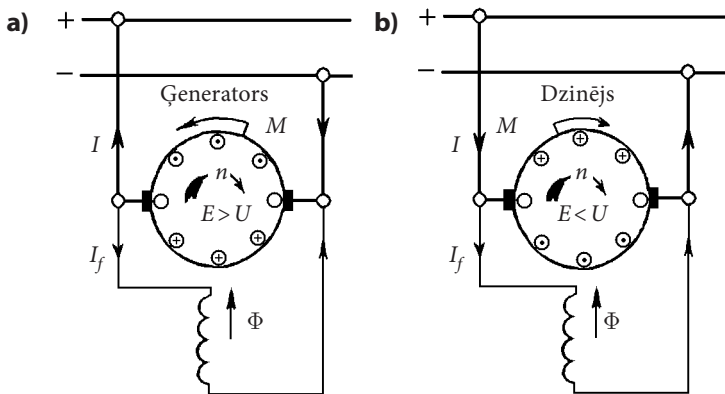
$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 \sum R, \quad (2.38.)$$

kur  $UI_a$  – enkura ķēdei pievadītā jauda;

$I_a^2 \sum R$  – elektriskie zudumi enkura ķēdē.

Lielumu  $E_a I_a$  var pārveidot šādi:

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a$$



2.89. att. Līdzstrāvas mašīnas darbība ģeneratora (a) un dzinēja (b) režīmā.

vai

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega.$$

Saskaņā ar (2.29.)

$$\frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = M,$$

tad

$$E_a I_a = M\omega = P_{em}, \quad (2.39.)$$

kur  $\omega = 2\pi n/60$  – enkura leņķiskā rotācijas frekvence;

$P_{em}$  – dzinēja elektromagnētiskā jauda.

Elektromagnētiskā jauda dzinējā tiek pārveidota mehāniskajā jaudā, kas nepieciešama rotora griešanai.

Ņemot vērā (2.39.), izteiksmi (2.38.) var pārveidot:

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum R.$$

No šī vienādojuma redzams, ka, pieaugot dzinēja slodzei (elektromagnētiskajam momentam  $M$ ), pieaug arī no tikla patērētā jauda. Tā kā dzinējam pievadītais spriegums parasti ir nemainīgs, tad, pieaugot slodzei, palielinās enkura tinuma strāva  $I_a$ .

Atkarībā no ierosmes veida līdzstrāvas dzinējus, tāpat kā ģeneratorus, iedala: dzinējos ar magnetoelektrisko un elektromagnētisko ierosmi. Pēdējos atkarībā no tinuma slēguma shēmas iedala: paralēlas, virknes un jauktas ierosmes dzinējos. Šo dzinēju principiālās shēmas neatšķiras no attiecīgajām ģeneratoru shēmām (sk. 2.76. att.).

## 2.7.2. Dzinēja momentu vienādojums

Dzinēja elektromagnētiskais moments griež enkuru, kas savukārt griezes kustību nodod darba mehānismam. Turklāt uz dzinēja vārpstu darbojas šādi momenti:

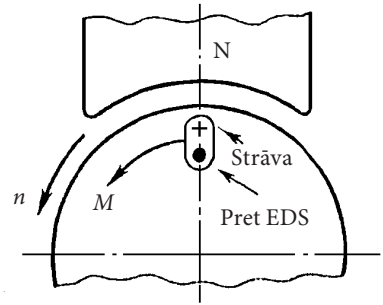
- elektromagnētiskais moments  $M$ ;
- tukšgaitas moments  $M_0$ , kas atbilst mehāniskajiem, magnētiskajiem un papildzudumiem. Tas nav atkarīgs no slodzes un normāla izpildījuma mašīnās ir aptuveni 2–6 % no nominālā momenta vērtības;
- dzinēja lietderīgais moments  $M_2$ , kas tiek pielikts darba mehānismam;
- dinamiskais moments  $M_D$ , kas rodas vārpstas rotācijas frekvences izmaiņas dēļ un to nosaka pēc formulas:

$$M_D = J \frac{d\omega}{dt},$$

kur  $J$  – visu rotējošo daļu kopējais inerces moments.

Līdzstrāvas dzinēja momentu vienādojums ir šāds:

$$M = M_0 + M_2 \pm M_D$$



2.90. att. Elektrodzinēja EDS darbības virziens.



vai

$$M = M_{st} \pm M_D, \quad (2.40.)$$

kur

$$M_{st} = M_0 + M_2. \quad (2.41.)$$

Rotācijas frekvencei pieaugot, dinamiskais moments summējas ar statisko momentu  $M_{st}$ , bet, frekvencei samazinoties, moments  $M_D$  darbojas pretī momentam  $M_{st}$ .

Ja enkura rotācijas frekvence ir nemainīga ( $d\omega/dt=0$ ), arī dinamiskais moments ir vienāds ar nulli. Tad dzinēja momentu vienādojums ir:

$$M = M_0 + M_2 = M_{st}, \quad (2.42.)$$

t. i., dzinēja stacionārā režīmā momenti  $M$  un  $M_{st}$  līdzsvaro viens otru.

Dzinēja griezes momentu var noteikt pēc formulas (2.29.). Turklāt moments ir proporcionāls elektromagnētiskajai jaudai, tāpēc

$$M = \frac{60P_{em}}{2\pi n} = 9,55 \frac{P_{em}}{n}. \quad (2.43.)$$

Ja formulā (2.43.) jauda izteikta vatos (W) un rotācijas frekvence apgriezienos minūtē ( $\text{min}^{-1}$ ), tad momenta mērvienība ir ņūtonmetrs (Nm).

Lietderīgā momenta vērtību nosaka analogiski:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n}, \quad (2.44.)$$

kur  $P_2$  – dzinēja lietderīgā jauda.

### 2.7.3. Dzinēja rotācijas frekvence

No EDS formulas  $E_a = c_e n \Phi$  redzams, ka dzinēja rotācijas frekvence

$$n = \frac{E_a}{c_e \Phi}.$$

Ņemot vērā  $E_a$  izteiksmi (2.36.), iegūstam:

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi}. \quad (2.45.)$$

No formulas (2.45.) redzams, ka dzinēja rotācijas frekvence tukšgaitā ir proporcionāla spriegumam un apgriezti proporcionāla magnētiskai plūsmai. Fizikāli to var izskaidrot ar to, ka, palielinot spriegumu  $U$  vai samazinot magnētisko plūsmu  $\Phi$ , pieaug starpība  $U - E_a$ . Tas savukārt izraisa strāvas  $I_a$  palielināšanos (sk. (2.37.)), tāpēc palielinās griezes moments un, ja dzinēja slodze ir nemainīga, pieaug arī dzinēja rotācijas frekvence.

No formulas (2.45.) izriet, ka dzinēja rotācijas frekvenci var regulēt, mainot spriegumu  $U$ , magnētisko plūsmu  $\Phi$  vai enkura ķēdes pretestību  $\sum R$ .

Dzinēja rotācijas virzienu nosaka magnētiskās plūsmas  $\Phi$  un enkura strāvas virziens.

Mainot virzienu vienam no šiem lielumiem, panāk rotācijas virziena izmaiņu (dzinēja reversu). Jāuzsver, ka mainot polaritāti barošanas shēmas spailēm, rotācijas virziens nemainās, jo šādā gadījumā vienlaikus mainās strāvas virziens gan enkura, gan ierosmes tinumā.

### 2.7.4. Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte

Par dzinēja stabilitāti sauc tā spēju atgriezties stacionārā režīmā, ja šis režīms īslaicīgas iedarbes rezultātā tiek izjaukts. Stabilitāte ir atkarīga no dzinēja un darba mehānisma raksturlielņiem  $M=f(n)$  un  $M_{st}=f(n)$ .

Pārveidojot izteiksmi (2.45.), var rakstīt:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a \sum R}{c_e \Phi}$$

un, ņemot vērā, ka  $I_a = \frac{M}{c_m \Phi}$ , iegūstam:

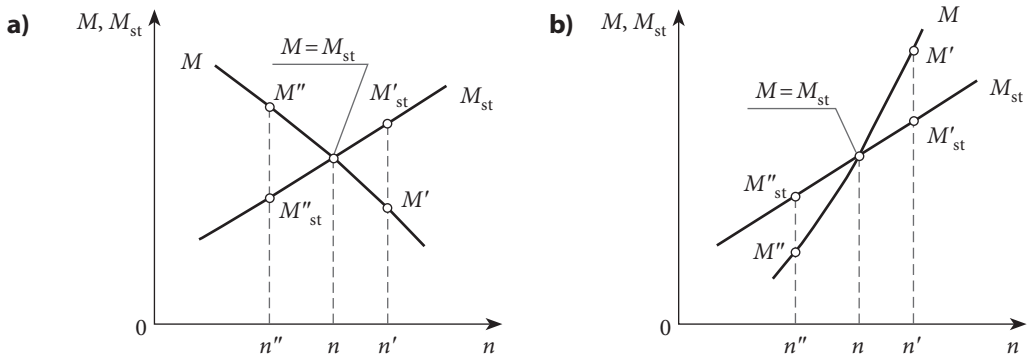
$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum R}{c_e c_m \Phi^2}. \quad (2.46.)$$

Dzinējs darbojas stabili ar nemainīgu rotācijas frekvenci, ja tā elektromagnētiskais moments un darba mehānisma bremzējošais moments ir vienādi, t. i.,

$$M = M_{st}. \quad (2.47.)$$

Tomēr stabils darbs iespējams tikai noteiktos apstākļos. Ilustrācijai 2.91. attēlā parādītas raksturlielnes  $M=f(n)$  un  $M_{st}=f(n)$ . Šo līkņu krustpunkts ( $M=M_{st}$ ) 2.91. attēlā atbilst stabilam darbam.

Ja īslaicīgas iedarbes rezultātā rotācijas frekvence mainās, piemēram, no  $n$  uz  $n'$ , vienādība (2.47.) tiek izjaukta un bremzējošais moments  $M'_{st}$  kļūst lielāks par dzinēja momentu  $M'$ . Tāpēc rotācijas frekvence samazinās līdz tādai vērtībai  $n$ , kad  $M=M_{st}$ .



2.91. att. Dzinēja stabila (a) un nestabila (b) darbība.

Analoģiski procesi notiek, ja rotācijas frekvence samazinās līdz vērtībai  $M''_{st}$  un enkurs saņem paātrinājumu, kas atgriež dzinēju iepriekšējā režīmā. Tādējādi aplūkojamā gadījumā dzinēja darbība ir stabila.

Ja dzinēja un darba mehānisma raksturlielnes atbilst 2.91. attēlā b parādītajām, tad dzinēja darbība ir nestabila. Tiešām, ja rotācijas frekvence īslaicīgas iedarbes rezultātā mainās no  $n$  uz  $n'$ , moments  $M'$  izraisīs vēl tālāku frekvences palielināšanos. Ja rotācijas frekvence mainās no  $n$  uz  $n''$ , tad bremsējošais moments izraisīs vēl lielāku frekvences samazināšanos. Tātad šādos apstākļos dzinēja darbība ir nestabila.

Vispārīgā gadījumā stabils darbs ir tad, ja tiek izpildīts nosacījums:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{st}}{dn}. \quad (2.48.)$$

Parasti šī nosacījuma izpildei nepieciešams, lai, pieaugot rotācijas frekvencei, dzinēja moments samazinātos (sk. 2.91. att. a).

## 2.7.5. Līdzstrāvas dzinēju palaišana

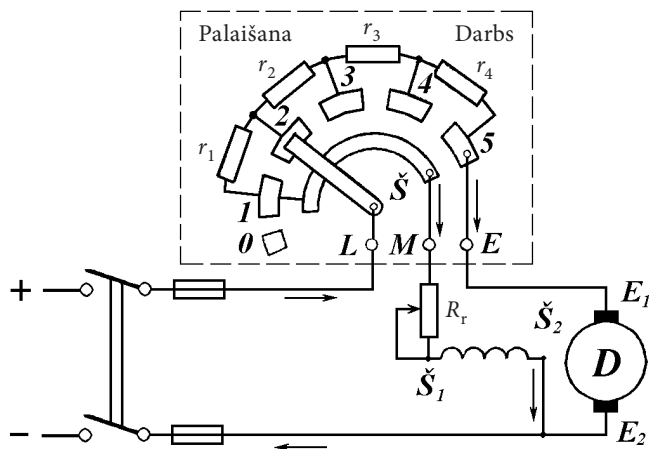
Dzinēja enkura tinuma strāvu nosaka pēc formulas:

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum R}.$$

Ja pieņem, ka spriegums  $U$  un pretestība  $\sum R$  ir nemainīgi lielumi, tad strāva  $I_a$  ir atkarīga tikai no pret-EDS  $E_a$ . Enkura strāva sasniedz maksimālo vērtību palaišanas procesa sākumā, kad rotors vēl nav sācis griezties, t. i.,  $n = 0$  un arī  $E_a = 0$ . Tāpēc palaišanas strāva

$$I_{pmax} = \frac{U}{\sum R}. \quad (2.49.)$$

Līdzstrāvas mašīnas enkura ķēdes pretestība parasti ir ļoti maza. Tāpēc, ja palaiž dzinēju, tieši pieslēdzot tā enkuru tīkla spriegumam, tinumos plūst nepieļaujami liela palaišanas strāva, kas nominālo pārsniedz 10–50 reizi.



2.92. att. Palaišanas reostata ieslēgšanas shēma.

Tik liela palaišanas strāva ir visai bīstama. Pirmkārt, tā mašīnā var izraisīt elektrisko loku uz kolektora, otrkārt, rodas palielināts griezes moments, kas triecienveidā iedarbojas uz dzinēju un darba mehānismu, un, treškārt, liela palaišanas strāva izraisa sprieguma kritumu tīklā, kas nelabvēlīgi ietekmē citu patērētāju darbu.

Tāpēc palaišanu, tieši pieslēdzot tīklam, izmanto tikai mazas jaudas dzinējiem (aptuveni līdz 0,5 kW). Šādos dzinējos, pateicoties to relatīvi lielai pretestībai un mazai masai, palaišanas strāva pārsniedz nominālo tikai 3–5 reizes un dzinējam briesmas nerada.

Lielas jaudas dzinēju palaišanai, lai ierobežotu strāvu, izmanto palaišanas reostatus, kurus ieslēdz virknē ar enkura tinumu (2.92. att.).

Pirms palaišanas reostatam iestata maksimālo pretestību  $R_{p,max}$ . Tad palaišanas strāva ir:

$$I_p = \frac{U}{\sum R + R_{p,max}}. \quad (2.50.)$$

Rotācijas frekvencei pieaugot, palielinās arī pret-EDS, bet enkura strāva samazinās. Tāpēc palaišanas reostata pretestību pakāpeniski samazina, novedot līdz  $R_p = 0$ . Pretējā gadījumā šajā reostatā tiks patērēts ievērojams enerģijas daudzums un dzinēja lietderīgā jauda samazināsies.

Palaišanas reostata pretestību izvēlas tā, lai palaišanas strāva nepārsniegtu nominālo vairāk nekā 2–3 reizes.

Tā kā dzinēja elektromagnētiskais moments proporcionāls magnētiskajai plūsmai  $\Phi$ , tad, lai sekmētu rotora ātrāku iegriešanos, paralēlas un jauktas ierosmes dzinēju regulēšanas reostatu pirms palaišanas izvada uz nulli ( $R_r = 0$ ). Magnētiskā plūsma šādā gadījumā ir maksimāla, un dzinējs rada vajadzīgo momentu ar mazāku enkura strāvu.

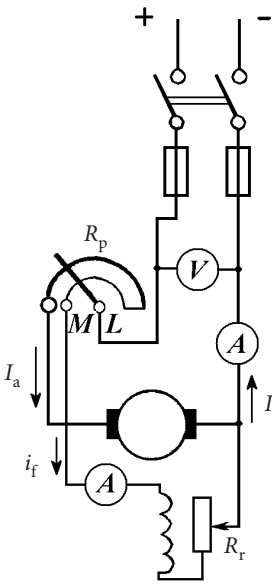
Lielas jaudas dzinēju palaišanai palaišanas reostatu izmantošana ne vienmēr ir lietderīga, jo tā ir saistīta ar lielu enerģijas patēriņu. Turklāt šādiem reostatiem ir lieli gabarīti. Tāpēc lielas jaudas dzinējus bieži palaiž, pazeminot spriegumu. Šo metodi plaši izmanto vilces dzinēju palaišanai.

Atslēdzot dzinēju no tīkla, jā rūpējas, lai vienlaikus netiktu pārtraukts ierosmes tinums, jo tajā rodas pašindukcijas EDS, kas var caursist izolāciju. Dzinēju elektrisko shēmu parasti veido tā, lai enkura tinuma atslēgšanas brīdī ierosmes tinums būtu noslēgts uz pretestību.

## 2.7.6. Paralēlas ierosmes dzinējs

Paralēlas ierosmes dzinēja shēma parādīta 2.93. attēlā. Reostats  $R_r$  ierosmes ķēdē kalpo dzinēja rotācijas frekvences regulēšanai. Tā, samazinot reostata  $R_r$  pretestību, ierosmes strāva un magnētiskā plūsma  $\Phi$  pieaug, bet enkura rotācijas frekvence samazinās (sk. (2.45.)). Palielinot  $R_r$  pretestību, rotācijas frekvence palielinās.

2.94. attēlā parādītas divas dzinēja raksturlīknes  $n = f(i_r)$ , ja  $I < I_N$  un  $I = I_N = const$ . Otrā līkne novietojas zemāk par pirmo tāpēc, ka, ja  $I = I_N$ , sprieguma kritums enkura ķēdē vairāk ietekmē rotācijas frekvenci nekā enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība



2.93. att. Parālēlas ierosmes dzinēja shēma.

(sk. (2.45)). Tomēr mazākām ierosmes strāvas vērtībām liknes sākumā krustojas punktā *a* un tālāk likne 2 novietojas augstāk nekā likne 1. Tas izskaidrojams ar to, ka ar mazām ierosmes strāvām arī magnētiskā plūsma ir maza un enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība, ja  $I = I_N$ , rotācijas frekvenci ietekmē stiprāk nekā sprieguma kritums enkura ķēdē.

No 2.94. attēlā parādītājām raksturliķnēm redzams, ka, pārtraucot ierosmes tinumu ( $i_f = 0$ ), dzinēja rotācijas frekvence strauji pieaug, un tas sāk joņot. Šāds režīms nav pieļaujams.

Dzinēja ekspluatācijas īpašības nosaka tā darba raksturliķnes  $n, I, M_2, M = f(P_2)$ , kas uzņemtas, ja  $U = const, i_f = const$  (2.95. att.).

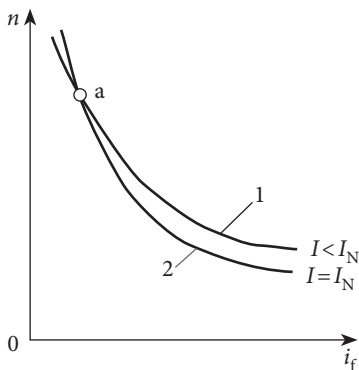
Ātruma raksturliķnes  $n = f(P_2)$  paskaidrošanai var izmantot formulu (2.45.)

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e \Phi}$$

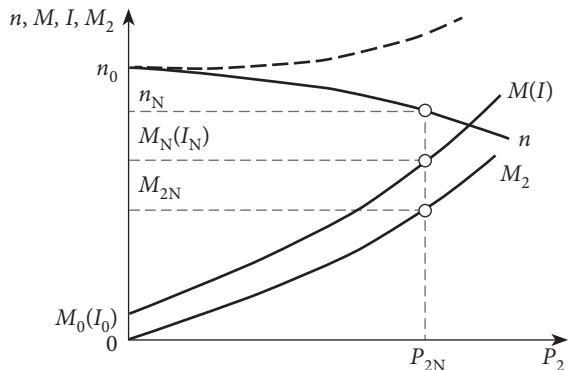
no kuras redzams, ka, ja  $U = const$ , rotācijas frekvenci nosaka divi faktori: sprieguma kritums  $I_a \sum R$  un magnētiskā plūsma  $\Phi$ . Palielinot slodzi, samazinās skaititājs  $U - I_a \sum R$ , turklāt enkura reakcijas dēļ samazinās arī magnētiskā plūsma  $\Phi$ . Parasti pirmais faktors darbojas spēcīgāk, un, pieaugot slodzei, dzinēja rotācijas frekvence samazinās.

Ja enkura reakcija dzinējā jūtami samazina magnētisko plūsmu  $\Phi$ , tad, pieaugot slodzei, rotācijas frekvence var arī pieaugt (pārtrauktā līnija 2.95. attēlā). Šāds gadījums parasti nav pieņemams no stabilitātes viedokļa.

Lai iegūtu krītošu raksturliķni  $n = f(P_2)$ , parālēlas ierosmes dzinējos izveido nelielu virknes ierosmes tinumu, ko sauc par stabilizējošo tinumu. Šāds tinums, ja tas slēgts



2.94. att. Parālēlas ierosmes dzinēja regulēšanas raksturliķne.



2.95. att. Parālēlas ierosmes dzinēja darba raksturliķnes.

saskaņoti ar paralēlas ierosmes tinumu, kompensē enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību, un magnētiskā plūsma  $\Phi$  paliek praktiski nemainīga.

Rotācijas frekvences izmaiņu, pārejot no dzinēja tukšgaitas uz nominālo slodzi, novērtē ar:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} 100 \%, \quad (2.51.)$$

kur  $n_0$  – rotācijas frekvence tukšgaitā.

Parasti paralēlas ierosmes dzinējiem  $\Delta n$  nepārsniedz 2–8 %, un raksturlikne  $n = f(P_2)$  ir cieta.

Griezes momenta  $M_2$  atkarību no jaudas  $P_2$  nosaka formula (2.44.). Ja būtu  $n = const$ , tad arī sakarība  $M_2 = f(P_2)$  būtu lineāra. Bet tā kā, pieaugot slodzei, rotācijas frekvence nedaudz krītas, minētā sakarība novirzās no lineāras.

No (2.42.) seko, ka elektromagnētiskais moments

$$M = M_0 + M_2.$$

Tā kā darba raksturliknes uzņem apstākļos, kad  $i_f = const$ , arī magnētiskie zudumi ir nemainīgi un  $M_0 = const$ .

Tāpēc grafiks  $M = f(P_2)$  iet paralēli liknei  $M_2 = f(P_2)$ . Ja pieņem, ka  $\Phi = const$ , tad grafiks  $M_2 = f(P_2)$  vienlaikus ataino arī sakarību  $I_a = f(P_2)$ , jo

$$M = c_m \Phi I_a.$$

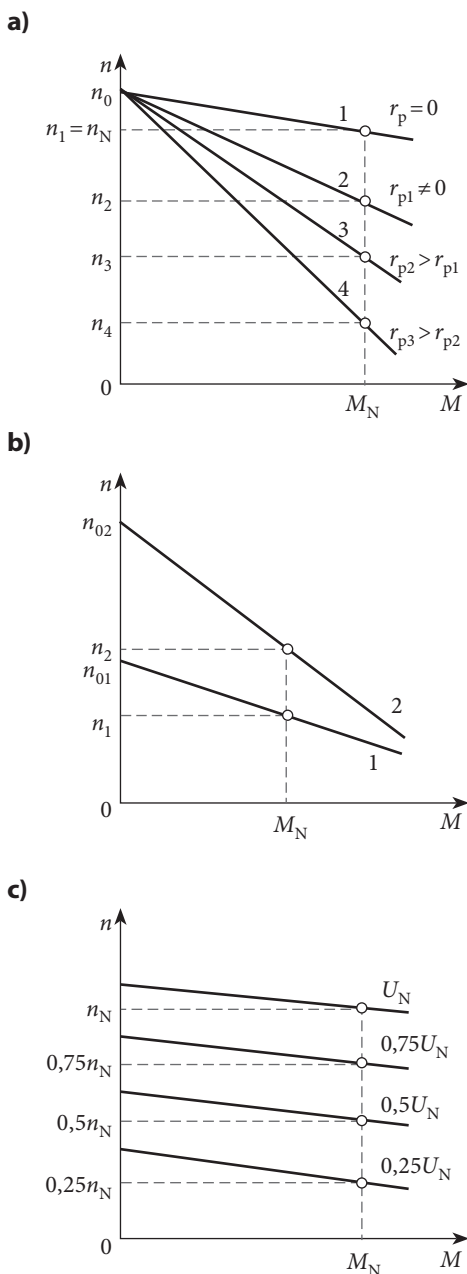
Dzinēja mehānisko raksturlikni apraksta vienādojums (2.46.):

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum R}{c_e c_m \Phi^2}.$$

Novērtējot dzinēja īpašības, svarīga nozīme ir tā rotācijas frekvences regulēšanai. Regulēšanu novērtē ar šādiem galveniem rādītājiem: laidenums; ekonomiskums, ko novērtē ar regulēšanas aparātūras izmaksām un elektroenerģijas zudumiem tajā, un diapazons, ko novērtē ar maksimālās rotācijas frekvences attiecību pret minimālo.

No izteiksmes (2.45.) redzams, ka paralēlas ierosmes dzinēja rotācijas frekvenci var regulēt, mainot pretestību enkura ķēdē, mainot magnētisko plūsmu un mainot enkuram pievadīto spriegumu. Ieslēdzot enkura ķēdē papildpretestību, var samazināt dzinēja rotācijas frekvenci (2.96. att. a). Šis paņēmieni ļauj regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā. Tomēr tas ir visai neekonomisks, jo nepieciešams relatīvi lielas jaudas reostats, kas jāparedz ilgstošam darbam, un regulēšana ir saistīta ar ievērojamiem enerģijas zudumiem reostatā, kurā plūst enkura strāva.

Rotācijas frekvences regulēšanu, mainot magnētisko plūsmu, paralēlas ierosmes dzinējam realizē, ieslēdzot reostatu ierosmes ķēdē. Tad, palielinot šī reostata pretestību, ierosmes strāva un arī magnētiskā plūsma samazinās, bet rotācijas frekvence pieaug. Ja ierosmes strāva  $i_f$  kļūst ļoti maza vai robežgadījumā, pārtraucot ķēdi,  $i_f = 0$ , dzinēja rotācijas frekvence var nepieļaujami pieaugt (dzinējs sāk joņot). Tas jāņem vērā dzinēja montāžas un ekspluatācijas laikā, nodrošinot, lai ierosmes tinuma ķēde netiktu pārtraukta.



2.96. att. Paralēlas ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlieknes: a – ieslēdzot enkura ķēdē papildpretestību; b – mainot magnētisko plūsmu; c – mainot enkuram pievadīto spriegumu.

Mainot magnētisko plūsmu  $\Phi$ , attiecīgi mainās mehāniskās raksturlieknes (2.96. att. b). Tā, samazinot magnētisko plūsmu līdz vērtībai  $\Phi_2$ , pieaug tukšgaitas rotācijas frekvence  $n_{02}$  un izmainās raksturlieknes slīpums (taisne 2). Regulēšanas diapazons šajā gadījumā ir  $n_{\max}/n_{\min} = 2-5$ . Turklāt rotācijas frekvences apakšējo robežu nosaka mašīnas piesātinājums, bet augšējo – dzirksteļošana uz kolektora un joņošanas draudi.

Apskatītais rotācijas frekvences regulēšanas paņēmiens ir vienkāršs un ekonomisks, jo paralēlas ierosmes dzinējos ierosmes strāva ir tikai 1–7 % no enkura strāvas. Tāpēc enerģijas zudumi regulēšanas reostatā arī nav lieli.

Dzinēja rotācijas frekvences regulēšanu, mainot barošanas spriegumu, veic tikai gadījumos, kad ierosmes strāva ir nemainīga, t. i., atsevišķi barojot enkura un ierosmes tinumu.

Dzinēja tukšgaitas rotācijas frekvence  $n_0$  ir proporcionāla barošanas spriegumam  $U$ . Tāpēc tā mehānisko raksturliekņu slīpums pret abscisu asi dažādiem spriegumiem nemainās, un raksturlieknes pārvietojas paralēli sev (2.96. att. c). Šī regulēšanas paņēmiena praktiskai realizācijai dzinējs jāpieslēdz barošanas avotam ar regulējamu spriegumu. Mazas un vidējas jaudas dzinējiem parasti var izmantot regulējamus taisngriežus, bet lielas jaudas dzinējiem – neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas ģeneratorus, kuru piedziņai parasti lieto trīsfāžu asinhronos dzinējus vai dīzeļagregātus.

Mainot dzinēja enkuram pievadīto spriegumu, rotācijas frekvenci parasti regulē uz leju no nominālās, jo mašīnas darbība ar  $U > U_N$  nav pieļaujama.

Ja rotācijas frekvenci regulē, mainot spriegumu, dzinēja lietderības koeficients praktiski saglabājas nemainīgs un tas ir pietiekami augsts. Arī regulēšanas diapazons var būt liels  $n_{\max}/n_{\min} \geq 25$ . Maksimālo rotācijas frekvenci šajā gadījumā ierobežo komutācijas apstākļi, bet minimālo, dzinēja dzesēšana.

Līdzstrāvas dzinējiem, kuru darbība saistīta ar biežu palaišanu un rotācijas frekvences regulēšanu lielā diapazonā, plaši izmanto sprieguma regulēšanu ar impulsu metodēm (impulsregulēšana). Šajā gadījumā enkura tinumu baro no nemainīga sprieguma avota, kuru ar tranzistoru vai tiristoru slēdzi periodiski pieslēdz un atslēdz. Tādējādi enkura tinumam tiek pieslēgti sprieguma impulsi. Dzinēja rotācijas frekvence šajā gadījumā ir atkarīga no sprieguma vidējās vērtības, kas savukārt ir atkarīga no impulsa un pauzes platuma attiecības.

Impulsa pārveidotājs (2.97. att.) sastāv no ieejas filtra LC, sprostodiodes D un induktivitātes L. Laika sprīdī  $\tau$ , kad elektroslēdzis ir noslēgts (tranzistors vai tiristors atvērts) barošanas spriegums  $U$  pieslēgts enkura tinumam un strāva  $I_a$  pieaug (2.97. att. b).

Laikā, kad tranzistors vai tiristors ir atvērts, strāva  $I_a$  turpina plūst caur sprostodiēdi D. Impulsa sekošanas frekvence nominālā darba režīmā parasti ir no 200 līdz 400 Hz. Tāpēc perioda ilgums  $T$  ir aptuveni par divām kārtām mazāks par enkura ķēdes laika konstanti, un strāva  $I_a$  impulsa laikā  $\tau$  nespēj jūtami pieaugt, bet pauzes laikā  $(T - \tau)$  jūtami samazināsies.

Vidējo spriegumu, ko pievada dzinējam, vienkāršoti nosaka pēc formulas:

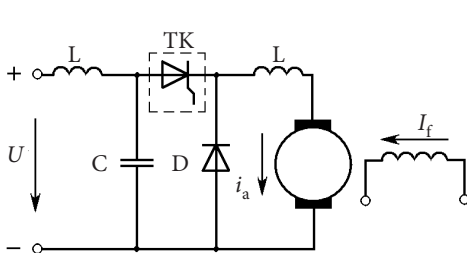
$$U_{\text{vid}} = U \frac{\tau}{T} = \alpha U,$$

kur  $\alpha$  – sprieguma regulēšanas koeficients.

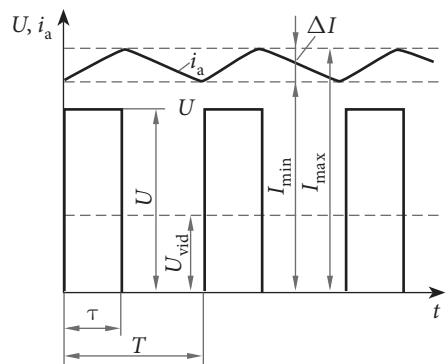
Sprieguma  $U_{\text{vid}}$  vērtību var regulēt, mainot impulsa perioda  $T$  ilgumu (impulsa frekvenčregulēšana) vai mainot laiku  $\tau$  (impulsa platuma regulēšana), vai arī mainot gan  $T$ , gan  $\tau$ .

Impulsregulēšanas metodes priekšrocība ir tā, ka iespējama rotācijas frekvences regulēšana bez papildu reostata enkura ķēdē. Tādējādi samazinās enerģijas zudumi regulēšanas un palaišanas procesa laikā.

a)



b)



2.97. att. Līdzstrāvas dzinēja rotācijas frekvences regulēšana ar impulsmetodi: a – elektriskā shēma; b – strāvas un sprieguma izmaiņu grafiks.



## 2.7.7. Virknes ierosmes dzinējs

Šajā dzinējā ierosmes tinums ieslēgts virknē ar enkura tinumu (2.98. att. a), tāpēc magnētiskā plūsma ir atkarīga no slodzes strāvas.

Ja slodze ir neliela, mašīnas magnētiskā sistēma nav piesātināta un plūsma ir proporcionāla enkura strāvai:

$$\Phi = k I_a,$$

kur  $k$  – proporcionalitātes koeficients.

Tādā gadījumā izteiksmi (2.29.) var pārrakstīt šādā formā:

$$M = c_M k I_a I_a = c'_M I_a^2. \quad (2.52.)$$

Rotācijas frekvenci šajā gadījumā var noteikt pēc formulas:

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e k I_a}. \quad (2.53.)$$

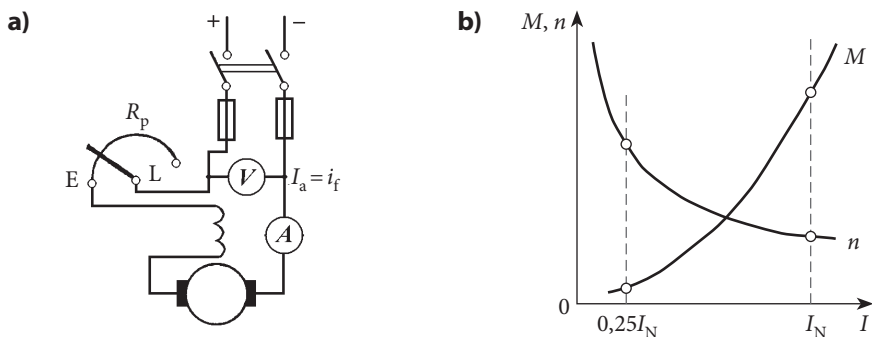
Tādējādi nepiesātināta dzinēja moments proporcionāls strāvas kvadrātam, bet rotācijas frekvence – apgriezti proporcionāla slodzes strāvai.

2.98. attēlā b parādītas virknes ierosmes dzinēja darba raksturlīknes  $M=f(I_a)$  un  $n=f(I_a)$ . Pie lielām slodzēm mašīnas magnētiskā ķēde piesātinās, magnētiskā plūsma vairs praktiski nepalielinās, un raksturlīknes kļūst gandrīz lineāras.

Dzinēja ātruma raksturlīkne rāda, ka, mainoties dzinēja slodzei, strauji mainās arī tā rotācijas frekvence.

Slodzei samazinoties zem 25 % no nominālās, dzinējs var sākt joņot. Tas izskaidrojams ar to, ka tukšgaitā samazinās dzinēja strāva, tātad arī magnētiskā plūsma. Tāpēc virknes ierosmes dzinēja darbināšana, palaišana ar slodzi, kas mazāka par 25 % no nominālās, nav pieļaujama. Tāpat dzinēja savienošanai ar darba mehānismu nav pieļaujama elastīgu pārvadu izmantošana, piemēram, siksnas pārvadu, jo, siksnai pārtrūkstot vai nokrītot, dzinējs var sākt joņot.

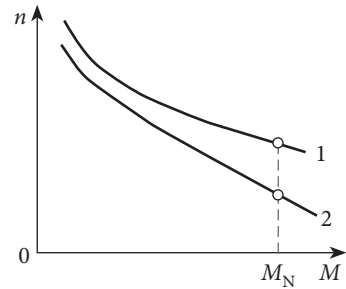
Virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlīknes  $n=f(M)$  vienādojumu iegūst, ja izteiksmē (2.53.) strāvu  $I_a$  ievieto no formulas (2.52.):



2.98. att. Virknes ierosmes dzinēja shēma (a) un darba raksturlīknes (b).

$$n = \frac{\sqrt{c'_M V}}{c_e k \sqrt{M}} - \frac{\sum R}{c_e k} \quad (2.54.)$$

Saskaņā ar šo vienādojumu mehāniskās rakstur-  
liknes (2.99. att.) ir strauji krītošas hiperboliskas lī-  
nes (mīkstas raksturliknes). Tādas līknes nodrošina  
dzinēja stabilu darbu jebkurai mehāniskai slodzei.  
Dzinēju spēja radīt lielu momentu, kas ir proporci-  
onāls enkura strāvas kvadrātam, ir ļoti svarīga pār-  
slodzes gadījumos, jo, pieaugot slodzei, dzinēja jauda  
palielinās lēnāk nekā elektromagnētiskais moments.  
Šī īpatnība kalpo par iemeslu virknes dzinēju plašai  
izmantošanai elektrotransportā, celtnos un dažādās  
pacelšanas ierīcēs.



2.99. att. Virknes ierosmes dzinēja mehānis-  
kās raksturliknes: 1 – dabiskā; 2 – maksīgā.

Nominālo rotācijas frekvences izmaiņu virknes ierosmes dzinējam nosaka pēc for-  
mulas:

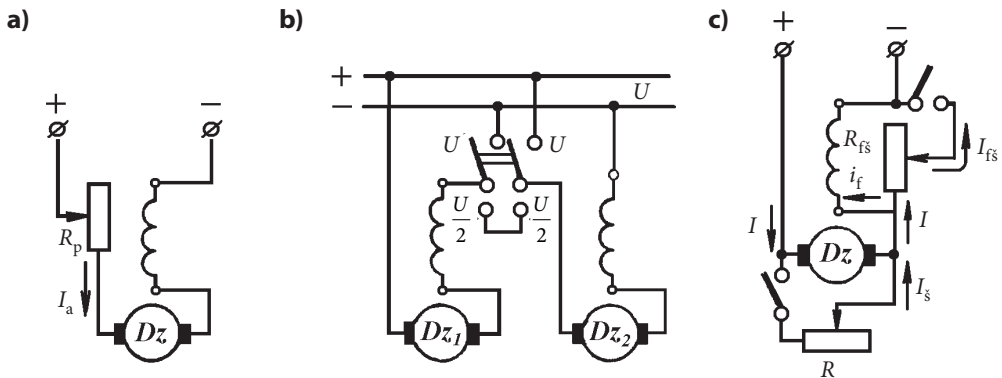
$$\Delta n = \frac{n_{(0,25)} - n_N}{n_N} 100 \%, \quad (2.55.)$$

kur  $n_{(0,25)}$  – dzinēja rotācijas frekvence, ja slodze ir 25 % no nominālās.

Virknes ierosmes dzinēju rotācijas frekvenci regulē, mainot spriegumu  $U$  vai mag-  
nētisko plūsmu  $\Phi$ .

Pirmajā gadījumā virknē enkura tinumam ieslēdz reostatu  $R_p$  (2.100. att. a). Palieli-  
not reostata pretestību, enkuram pievadītais spriegums samazinās un krītas arī dzinēja  
rotācijas frekvence. Šo metodi izmanto tikai mazas jaudas dzinējiem, jo reostatā ir ievē-  
rojami enerģijas zudumi. Turklāt, reostats jāaprēķina dzinēja darba strāvai, tāpēc tam  
ir lieli izmēri.

Ja mehānismu piedzen vairāki viena tipa dzinēji, to rotācijas frekvenci var regulēt,  
mainot slēguma shēmu (2.100. att. b).



2.100. att. Virknes ierosmes dzinēja frekvences regulēšana: a – ar enkura tinumam virknē ieslēgtu reostatu; b – saslēdzot  
dzinējus virknē; c – šuntējot ierosmes vai enkura tinumu.

Tā, saslēdzot divus dzinējus paralēli, katrs no tiem saņem pilnu tīkla spriegumu, bet, slēdzot virknē, – divreiz mazāku spriegumu. Ja kopā darbojas daudzi dzinēji, tad arī to ieslēgšanas shēmām iespējami vairāki varianti. Šo metodi plaši izmanto elektrolokomotīvēs, kur uzstāda vairākus viena tipa vilces dzinējus.

Enkuram pievadītā sprieguma maiņai plaši izmanto arī impulsregulēšanas metodi (sk. 2.7.6. apakšnodaļu).

Dzinēja rotācijas frekvences regulēšanu, mainot magnētisko plūsmu, realizē šādos veidos: šuntējot ierosmes vai enkura tinumu un samazinot ieslēgto ierosmes tinuma vijumu skaitu. Samazinot reostata  $R_{f\dot{s}}$  pretestību (2.100. att. c), ierosmes strāva un magnētiskā plūsma samazinās, tāpēc rotācijas frekvence pieaug. Šīs metodes novērtēšanai izmanto regulēšanas koeficientu:

$$k_{\text{reg}} = \frac{I_{f\dot{s}}}{I_a} 100 \%$$

Parasti  $R_{f\dot{s}}$  izvēlas tā, lai  $k_{\text{reg}} \geq 50 \%$ .

Tā kā reostata  $R_{f\dot{s}}$  pretestība ir maza, jo arī ierosmes tinuma pretestība ir maza, tad šis regulēšanas paņēmiens ir ekonomisks.

Samazinot ierosmes tinuma vijumu skaitu, dzinēja rotācijas frekvence palielinās.

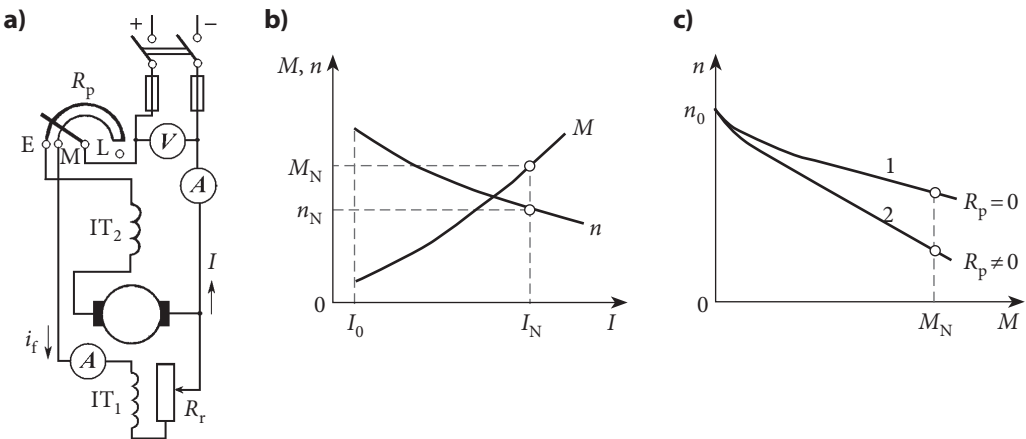
Šuntējot enkura tinumu (2.100. att. c), ierosmes strāva palielinās un rotācijas frekvence samazinās. Šis paņēmiens ir neekonomisks un to izmanto reti.

## 2.7.8. Jauktas ierosmes dzinējs

Jauktas ierosmes dzinējam ir divi ierosmes tinumi: paralēlais un virknes (2.101. att.). Tā rotācijas frekvenci nosaka pēc formulas:

$$n = \frac{U - I_a \sum R}{c_e (\Phi_1 \pm \Phi_2)}, \quad (2.56.)$$

kur  $\Phi_1$  un  $\Phi_2$  – attiecīgi paralēlā  $IT_1$  un virknes  $IT_2$  ierosmes tinuma radītā magnētiskā plūsma.



2.101. att. Jauktas ierosmes dzinēja shēma (a) un raksturlieknes (b un c).

Plus zīme formulā (2.56.) atbilst saskaņotam tinumu slēgumam (plūsmas summējas). Šajā gadījumā, slodzei pieaugot, magnētiskā plūsma palielinās un rotācijas frekvence samazinās.

Ierosmes tinumu pretslēgumu lieto ļoti reti, jo šajā slēgumā, slodzei pieaugot, magnētiskā plūsma samazinās, rotācijas frekvence palielinās un dzinēja darbība var kļūt nestabila.

2.101. attēlā a parādīta jauktas ierosmes dzinēja elektriskā shēma, bet 2.101. attēlā b un c – darba raksturlieknes. Mehāniskās raksturlieknes (2.101. att. c) ir atkarīgas no abu tinumu MS attiecības. Saskaņotā slēgumā virknes tinums ir galvenais un dod vismaz 70 % no mašīnas kopējā MS. Mehāniskās raksturlieknes atrodas starp paralēlas un virknes ierosmes dzinēju mehāniskajām raksturlieknēm.

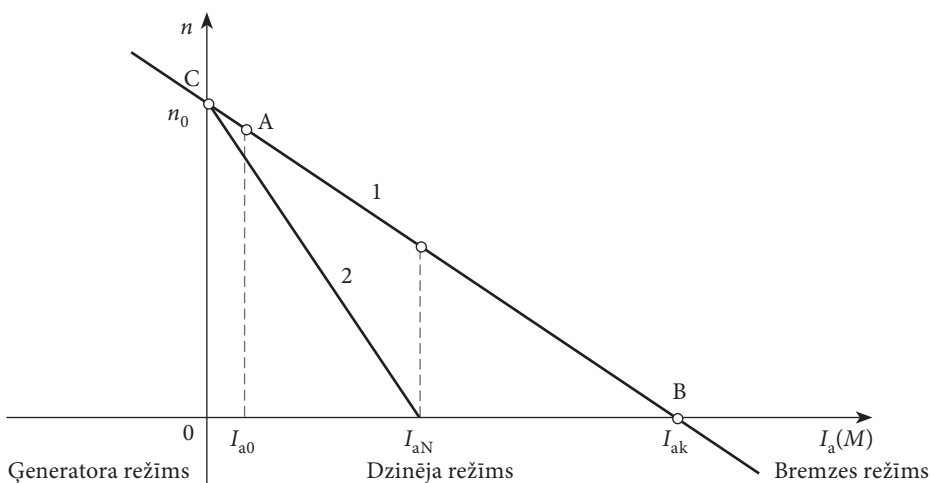
Jauktas ierosmes dzinējam ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar virknes ierosmes dzinēju. Šis dzinējs var darboties tukšgaitā, jo tā paralēlais tinums ierobežo rotācijas frekvenci un nepieļauj joņošānu. Tomēr divu ierosmes tinumu izmantošana nedaudz sadārdzina dzinēju.

## 2.7.9. Līdzstrāvas dzinēju bremsēšana

Līdzstrāvas dzinēju ātrai apturēšanai vai rotācijas frekvences samazināšanai plaši izmanto elektrisko bremsēšanu. Bremsēšanu izmanto arī tad, ja ilgāku laiku jāierobežo kāda mehānisma rotācijas frekvence, piemēram, celtnim nolaižot kravu. Dzinēju bremsēšanai izmanto trīs paņēmienus: rekuperatīvo, pretslēguma un dinamisko bremsēšanu.

**Rekuperatīvā bremsēšana** ir visekonomiskākā, jo ir saistīta ar dzinēja pāreju ģeneratora režīmā un enerģijas atdošanu tīklā.

Rekuperatīvo bremsēšanu realizē, ja dzinēja rotācijas frekvenci palielina virs tukšgaitas frekvences  $n_0$  (2.102. att.). Tad EDS  $E_a$  kļūst lielāks par tīkla spriegumu  $U$  un strāva  $I_a$



2.102. att. Līdzstrāvas mašīnas darba režīmi.

maina virzienu. Arī elektromagnētiskais griezes moments maina virzienu uz pretējo un kļūst bremsējošs attiecībā pret ārējo momentu. Paralēlas ierosmes dzinējam mehāniskā raksturlikne rekuperatīvās bremsēšanas režīmā ir dzinēja režīma attiecīgās raksturliknes turpinājums otrajā kvadrantā.

Ņemot vērā virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturliknes īpatnību, ka tukšgaitā  $n \rightarrow \infty$ , tā rekuperatīvā bremsēšana nav iespējama. Tāpēc šāda režīma realizācijai virknes ierosmes tinumu caur rezistoru pieslēdz paralēli enkura tinumam vai baro no neatkarīga avota.

**Pretslēguma bremsēšana.** Šajā režīmā dzinēja elektromagnētiskais moments kļūst bremsējošs. Pretslēguma bremsēšanu realizē divējādi:

- 1) mainot strāvas virzienu enkura vai ierosmes tinumā;
- 2) ļaujot piedzenamā mehānisma uzkrātajai kinētiskajai enerģijai griezt tiklam pieslēgtā dzinēja enkuru pretēji tā griešanās virzienam dzinēja darba režīmā.

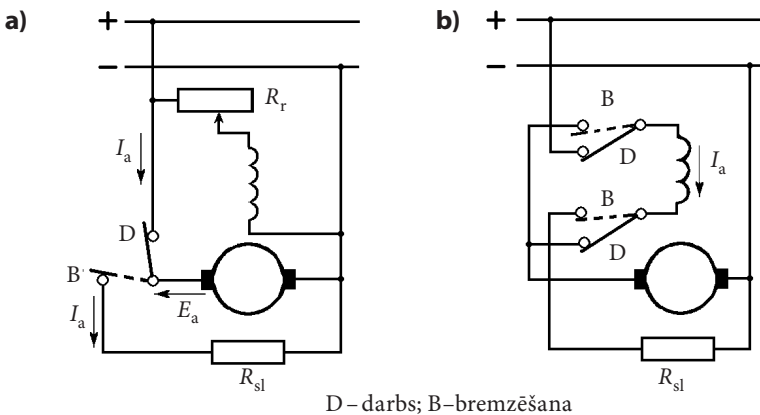
Pretslēguma bremsēšanas režīmā enkura EDS darbojas saskaņoti ar tīkla spriegumu, tāpēc

$$I_a = \frac{U + E_a}{\sum R}$$

Gadījumā, ja dzinēju izmanto tādu mehānismu piedziņai, kuru slodzes moments var būt lielāks par elektromagnētisko momentu, piemēram, svara nolaišanai, pie noteiktas slodzes dzinējs apstājas (punkts B 2.102. attēlā). Turpinot palielināt statisko slodzes momentu, dzinējs sāks griezties pretējā virzienā.

Lai šādos gadījumos ierobežotu strāvu enkura ķēdē, ieslēdz papildpretestību un pāriet uz maksimālo raksturlikni (taisne 2), nodrošinot  $I_{ak} \leq I_{aN}$ .

**Dinamiskā bremsēšana.** Dinamisko bremsēšanu realizē, enkura tinumu atslēdzot no tīkla un pieslēdzot to speciālam bremsēšanas reostatam  $R_{sl}$  (2.103. att.). Šajā gadījumā rotējošo daļu mehāniskā enerģija pārvēršas elektriskajā enerģijā, kas tiek patērēta reostatā



2.103. att. Dinamiskās bremsēšanas shēmas: a – paralēlas ierosmes dzinējam; b – virknes ierosmes dzinējam.

$R_{sl}$  un enkura ķēdes pārējos elementos.

Enkura strāva dinamiskās bremsēšanas režīmā maina savu virzienu uz pretējo, bet elektromagnētiskais moments iedarbojas bremsējoši uz dzinēja rotējošām daļām. Dinamiskās bremsēšanas intensitāti regulē, mainot ierosmes strāvu.

Virknes ierosmes dzinēju ierosmes tinumu dinamiskās bremsēšanas laikā, lai izsargātos no mašīnas atmagnetizēšanas, nepieciešams pārslēgt tā, lai strāvas virziens tajā paliktu nemainīgs.

## 2.8. SPECIĀLAS NOZĪMES LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS

### 2.8.1. Ģeneratori ar strauji krītošu ārējo raksturliķni

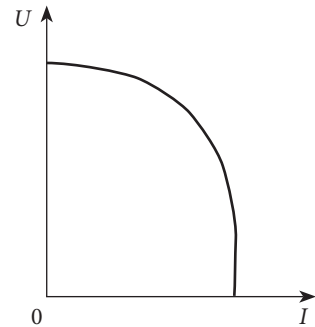
Šādos ģeneratoros, strauji mainoties spriegumam uz to spailēm, enkura strāvas vērtība ir tuva īsslēguma strāvai. Strauji krītoša ārējā raksturliķne nepieciešama, piemēram, metināšanas ģeneratoriem. Tādā gadījumā metināšanas strāva ir mazā mērā atkarīga no loka garuma un pat īsslēguma brīdī, kad elektrods pieskaras metināšanas objektam, tā pieaug tikai nedaudz.

Krītoša ārējā raksturliķne ir arī ģeneratoriem, kas baro elektrodzinējus, kuriem darba laikā iespējami režīmi ar nobremzētu rotoru, piemēram, ekskavatoru dzinējiem. Krītoša ārējā raksturliķne šajā gadījumā ierobežo dzinēja strāvu un griezes momentu, tādējādi pasargājot mehānismus no bojājumiem. Līdzīgs mērķis tiek sasniegts dīzeļlokomotīvēs, barojot vilces dzinējus.

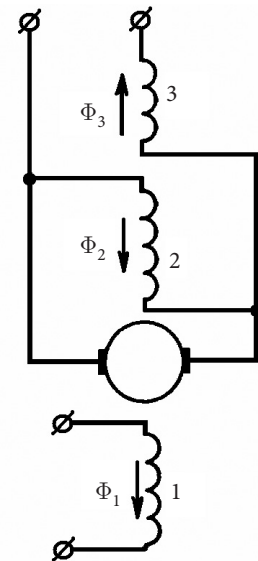
Līdzstrāvas ģeneratora strauji krītoša ārējā raksturliķne parādīta 2.104. attēlā. Šādas ārējās raksturliķnes var iegūt jauktas ierosmes ģeneratoram (sk. 2.76. att. d), ja to papildina ar trešo neatkarīgas ierosmes tinumu.

Turklāt virknes ierosmes tinuma magnētiskā plūsma  $\Phi_3$  šajā gadījumā vērsta pretī divu tinumu plūsmām  $\Phi_1$  un  $\Phi_2$  (2.105. att.).

Elektriskajai metināšanai izmanto speciālas konstrukcijas līdzstrāvas ģeneratoru ar divkāršu polu sistēmu (2.106. att.). Polu  $N_1$  un  $S_1$  serdēm ir lielāks šķērsriezuma laukums nekā polu  $N_2$  un  $S_2$  serdēm. Ģeneratoram ir divi ierosmes tinumi: tinuma 1 spoles aptver polus  $N_1$  un  $S_1$ , bet tinuma 2 spoles aptver šaurākos polus  $N_2$  un  $S_2$ . Mašīnā ir trīs sukas: galvenās sukas A un B un papildsuka C. Abu polu pāru ierosmes tinumus saslēdz paralēli un pievieno sukām BC, bet slodzi pieslēdz galvenajām



2.104. att. Kombinētas ierosmes ģeneratora ārējā raksturliķne.

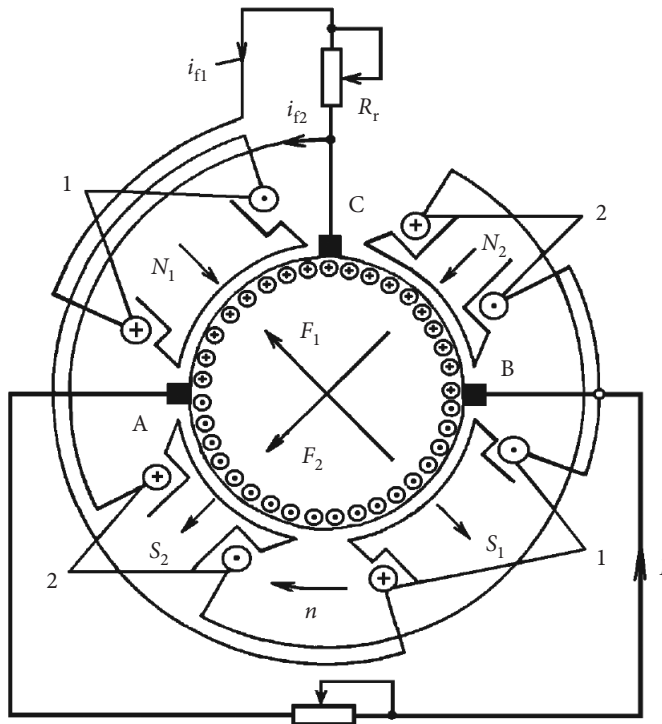


2.105. att. Kombinētas ierosmes ģeneratora shēma: 1 – neatkarīgas ierosmes tinums; 2 – paralēlas ierosmes tinums; 3 – virknes ierosmes tinums.

sukām AB. Ierosmes tinuma 1 ķēdē ieslēgts regulēšanas reostats  $R_r$ .

Ģeneratora rotācijas virzienu izvēlas tā, lai enkura MS komponente  $F_2$  pastiprinātu polu  $N_2$  un  $S_2$  radīto lauku, bet komponente  $F_1$  vājinātu polu  $N_1$  un  $S_1$  lauku. Tādā gadījumā vienas polaritātes polu magnētiskā plūsma  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ , pieaugot strāvai  $I$ , samazinās, jo nepiesātināto polu  $N_1$  un  $S_1$  plūsmas  $\Phi_1$  samazināšanās ir lielāka nekā plūsmas  $\Phi_2$  palielināšanās piesātinātajos polos  $N_2$  un  $S_2$ . Spriegums starp sukām B un C, kurām pievienoti ierosmes tinumi, gandrīz nemainās, jo inducētā EDS lielums uz sukām B un C ir atkarīgs no polu  $N_2$  un  $S_2$  nemainīgās magnētiskās plūsmas. Pateicoties šādai ierosmes sistēmai, ģeneratora spriegums, pieaugot slodzes strāvai, strauji krītas un pat īsslēguma režīmā nepārsniedz pieļaujamās vērtības. Krītošās ārējās raksturlieknes slīpumu var regulēt ar reostatu  $R_r$ .

Aplūkotajiem līdzstrāvas metināšanas ģeneratoriem piemīt vairāki trūkumi: samērā zems lietderības koeficients, relatīvi liela masa un sarežģīta konstrukcija. Turklāt suku kolektora mezgls sarežģī šādu ģeneratoru ekspluatāciju un samazina darba drošumu. Tāpēc pēdējā laikā aizvien plašāk izmanto maiņstrāvas metināšanas agregātus.



2.106. att. Metināšanas ģenerators ar divkāršu polu sistēmu.

## 2.8.2. Elektromašīnu pastiprinātāji

Automatizētās elektropiedziņas sistēmās līdzās elektronu, magnētiskajiem un hidrauliskajiem pastiprinātājiem pielietojumu rod elektromašīnu pastiprinātāji.

Parasto līdzstrāvas neatkarīgas ierosmes ģeneratoru var uzskatīt par pastiprinātāju. Jauda  $P_1$ , kas pievadīta ierosmes tinumam, šajā gadījumā ir ieejas signāls, bet enkura jauda  $P_2$  – izejas signāls. Attiecību  $P_2/P_1 = k_p$  sauc par ģeneratora pastiprinājuma koeficientu. Ģeneratoriem ar nominālo jaudu 0,5–30 kW  $k_p = 15–50$ .

Daudz lielāku pastiprinājuma koeficienta vērtību var iegūt, izmantojot speciālu mašīnu, kuru griež asinhronais dzinējs.

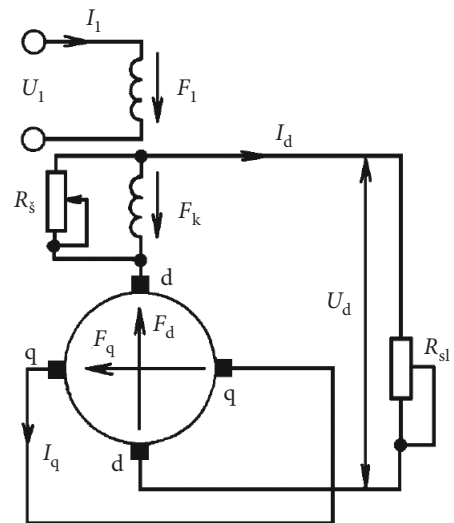
Plašāk izplatīts ir šķērslauka elektromašīnu pastiprinātājs (2.107. att.).

Pastiprinātāja statorā var būt ievietoti vairāki vadības tinumi, no kuriem attēlā parādīts tikai viens, un kompensācijas tinums. Ja uz vadības tinumu padod pastiprināmo signālu ar spriegumu  $U_1$  un strāvu  $I_1$ , tas rada nelielu magnētisko plūsmu garenass virzienā. Šī plūsma inducē enkura tinumā EDS  $E_q$ , kura maksimālā vērtība ir uz sukām q–q. Tā kā sukas q–q slēgtas īsi, tad enkura tinumā plūst relatīvi liela strāva  $I_q$ . Šī strāva rada šķērsass virzienā vērstu magnētisko plūsmu, kas savukārt enkura tinumā inducē relatīvi lielu EDS  $E_d$  ar maksimālo vērtību uz sukām d–d. EDS  $E_d$  ārējā slodzes ķēdē uztur strāvu  $I_d$ . Tādējādi šķērslauka elektromašīnu pastiprinātājā ir divas pastiprinājuma pakāpes. Pirmo pakāpi veido vadības tinums un enkura tinums pa q asi, bet otro – enkura tinums pa q asi un enkura tinums pa d asi.

Strāva  $I_d$  rada enkura garenreakcijas MS, kas vērsts pretī vadības tinuma radītajam MS  $F_1$  un cenšas atmagnetizēt mašīnu. Lai to novērstu, izveidots kompensācijas tinums, kura radītā MS  $F_k$  virziens ir pretējs enkura garenreakcijas MS virzienam.

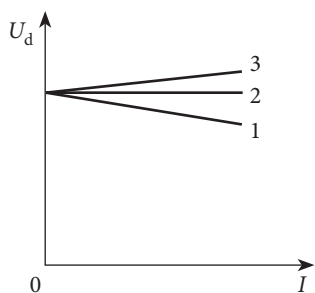
Elektromašīnu pastiprinātājos kompensācijas tinumu parasti izveido nedaudz spēcīgāku nekā tas nepieciešams enkura garenreakcijas kompensācijai. Tas ir nepieciešams, lai ar šuntējošā reostata  $R_s$  palīdzību varētu iestatīt katram gadījumam nepieciešamo kompensācijas pakāpi. Kompensācijas pakāpe būtiski ietekmē pastiprinātāja ārējās raksturlīknes (2.108. att.).

Ja enkura garenreakcija nav pilnībā kompensēta, tad, slodzei pieaugot, izejas spriegums  $U_d$  samazinās (2.108. att., līkne 1). Pilnīgas kompensācijas gadījumā, slodzes strāvai pieaugot, spriegums  $U_d$  nedaudz samazinās sakarā ar sprieguma kritumu enkura ķēdē (2.108. att., līkne 2). Ja enkura garenreakcijas kompensācijas pakāpe ir pārāk liela, tad, slodzei pieaugot, spriegums  $U_d$



2.107. att. Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātāja principiālā shēma.





2.108. att. Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātāja ārējās raksturlīknes, ja enkura garenreakcija nav pilnībā kompensēta (1), pilnībā kompensēta (2) un kompensācijas pakāpe ir pārāk liela (3).

palielinās. No darbības stabilitātes viedokļa šāds režīms nav vēlams.

Elektromašīnu pastiprinātāju pastiprinājuma koeficienta vērtība var sasniegt no 10 000 līdz 100 000.

Lai pārejas procesos palielinātu pastiprinātāja ātrdarbību, tā statora jūgu veido no elektrotehniskā tērauda loksņēm. Tādā gadījumā samazinās virpuļstrāvas, kas bremzē pārejas procesu norisi. Lai mazinātu paliekošā magnētisma ietekmi uz pastiprinātāja raksturlīkņēm, tā izgatavošanā izmanto augstvērtīgu tēraudu.

Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātājus izgatavo ar jaudu līdz 100 kW.

### 2.8.3. Līdzstrāvas taхоģeneratori

Par taхоģeneratoriem sauc elektriskās mikromašīnas, kas darbojas ģeneratora režīmā un kalpo rotācijas frekvences pārveidošanai elektriskajā signālā. Pārveidošanas proporcionalitāti nosaka izejas raksturlīkne, t. i., sakarība starp rotācijas frekvenci  $n$  un taхоģeneratora izejas spriegumu  $U_{iz}$ .

Līdzstrāvas taхоģeneratori ir parastas mazjaudas mašīnas ar neatkarīgu ierosmi vai ar pastāvīgiem magnētiem. Šāda ierosme nodrošina nemainīgu magnētisko plūsmu  $\Phi = const$ . Tādā gadījumā EDS, kas inducējas enkurā, ir proporcionāls rotācijas frekvencei  $n$ :

$$E_a = c_e n \Phi = cn. \quad (2.57)$$

Taču taхоģeneratora sprieguma vienādojumu var uzrakstīt arī šādi:

$$E_a = U_{iz} + IR_a = U_{iz} \left( 1 + \frac{R_a}{R_{sl}} \right), \quad (2.58.)$$

kur  $I = U_{iz}/R_{sl}$ ;

$R_{sl}$  – slodzes pretestība.

Ņemot vērā izteiksmes (2.57.) un (2.58.), iegūstam taхоģeneratora izejas raksturlīknes vienādojumu:

$$U_{iz} = \frac{cn}{1 + R_a/R_{sl}}. \quad (2.59.)$$

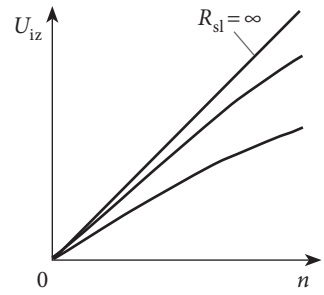
No izteiksmes (2.59.) redzams, ka taхоģeneratora izejas spriegums ir proporcionāls rotācijas frekvencei  $n$ , ja slodzes pretestība  $R_{sl}$  ir nemainīga.

Taхоģeneratora izejas raksturlīknes parādītas 2.109. attēlā. Pieaugot slodzes strāvai  $I$ , izpaužas enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība (sk. 2.4.2. apakšnodaļu) un raksturlīknes novirzās no lineārām. Mēraparātu izmantošana ar lielu iekšējo pretestību samazina raksturlīkņu nelinearitāti.

Svarīgs taхоģeneratora parametrs ir tā izejas raksturlīknes stāvums (izejas sprieguma

pieauguma attiecība pret rotācijas frekvences pieaugumu). Darba gaitā taļoģeneratora izejas raksturlīknes stāvums var mainīties, mainoties ierosmes tinuma temperatūrai un sprieguma kritumam suku kontaktos. Līdzstrāvas taļoģeneratoru kļūda (izejas raksturlīknes novirze no lineāras) nepārsniedz 0,5–3 %. Tos izmanto rotācijas frekvences mērišanai līdz 10 000 min<sup>-1</sup>.

Jāatzīmē, ka līdzstrāvas taļoģeneratoriem piemīt visi trūkumi, kas izriet no suku kolektora mezģla konstrukcijas. Tāpēc aizvien plašāku pielietojumu rod bezkontakta taļoģeneratori.



2.109. att. Taļoģeneratora izejas raksturlīknes.

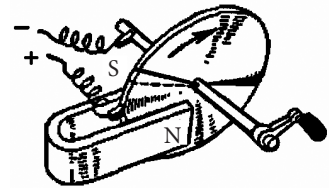
### 2.8.4. Unipolārie ģeneratori

Unipolārās mašīnas atšķiras no parastajām līdzstrāvas mašīnām ar to, ka to enkurā inducējas nemainīga virziena EDS. Tāpēc tajās, atšķirībā no heteropolārajām līdzstrāvas mašīnām, nav frekvenču pārveidotāja.

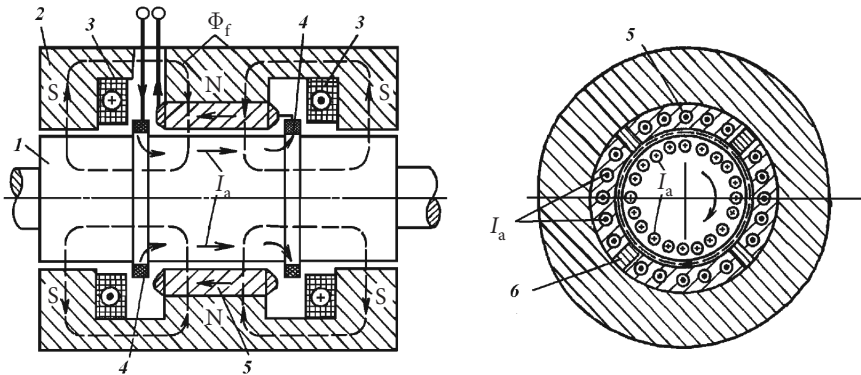
Unipolārās mašīnas darbības princips paskaidrots 2.110. attēlā.

Var stādīties priekšā, ka 2.110. att. parādītais disks sastāv no daudziem sektora veida vadiem. Katrs no šiem sektoriem rotējot atrodas nemainīgas polaritātes laukā. Tāpēc arī tajā inducētais EDS saglabā nemainīgu virzienu. Ar izvēlēto rotācijas virzienu un polu polaritāti EDS vērsts no diska centra uz tā perifēriju.

Viens no unipolārā līdzstrāvas ģeneratora izveidojuma variantiem parādīts 2.111. attēlā. Enkurs izveidots kā mašīvs tērauda disks, kas rotē ierosmes laukā. Ierosmes magnētisko plūsmu  $\Phi_f$  rada nekustīgas spoles. Plūsmas  $\Phi_f$  noslēdzoties magnētvdā, divas reizes šķērso gaisa spraugu. Aktīvajā zonā starp sukām uz enkura virsmas veidojas gredzenveida pols (aplūkojamā piemērā ziemeļpols N).



2.110. att. Diskveida unipolārās mašīnas darbības princips.



2.111. att. Unipolārais ģenerators: 1 – rotors; 2 – statora magnētvdas; 3 – ierosmes tinuma spoles; 4 – suku; 5 – kompensācijas “tinums”; 6 – nemagnētiskas starplikas.

Tāpēc visos rotora aksiālajos elementos starp sukām inducēsies EDS:

$$E = Bl_{\delta} V, \quad (2.60.)$$

kur  $B$  – magnētiskā lauka indukcija gaisa spraugā;

$l_{\delta}$  – aktīvās zonas aprēķina garums;

$V$  – lineārais ātrums uz rotora virsmas.

Ja sukām pieslēdz slodzi, parādās enkura strāva  $I_a$ , kas sadalās starp rotora aksiāliem elementiem. Pieņemam, ka sukas vienmērīgi novietotas uz kontaktgredzeniem. Tāpat kā parastajā līdzstrāvas mašīnā, enkura reakcijas MS atmagnetizējoši iedarbojas uz ierosmes lauku. Turklāt šī ietekme ir jūtāmāka, jo enkura lauks noslēdzas rotora un statora detaļās ar mazu magnētisko pretestību. Enkura reakcijas ietekmes mazināšanai lieto kompensācijas “tinumu” un nemagnētiskas starplikas statorā vai rotorā.

Unipolāros ģeneratorus izmanto lielu strāvu iegūšanai (līdz  $1,5 \cdot 10^5$  A ilgstošā režīmā un līdz  $1,8 \cdot 10^6$  A impulsrežīmā) ar nelielu spriegumu (1–100 V ilgstošā režīmā un līdz 800 V impulsrežīmā). Robežjaudas mašīnās strāvas novadīšanu īsteno caur šķidra metāla kontaktiem (nātrijs, kālijs). Minētajā strāvu un spriegumu diapazonā unipolārie ģeneratori tehniski ekonomisko rādītāju ziņā pārspēj līdzstrāvas mašīnas ar kolektoru. Unipolāros ģeneratorus izmanto elektrolīzē, paātrinātāju elektromagnētu barošanai, kondukcijas elektromagnētiskajos sūkņos u. c.

### 2.8.5. Līdzstrāvas vadāmi dzinēji

Vadāmi dzinēji kalpo elektriskā signāla (vadības signāla) pārveidošanai mehāniskā rotācijas kustībā ar mērķi iedarboties uz regulējamo vai vadāmo ierīci. Vadāmus dzinējus plaši izmanto automātiskās vadības un regulēšanas sistēmās. Ja signāla spriegums un jauda nav pietiekama, servodzinēja darbināšanai izmanto jaudas pastiprinātājus. Vadāmu dzinēju nominālā jauda parasti nepārsniedz 500–600 W.

Specifiskie darba apstākļi vadāmiem dzinējiem izvirza šādas prasības:

- nav pieļaujama pašgaita, t. i., noņemot vadības signālu, rotoram jāapstājas;
- lai nodrošinātu dzinēja stabilu darbību plašā rotācijas frekvenču diapazonā, tā mehāniskajām un regulēšanas raksturlielņiem jābūt lineārām;
- pietiekama ātrdarbība;
- minimāls izkustēšanās spriegums (minimāls vadības signāls, kas izraisa rotora griešanos);
- darba drošums un ekonomiskums.

Pieņemot lēmumu par noteikta tipa vadāma dzinēja izmantošanu, vadās pēc tā, kā minētais dzinējs atbilst iepriekš minētajām prasībām. Turklāt vadāmiem dzinējiem jāatbilst arī elektriskajām mašīnām izvirzītajām vispārīgajām prasībām.

Novērtējot vadāmu dzinēju ekspluatācijas īpašības, galvenokārt aplūko to mehāniskās un regulēšanas raksturlielnes.

Parasti līdzstrāvas vadāmus dzinējus izveido ar neatkarīgu ierosmi, retāk – ar pa-

stāvīgajiem magnētiem. Suku kolektora mezgls sarežģī šo dzinēju ekspluatāciju. Kā pozitīvās līdzstrāvas vadāmu dzinēju īpašības jāmin lineāras mehāniskās un regulēšanas raksturlielnes, kā arī vienkārša vadība.

Vadāmos dzinējos ar elektromagnētisko ierosmi izmanto enkura un polu vadību, bet dzinējos ar pastāvīgajiem magnētiem – tikai enkura vadību.

Vadāmiem dzinējiem ar enkura vadību (2.112. att. a) un elektromagnētisko ierosmi polu tinums kalpo par ierosmes tinumu  $I_eT$ , bet enkura tinums ir vadības tinums VT. Ierosmes tinumam tiek pieslēgts nemainīgs līdzstrāvas spriegums  $U_{ie}$ . Vadības tinumam signāls (vadības spriegums  $U_v$ ) caur vadības bloku VB tiek pieslēgts tikai tad, kad nepieciešams vadāmo dzinēju ieslēgt. Dzinējos ar pastāvīgajiem magnētiem ierosmes tinuma nav, un pievadīts tiek tikai vadības signāls (2.112. att. b).

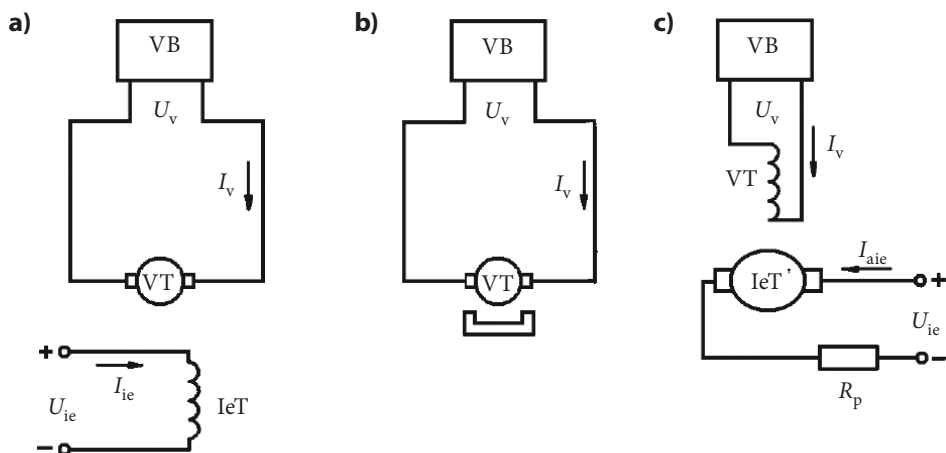
Dzinējos ar polu vadību enkura tinums kalpo par ierosmes tinumu, bet polu tinums – par vadības tinumu (2.112. att. c). Lai ierobežotu strāvu enkura tinumā, kad rotors ir nekustīgs, parasti virknē ar to ieslēdz rezistoru  $R_p$ .

Līdzstrāvas vadāmu dzinēju reversu īsteno, izmainot vadības signāla polaritāti.

Līdzstrāvas vadāmu dzinēju enkurs var būt izveidots tāpat kā parastajiem līdzstrāvas dzinējiem. Tomēr parastās konstrukcijas enkuram ir relatīvi liels inerces moments un tāpēc nepietiekama ātrdarbība. Šo iemeslu dēļ plašāk izmanto vadāmus dzinējus ar dobu plastmasas rotoru (2.113. att.), uz kura novietots enkura tinums, kas savienots ar kolektoru. Iekšējais nekustīgais feromagnētiskais stators dzinējos ar enkura vadību var būt masīvs.

Sakarā ar palielinātu gaisa spraugu starp ārējo un iekšējo statoru nepieciešams spēcīgāks ierosmes tinums. Tāpēc mašīnas gabarītu izmēri pieaug, bet lietderības koeficients samazinās. Šādu vadāmu dzinēju jauda nepārsniedz 10–15 W.

Vadāmos dzinējos ar diskveida enkuru rotors ir plāns, no izolācijas materiāla – tekstoļīta vai getinaksa – perforēts disks, kuram abās pusēs elektroķīmiskā procesā ir izveidots

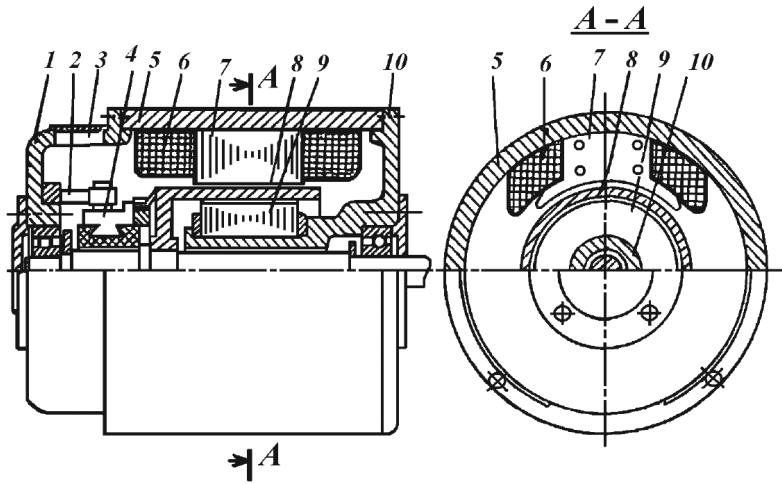


2.112. att. Līdzstrāvas vadāmu dzinēju slēguma shēmas: a un b – ar enkura vadību; c – ar polu vadību.

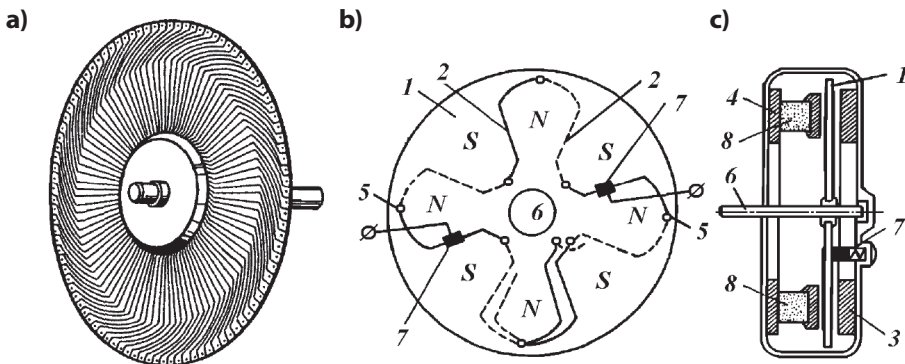
enkura iespiestais tinums (2.114. att.). Tas ir viļņa tinums, ko veido plānas vara joslas.

Katra šī tinuma sekcija (2.114. att. b) sastāv no divām vara joslām, no kurām viena sekcijas puse atrodas diska vienā pusē, bet otra – diska pretējā pusē (parādīta ar pārtrauktām līnijām.) Abas sekcijas daļas tinuma veidošanas laikā tiek savstarpēji savienotas pa diskā izveidotām spraugām. Vadāmajam dzinējam ar diskveida enkuru kolektora nav, bet diska vienai pusei piespiestās divas sudraba-grafīta sukas tieši slid pāri iespiestā tinuma sekciju aktīvajām malām.

Vadāma dzinēja diskveida enkurs (2.114. att. c) atrodas starp pastāvīgajiem magnētiem, kuriem ir gredzena segmenta formas uzgaļi, un magnētiski mīksta tērauda gredze-



2.113. att. Līdzstrāvas vadāms dzinējs ar dobu nemagnētisku rotoru: 1 – priekšējais gultņu vairogs; 2 – suku turētājs; 3 – apskates lūkas vāciņš; 4 – kolektors; 5 – ārējā statora jūgs; 6 – polu ierosmes tinums; 7 – polu serde; 8 – dobs enkurs (rotors); 9 – iekšējais stators; 10 – aizmugures gultņu vairogs.



2.114. att. Līdzstrāvas vadāma dzinēja diskveida rotors ar iespiesto tinumu (a), iespiestā tinuma principiālā shēma 8 polu dzinējam (b) un vadāma dzinēja konstruktīvā shēma (c): 1 – disks; 2 – enkura tinuma sekcijas; 3 un 4 – gredzeni; 5 – spraugas diskā; 6 – vārpsta; 7 – sukas; 8 – pastāvīgie magnēti.

nu 3. Pastāvīgie magnēti piestiprināti otram magnētiski mīksta tērauda gredzenam 4.

Ierosmes polu radītā magnētiskā plūsma virzās perpendikulāri diska plaknei cauri divām gaisa spraugām, nemagnētiskajam diskam ar iespiesto tinumu un noslēdzas pa gredzeniem 3 un 4.

Dažreiz, lai enkurs pēc vadības signāla pārtraukšanas ātrāk apstātos, enkura disku izgatavo no alumīnija. Bet darba režīmā tāds enkurs izraisa bremsējošu momentu, kas samazina servodzinēja stacionāro griešanās ātrumu.

Vadāmiem dzinējiem ar diskveida enkuru galvenais trūkums ir samērā mazais kalpošanas ilgums, jo suku darbības rezultātā iespiestais tinums ātri nodilst.

## 2.8.6. Līdzstrāvas magnetohidrodinamiskās mašīnas

Par magnetohidrodinamiskajām sauc elektriskās mašīnas, kurās enerģijas elektromehāniskā pārveidošana saistīta ar šķidrums vai gāzu pārvietošanos magnētiskajā laukā. Par vienkāršāko magneto-hidrodinamisko dzinēju var uzskatīt līdzstrāvas elektromagnētisko sūkni (2.115. att.), kas kalpo šķidru metālu pārsūkņēšanai. Šajā sūknī kanāls ar šķidru metālu (parasti dzīvsudrabu, litiju, nātriju, kāliju u. c.) novietots starp elektromagnēta poliēm N un S. No ārējā avota ar spriegumu  $U$  caur elektrodiem līdzstrāva  $I$  tiek pievadīta šķidrajam metālam. Tā kā strāva šķidrumam tiek pievadīta caur elektrisku kontaktu, t. i., kondukcijas ceļā, šādu sūkni sauc par kondukcijas tipa sūkni.

Uz elementāru šķidrā metāla tilpumu  $dK$  darbojas elektromagnētisks spēks:

$$dN = JBdK,$$

kur  $B$  – magnētiskā lauka indukcija;

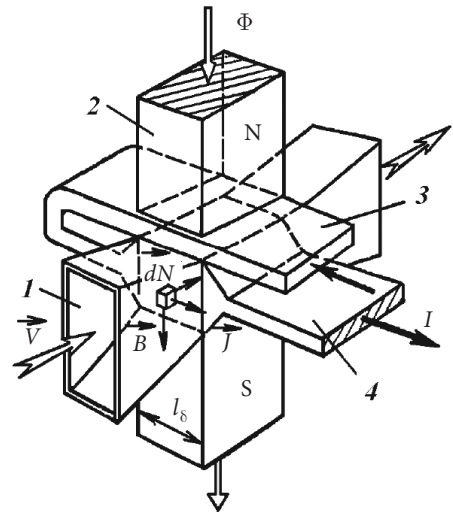
$J$  – strāvas blīvums.

Šādu spēku rezultātā šķidrā metāls pārvietojas ar tādu ātrumu  $V$ , kas nodrošina spriegumu līdzsvaru

$$U - E = U - Bl_s V = IR_a. \quad (2.61.)$$

Lai mazinātu strāvas  $I$  radīto atmagnetizējošo šķērslauku, starp poliēm un kanālu novieto kompensācijas šinu, pa kuru pretējā virzienā plūst tā pati strāva  $I$  (sk. 2.4. apakšnodaļu).

Galvenā elektromagnētisko sūkņu priekšrocība ir tāda, ka tajos nav rotējošu detaļu. Tāpēc iespējams pilnībā hermetizēt hidraulisko plūsmu. Pateicoties šim apstāklim, minētos sūkņus izmanto kodolreaktoros šķidro siltnesēju cirkulācijas nodrošināšanai.



2.115. att. Kondukcijas tipa elektromagnētiskais sūknis: 1 – kanāls; 2 – elektromagnēta poli; 3 – kompensācijas šina; 4 – elektrodi.

Līdzstrāvas kondukcijas sūkņu barošanai nepieciešams barošanas avots ar lielu strāvu un nelielu spriegumu. Šiem mērķiem labi piemēroti unipolārie ģeneratori.

Magnetohidrodinamiskajos dzinējos par darba ķermeni var izmantot arī plazmu, t. i., augstas temperatūras jonizētu gāzi. Aplūkojamās mašīnas, tāpat kā visi elektromehāniskie pārveidotāji, ir apgriežamas. Tāpēc tās var izmantot arī elektriskās enerģijas ģenerēšanai. Tā, piemēram, ar 2.115. attēlā parādīto mašīnu var iegūt līdzstrāvu. Šajā nolūkā caur kanālu ar ātrumu  $V$  jāpārvieta strāvu vadošs šķidrums vai gāze. Ja kanālā būs radīts magnētiskais lauks ar indukciju  $B$ , uz elektrodiem parādīsies EDS  $E = Bl_{\delta} V$ . Noslēdzot ārējo ķēdi, tajā plūdis strāva. Mūsdienās magnetohidrauliskos ģeneratorus jau izmanto lielas jaudas impulsu iegūšanai.

## 3. TRANSFORMATORI

### 3.1. VISPĀRĪGAS ZIŅAS PAR TRANSFORMATORIEM

#### 3.1.1. Pamatdefinīcijas

Par **transformatoru** sauc statisku elektromagnētisku ierīci, kas vienas primārās maiņstrāvas sistēmu pārveido citā, sekundārā, ar citiem parametriem, to skaitā ar citu spriegumu.

Transformatora darbības principa pamatā ir elektromagnētiskās indukcijas parādība.

Parasti transformators sastāv no serdes, kas izgatavota no elektrotehniskā tērauda skārda, un diviem vai vairākiem tinumiem. Pa serdi noslēdzas magnētiskā plūsma, bet tinumos – elektriskā strāva.

Transformatoru, kurā ir divi tinumi, sauc par divtinumu, bet, kurā ir trīs vai vairāk tinumu, attiecīgi par trīstinumu un daudztinumu transformatoru. Visizplatītākie ir divtinumu transformatori. Tāpēc šajā nodaļā apskatāmie jautājumi pirmām kārtām tiks veltīti tieši šiem transformatoriem, bet daudztinumu transformatorus aplūkosim atsevišķi.

Izšķir vienfāzes, trīsfāžu un daudzfāžu transformatorus. Daudzfāžu transformatora tinumu veido visu fāžu tinumi, kas noteiktā veidā savienoti savā starpā.

Tinumu, kuram elektriskā enerģija tiek pievadīta no tīkla, sauc par primāro, bet tinumu, no kura enerģiju pievada patērētājiem, par sekundāro.

Atbilstoši tinuma nosaukumam visus lielumus (spriegums, jauda, strāva u. c.), kas attiecas uz primāro tinumu, sauc par primāriem un apzīmē ar indeksu 1. Sekundāro tinumu raksturojošos lielumus sauc par sekundāriem un apzīmē ar indeksu 2.

Ja sekundārā tinuma spriegums mazāks par primāro, transformatoru sauc par pazeminošu, bet, ja lielāks, tad par paaugstinošu. Tinumu, kas pievienots tīklam ar augstāku spriegumu, sauc par augstākā sprieguma (AS) tinumu, bet to, kas pievienots zemākā sprieguma tīklam – par zemākā sprieguma (ZS) tinumu.

Transformators ar atzarojumiem ir tāds transformators, kura tinumos ir speciāli atzarojumi primārā un sekundārā tinuma vijumu attiecības izmainīšanai. Sprieguma un strāvas nominālajām vērtībām atbilst tikai viens pamatatzars, kuru atzīmē uz transformatora plāksnītes.

Lai pasargātu transformatora izolāciju no gaisa iedarbības un uzlabotu tā dzesēšanas apstākļus, serdi kopā ar tinumiem ievieto tvertnē, kas piepildīta ar transformatoru eļļu. Šādus transformatorus sauc par eļļas transformatoriem, atšķirībā no sausajiem transformatoriem.

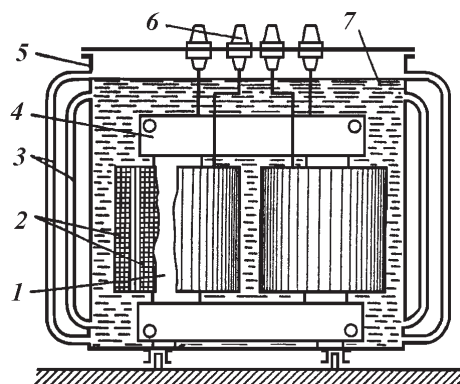
Atkarībā no veicamā uzdevuma transformatoru konstruktīvais izveidojums var būt dažāds. Tomēr elektromagnētiskie procesi visu veidu transformatoros būtībā ir vienādi. Visiem transformatoriem ir līdzīga konstruktīvā shēma, kas iekļauj:

- magnētisko sistēmu – magnētvalu, kas izgatavots no elektrotehniskā tērauda loksnēm;



- elektrisko sistēmu – divus vai vairāk tinumus, kas aptver serdi un ir izolēti no tās;
- dzesēšanas sistēmu (gaisa, eļļas, ūdens vai kombinētu), kas kalpo siltuma novadīšanai;
- mehānisko sistēmu, kas nodrošina transformatora konstrukcijas stiprību.

3.1. attēlā parādīta vienfāzes divtinumu transformatora konstruktīvā shēma. Šāda transformatora magnētveds ar tinumiem ievietots tvertnē, kas piepildīta ar eļļu. Magnētvedu kopā ar tinumiem pieņemts saukt par transformatora aktīvo daļu.



3.1. att. Vienfāzes transformatora konstruktīvā shēma: 1 – magnētveds; 2 – AS un ZS tinumi; 3 – caurules eļļas cirkulācijai; 4 – jūga sija; 5 – tvertne; 6 – AS un ZS ievadi; 7 – eļļa.

### 3.1.2. Transformatoru tipi

Mainstrāvas ģeneratori elektrostacijās ražo elektroenerģiju ar spriegumu 6–30 kV, bet tās pārvadē izmanto daudz lielāku spriegumu: 110, 150, 220, 330, 400, 500 kV un lielāku. Tāpēc katrā elektrostacijā uzstāda paaugstinošos transformatorus. Elektroenerģijas sadale starp pilsētām, lauku un rūpniecības patērētājiem, kā arī lielu uzņēmumu teritorijā notiek pa gaisvadu vai kabeļlīnijām ar spriegumu 220, 110, 35, 20, 10, 6 kV. Tādējādi visos sadales tīklu mezglu punktos jāuzstāda pazeminošie transformatori. Pazeminošie transformatori jāuzstāda arī tiešā elektroenerģijas patērētāju tuvumā, jo lielākā daļa no tiem darbojas ar 220, 380 un 660 V spriegumu.

No iepriekš teiktā var secināt, ka elektriskā enerģija ceļā no elektrostacijas līdz patērētājam tiek daudzkārt transformēta. Transformatorus, kurus izmanto maiņsprieguma pārveidošanai elektriskajās sistēmās – elektrostacijās un apakšstacijās, rūpniecības uzņēmumos, pilsētu un lauku sadales tīklos u. c., sauc par spēka transformatoriem.

Energosistēmās galvenokārt izmanto divtinumu un trīstinumu trīsfāžu transformatorus. Trīstinumu transformatorus uzstāda gadījumos, ja elektroenerģija jāaizvada dažādos attālumos ar diviem dažādiem spriegumiem. Tad trīstinumu transformators var aizstāt divus divtinumu transformatorus, tādējādi samazinot vajadzīgās platības, materiālus, kapitālos ieguldījumus un elektroenerģijas zudumus ekspluatācijas laikā.

Atsevišķos gadījumos divtinumu transformatora tinumus izveido no vairākiem savā starpā izolētiem zariem. Šādus transformatorus izmanto elektrostacijās, kad vienam transformatoram pieslēdz vairākus ģeneratorus.

Mūsdienu lieljaudas elektrostacijās divu augstsprieguma sistēmu savienošanai parasti izmanto autotransformatorus, t. i., tādus, kuros tinumi savā starpā savienoti elektriski. Autotransformatoriem piemīt vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar parastajiem transformatoriem. To izmaksas, aktīvo materiālu patēriņš un zudumi ekspluatācijas laikā ir

mazāki. Arī jaudas robežvērtības autotransformatoros var sasniegt lielākas, jo to masa un gabarīti ir mazāki nekā parastajiem transformatoriem.

Pie autotransformatoru trūkumiem jāpieskaita sarežģītākas releju aizsardzības ierīkošana un sprieguma regulēšana sakarā ar elektriski saistītiem tinumiem, kā arī nepieciešamība ierīkot ciešo zemējumu, kas palielina īsslēgumu strāvas. Turklāt paaugstinātu bīstamību autotransformatoriem rada atmosfēras radītie pārspriegumi.

Transformatorus, kurus izmanto shēmās ar pusvadītājelementiem (diodēm, tranzistoriem, tiristoriem u. c.), sauc par pārveidotājtransformatoriem.

Bez iepriekš minētajiem izgatavo vēl citus speciālos transformatorus, tādus kā elektrokrašņu, metināšanas, elektrovilces, mērmaiņus (sprieguma un strāvas) u. c.

Vispirms aplūkosim raksturīgākos spēka transformatorus.

### 3.1.3. Transformatoru nominālie lielumi

Transformatora nominālos datus, kuriem tas aprēķināts izgatavotāj rūpnīcā visam ekspluatācijas laikam, uzrāda piestiprinātajā plāksnītē – pasē. Tie ir:

- nominālā pilnā jauda  $S_N$ , kV·A;
- nominālais līnijas primārais spriegums  $U_{1IN}$ , V vai kV;
- nominālais līnijas sekundārais spriegums  $U_{2IN}$ , V vai kV;
- nominālā līnijas primārā strāva  $I_{1IN}$ , A;
- nominālā līnijas sekundārā strāva  $I_{2IN}$ , A;
- nominālā frekvence  $f$ , Hz;
- fāžu skaits;
- tinumu savienojumu shēma un grupa;
- īsslēguma spriegums  $u_k$ , %;
- darba režīms un dzesēšanas veids;
- transformatora kopējā masa, kg;
- eļļas masa, kg;
- aktīvās daļas masa, kg.

Vienfāzes transformatora nominālo jaudu aprēķina pēc formulas:

$$S_N = U_{1fN} \cdot I_{1fN}, \quad (3.1.)$$

bet trīsfāžu transformatora:

$$S_N = \sqrt{3} U_{1IN} \cdot I_{1IN} = 3 U_{1fN} \cdot I_{1fN}, \quad (3.2.)$$

kur  $U_{1fN}$ ,  $I_{1fN}$  – primārā tinuma nominālais fāzes spriegums un fāzes strāva.

Transformatora nominālos spriegumus (primāro un sekundāro) nosaka tukšgaitas režīmā. Primārā un sekundārā tinuma nominālās strāvas atbilst transformatora nominālajai jaudai un nominālajiem spriegumiem.

### 3.1.4. Transformatora darbības princips

Transformatora darbība pamatā ir divu vai vairāku nekustīgu kontūru savstarpēja elektromagnētiskā iedarbība. Ja vienu no šiem kontūriem pievieno maiņstrāvas avotam, tad tā radītās magnētiskās plūsmas rezultātā sekundārajos kontūros inducēsies elektrodzinējspēks (EDS). Ja sekundārie kontūri (tinumi) ir noslēgti, tajos plūst maiņstrāva. Tādējādi primārā kontūra maiņstrāvas enerģija tiek pārveidota (transformēta) sekundāro kontūru maiņstrāvas enerģijā.

Saskaņā ar elektromagnētiskās indukcijas likumu EDS, kas inducējas kontūrā, ir proporcionāls tās plūsmas izmaiņas ātrumam, kura šķeļ kontūru

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -W\frac{d\Phi}{dt}, \quad (3.3)$$

kur  $W$  – kontūra vijumu skaits;

$\Psi$  – kontūra plūsmas saķēdējums.

EDS virzienu nosaka pēc Lenca likuma, saskaņā ar kuru EDS radītā strāva cenšas pretoties magnētiskās plūsmas izmaiņām.

Nemot vērā, ka magnētiskās plūsmas saķēdējumu var izteikt ar kontūra induktivitāti  $L$  un strāvu  $i$ , t. i.,  $\Psi = iL$ , vienādojumu (1.3) var pārrakstīt:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(iL)}{dt} = -L\frac{di}{dt} - i\frac{dL}{dt}. \quad (3.4)$$

Ja  $L = \text{const}$ , tad

$$e = -L\frac{di}{dt}. \quad (3.5)$$

Transformatora darbības principu sīkāk apskatīsim vienfāzes divtinumu transformatoram, kura elektromagnētiskā sistēma parādīta 3.2. attēlā. Šāds transformators sastāv no noslēgta magnētvida un diviem tinumiem ar vijumu skaitu  $W_1$  un  $W_2$ .

Transformatora tinumos inducējas EDS un plūst strāvas, kas rada enerģijas pārnesei nepieciešamo elektromagnētisko lauku.

Magnētvids kalpo saites pastiprināšanai starp tinumiem un tinumu, atzaru un citu detaļu novietošanai un stiprināšanai. Magnētvidu saliek no izolētām elektrotehniskā tērauda loksnēm. Lokšņu biezumu izvēlas atkarībā no pieļaujamā virpuļstrāvu radīto zudumu līmeņa. Ja tīkla frekvence ir 50 Hz, spēka transformatoru magnētvida loksnes parasti izvēlas 0,35–0,27 mm biezas. Magnētvida daļu, kur novieto tinumus, sauc par stieni, bet to daļu, kas savieno stieņus un uz kuras neatrodas tinumi, sauc par jūgu.

Ja transformatora primāro tinumu ar nenoslēgtu sekundāro tinumu pieslēdz maiņstrāvas tīklam ar spriegumu  $U_1$ , tajā plūdis strāva  $i_1 = i_0$ . Strāvas  $i_0$  radītais magnetizējošais spēks (MS)  $i_0 W_1$  magnētvadā izraisa mainīgu magnētisko plūsmu  $\Phi$ , kas saķēdējas ar primārā un sekundārā tinuma vijumiem. Magnētiskā plūsma  $\Phi$  primārajā tinumā inducē pašindukcijas EDS

$$e_1 = -W_1\frac{d\Phi}{dt} = -L_1\frac{di_0}{dt}, \quad (3.6)$$

bet sekundārajā tinumā savstarpējas indukcijas EDS

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -M_{12} \frac{di_0}{dt}, \quad (3.7.)$$

kur  $L_1$  – primārā tinuma induktivitāte;

$M_{12}$  – primārā un sekundārā tinuma savstarpējā induktivitāte.

Saskaņā ar otro Kirhofa likumu primārajam tinumam var rakstīt:

$$u_1 = -e_1 + i_0 R_1, \quad (3.8.)$$

t. i., primārajā tinumā inducēto EDS  $e_1$  kopā ar sprieguma kritumu aktīvajā pretestībā  $R_1$  līdzsvaro tīkla spriegums  $u_1$ .

Analoģiski sekundārajam tinumam:

$$u_2 = e_2. \quad (3.9.)$$

No izteiksmēm 3.6.–3.9. redzams, ka, attiecīgi izvēloties tinumu vijumu skaitu, ar nemainīgu tīkla spriegumu var iegūt vajadzīgo sekundāro spriegumu  $u_2$ . Turklāt, ja  $W_1 > W_2$ , tad  $u_1 > u_2$  un transformatoru sauc par pazeminošo, bet, ja  $W_1 < W_2$ , tad  $u_1 < u_2$ , un transformators ir paaugstinošs.

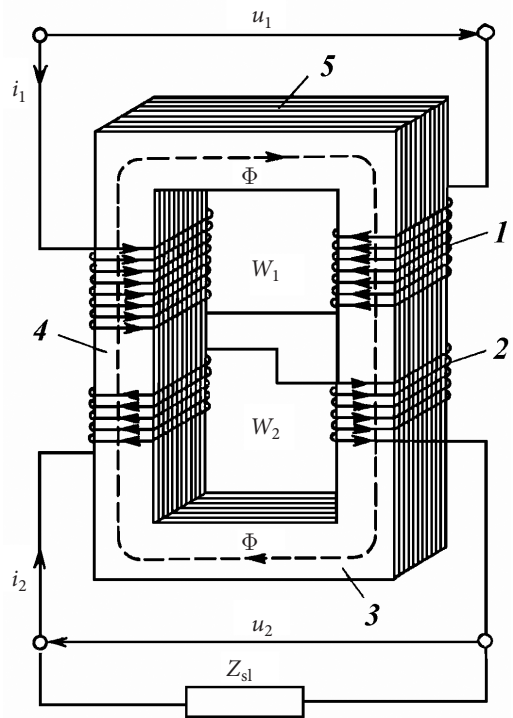
Ja sekundāro tinumu pieslēdz slodzes pretestībai  $Z_{sl}$ , tajā plūdis strāva  $i_2$ . Šīs strāvas radītais MS saskaņā ar Lenca likumu vērsti pretī primārās strāvas radītajam MS un cenšas samazināt magnētisko plūsmu  $\Phi$ . Tomēr praksē magnētiskā plūsma jūtami nesamazinās, jo vienlaikus ar strāvas parādīšanos sekundārajā tinumā pieaug arī strāva  $i_1$  un kompensē strāvas  $i_2$  atmagnetizējošo darbību, uzturot  $\Phi = const$  un nodrošinot līdzsvaru starp  $e_1$  un  $u_1$ .

Tādējādi slodzes režīmā magnētisko plūsmu transformatora serdē uztur primārais un sekundārais tinums kopā un to summārais MS ir aptuveni tāds pats kā tukšgaitā:

$$i_1 W_1 + i_2 W_2 \approx i_0 W_1. \quad (3.10.)$$

Tukšgaitas MS  $i_0 W_1$  ir 0,5–3 % no primārā tinuma MS nominālajā režīmā. Tāpēc daudzos gadījumos var pieņemt  $i_0 W_1 = 0$ . Tad

$$i_1 W_1 + i_2 W_2 \approx 0,$$



3.2. att. Vienfāzes divtinumu transformatora elektromagnētiskā sistēma: 1 – primārais tinums; 2 – sekundārais tinums; 3 – magnētveds; 4 – magnētveda stienis; 5 – magnētveda jūgs.

t. i., režīmos, kas tuvi nominālajam, strāvas  $i_1$  un  $i_2$  nobīdās savā starpā fāzē aptuveni par  $180^\circ$  un to radītie MS līdzsvaro viens otru tādā mērā, lai uzturētu nemainīgu magnētisko plūsmu  $\Phi$ . Šis pieņēmums ļauj secināt, ka primārā un sekundārā tinuma strāvas  $i_1$  un  $i_2$  ir apgriezti proporcionālas to vijumu skaitam:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{W_2}{W_1}.$$

Tā kā lielaudas transformatoru lietderības koeficients ir 0,97–0,99, var aptuveni pieņemt:

$$i_1 u_1 = i_2 u_2. \quad (3.11.)$$

No vienādojuma (3.11.) redzams, ka strāvas  $i_1$  un  $i_2$  transformatorā mainās apgriezti proporcionāli spriegumiem  $u_1$  un  $u_2$ .

Trīsfāžu maiņstrāvas transformēšanai izmanto vai nu trīs vienfāzes transformatorus (3.3. att. a), vai vienu trīsfāžu transformatoru, kurā visām trim fāzēm izveidots kopīgs magnētveds (3.3. att. b).

Tiešām, ja trīs vienfāzes transformatorus novieto tā, kā parādīts 3.4. att. a, tad magnētvedu daļas, uz kurām neatrodas tinumi, var apvienot vienā. Ņemot vērā, ka trīsfāžu sistēmā strāvu vektoru summa ir:

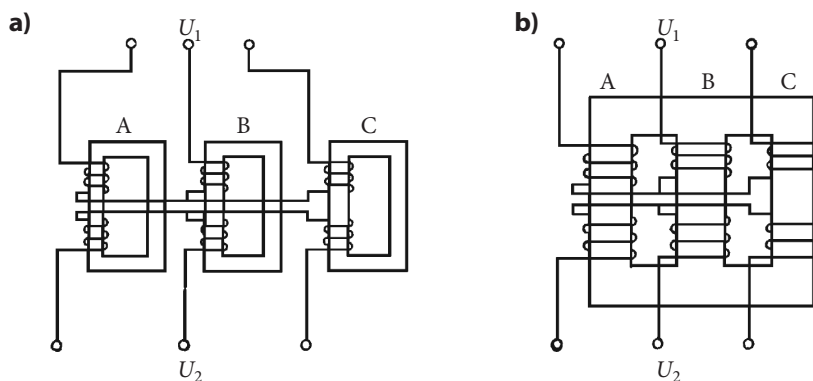
$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0,$$

tātad arī

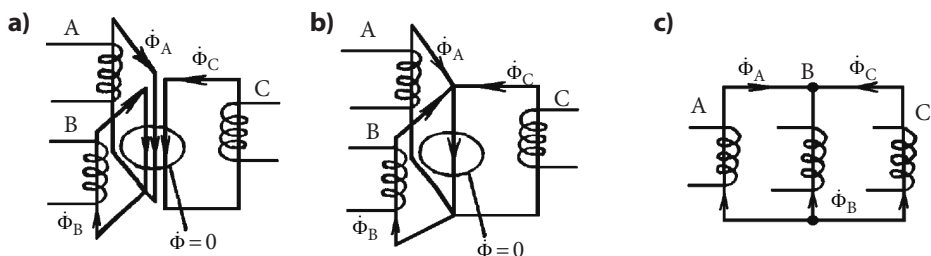
$$\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0.$$

Līdz ar to apvienotais stienis vispār nav vajadzīgs. Tā var izveidot trīsfāžu telpisko transformatoru (3.4. att. b). Ja šī transformatora B fāzei noņem jūgus un visus trīs stieņus izvieto vienā plaknē, iegūst parasto vienplaknes trīsfāžu transformatoru (3.4. att. c).

Trīsfāžu transformatori ar stieņu izvietojumu vienā plaknē ir ieguvuši visplašāko pielietojumu. Tiem raksturīgai nelielai magnētiskai asimetrijai ekspluatācijas laikā nav būtiskas nozīmes. Tā kā trīsfāžu transformatorā apvienojas trīs vienfāzes transformatori,



3.3. att. Trīsfāžu transformatori: a – grupas; b – ar kopīgu magnētvedu.



3.4. att. Trīs fāžu transformatora telpiskā (a, b) un vienplaknes (c) izveidošana.

visas iepriekš iegūtās sakarības ir spēkā trīs fāžu transformatora atsevišķai fāzei.

Turpmāk elektromagnētiskos procesus apskatīsim, pamatojoties uz vienfāzes transformatoru, pieņemot, ka trīs fāžu transformatora katrā fāzē stacionāros simetriskajos režīmos notiek analogiski procesi ar nobīdi laikā par  $120^\circ$ . Apskatot nestacionāros, nesimetriskos un citus trīs fāžu transformatoru režīmus, ņemsim vērā magnētivada īpatnības.

## 3.2. TRANSFORMATORA TUKŠGAITAS REŽĪMS

### 3.2.1. Vispārīgi norādījumi

Par transformatora tukšgaitu sauc režīmu, kurā primārajam tinumam pievada spriegumu, bet sekundārā tinuma ķēde ir pārtraukta, t. i.,  $i_2 = 0$ .

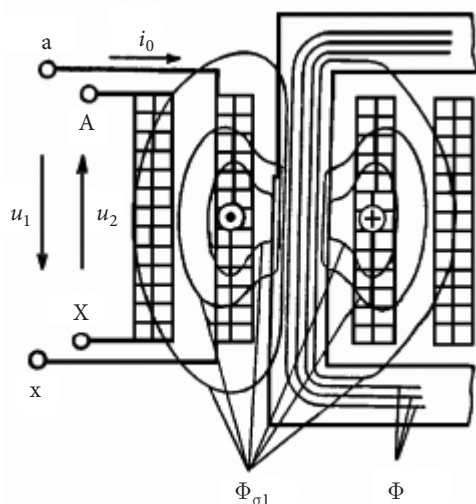
Tukšgaitas režīmā var noteikt šādus svarīgus lielumus:

- transformācijas koeficientu;
- tukšgaitas strāvu;
- tukšgaitas zudumus.

Tukšgaitas režīmam ir liela teorētiska nozīme kopā ar īsslēguma režīmu, kurā sekundārais tinums tiek saslēgts īsi, bet primārajam tinumam pievadīts pazemināts spriegums. Izmantojot superpozīcijas metodi, no šiem režīmiem var sintezēt transformatora raksturlīknes un parametrus jebkuram režīmam, to skaitā arī nominālās slodzes režīmam.

Izmantojot tukšgaitas un īsslēguma režīmu, praktiski var noteikt tādu transformatora parametrus kā transformācijas koeficients, lietderības koeficients u. c.

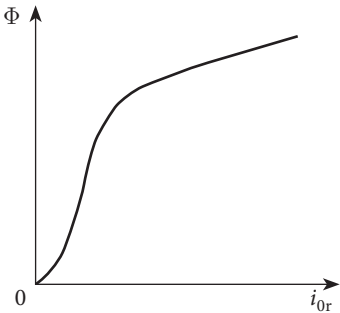
Apskatot tukšgaitas režīmu, izmantosim spriegumu, strāvu, EDS efektīvās vērtības un magnētiskās plūsmas efektīvo un amplitūdas vērtību.



3.5. att. Transformatora tukšgaitas režīms.

### 3.2.2. Fizikālie procesi transformatora tukšgaitā

Pieņemsim, ka transformatora primārā tinuma spailēm a–x pieslēgts sinusoidāls nominālais spriegums  $u_1$  ar nominālo frekvenci (3.5. att.). Sekundārā tinuma spaiļes A–X nav noslēgtas, un strāva  $i_2$  vienāda ar nulli. Strāvu  $i_0$ , kas šajā gadījumā plūst primārajā tinumā, sauc par tukšgaitas strāvu. Tukšgaitas režīmā enerģija transformatorā no viena tinuma otrā netiek pārvadīta. Transformators ir tikai ierosināts. Līdzīgi kā spole ar tēraudu serdi, kas pieslēgta maiņstrāvas tīklam. Tomēr sakarā ar to, ka transformatorā ir divi vai vairāk tinumi, magnētiskā plūsma, ko radījusi tukšgaitas strāvas reaktīvā komponente  $i_{0r}$ , nevienādi saķēdējas ar šiem tinumiem. Tāpēc ir lietderīgi apskatīt transformatora magnētisko lauku kā sastāvošu no divām daļām. Galvenā magnētiskā plūsma  $\Phi$  noslēdzas pa magnētivadu un saķēdējas ar visiem primārā un sekundārā tinuma vijumiem. Izklīdes plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  daļēji vai pilnīgi noslēdzas ārpus magnētivada un ir saķēdēta tikai ar primāro tinumu (3.5. att.).



3.6. att. Transformatora magnetizēšanas līkne.

Galvenā magnētiskā plūsma  $\Phi$  noslēdzas pa magnētivadu. Tā magnētiskā pretestība ir atkarīga no magnētiskā lauka intensitātes. Ja intensitātes vērtības ir mazas, sakarībai  $\Phi = f(i_{0r})$  ir lineārs raksturs, bet lielām intensitātēm jau izpaužas magnētiskais piesātinājums, un minētā sakarība ir nelineāra. Līkne  $\Phi = f(i_{0r})$ , ko sauc par transformatora magnetizēšanas līkni, parādīta 3.6. attēlā.

Bez piesātinājuma magnētiskā plūsma  $\Phi$  magnētivadā izraisa virpuļstrāvas un histerēzi, kuras pamatā arī rada elektroenerģijas zudumus transformatora tukšgaitā.

Izklīdes magnētiskā plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  noslēdzas galvenokārt pa gaisu, eļļu un izolāciju, t. i., pa posmiem, kuriem ir nemainīga magnētiskā caurlaidība ( $\mu = const$ ). Tāpēc magnētiskā plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  ir proporcionāla magnetizējošam spēkam.

Magnētiskās plūsmas  $\Phi$  un  $\Phi_{\sigma 1}$  rada viens un tas pats MS  $i_{0r}W_1$ , bet, tā kā magnētiskās pretestības  $R_\mu$  to ceļā ir visai dažādas, tad saskaņā ar Oma likumu magnētiskajām ķēdēm

$$\Phi = \frac{i_{0r} W_1}{R_\mu}$$

minētās plūsmas ir visai dažādas. Mūsdienu transformatoros tukšgaitas režīmā plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  ir 0,1–0,25 % no magnētiskās plūsmas  $\Phi$ .

Galvenā plūsma  $\Phi$  primārajā un sekundārajā tinumā inducē EDS

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_{10}}{dt}, \quad (3.12.)$$

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi_{20}}{dt}. \quad (3.13.)$$

Magnētiskā plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  primārajā tinumā inducē EDS no izkļiedes lauka

$$e_{\sigma 1} = -W_1 \frac{d\Phi_{\sigma 1}}{dt} = -\frac{d\Psi_{\sigma 1}}{dt}. \quad (3.14.)$$

Primārajā tinumā inducētie EDS  $e_1$  un  $e_{\sigma 1}$  kopā ar sprieguma kritumu pretestībā  $R_1$  līdzsvaro tīkla spriegumu  $u_1$ :

$$u_1 = -e_1 - e_{\sigma 1} + i_0 R_1, \quad (3.15.)$$

bet sekundārā tinuma EDS vienāds ar spriegumu uz tā spailēm

$$u_2 = e_2. \quad (3.16.)$$

Tukšgaitas režīmā transformatora atdotā jeb lietderīgā jauda vienāda ar nulli. Tomēr transformators no tīkla patērē nelielu enerģiju tā saukto tukšgaitas zudumu segšanai.

### 3.2.3. Ideāla transformatora tukšgaita

Transformatora tukšgaitas režīmā sprieguma kritums tinuma aktīvajā pretestībā  $R_1$  nepārsniedz 0,1–0,3 % no EDS  $e_1$ . Tāpēc to, tāpat kā EDS no izkļiedes lauka  $\Phi_{\sigma 1}$ , var neņemt vērā. Tāpat mazi ir arī zudumi tukšgaitas režīmā. Ir lietderīgi sākumā no apskates izslēgt minētos faktorus, pie tiem atgriežoties citos gadījumos, piemēram, apskatot ekspluatācijas režīmus.

Šāda vienkāršota pieeja ļauj sākumā apskatīt un labāk izprast būtiskākās parādības transformatorā, vēlāk ieviešot vajadzīgās korekcijas.

Transformatoru bez aktīvās pretestības, izkļiedes un zudumiem sauksim par ideālu transformatoru. Ņemot vērā iepriekš teikto, vienādojumu (3.15.) var pārrakstīt šādi:

$$u_1 = -e_1 = W_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.17.)$$

Vienādojumu (3.17.) sauc par ideāla transformatora primārā tinuma sprieguma vienādojumu. No (3.17.) izriet, ka spriegums  $u_1$  jebkurā mirklī tiek līdzsvarots ar primārajā tinumā inducēto EDS. Acīm redzams, ka EDS  $e_1$  un sprieguma  $u_1$  formām jābūt identiskām, turklāt tiem jāatrodas pretfāzē.

Ja transformatoru pieslēdz tīklam ar sinusoidālu spriegumu  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t)$ , tad inducētais EDS arī būs sinusoidāls:

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{1m} \sin(\omega t - \pi). \quad (3.18.)$$

Atrisinot vienādojumu (3.18.), iegūstam:

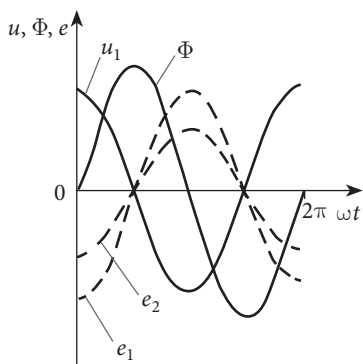
$$\Phi = -\frac{E_{1m}}{W_1} \int \sin(\omega t - \pi) dt = \frac{E_{1m}}{\omega W_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3.19.)$$

kur

$$\Phi_m = \frac{E_{1m}}{\omega W_1}, \quad (3.20.)$$

$\Phi_m$  – magnētiskās plūsmas amplitūda.





3.7. att. Transformatora sprieguma, magnētiskās plūsmas un EDS izmaiņas laikā.

No izteiksmes (3.18.) un (3.19.) redzams, ka, ja primārajam tinumam pievadīts sinusoidāls spriegums, tad arī plūsma mainās sinusoidāli. Turklāt magnētiskā plūsma  $\Phi$  atpaliek fāzē no sprieguma  $u_1$  par  $90^\circ$  un savukārt apsteidz EDS  $e_1$  par  $90^\circ$ . Tā kā abus EDS  $e_1$  un  $e_2$  inducē viena un tā pati magnētiskā plūsma, tie sakrīt fāzē. EDS  $e_1$  un  $e_2$  ir sinusoidāli un atpaliek fāzē no magnētiskās plūsmas  $\Phi$  par  $90^\circ$  (3.7. att.).

Saskaņā ar (3.20.) primārā un sekundārā tinuma EDS amplitūdas un efektīvās vērtības var aprēķināt pēc šādām formulām:

$$E_{1m} = \omega W_1 \Phi_m = 2\pi f_1 W_1 \Phi_m;$$

$$E_{2m} = \omega W_2 \Phi_m = 2\pi f_1 W_2 \Phi_m;$$

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m; \quad (3.21.)$$

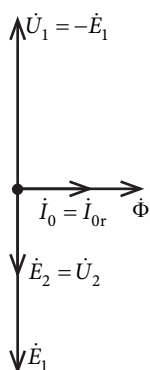
$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 W_2 \Phi_m. \quad (3.22.)$$

Tas apstāklis, ka ideālā transformatorā ar sinusoidālu spriegumu arī EDS un magnētiskā plūsma ir sinusoidāla, ļauj vienādojumus (3.16.) un (3.17.) pārrakstīt kompleksā formā;

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1; \quad (3.23.)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}_2 \quad (3.24.)$$

un konstruēt attiecīgo vektoru diagrammu (3.8. att.).



3.8. att. Ideāla transformatora vektoru diagramma tukšgaitas režīmā.

Vienādojums (3.23.) un (3.24.) ļauj novērtēt vairākas parādības, kas transformatorā rodas darba procesā.

Saskaņā ar (3.21.) un (3.23.) magnētiskās plūsmas amplitūdas vērtību var aprēķināt pēc formulas:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 f_1 W_1} = \frac{U_1}{4,44 f_1 W_1}, \quad (3.25.)$$

no kuras izriet, ka, ja vijumu skaits  $W_1$  un frekvence  $f_1$  ir nemainīgi, plūsmu nosaka tikai primārajam tinumam pievadītais spriegums. Īpaši jāuzsver, ka plūsmas vērtība nav atkarīga no slodzes.

Par transformatora koeficientu  $K$  saucsim AS tinumā inducētā EDS attiecību pret ZS tinuma EDS. Pieņemsim, ka AS tinums ir transformatora primārais tinums, tad

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f_1 W_1 \Phi_m}{4,44 f_1 W_2 \Phi_m} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (3.26.)$$

Tā kā transformatora tukšgaitā  $E_2 = U_2$  un  $E_1 = U_1$ , tad

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (3.27.)$$

Transformācijas koeficientu izmanto, reducējot transformatora sekundārā tinuma parametrus uz primāro tinumu (sk. 3.3. apakšnodaļu).

Ekspluatācijas apstākļos svarīga nozīme ir spriegumu transformācijas koeficientam, ar ko saprot nominālo spriegumu attiecību. Vienfāzes transformatoram EDS un spriegumu transformācijas koeficienti neatšķiras viens no otra, bet trīsfāžu transformatoros šie lielumi var atšķirties.

Transformatora tukšgaitas strāvas reaktīvo komponenti  $I_{0r}$  sauc par magnetizēšanas strāvu. Tā rada plūsmu transformatora magnētīvadā.

Magnetizēšanas strāvas amplitūdu ideālam transformatoram var aprēķināt no izteiksmes:

$$I_{0rm} = \frac{\Phi_m}{W_1} R_{\mu}. \quad (3.28.)$$

Ņemot vērā (3.25.), izteiksmi (3.28.) var pārrakstīt:

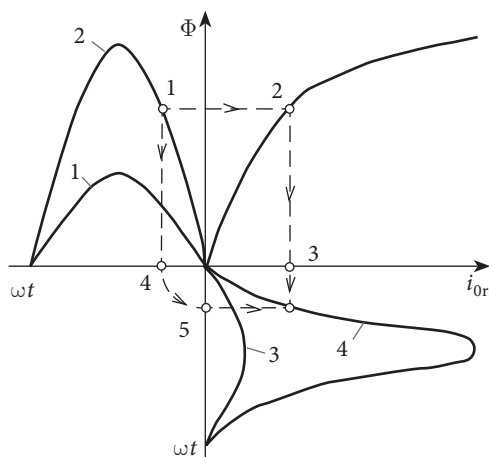
$$I_{0rm} = \frac{U_1}{4,44 f_1 W_1^2} R_{\mu}. \quad (3.29.)$$

Tādējādi transformatora magnetizēšanas strāvu, ja uzdota tikla frekvence un vijumu skaits, nosaka ne tikai spriegums  $U_1$ , bet arī magnētiskā pretestība  $R_{\mu}$ , kas savukārt ir atkarīga no magnētīvada piesātinājuma pakāpes.

Ja magnētīvads nav piesātināts, magnetizēšanas strāva  $i_{0r}$  ir sinusoidāla, bet, ja piesātināta – nesinusoidāla. Strāvu  $i_{0r}$  piesātināta magnētīvada gadījumā nosaka, izmantojot transformatora magnetizēšanas likni, kas attēlo sakarību starp magnētisko plūsmu  $\Phi$  un MS  $i_{0r} W_1$  vai tam proporcionālo  $i_{0r}$  (3.9. att.).

Magnetizēšanas likni  $\Phi = f(i_{0r})$  var iegūt aprēķinu ceļā vai eksperimentāli. Nosakot likni  $\Phi = f(i_{0r})$  eksperimentāli, tinumu baro ar līdzstrāvu. Šajā gadījumā minētā sakarība tiek uzņemta bez zudumiem magnētīvadā, kas arī atbilst tukšgaitas strāvas reaktīvai komponentei  $i_{0r}$ , t. i., magnetizēšanas strāvai.

Izmantojot magnetizēšanas likni un magnētiskās plūsmas  $\Phi$  izmaiņas laikā, var



3.9. att. Magnetizēšanas strāvas noteikšana.

viegli noteikt magnetizēšanas strāvas  $i_{0r}$  izmaiņas laikā. Grafisko konstrukciju secība ar bultiņām parādīta 3.9. attēlā. Sākot no plūsmas  $\Phi$  liknes punktā 1, caur punktu 2 pārvietojas vertikāli uz leju uz punktu 3. Tad no punkta 1 caur punktu 4 un 5 pārvietojas horizontāli un krustpunktā ar vertikālo līniju atrod atbilstošo strāvas  $i_{0r}$  vērtību.

Kā redzams no 3.9. attēla, ja plūsmas amplitūdas vērtība neizraisa magnētvasda piesātinājumu (līkne 1), strāva  $i_{0r}$  ir sinusoidāla (līkne 3), ja plūsma izraisa piesātinājumu (līkne 2) – strāva  $i_{0r}$  nav sinusoidāla (līkne 4). Jo lielāka magnētvasda piesātinājuma pakāpe, jo vairāk tiek kropļota magnetizēšanas strāvas forma. Šajā gadījumā jāatceras, ka transformatora vienādojumi kompleksā formā ir spēkā tikai sinusoidāliem spriegumiem, EDS un strāvām. Tāpēc nesinusoidālā magnetizēšanas strāva  $i_{0r}$  jāaizvieto ar ekvivalentu sinusoidālu, kurai ir tāda pati efektīvā vērtība:

$$I_{0r} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{0r}^2 dt}.$$

Strāva  $I_{0r}$ , tāpat kā magnētiskā plūsma  $\Phi$ , no sprieguma atpaliek par  $90^\circ$ . Tāpēc aktīvā jauda, ko transformators patērē no tīkla, ir vienāda ar nulli.

### 3.2.4. Reāla transformatora tukšgaitas režīms

Reāla transformatora magnētvdā rodas enerģijas zudumi no histerēzes un virpuļstrāvām. Tāpat enerģijas zudumi rodas tinuma aktīvajā pretestībā. Tāpēc reāla transformatora tukšgaitas strāvai  $I_0$  ir divas komponentes: magnetizēšanas (reaktīvā)  $I_{0r}$ , kas rada magnētisko plūsmu  $\Phi$  un sakrīt ar to fāzē, un aktīvā  $I_{0a}$ , kas sedz magnētiskos zudumus magnētvdā un elektriskos zudumus primārajā tinumā (sk. 3.11. att.)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0a} + \dot{I}_{0r}. \quad (3.30)$$

Spēka transformatoros komponente  $I_{0a}$  nepārsniedz 10 % no strāvas  $I_0$  vērtības.

Reālā transformatorā bez galvenās magnētiskās plūsmas  $\Phi$  eksistē izkliedes plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$ , kas noslēdzas galvenokārt nemagnētiskā vidē un ir saķēdēta tikai ar primāro tinumu. Tā kā magnētiskā plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  nav saistīta ar histerēzes parādību un virpuļstrāvām magnētvdā, tā fāzē sakrīt ar tukšgaitas strāvu. EDS, ko primārajā tinumā inducē plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$ , nosaka izteiksme:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_0 X_1, \quad (3.31)$$

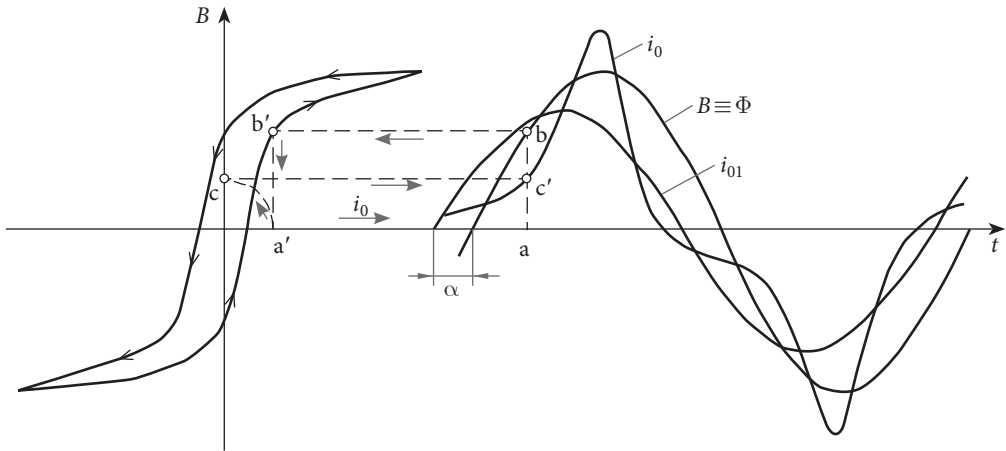
kur  $X_1$  – primārā tinuma induktīvā izkliedes pretestība.

Tādējādi, ņemot vērā sprieguma kritumu aktīvajā  $R_1$  un induktīvajā pretestībā  $X_1$ , iegūstam primārā tinuma sprieguma vienādojumu:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_1 + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1, \quad (3.32)$$

kur  $Z_1 = R_1 + jX_1$  – transformatora primārā tinuma pilnā pretestība.

Tā kā komponente  $I_{0a}$  stipri ietekmē tukšgaitas strāvas fāzi un formu, apskatīsim ti-

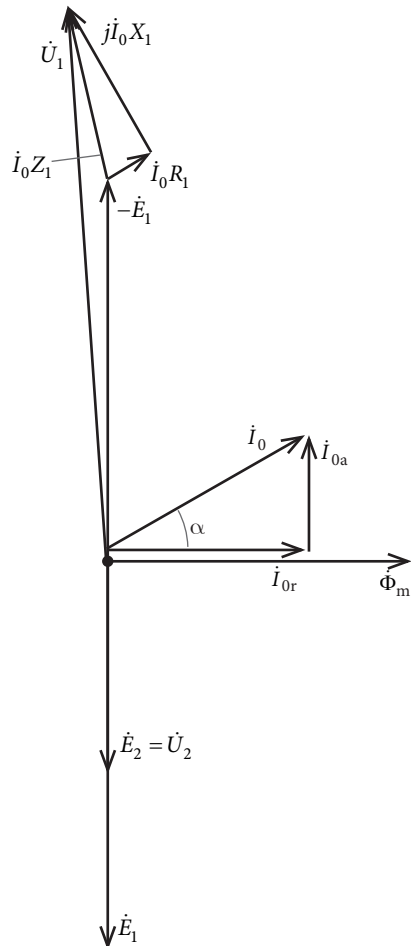


3.10. att. Histerēzes ietekme uz tukšgaitas strāvu.

kai histerēzes parādību transformatora serdē. 3.10. attēlā palielināti parādīta histerēzes cilpa. Katrai indukcijas vērtībai atbilst dažādas tukšgaitas strāvas vērtības cilpas augšupejošajā un lejupejošajā zarā. Viena punkta konstruēšana tukšgaitas strāvas  $i_0$  līknei, ja  $B = ab$  parādīta 3.10. attēlā. Analogiski iegūti strāvas  $i_0$  citi punkti. Sadalot tukšgaitas strāvas līkni harmonikās, var redzēt, ka tās pirmā harmonika  $I_{01}$  apsteidz fāzē magnētisko plūsmu  $\Phi$  par leņķi  $\alpha$ , ko sauc par magnētisko zudumu leņķi.

3.11. attēlā parādīta transformatora vektoru diagramma tukšgaitā. Vektoru diagrammu konstruē šādā secībā: vispirms atliek magnētiskās plūsmas vektoru, tad atliek tukšgaitas strāvas  $\dot{I}_0$  vektoru, kas apsteidz plūsmu par leņķi  $\alpha$ , konstruē EDS vektorus  $\dot{E}_1$  un  $\dot{E}_2$ , kas atpaliek no plūsmas par  $90^\circ$ . Saskaņā ar (3.32.) pie vektora  $-\dot{E}_2$  pieskaita vektorus  $\dot{I}_0 R_1$  un  $j\dot{I}_0 X_1$ , iegūstot sprieguma vektoru  $\dot{U}_1$ .

Jāatzīmē, ka sprieguma kritums spēka transformatora primārajā tinumā parasti sastāda mazāk nekā 0,5 % no nominālā sprieguma.



3.11. att. Transformatora vektoru diagramma tukšgaitā.

### 3.2.5. Transformatora tukšgaitas zudumi

Tukšgaitas režīmā spēka transformatorā ir šādi zudumi:

- elektriskie zudumi primārajā tinumā  $\Delta p_{e1}$ ;
- magnētiskie pamatzudumi serdes tēraudā  $\Delta p_{mag0}$ ;
- tukšgaitas papildzudumi  $\Delta p_{pap}$ .

Tā kā tukšgaitas režīmā transformatora atdotā jauda ir vienāda ar nulli, tad visa jauda  $P_0$ , ko tas saņem no tīkla, tiek patērēta zudumu segšanai. Tādējādi

$$P_0 = \Delta p_{e1} + \Delta p_{mag0} + \Delta p_{pap}.$$

Elektriskos zudumus var neņemt vērā, jo pat nelielas jaudas transformatoros ar relatīvi lielu  $I_0$  un  $R_1$  vērtību šie zudumi parasti ir mazāki par 2 % no  $P_0$ . Tāpēc var pieņemt:

$$P_0 = \Delta p_{mag0} + \Delta p_{pap} = \Delta p_t, \quad (3.33.)$$

t. i., visa tukšgaitas jauda tiek patērēta magnētisko zudumu segšanai tēraudā. Šie zudumi nav atkarīgi no transformatora slodzes.

Magnētiskie pamatzudumi serdē sastāv no histerēzes un virpuļstrāvu zudumiem. Kopējos zudumus tēraudā var aprēķināt no formulas:

$$\Delta p_t = p_{1,0/50} \left( \frac{f}{50} \right)^\beta B^2 G_t, \quad (3.34.)$$

kur  $p_{1,0/50}$  – īpatnējie zudumi tēraudā, ja  $B = 1$  T un  $f = 50$  Hz;

$f$  – pārmagnetizēšanas frekvence;

$\beta$  – pakāpes rādītājs, kas atkarīgs no tērauda markas;

$B$  – indukcija magnētvasda posmā;

$G_t$  – magnētvasda posma masa.

Transformatora tukšgaitas režīmā bez pamatzudumiem rodas arī papildzudumi. To rašanās galvenie iemesli ir:

- tērauda struktūras izmaiņas, loksnes mehāniski apstrādājot;
- nevienmērīgs indukcijas sadalījums lokšņu sadurvietās un savelkošo skrūvju vietās;
- metāla detaļas un mezgli, kuros inducējas virpuļstrāvas (eļļas tvertne, stiprinājumu detaļas u. c.);
- zudumi augstsprieguma transformatoru izolācijā.

Pieredze rāda, ka papildzudumi parasti sastāda 10–15 % no tukšgaitas pamatzudumiem. Tāpēc izteiksmi (3.33.) var pārrakstīt:

$$\Delta p_t = k \Delta p_{mag0}, \quad (3.35.)$$

kur  $k = 1,1-1,15$ .

Sīkāk par tukšgaitas zudumu aprēķinu sk. 3.9. apakšnodaļu.

### 3.2.6. Transformatora ekvivalentā shēma un tukšgaitas mēģinājums

No vienādojuma (3.32.) redzams, ka transformatoru tukšgaitas režīmā var iedomāties kā divas virknē savienotas aktīvi induktīvas spoles (3.12. att.). Vienai no tām nav serdes, bet otrai ir. Šo spoļu pretestība attiecīgi ir:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \text{ un}$$

$$Z_m = R_m + jX_m.$$

Pretestības  $Z_m$ ,  $R_m$  un  $X_m$  sauc par shēmas magnetizēšanas zara parametriem. Tos nosaka no tukšgaitas mēģinājuma, ko veic saskaņā ar 3.13. attēlā parādīto shēmu.

Tukšgaitas mēģinājuma laikā sekundārais tinums ir pārtraukts, bet primāro tinumu baro ar spriegumu  $U_1 = (0,2-1,2)U_N$ . Līknes  $I_0 = f(U_1)$ ,  $P_0 = f(U_1)$  un  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ , kas konstruētas, izmantojot tukšgaitas mēģinājuma rezultātus, sauc par transformatora tukšgaitas raksturliņiem. Šīs līknes parādītas 3.14. attēlā.

Līkne  $I_0 = f(U_1)$  praktiski atkārtoti transformatora serdes magnetizēšanas līkni, jo magnētiskā plūsma  $\Phi$  ir proporcionāla spriegumam  $U_1$  un magnetizēšanas strāva ir proporcionāla magnētiskā lauka intensitātei. Tāpēc, tāpat kā iepriekš, sakarības  $I_0 = f(U_1)$  nelineāro raksturu var izskaidrot ar magnētiskās ķēdes piesātinājumu.

Līkne  $P_0 = f(U_1)$  ir tuva parabolai, jo jauda  $P_0$  ir proporcionāla  $U_1^2$ .

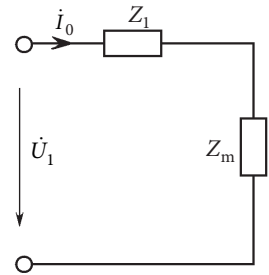
Jaudas koeficients  $\cos \varphi_0$ , palielinoties spriegumam  $U_1$ , samazinās, jo, pieaugot piesātinājumam, pieaug arī reaktīvā jauda.

No mērījumu rezultātiem tukšgaitas mēģinājumā nosaka:

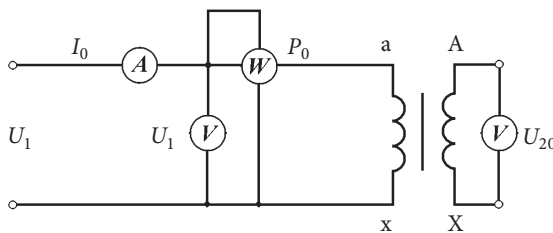
$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}; R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (3.36.)$$

No ekvivalentās shēmas (sk. 3.12. att.) redzams, ka

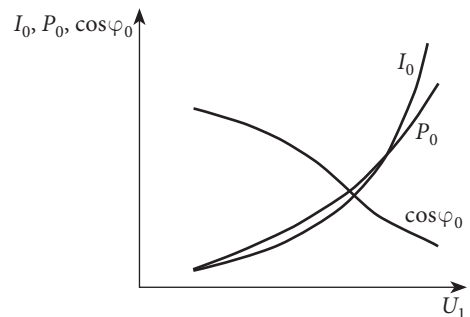
$$Z_0 = Z_1 + Z_m; R_0 = R_1 + R_m; X_0 = X_1 + X_m.$$



3.12. att. Transformatora ekvivalentā shēma tukšgaitas režīmā.



3.13. att. Transformatora tukšgaitas mēģinājuma shēma.



3.14. att. Transformatora tukšgaitas raksturliņķes.

Spēka transformatoros  $R_m \gg R_1$  un  $X_m \gg X_1$ . Tāpēc ar pietiekamu precizitāti var uzskatīt, ka tukšgaitas mēģinājumā ir noteiktas magnetizēšanas zara pretestības  $R_m \approx R_0$ ,  $X_m \approx X_0$ . Šī paša iemesla dēļ izmērītā jauda  $P_0$  ir vienāda ar transformatora magnētiskajiem zudumiem. Tiešām, elektriskie zudumi primārajā tinumā  $I_0^2 R_1$  ir ļoti mazi, jo strāva  $I_0$  spēka transformatoros parasti nepārsniedz dažus procentus no nominālās.

Tukšgaitas mēģinājumā nosaka arī transformācijas koeficientu:

$$K = \frac{U_1}{U_2}$$

Mūsdienu spēka transformatoros ar jaudu 10–1 000 000 kV·A tukšgaitas zudumi ir 1,5–0,05 % no patērētās jaudas. Tie būtiski ietekmē transformatora gada lietderības koeficientu, īpaši transformatoriem ar sezonas darba raksturu. Šis apstāklis izskaidrojams ar to, ka tukšgaitas zudumi nav atkarīgi no slodzes, t. i., enerģija to segšanai tiek patērēta visu laiku, kad transformators ir pieslēgts tīklam.

Apskatot trīsfāžu transformatora tukšgaitu, jāatzīmē, ka stieņu tipa magnētvids veido nesimetrisku magnētisko sistēmu. Tas izskaidrojams ar to, ka magnētiskās ķēdes garums vidējai fāzei ir mazāks nekā malējām fāzēm. Rezultātā tukšgaitas strāva vidējā fāzē ir mazāka. Par transformatora tukšgaitas strāvu tādā gadījumā pieņem fāžu strāvu vidējo aritmētisko vērtību. Lielas jaudas transformatoros minētā asimetrija tomēr ir niecīga un to var neņemt vērā. Jo sevišķi tas attiecas uz slodzes režīmu, ņemot vērā, ka tukšgaitas strāva spēka transformatoros ir relatīvi maza.

### 3.2.7. Tinumu savienojumu shēmas un grupas

Trīsfāžu transformatoru tinumus var slēgt zvaigznes (Y), trīsstūra ( $\Delta$ ) vai zigzagzvaigznes (Z) savienojumā. Turklāt zvaigznes un zigzagzvaigznes slēgums var būt ar nulles punkta izvadu  $Y_0, Z_0$  vai bez tā. Neatkarīgi no tinumu savienojumu shēmas katras fāzes tinumam ir sākums un beigas.

Transformatoru tinumu spaiļu apzīmējumi doti 3.1. tabulā.

Jāatzīmē, ka gadījumā, ja AS vai ZS tinumiem ir atzari, kas paredzēti sprieguma regulēšanai, tad to sākumu un beigas apzīmē ar ciparu indeksiem 1, 2, 3 utt.

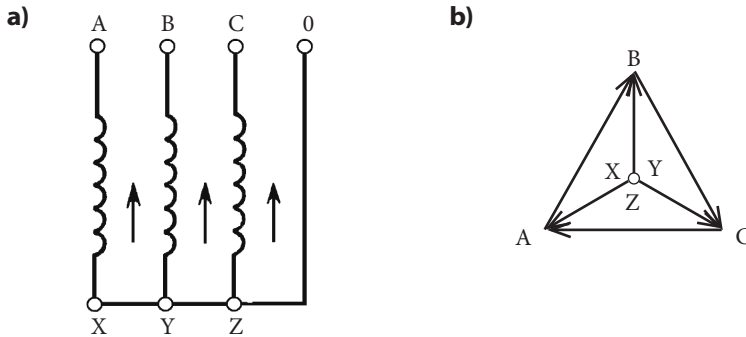
3.1. tabula. Transformatora tinumu spaiļu apzīmējumi

Tinumu galu nosaukums	Vienfāzes transformatoros		Trīsfāžu transformatoros		
	augstākā sprieguma tinums	zemākā sprieguma tinums	augstākā sprieguma tinums	zemākā sprieguma tinums	vidēja sprieguma tinums
Tinuma sākums	A	a	A, B, C	a, b, c	$A_m, B_m, C_m$
Tinuma beigas	X	x	X, Y, Z	x, y, z	$X_m, Y_m, Z_m$

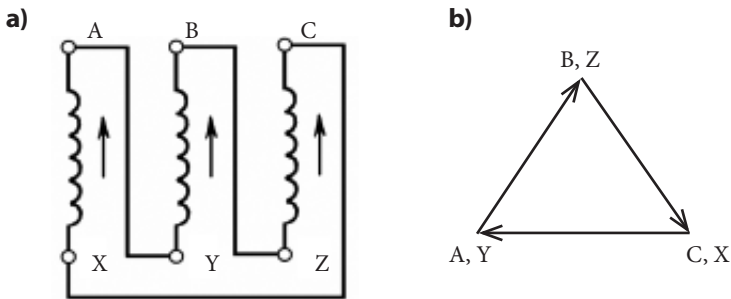
Slēdzot trīsfāžu tinumus zvaigznē, to beigas savieno vienā punktā, bet sākumus atstāj brīvus vai otrādi – sākumus savieno un beigas atstāj brīvas (3.15. att.).

Savienojot tinumus trīsstūrī, katra tinuma sākumu pievieno iepriekšējā tinuma beigām (3.16. att.).

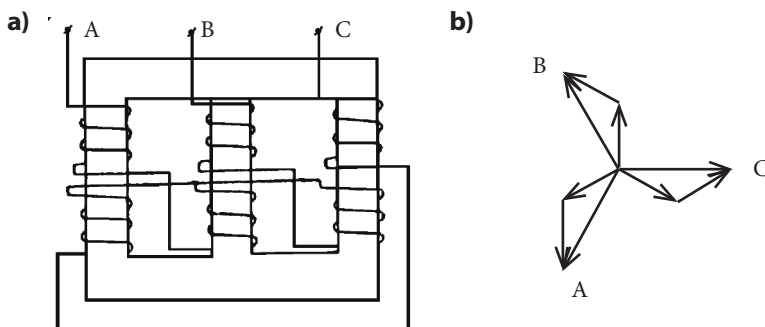
Zigzagzvaigznes savienojumā katras fāzes tinumu sadala divās daļās (parasti vienādās) un novieto tās uz dažādiem stieņiem (3.17. att. a). Tinuma pirmās daļas beigas savieno ar otrās daļas beigām. Ja tinums sadalīts vienādās daļās, tad rezultējošais EDS ir  $\sqrt{3}$  reizes lielāks nekā EDS vienā daļā (3.17. att. b).



3.15. att. Shēma (a) un vektoru diagramma (b) tinumu savienojumam zvaigznē.



3.16. att. Shēma (a) un vektoru diagramma (b) tinumu savienojumam trīsstūrī.



3.17. att. Shēma (a) un vektoru diagramma (b) tinumu savienojumam zigzagzvaigznē.



Jāatgādina, ka zvaigznes slēgumā fāzes spriegums ir  $\sqrt{3}$  reizes mazāks par līnijas spriegumu, bet fāzes un līnijas strāvas ir vienādas. Trīsstūra slēgumā fāzes un līnijas spriegums ir vienādi, bet fāzes strāva ir  $\sqrt{3}$  reizes mazāka par līnijas strāvu. Ja līnijas spriegumu un strāvu, strāvas blīvumu un indukcijas vērtība magnētvdādā ir vienādas, tad zvaigznē slēgtā tinumā salīdzinājumā ar trīsstūrī slēgtu tinumu ir  $\sqrt{3}$  reizes mazāks vijumu skaits, bet  $\sqrt{3}$  reizes lielāks vada šķērsriezuma laukums.

Tāpat jāņem vērā, ka primārā līnijas  $U_{11}$  un sekundārā līnijas  $U_{12}$  sprieguma attiecība (līnijas spriegumu transformācijas koeficients  $K_l$ ) ir atkarīga ne tikai no vijumu skaita tinumos  $W_1$  un  $W_2$ , bet arī no tinumu savienojumu shēmas.

$$\text{Tinumu slēgumam } Y/Y \text{ un } \Delta/\Delta \quad K_l = \frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{W_1}{W_2};$$

$$\text{tinumu slēgumam } Y/\Delta \quad K_l = \frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{\sqrt{3}W_1}{W_2};$$

$$\text{tinumu slēgumam } \Delta/Y \quad K_l = \frac{U_{11}}{U_{12}} = \frac{W_1}{\sqrt{3}W_2}.$$

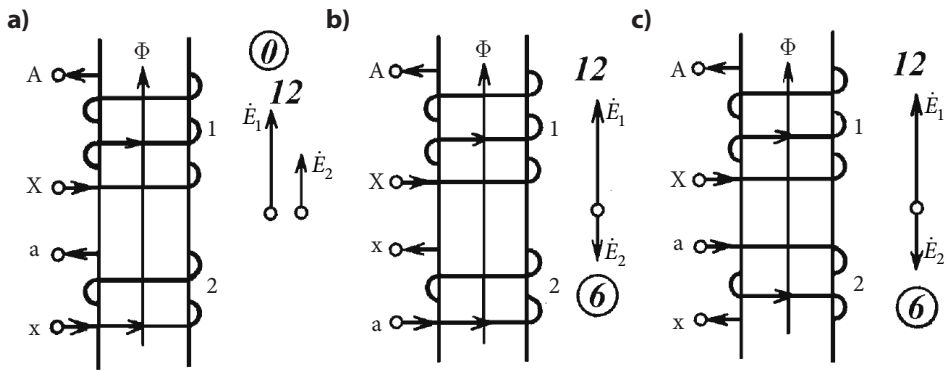
Savienojot tinumus zigzagzvaigznē, sakarības starp strāvām un spriegumiem ir tādas pašas kā zvaigznes slēgumā. Tomēr, lai izveidotu zigzagzvaigznes slēgumu, ja fāzes spriegums ir uzdots, par 16 % jāpalielina vijumu skaits salīdzinājumā ar zvaigznes slēgumu. Tas izskaidrojams ar to, ka zigzagzvaigznes fāzes tinuma divas daļas novietotas uz dažādiem stieņiem un saslēgtas virknē. Tāpēc EDS, kas inducējas tajās, ir nobīdīti fāzē par  $60^\circ$  (3.17. att.). EDS zigzagzvaigznes tinuma fāzē ir  $2/\sqrt{3} = 1,16$  reizes mazāks salīdzinājumā ar gadījumu, kad abas tinuma daļas novieto uz viena stieņa. Zigzagzvaigznes slēguma pozitīvās īpašības izpaužas transformatoru nesimetriskajos režīmos (sk. 3.7. apakšnodaļu).

Trīsfāžu divtinumu spēka transformatoros parasti izmanto šādas tinumu slēguma shēmas:  $Y/Y_0$ ,  $Y/\Delta$ ,  $Y_0/\Delta$ ,  $Y/Z_0$ ,  $\Delta/Y_0$  un  $\Delta/\Delta$ . Transformatoru ekspluatācijas praksē bez tinumu slēgumu shēmas svarīgi zināt fāžu nobīdes leņķi starp EDS augstākā un zemākā sprieguma tinumos.

3.18. attēlā parādīti divi tinumi 1 un 2, kas novietoti uz viena stieņa, un tos caurtver viena un tā pati magnētiskā plūsma  $\Phi$ . Ja abiem tinumiem ir vienāds uztīšanas virziens un vienādi apzīmēti izvadi (3.18. att. a), tad tajos inducētie EDS sakrīt fāzē, t. i., katrā mirklī tiem ir viens un tas pats virziens attiecībā pret tinuma spailēm, piemēram, no X uz A un no x uz a. Ja vienam tinumam, piemēram, 2, apmaina vietām spaiļu apzīmējumus (3.18. att. b), EDS  $\dot{E}_1$  būs virzīts no X uz A, bet EDS  $\dot{E}_2$  – no a uz x, un minētie EDS būs nobīdīti fāzē par  $180^\circ$ . Analogisku fāžu nobīdi starp EDS  $\dot{E}_1$  un  $\dot{E}_2$  var panākt, apmainot vienam no tinumiem, piemēram, 2, uztīšanas virzienu (3.18. att. c)

Tādējādi fāžu nobīdes leņķis starp EDS AS un ZS tinumos ir atkarīgs gan no tinumu uztīšanas virziena, gan no spaiļu apzīmējumiem. Ja tinumi novietoti uz viena stieņa, šis leņķis var būt vienāds ar  $0^\circ$  vai  $180^\circ$ .

Primārā un sekundārā līnijas EDS un spriegumu fāžu nobīdes leņķi raksturo ar



3.18. att. Vienfāzes transformatora tinumu savienojumu grupas.

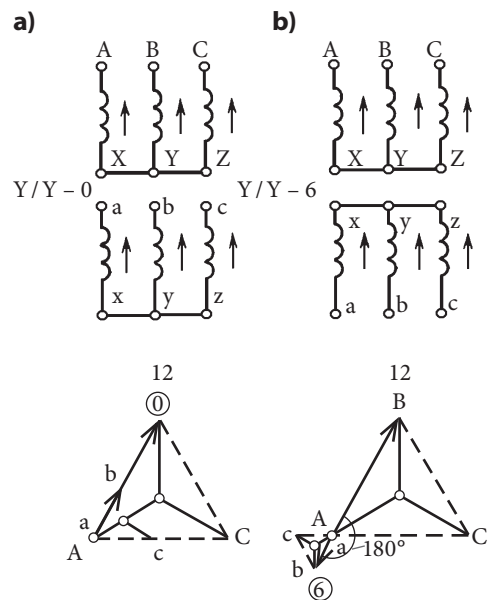
tinumu savienojumu grupu. Savienojumu grupu iegūst, dalot ar 30 fāžu nobīdes leņķi starp AS un ZS līnijas EDS. Turklāt leņķa atskaiti izvēlas no EDS vektora AS tinumā pulksteņa rādītāju kustības virzienā. Transformatori, kuriem minētie leņķi ir vienādi, pieder pie vienas tinumu savienojumu grupas.

Trīsfāžu transformatoros ar tinumu savienojumu shēmām Y, Δ un Z var izveidot 12 dažādas grupas ar līnijas EDS fāžu nobīdēm ik par 30°. Tāpēc praksē grupas noteikšanai izmanto pulksteņa ciparnīcu, kurā arī ir 12 cipari, kas izvietoti ar 30° nobīdi. Lai noteiktu tinumu savienojumu grupu, savieto AS tinuma līnijas EDS vektoru ar minūšu rādītāju un ciparu 12, bet ZS tinuma līnijas EDS ar stundu rādītāju.

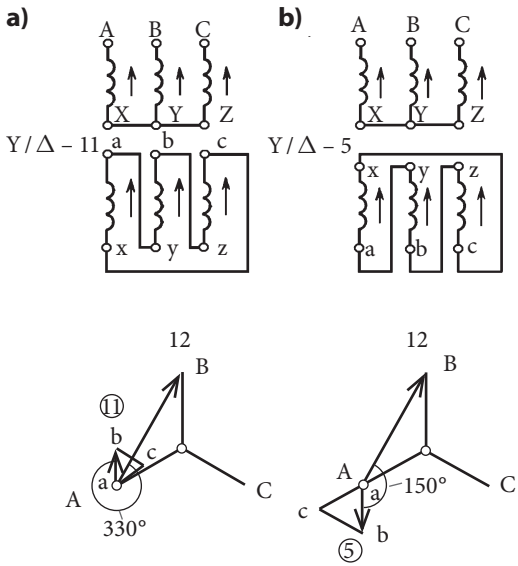
Tad stundu rādītājs uzrāda savienojumu grupu. Tātad, ja abu pušu EDS un spriegumi sakrīt fāzē, tad transformatora tinumu savienojumam ir nulles grupa, jo šajā gadījumā grupu pieņemts apzīmēt nevis ar ciparu 12, bet ar 0.

Trīsfāžu transformatoru tinumu slēguma shēmās Y/Y, Δ/Δ un Δ/Z var izveidot pārskaitļa grupas 2, 4, 6, 8, 10, 0, bet shēmās Y/Δ, Δ/Y un Y/Z – nepārskaitļu grupas 1, 3, 5, 7, 9 un 11. 3.19. attēlā parādītas tinumu savienojumu shēmas un vektoru diagrammas nulles (3.19. att. a) un 6. (3.19. att. b) grupai. Šīs grupas apzīmē attiecīgi Y/Y-0 un Y/Y-6.

3.20. attēlā parādītas transformatoru savienojumu shēmas Y/Δ un attiecīgās vektoru diagrammas 11. (3.20. att. a) un 5. (3.20. att. b) grupai. Šīs grupas apzīmē ar Y/Δ-11 un Y/Δ-5.



3.19. att. Trīsfāžu transformatoru savienojumu grupas 0. (a) un 6. (b).



3.20. att. Trīsfāžu transformatoru savienojumu grupas 11. (a) un 5. (b).

Ja vienam no transformatoru tinumiem izmaina spaiļu apzīmējumus no a, b, c uz c, a, b un tālāk uz b, c, a, tad nulles grupas vietā iegūsim attiecīgi 4. un 8. grupu, no 6.–10. un 2. grupu, no 11.–3. un 7., bet no 5.–9. un 1. grupu.

Jāatzīmē, ka, izmantojot tinumu savienojumus zigzagzvaigznē kopā ar savienojumiem trīsstūrī un zvaigznē, var iegūt ne tikai 30° fāžu nobīdi starp līnijas EDS AS un ZS tinumos, bet arī citu nobīdi. Tomēr liela grupu dažādība var radīt zināmas neērtības, tāpēc trīs-fāžu transformatorus parasti izgatavo ar divām savienojumu grupām – ar nulto un vienpadsmito. 3.21. attēlā parādītas tinumu savienojumu shēmas un vektoru diagrammas trīs-fāžu transformatoriem.

### 3.3. TRANSFORMATORA ĪSSLĒGUMA REŽĪMS

#### 3.3.1. Vispārīgi norādījumi

Transformatora īsslēguma režīms ir tāds galējs režīms, kad sekundārais tinums slēgts īsi un spriegums  $U_2$  uz tā spailēm vienāds ar nulli. No īsslēguma mēģinājumā iegūtiem rezultātiem nosaka tādus svarīgus transformatora rādītājus kā īsslēguma spriegums un īsslēguma zudumi.

Ja transformatoram, kuram sekundārais tinums slēgts īsi, primārajā pusē pievada nominālo spriegumu, īsslēguma strāvas tinumos var pārsniegt nominālo vērtību 10–20 un vairāk reižu, jo tinumu pretestības ir relatīvi mazas. Šāds īsslēguma režīms iespējams reālos transformatoru ekspluatācijas apstākļos. Tas ir visai bīstams sakarā ar mehāniskiem spēkiem, kas iedarbojas uz tinumiem, un iespējamo temperatūras paaugstināšanos.

Tāpēc transformatora tinumi jāveido ar zināmu mehānisko izturību un to shēmā jāparedz aizsardzība, kas spēj ātri atslēgt īsslēgto transformatoru no tīkla. Ja aizsardzība kādu iemeslu dēļ neatslēdz īsslēgto transformatoru no tīkla, tas cieš avāriju. Šajā sakarā aprakstīto īsslēguma režīmu var nosaukt par avārijas īsslēgumu.

Otru īsslēguma režīmu, kura laikā primāro tinumu baro ar pazeminātu spriegumu, sauc par īsslēguma mēģinājumu. Primārā sprieguma vērtību izvēlas tā, lai strāva transformatorā nepārsniegtu nominālo vērtību. No īsslēguma mēģinājuma iegūst iepriekš minētos lielumus – īsslēguma spriegumu un īsslēguma zudumus.

Pieņemsim, ka īsslēguma mēģinājumā primārais spriegums pazemināts līdz tādai

Tinumu savienojumu shēmas		Vektoru diagrammas		Apzīmējums
AS	ZS	AS	ZS	
				$Y/Y_0 - 0$
				$Y/\Delta - 11$
				$Y_0/\Delta - 11$

Tinumu savienojumu shēmas			Vektoru diagrammas			Apzīmējums
AS	VS	ZS	AS	VS	ZS	
						$Y_0/Y_0/\Delta - 0 - 11$
						$Y_0/\Delta/\Delta - 11 - 11$

Tinumu savienojumu shēmas		Vektoru diagrammas		Apzīmējums
AS un VS	ZS	AS un VS	ZS	
				$Y_{0\text{aut}}/\Delta - 0 - 11$

3.21. att. Tinumu savienojumu shēmas un vektoru diagrammas trīsfāžu divtinumu (a), trīsfāžu trīstinumu (b) un trīsfāžu trīstinumu autotransformatoram (c).

vērtībai  $u_k$ , kad transformatora tinumos plūst nominālās strāvas. Spriegumu  $u_k$ , kas īsslēguma mēģinājumā primārajā (un arī sekundārajā) tinumā uztur nominālo strāvu, sauc par īsslēguma spriegumu. To parasti izsaka procentos no nominālā sprieguma:

$$u_{k\%} = \frac{u_k}{U_N} \cdot 100. \quad (3.37)$$

Īsslēguma spriegumu parasti reducē uz darba temperatūru 75 °C.

Mūsdienu spēka transformatoriem īsslēguma spriegums  $u_{k\%}$  parasti ir robežās no 4,5 līdz 15 %. Mazākās vērtības attiecas uz zemu spriegumu un mazas jaudas transformatoriem, bet lielākās – uz augstu spriegumu un lieljaudas transformatoriem.

### 3.3.2. Fizikālie procesi transformatora īsslēgumā

Pieņemsim, ka transformatora īsslēguma režīmā primārajam tinumam pievadīts spriegums, kas tuvs īsslēguma spriegumam  $u_k$ . Tāpēc arī strāvas  $I_1$  un  $I_2$  primārajā un sekundārajā tinumā būs tuvas nominālajām.

Strāvas  $I_1$  un  $I_2$  rada attiecīgos MS  $F_1 = I_1 W_1$  un  $F_2 = I_2 W_2$ , kuri kopā uztur magnētisko plūsmu  $\Phi_k$  transformatora serdē. Plūsma  $\Phi_k$  ir saķēdēta gan ar primāro, gan ar sekundāro tinumu. Bez tam transformatorā eksistē vēl primārā tinuma izkliedes plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  un sekundārā tinuma izkliedes plūsma  $\Phi_{\sigma 2}$ . Šīs plūsmas saķēdētas attiecīgi tikai ar primāro un sekundāro tinumu (3.22. att.).

Īstenībā lauka aina transformatorā ir daudz sarežģītāka salīdzinājumā ar 3.22. attēlā parādīto, īpaši, ja ņem vērā, ka magnētiska plūsma daļēji noslēdzas pa tvertnes sienīņām un citām detaļām. Tomēr fizikālās ainas zināma vienkāršošana attaisnojas, jo bez tā praktiskie aprēķini būtu ļoti sarežģīti.

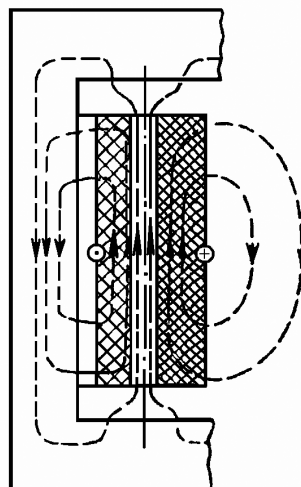
Apskatot MS  $F_1$  un  $F_2$  mijiedarbību, varam rīkoties līdzīgi, kā apskatot EDS līdzsvaru kontūros. Jāņem vērā, ka transformatoram īsslēguma mēģinājumā tiek pievadīts pazemināts spriegums  $u_k$ . Attiecīgi samazinās arī plūsma  $\Phi_k$ . Sakarā ar to, ka tukšgaitas strāva spēka transformatoros sastāda tikai dažus procentus no nominālās, var neņemt vērā tās radīto MS un uzskatīt, ka MS  $F_1$  un  $F_2$  atrodas savstarpējā līdzsvarā

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = 0, \quad (3.38)$$

vai

$$\dot{I}_1 W_1 = -\dot{I}_2 W_2. \quad (3.39)$$

Vienādojumiem (3.38.) un (3.39.), ko bieži sauc par MS līdzsvara vienādojumiem, ir svarīga loma transformatora īsslēguma režīma fizikālo procesu izpratnē. Strāvu  $I_1$  un  $I_2$



3.22. att. Izkliedes lauki transformatorā ar koncentriskiem tinumiem.

absolūtajām vērtībām var uzrakstīt:

$$I_1 = I_2 \frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{K} I_2. \quad (3.40.)$$

No izteiksmes (3.40.) redzams, ka strāvu attiecību īsslēguma režīmā, tāpat kā EDS attiecību tukšgaitas režīmā, nosaka transformācijas koeficients.

Apskatīsim EDS, kas inducējas primārajā un sekundārajā tinumā. Tā kā galvenā magnētiskā plūsma  $\Phi_k$  transformatorā ir saķēdēta ar primāro un sekundāro tinumu, EDS  $E_1$  un  $E_2$  atpaliek fāzē no plūsmas  $\Phi_k$  par  $90^\circ$ . To lielumu nosaka formulas (3.21.) un (3.22.).

Bez magnētiskās plūsmas  $\Phi_k$  transformatorā eksistē arī izkliedes plūsmas  $\Phi_{\sigma 1}$  un  $\Phi_{\sigma 2}$ , kas primārajā un sekundārajā tinumā inducē EDS  $E_{\sigma 1}$  un  $E_{\sigma 2}$ . Tā kā plūsmas  $\Phi_{\sigma 1}$  un  $\Phi_{\sigma 2}$  galvenokārt izplatās nemagnētiskā vidē, var uzskatīt, ka tās fāzē sakrīt ar strāvām  $I_1$  un  $I_2$  un ir proporcionālas tām. Tāpēc var rakstīt:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1; \quad (3.41.)$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2, \quad (3.42.)$$

kur  $X_1$  un  $X_2$  attiecīgi primārā un sekundārā tinuma induktīvās izkliedes pretestības.

Reālu transformatoru tinumiem bez induktīvajām pretestībām piemīt arī aktīvās pretestības  $R_1$  un  $R_2$ . Sprieguma kritumi šajās pretestībās ir  $I_1 R_1$  un  $I_2 R_2$ . Tādējādi primārajam tinumam pieliktais īsslēguma spriegums  $U_k$  tiek līdzsvarots ar EDS  $E_1$ ,  $E_{\sigma 1}$  un sprieguma kritumu  $I_1 R_1$ :

$$\dot{U}_k = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 R_1. \quad (3.43.)$$

Ņemot vērā izteiksmi (3.41), vienādojumu (3.43) var pārrakstīt:

$$\dot{U}_k = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (3.44.)$$

kur  $Z_1 = R_1 + jX_1$  – primārā tinuma pilnā pretestība.

Sprieguma kritums  $\dot{I}_1 R_1$  sakrīt fāzē ar strāvu  $\dot{I}_1$ , bet sprieguma kritums  $j\dot{I}_1 X_1$  apsteidz fāzē strāvu  $\dot{I}_1$  par  $90^\circ$ .

Transformatora sekundārais tinums slēgts īsi, tāpēc spriegums uz tā spailēm ir vienāds ar nulli, t. i.,

$$0 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 R_2,$$

vai

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 Z_2, \quad (3.45.)$$

kur  $Z_2 = R_2 + jX_2$  – sekundārā tinuma pilnā pretestība.

Līdzīgi kā primārajam tinumam sprieguma kritums  $\dot{I}_2 R_2$  sakrīt fāzē ar strāvu  $\dot{I}_2$ , bet sprieguma kritums  $j\dot{I}_2 X_2$  apsteidz fāzē strāvu  $\dot{I}_2$  par  $90^\circ$ .

Vienādojumus (3.43.–3.45.) pieņemts saukt par transformatora EDS vienādojumiem.

Transformatora darbības analizē tiem ir tikpat svarīga nozīme kā MS vienādojumam (3.38).

### 3.3.3. Reducētais transformators

Tā kā vispārīgā gadījumā vijumu skaits primārajā un sekundārajā tinumā nav vienāds, tad  $E_1 \neq E_2$  un  $I_1 \neq I_2$ . Dažādiem EDS un strāvām atbilst arī dažādi tinumu parametri, t. i., aktīvās un induktīvās pretestības. Šis apstāklis apgrūtina transformatora primārajā un sekundārajā tinumā notiekošo procesu kvantitatīvu salīdzināšanu un attēlošanu vektoru diagrammās, jo transformācijas koeficienti lielākoties ir samērā lieli, tāpēc vienā mērogā grūti attēlot primārās un sekundārās ķēdes elektriskos lielumus (EDS, spriegumus, strāvas). Lai novērstu minētās grūtības, viena tinuma elektriskos lielumus pārrēķina (reducē) uz vienu un to pašu vijumu skaitu ( $K = W_1/W_2 = 1$ ). Parasti sekundāro tinumu reducē uz primārā tinuma vijumu skaitu. Jāatzīmē, ka bez reducēšanas nav iespējams iegūt transformatora ekvivalento shēmu.

Sekundārā tinuma reducēšanas operācijai jābūt ekvivalentai, tā nedrīkst ietekmēt primārā tinuma darba režīmu. Visus lielumus, kas attiecas uz reducētā transformatora sekundāro tinumu, apzīmēsim ar tiem pašiem simboliem, kas nereducētam, pieliekot indeksu "prim" –  $E'_2, I'_2, R'_2$  utt.

Lai iegūtu sekundārā tinuma reducēto EDS  $E'_2, E_2$  jāizmaina proporcionāli transformācijas koeficientam, t. i.,

$$E'_2 = K E_2. \quad (3.46.)$$

Analoģiski reducē arī EDS  $E_{\sigma 2}$ .

Reducējot transformatora sekundāro tinumu uz primāro, tā pilnā jauda nedrīkst mainīties, t. i.,  $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$ , tāpēc

$$I'_2 = \frac{E_2}{E_1} I_2 = \frac{1}{K} I_2. \quad (3.47.)$$

Tādējādi, lai iegūtu reducēto strāvu  $I'_2$ , nereducētā strāva  $I_2$  jāizdala ar transformācijas koeficientu.

Reducēšanas procesā jaudas nemainās, tāpēc zudumiem reducētajā un nereducētajā tinumā jābūt vienādiem, t. i.,

$$I'^2_2 R'_2 = I^2_2 R_2$$

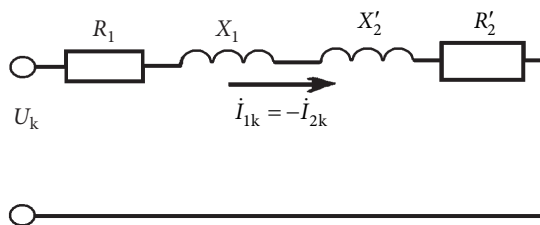
un

$$R'_2 = K^2 R_2. \quad (3.48.)$$

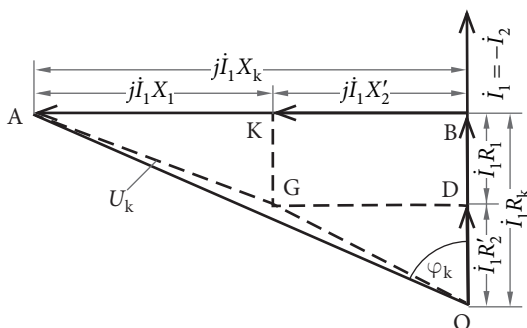
No fizikālā viedokļa iegūto izteiksmi (3.48.) var paskaidrot šādi. Ja, piemēram, sekundārā tinuma vijumu skaits pieaug  $K$  reizes, tad tā kopējais garums arī pieaug  $K$  reizes, bet šķērsriezuma laukums, pieņemot nemainīgu strāvas blīvumu, samazinās  $K$  reizes. Tāpēc aktīvā pretestība pieaug  $K^2$  reizes. Analoģiski reducē sekundārā tinuma induktīvo izkliedes pretestību:







3.24. att. Transformatora ekvivalentā shēma īsslēguma režīmā



3.25. att. Transformatora īsslēguma trīsstūris.

tā sauktajā īsslēguma trīsstūrī, ko plaši izmanto transformatoru teorijā (3.25. att.). Tādā nolūkā atliekam strāvas  $\dot{I}_1$  vektoru pozitīvajā ordinātu ass virzienā un parastajā veidā konstruējam spriegumu kritumu  $\dot{I}_1 R_1$  un  $\dot{I}_1 R'_2$  vektorus. Vektoru saskaitīšanas kārtība rezultātu neietekmē. Tāpēc varam iziet no punkta O un saskaitīt vektorus tādā secībā, kā parādīts 3.25. attēlā. Trīsstūri OBA sauc par īsslēguma trīsstūri. Tā katetes OB un BA kā sprieguma  $U_k$

komponentes attēlo aktīvo un induktīvo sprieguma kritumu transformatorā.

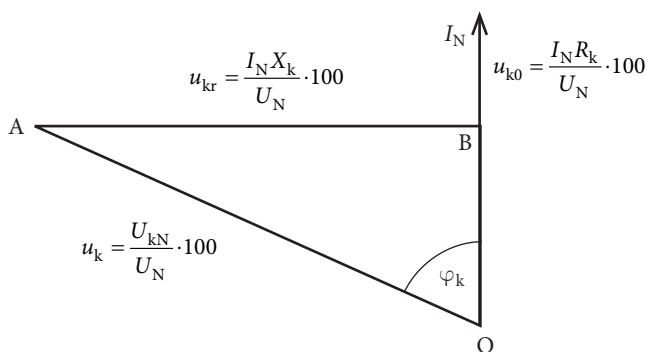
No 3.25. attēla redzams, ka

$$OB = I_1 R_1 + I_1 R'_2 = I_1 (R_1 + R'_2) = I_1 R_k;$$

$$BA = I_1 X_1 + I_1 X'_2 = I_1 (X_1 + X'_2) = I_1 X_k;$$

$$OA = \sqrt{OB^2 + BA^2} = I_1 \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = I_1 Z_k;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{BA}{OB} = \frac{X_k}{R_k}.$$



3.26. att. Īsslēguma trīsstūris ar spriegumiem relatīvajās vienībās.

Pretestības  $R_k = R_1 + R_2'$ ,  $X_k = X_1 + X_2'$  un  $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$  sauc par īsslēguma pretestībām.

Izmantošanai praktiskiem mērķiem īsslēguma trīsstūri parasti konstruē nominālai strāvas vērtībai  $I_1 = I_{1N}$  (3.26. att.). Trīsstūra malas izsaka procentos no nominālā sprieguma  $U_N$ :

$$OB = u_{ka\%} = \frac{I_N R_k}{U_N} \cdot 100; \quad (3.52.)$$

$$BA = u_{kr\%} = \frac{I_N X_k}{U_N} \cdot 100; \quad (3.53.)$$

$$OA = u_{k\%} = \frac{I_N Z_k}{U_N} \cdot 100. \quad (3.54.)$$

Jāatzīmē, ka nominālajā darba režīmā sprieguma kritums pašā transformatorā skaitliski vienāds ar īsslēguma spriegumu.

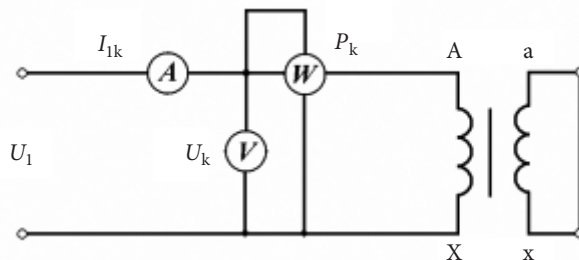
### 3.3.5. Īsslēguma mēģinājums

Lai noteiktu transformatora īsslēguma pretestības un zudumus, izdara īsslēguma mēģinājumu. Mēģinājuma shēma parādīta 3.27. attēlā. Transformatora sekundārais tinums saslēgts īsi, bet primārais tinums tiek barots ar tādu pazeminātu spriegumu  $U_1$ , lai strāvas tinumos nepārsniedz  $(1-1,2)I_N$ .

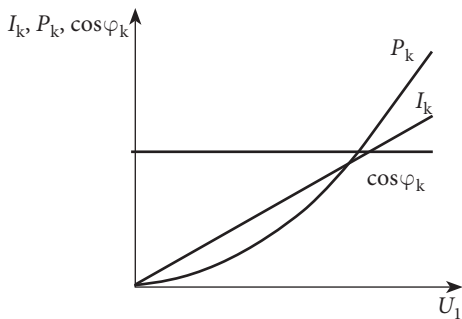
Spriegumu  $U_1$  regulē no nulles līdz vērtībai, kad strāva sasniedz iepriekš norādīto lielumu. Tādā veidā uzņemtās īsslēguma raksturlieknes  $I_k = f(U_1)$ ,  $P_k = f(U_1)$  un  $\cos \varphi_k = f(U_1)$  parādītas 3.28. attēlā. Tā kā īsslēguma mēģinājums tiek veikts ar daudzkārt pazeminātu spriegumu, transformatora magnētqvads nav piesātināts. Tāpēc sakarība  $I_k = f(U_1)$  ir lineāra, bet  $\cos \varphi_k = const$ . Bez tam pazeminātam barošanas spriegumam atbilst arī samazināta magnētiskā plūsma. Šis apstāklis īsslēguma režīmā ļauj neņemt vērā zudumus serdē un uzskatīt, ka visa jauda, ko transformators uzņem no tīkla, tiek patērēta elektrisko zudumu  $P_k$  segšanai primārajā ( $\Delta p_{e1}$ ) un sekundārajā ( $\Delta p_{e2}$ ) tinumā:

$$P_k = \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2}. \quad (3.55.)$$

Zudumi tinumos sastāv no pamatzudumiem, kurus nosaka to pretestības līdzstrāvai



3.27. att. Īsslēguma mēģinājuma shēma.



3.28. att. Transformatora īsslēguma raksturliķnes.

$R_{10}$  un  $R'_{20}$  un papildzudumi, kas saistīti ar izkliedes plūsmas nevienmērīgu sadalījumu tinumu vijumu šķērsgrīzumā un garumā. Pamatzudumus tinumos ( $\Delta p_{e0}$ ) var noteikt pēc formulas:

$$\Delta p_{e0} = I_1^2 R_{10} + I_2'^2 R_{20}'.$$

Jautājums par papildzudumiem ir visai sarežģīts. Parasti papildzudumus iekļauj pamatzudumos, nedaudz palielinot pretestības  $R_{10}$  un  $R'_{20}$ . Tādējādi:

$$\begin{aligned} P_k &= \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} = I_1^2 R_{10} k_{r1} + I_2'^2 R_{20}' k_{r2} = \\ &= I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2' = I_1^2 R_k, \end{aligned} \quad (3.55a.)$$

kur  $k_{r1}$  un  $k_{r2}$  – koeficienti, kas ievēro pretestību  $R_{10}$  un  $R'_{20}$  palielināšanos.

Šo koeficientu vērtības parasti ir robežās no 1,05 līdz 1,15. Tie ir atkarīgi no tinuma tipa, vadu formas un citiem faktoriem.

Īsslēguma zudumiem, tāpat kā tukšgaitas zudumiem, ir svarīga nozīme transformatoru ekspluatācijā. Praktiskajos aprēķinos īsslēguma zudumus nosaka, izmantojot relatīvo slodzes strāvu jeb slodzes koeficientu:

$$\beta = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}. \quad (3.56.)$$

Tad

$$I_1 = \beta I_{1N} \text{ un } I_2 = \beta I_{2N}. \quad (3.57.)$$

Nemot vērā izteiksmi (3.57),

$$P_k = \beta^2 I_{1N}^2 R_k = \beta^2 P_{kN}, \quad (3.58.)$$

kur  $P_{kN}$  – īsslēguma zudumi, kas atbilst nominālajai strāvai tinumos.

Tātad īsslēguma zudumi ir atkarīgi no transformatora slodzes un tāpēc tos sauc arī par mainīgajiem zudumiem.

No īsslēguma mēģinājuma rezultātiem aprēķina īsslēguma pilno, aktīvo un induktīvo pretestību, kā arī īsslēguma spriegumu un tā komponentes

$$\begin{aligned} Z_k &= \frac{U_1}{I_{N1}}; \quad R_k = \frac{P_k}{I_1^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \\ u_{k\%} &= \frac{I_N Z_k}{U_N} \cdot 100; \quad u_{ka\%} = \frac{I_N R_k}{U_N} \cdot 100; \quad u_{kr\%} = \frac{I_N X_k}{U_N} \cdot 100. \end{aligned}$$

Nosakot pretestību  $R_k$ , kā arī citus no šīs pretestības atkarīgus lielumus, tādus kā  $u_{ka\%}$ ,  $u_{k\%}$ ,  $P_{kN}$ , tos reducē atbilstoši nosacītai temperatūrai 75 °C.

No īsslēguma mēģinājuma var noteikt tikai vienkāršotās ekvivalentās shēmas para-

metrus  $R_k, X_k$ . Pretestības  $R_1, R_2', X_1, X_2'$  šajā gadījumā var noteikt tikai aptuveni, pieņemot, ka  $R_1 = R_2' = R_k / 2$  un  $X_1 = X_2' = X_k / 2$ .

Ja primārā un sekundārā tinuma pretestības izmērītas ar līdzstrāvu, piemēram, ar voltmetra un ampērmetra metodi, tad pretestības  $R_1, R_2', X_1, X_2'$  var aprēķināt no šādām sakarībām:

$$\frac{R_1}{R_2'} = \frac{R_{10}}{K^2 R_{20}}; \quad \frac{X_1}{X_2'} = \frac{R_{10}}{K^2 R_{20}}.$$

### 3.4. TRANSFORMATORA DARBĪBA SLODZES REŽĪMĀ

#### 3.4.1. Fizikālie procesi slogotā transformatorā un vektoru diagrammas

Šajā apakšnodaļā parādīsim, ka, izmantojot iepriekš apskatītos tukšgaitas un išslēguma režīmus, ar superpozīcijas metodi var iegūt jebkuru transformatora slodzes režīmu.

Vienfāzes transformatora magnētiskā lauka aina slodzes režīmā parādīta 3.29. attēlā. Ja neņem vērā sprieguma kritumus tinumos, aptuveni var pieņemt, ka  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$ . Uzskatot, ka spriegums  $U_1$ , kas pieslēgts primārajam tinumam, ir nemainīgs, par nemainīgu jāpieņem arī EDS  $E_1$ , galvenā magnētiskā plūsma  $\Phi$ , tukšgaitas strāva  $I_0$  un tās radītais MS  $F_0 = I_0 W_1$ . Šie lielumi saglabā nemainīgu vērtību no tukšgaitas līdz išslēgumam, t. i., nav atkarīgi no slodzes.

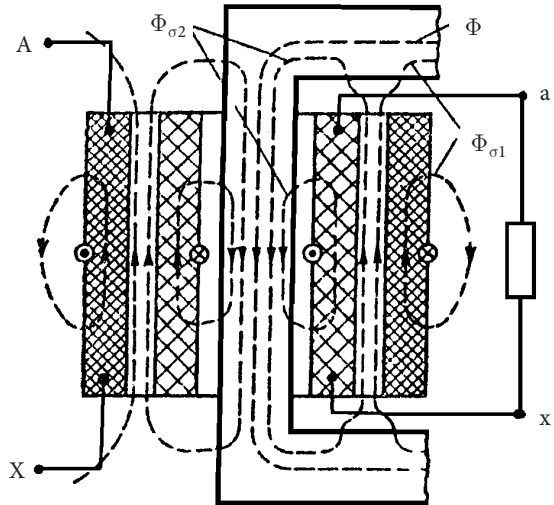
Ja transformatoru sāk slogot, strāvas  $I_2$  radītais MS  $F_2 = I_2 W_2$  centīsies samazināt transformatora galveno magnētisko plūsmu. Tā kā saskaņā ar iepriekš teikto tas nav iespējams, primārajā MS jāparādās komponentei  $-F_2$ , kas pēc lieluma vienāda ar  $F_2$ , bet vērsta tai pretī. Tādējādi primārā tinuma MS sastāv no divām komponentēm: tukšgaitas MS  $F_0 = I_0 W_1$ , kas nav atkarīga no slodzes un komponentes  $F_{sl} = -I_2 W_2$ , kas ir proporcionāla slodzei. Tāpēc var rakstīt:

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_0 + (-\dot{F}_2)$$

jeb

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1. \quad (3.59.)$$

Reālā transformatorā slodzes režīmā bez EDS  $E_1$  un  $E_2'$  eksistē sprieguma kritumi pretestībās  $R_1, R_2', X_1, X_2'$ . Sprieguma kritumi šajās pretestībās salīdzinājumā ar  $E_1$  un  $E_2'$  ir dažī procenti. Vektoru diagrammās tie parādīti palielināti.



3.29. att. Transformatora darbības shēma slodzes režīmā.

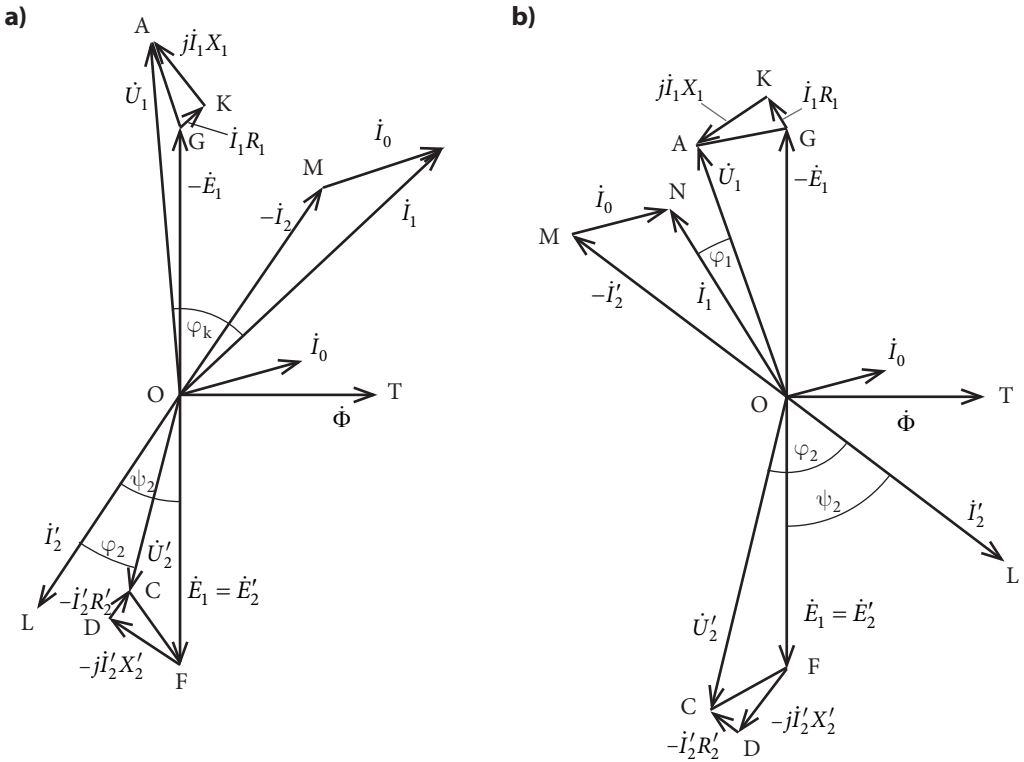
3.30. attēlā a parādīta slogota transformatora vektoru diagramma, ja slodzei ir induktīvs raksturs. Šajā diagrammā OT attēlo galveno magnētisko plūsmu  $\Phi$ , vektors OF – EDS  $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ , kas atpaliek fāzē no plūsmas  $\Phi$  par  $90^\circ$ , OL – strāvas  $\dot{I}'_2$  vektors atpaliek fāzē par leņķi  $\Psi_2$  no EDS  $\dot{E}'_2$ . Strāvas  $\dot{I}_1$  vektors iegūts, pie tukšgaitas strāvas  $\dot{I}_0$  pieskaitot vektoru  $(-\dot{I}'_2)$ .

Lai iegūtu spriegumu  $\dot{U}'_2$  uz sekundārā tinuma spailēm, no EDS  $\dot{E}'_2$  jāatņem sprieguma kritumi  $j\dot{I}'_2 X'_2$  un  $\dot{I}'_2 R'_2$ . Jāatceras, ka sprieguma kritums uz induktīvās pretestības apsteidz strāvu par  $90^\circ$ , bet uz aktīvās pretestības sakrīt fāzē ar strāvu. Līdzīgā veidā var iegūt primārā sprieguma  $\dot{U}_1$  vektoru. Proti, pie vektora  $(-\dot{E}_1)$  pieskaita sprieguma kritumus  $\dot{I}_1 R_1$  un  $j\dot{I}_1 X_1$ .

3.30. attēlā b dota transformatora vektoru diagramma kapacitīvas slodzes gadījumam. Tās konstruēšana veikta līdzīgi kā iepriekšējā gadījumā.

Transformatora vektoru diagrammas uzskatāmi parāda sakarības starp primārā un sekundārā tinuma elektriskajiem lielumiem. Tās ļauj izsekot visu vektoru izmaiņām, slodzei mainoties, ja  $U_1 = const$ .

Ja strāva  $I'_2 = 0$ , abas 3.30. attēlā dotās diagrammas pārvēršas diagrammā, kas atbilst transformatora tukšgaitas režīmam (sk. 3.11. att.). Slodzei pieaugot, proporcionāli strāvām  $I'_2$  un  $I_1$  palielinās trīsstūri CDF un AKG un attiecīgi izmainās spriegums  $U'_2$ .



3.30. att. Slogota transformatora vektoru diagramma induktīva (a) un kapacitīva (b) rakstura slodzei.

### 3.4.2. Transformatora pamatvienādojumi

Transformatora slodzes režīmā apskata primārā un sekundārā tinuma spriegumu un strāvu jeb MS vienādojumus.

Transformatora MS vienādojums iegūts jau iepriekš (sk. izteiksmi 3.59.). Ja šā vienādojuma visus locekļus izdala ar  $W_1$ , iegūst strāvu vienādojumu:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{1}{K} \dot{I}_2 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2. \quad (3.60.)$$

Sprieguma vienādojumu var iegūt, ja izmanto otro Kirhofa likumu (kontūrā ielēgto EDS algebriskā summa ir vienāda ar sprieguma kritumu summu).

Transformatora primārā tinuma ķēdē darbojas spriegums  $U_1$ , EDS  $E_1$  un  $E_{\sigma 1}$ , kuri šajā ķēdē uztur strāvu  $I_1$ , t. i.,

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} + \dot{I}_1 R_1 = \\ &= -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1. \end{aligned} \quad (3.61.)$$

Ja neņem vērā zudumus tēraudā, EDS  $E_1$  var izteikt:

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_0 X_m. \quad (3.62.)$$

Savukārt induktīvās pretestības  $X_m$  un  $X_1$  nosaka izteiksmes

$$X_m = \omega M; \quad (3.63.)$$

$$X_1 = \omega L_{\sigma 1}, \quad (3.64.)$$

kur  $M$  – transformatora savstarpējā induktivitāte, kas atbilst galvenajai magnētiskajai plūsmai;

$L_{\sigma 1}$  – primārā tinuma induktivitāte, kas atbilst tā izkliedes plūsmai.

Ņemot vērā formulas (3.62.–3.64.) un to, ka  $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$  vienādojumu (3.61.) var pārakstīt:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 \omega L_{\sigma 1} + j\dot{I}_1 \omega M + j\dot{I}'_2 \omega M = \\ &= \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 \omega L_1 + j\dot{I}'_2 \omega M, \end{aligned} \quad (3.65.)$$

kur  $L_1 = L_{\sigma 1} + M$  – primārā tinuma pilnā induktivitāte.

Sekundārā tinuma ķēdē darbojas EDS  $E'_2$  un  $E_{\sigma 2}$ , kas uztur sekundāro strāvu  $I'_2$ . Strāva izraisa sprieguma kritumu slodzes pretestībā, kas ir reducētā transformatora sekundārais spriegums  $U'_2$ . Tādējādi

$$\begin{aligned} \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 + \dot{E}_{\sigma 2} - \dot{I}'_2 R'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 = \\ &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2. \end{aligned} \quad (3.66.)$$

Spriegumu  $\dot{U}'_2$  var izteikt arī kā  $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_{sl}$ , kur  $Z'_{sl}$  – slodzes pretestība, kas reducēta uz transformatora primāro tinumu. Tad

$$\dot{I}'_2 (Z'_2 + Z'_{sl}) = \dot{E}'_2. \quad (3.67.)$$

Tā kā  $\dot{E}'_2 = \dot{E}'_1$ , vienādojumu (3.67) var pārveidot:

$$\begin{aligned} \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 \omega L_{\sigma 2} + j\dot{I}'_1 \omega M + j\dot{I}'_2 \omega M + \dot{I}'_2 Z'_{sl} = \\ = \dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 \omega L_2 + j\dot{I}'_1 \omega M + \dot{I}'_2 Z'_{sl} = 0, \end{aligned} \quad (3.68.)$$

kur  $L_{\sigma 2}$  – sekundārā tinuma induktivitāte, kas atbilst izkliedes plūsmai;

$L_2 = L_{\sigma 2} + M$  – sekundārā tinuma pilnā induktivitāte.

Biežāk izmanto transformatora vienādojumus, kas pierakstīti (3.61.) un (3.66.) formā. Tiem atbilst 3.30. attēlā dotās vektoru diagrammas. Spriegumu vienādojumus (3.65.) un (3.68.), kuros kā parametri izmantoti lielumi  $L$  un  $M$ , lieto retāk (sk. daudztinumu transformatorus 3.6. apakšnodaļā).

Lai raksturotu saiti starp diviem saistītiem kontūriem, lieto tā saukto saites koeficientu  $k_s$ . Tā kā

$$M = L_1 - L_{\sigma 1} = L_1 \left( 1 - \frac{L_{\sigma 1}}{L_1} \right),$$

un

$$M = L_2 - L_{\sigma 2} = L_2 \left( 1 - \frac{L_{\sigma 2}}{L_2} \right),$$

tad, reizinot abus vienādojumus, iegūstam:

$$M^2 = L_1 L_2 \left( 1 - \frac{L_{\sigma 1}}{L_1} \right) \left( 1 - \frac{L_{\sigma 2}}{L_2} \right) = L_1 L_2 k_s^2,$$

no kurienes

$$k_s = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (3.69.)$$

### 3.4.3. Transformatora ekvivalentās shēmas

Transformatora dažādu raksturliķņu un darba režīmu aprēķināšanu var ērti veikt, izmantojot ekvivalento shēmu, kurā elektromagnētiskās saites starp primāro un sekundāro tinumu aizstātas ar elektriskām saitēm.

Tiešām, ja sekundārais tinums ir reducēts uz primāro, kas no matemātikas viedokļa nozīmē pāreju no mainīgiem  $U_2, I_2, Z_2$  uz jauniem mainīgiem  $U'_2, I'_2, Z'_2$ , tad visi transformatora tinumu parametri ir reducēti uz vienu (primāro) spriegumu. Tāpēc transformatoru var aizvietot ar elektrisko ekvivalento shēmu. Šādai shēmai, protams, jāatbilst transformatora pamatvienādojumiem (3.60.), (3.61.) un (3.66.).

Izmantojot iepriekš iegūtās izteiksmes, var noteikt strāvu  $I_1$  atkarībā no sprieguma  $U_1$  un shēmas parametriem. No formulas (3.67.) var rakstīt:

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{Z'_2 + Z'_{sl}} = \frac{\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_{sl}}. \quad (3.70.)$$

Savukārt:

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m}.$$

Tādējādi

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} + \frac{-\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_{sl}},$$

no kurienes

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_1 \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{sl}}}. \quad (3.71.)$$

Ievietojot  $-\dot{E}_1$  izteiksmi vienādojumā (3.61.) un atrisinot to attiecībā pret strāvu  $\dot{I}_1$ , iegūstam:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{sl}}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_e}, \quad (3.72.)$$

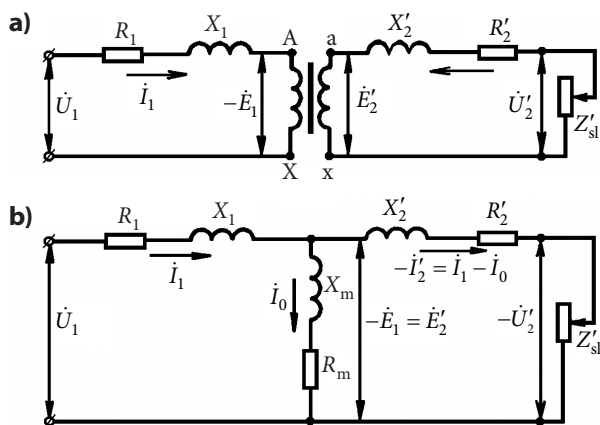
kur

$$Z_e = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z'_2 + Z'_{sl}}} \quad (3.73.)$$

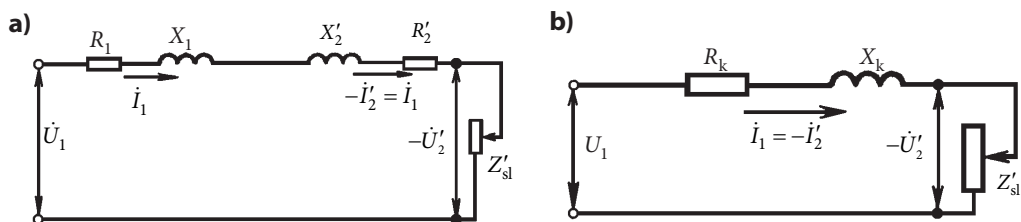
ir transformatora ekvivalentās shēmas kopējā pretestība.

Iegūtā formula (3.73.) parāda, kā ekvivalentajā shēmā savā starpā savienotas pretestības  $Z_1, Z_m, Z'_2$  un  $Z'_{sl}$ . Shēma sastāv no primārā zara ar pretestību  $Z_1$ , magnetizēšanas zara ar pretestību  $Z_m$  un strāvu  $I_0$ , kā arī magnetizēšanas zaram paralēli pieslēgta zara ar pretestību  $Z'_2 + Z'_{sl}$  un strāvu  $-\dot{I}'_2$  (3.31. att.). Iegūto shēmu sauc par transformatora T veida ekvivalento shēmu.





3.31. att. Transformatora shēma (a) un T veida ekvivalentā shēma (b).



3.32. att. Transformatora vienkāršotās ekvivalentās shēmas: a – ar virknē slēgtām primārā un sekundārā tinuma pretestībām; b – shēma ar išslēguma pretestībām.

Var pārliecināties, ka transformatora pamatvienādojumi atbilst 3.31. attēlā b parādītās elektriskās shēmas Kirchofa vienādojumiem, kuri uzrakstīti abiem kontūriem un vienam mezgla punktam.

T veida shēmā magnētiskie zudumi tiek ievēroti kā elektriskie zudumi, kas izdalās pretestībā  $R_m$ . Tātad:

$$R_m = \frac{\Delta p_{\text{mag}}}{I_0^2}.$$

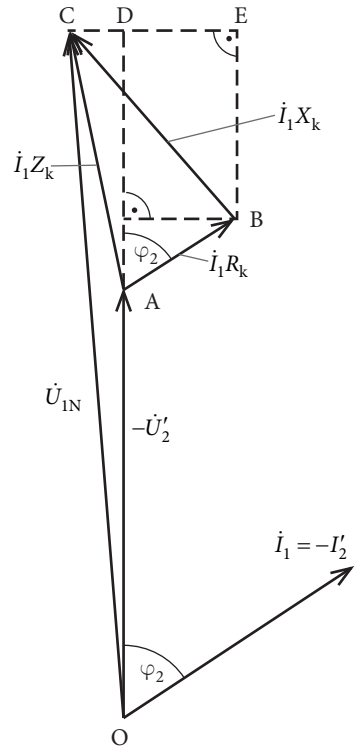
Galvenās magnētiskās plūsmas  $\Phi$  uzturēšanai transformatora serdē tiek patērēta reaktīvā jauda  $Q_m$ . Ekvivalentajā shēmā šai jaudai atbilst reaktīvā jauda, kuru patērē pretestība  $X_m$ , tāpēc

$$X_m = \frac{Q_m}{I_0^2}.$$

Daudziem praktiskiem aprēķiniem, kuros nav nepieciešama liela precizitāte, izmanto vienkāršoto ekvivalento shēmu (3.32. att.). To iegūst no T veida shēmas, pieņemot  $I_0 = 0$ , jo  $I_0$  ir tikai daži procenti no nominālās strāvas.

Lai dažādas jaudas transformatoriem salīdzinātu ekvivalento shēmu parametrus  $R_1, R_2', X_1, X_2', R_m$  un  $X_m$ , tos parasti izsaka relatīvajās vienībās, par bāzes pretestību

pieņemot  $Z_b = U_N/I_N$ . Spēka transformatoriem pretestības relativajās vienībās:  $R_{1*} \approx R_{2*}' = 0,001-0,05$ ;  $X_{1*} \approx X_{2*}' = 0,002-0,1$ ;  $R_{m*} = 2,5-20$ ;  $X_{m*} = 25-200$ .



### 3.4.4. Slogota transformatora sprieguma izmaiņa

Mainoties transformatora slodzei, attiecīgi izmainās arī sprieguma kritumi tā tinumos. Tāpēc mainās arī sekundārā tinuma spriegums. Par transformatora sprieguma izmaiņu sauc algebrisko starpību starp sekundāro spriegumu tukšgaitā  $U_{2N}$  un spriegumu  $U_2$ , kas atbilst nominālajai slodzes strāvai  $I_{2N}$ , ja  $U_N = U_{1N}$ .

Sprieguma izmaiņu parasti izsaka procentos no nominālā sprieguma un aprēķina pēc šādām formulām:

$$\Delta u_{\%} = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \cdot 100 = \frac{U_{2N}' - U_2'}{U_{2N}'} \cdot 100 = \frac{U_{1N} - U_2'}{U_{1N}} \cdot 100. \quad (3.74.)$$

Sprieguma izmaiņas  $\Delta u_{\%}$  noteikšanai izmantosim 3.32. attēlā b doto vienkāršoto ekvivalento shēmu, kurā  $I_0 = 0$  un  $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$ . No minētās shēmas redzams, ka

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2' + \dot{I}_1 Z_k. \quad (3.75.)$$

Vienādojumam (3.75.) atbilstošā vektoru diagramma parādīta 3.33. attēlā. No šīs diagrammas, iepriekš to papildinot ar pārtrauktām līnijām, varam iegūt:

$$\Delta u_{\%} = \left( \frac{OC - OA}{OC} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{\sqrt{OC^2 - CD^2} - AD}{OC} \right) \cdot 100.$$

Apzīmējot

$$p = \frac{AD}{OC} = \frac{AF + FD}{OC} = \frac{I_1 R_k}{U_{1N}} \cos \varphi_2 + \frac{I_1 X_k}{U_{1N}} \sin \varphi_2,$$

un

$$n = \frac{CD}{OC} = \frac{CE - DE}{OC} = \frac{I_1 X_k}{U_{1N}} \cos \varphi_2 - \frac{I_1 R_k}{U_{1N}} \sin \varphi_2,$$

iegūsim

3.33. att. Transformatora vienkāršotā vektoru diagramma.

$$\Delta u_{\%} = \left(1 - \sqrt{1 - n^2} - p\right) \cdot 100.$$

Ņemot vērā, ka  $n^2$  parasti ir daudzkārt mazāks par 1, un izmantojot aptuveno formulu  $\sqrt{1 - n^2} \approx 1 + \frac{n^2}{2}$ ,

nosakām:

$$\Delta u_{\%} = \left(p + \frac{n^2}{2}\right) \cdot 100. \quad (3.76.)$$

Ievietojot  $p$  un  $n$  izteiksmes formulā (3.76.) un ņemot vērā (3.52.), (3.53.) un (3.57.), iegūstam

$$\Delta u_{\%} = \beta(u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kr\%} \sin \varphi_2) + \beta^2 \frac{(u_{kr} \cos \varphi_2 - u_{ka} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (3.77.)$$

Parasti otro locekli izteiksmē (3.77.) var neņemt vērā. Tad transformatora sprieguma izmaiņu aprēķina pēc šādas formulas:

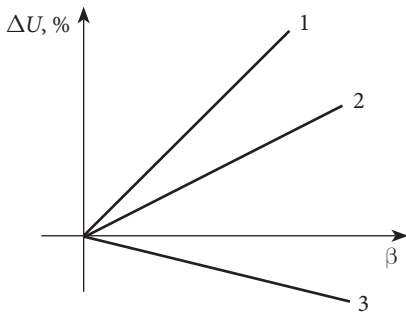
$$\Delta u_{\%} = \beta(u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kr\%} \sin \varphi_2). \quad (3.78.)$$

No (3.78.) redzams, ka transformatora sprieguma izmaiņa ir atkarīga gan no slodzes lieluma, gan no tās rakstura.

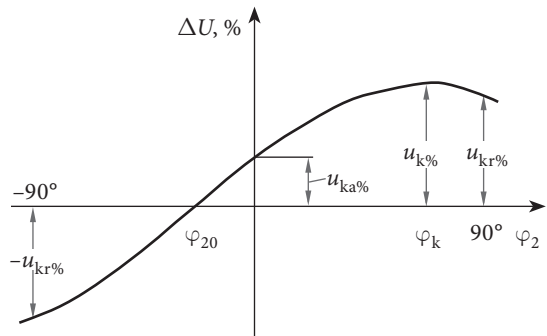
Sakarības  $\Delta u_{\%} = f(\beta)$  dažādām  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  vērtībām ir praktiski lineāras (3.34. att.), jo pirmais loceklis formulā (3.77.) mainās proporcionāli slodzei, bet otrais – ļoti maz ietekmē  $\Delta u_{\%}$ .

Sakarībai  $\Delta u_{\%} = f(\varphi_2)$ , ja  $\beta = 1$ , ir sarežģītāks raksturs (3.35. att.). Tās analīzei izmantosim vienkāršoto formulu (3.78.). Ja  $\varphi_2 = 0$ , tad  $u_{\%} = u_{ka\%}$ , bet, ja  $\varphi_2 = \pm 90^\circ$ ,  $u_{\%} = \pm u_{kr\%}$ . Sprieguma izmaiņas maksimālo vērtību sasniedz, ja  $\varphi_2 = \varphi_k$ . Savukārt, ja  $\varphi_2 = -(90^\circ - \varphi_k)$ , sprieguma izmaiņa ir vienāda ar nulli.

Transformatoru ekspluatācijas praksē bieži izmanto tā ārējās raksturlīknes, t. i., sakarības  $U_2 = f(I_2)$  vai  $U_2 = f(\beta)$ , ja  $U_1 = \text{const}$  un  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ . Šādu raksturlīkņu kons-



3.34. att. Sakarība  $\Delta u_{\%} = f(\beta)$ , ja  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ : 1 – aktīvi induktīvai slodzei; 2 – aktīvai slodzei; 3 – aktīvi kapacitīvai slodzei.



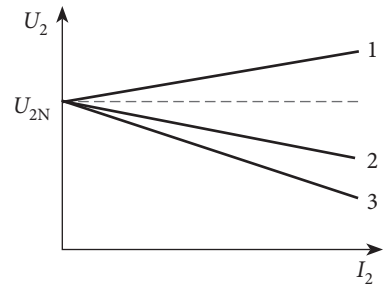
3.35. att. Transformatora sprieguma izmaiņas atkarībā no slodzes rakstura.

truēšanai var izmantot izteiksmi

$$U_2 = U_{2N}(1 - \Delta u/100).$$

3.36. attēlā parādītas transformatora ārējās raksturlīknes dažādam slodzes raksturam. Tās ir lineāras, jo sakarības  $\Delta u = f(\beta)$  ir lineāras.

Parasti spēka transformatoros  $\Delta u_{\%} = 2-8\%$ . Turklāt lielākās vērtības atbilst augsta sprieguma transformatoriem, jo tiem ir lielāks īsslēguma spriegums.



3.36. att. Transformatora ārējās raksturlīknes: 1 – aktīvi kapacitīva slodze; 2 – aktīva slodze; 3 – aktīvi induktīva slodze.

### 3.4.5. Transformatora lietderības koeficients

Transformatora lietderības koeficients  $\eta$  ir svarīgs tā ekspluatācijas rādītājs. Lietderības koeficients ir atdotās jaudas  $P_2$  un uzņemtās jaudas  $P_1$  attiecība

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.79.)$$

Tomēr ar šādu tiešo metodi, izmērot jaudas  $P_1$  un  $P_2$ , lietderības koeficientu nevar noteikt pietiekami precīzi, jo transformatoru lietderības koeficients ir ļoti augsts, līdz ar to mērījumu kļūdas var būtiski ietekmēt rezultātu. Tāpēc transformatora lietderības koeficientu aprēķina pēc netiešās metodes, izmantojot eksperimentāli vai aprēķinu ceļā noteiktos jaudas zudumus. Tā kā

$$P_2 = P_1 - P_0 - P_k = P_1 - P_0 - \beta^2 P_{kN},$$

tad saskaņā ar izteiksmi (3.79.)

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}}. \quad (3.80.)$$

Transformatora sekundārā tinuma atdotā aktīvā jauda ir:

$$P_2 = m I_2 U_{2N} \cos \varphi_2 = \beta m I_{2N} U_{2N} \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2, \quad (3.81.)$$

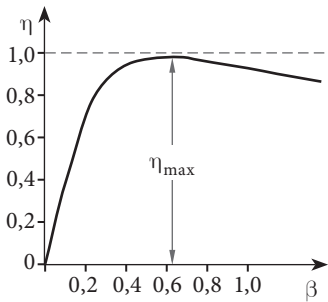
kur  $m$  – fāžu skaits;

$S_N$  – nominālā pilnā jauda.

Ievietojot sakarību (3.81.) izteiksmē (3.80.) un neņemot vērā nelielo sprieguma izmaiņu, slodzei mainoties, iegūstam:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}}. \quad (3.82.)$$

Lietderības koeficienta atkarība no slodzes  $\eta = f(\beta)$  parādīta 3.37. attēlā. Līknes sākuma daļa atbilst režīmam, kad pārsvarā ir nemainīgie magnētiskie zudumi  $P_0$ . Slodzei pieaugot, strauji palielinās elektriskie zudumi, un, kad tie kļūst lielāki par magnētiskajiem zudumiem, lietderības koeficients samazinās.



3.37. att. Transformatora lietderības koeficienta atkarība no slodzes.

Lai noteiktu optimālo slodzes koeficientu  $\beta_{\text{opt}}$ , kad lietderības koeficientam ir maksimālā vērtība, funkcijas  $\eta = f(\beta)$  pirmo atvasinājumu pielīdzina nullei. Atrisinot vienādojumu  $d\eta/d\beta = 0$ , iegūst

$$\beta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}. \quad (3.83.)$$

Tātad lietderības koeficientam maksimālā vērtība ir, kad tukšgaitas zudumi (nemainīgie zudumi) ir vienādi ar īsslēguma zudumiem (mainīgiem zudumiem).

Spēka transformatoros parasti  $P_0/P_{kN} = 0,2-0,4$ , un lietderības koeficients maksimālo vērtību sasniedz, ja  $\beta = 0,45-0,65$ . Šīs  $\beta$  vērtības lielākoties atbilst transformatoru vidējai slodzei. Jāatzīmē, ka slodzes diapazonā  $0,4 < \beta < 1,5$  transformatoru lietderības koeficients mainās samērā maz.

### 3.4.6. Transformatora sprieguma regulēšana

Slodzes izmaiņas izraisa attiecīgas sprieguma krituma izmaiņas pašā transformatorā un tīklā. Tādējādi mainās arī transformatora sekundārais spriegums un patērētājiem pievadītais spriegums. Tā kā daudzi patērētāji ir visai jutīgi pret sprieguma izmaiņām, rodas nepieciešamība transformatora sekundāro spriegumu regulēt atbilstoši slodzes izmaiņām.

Spēka transformatoros spriegumu regulē, mainot primārā vai sekundārā tinuma vijumu skaitu. Šim nolūkam tinumos izveido pārslēdzamus atzarojumus. Pārslēgšanu veic gan tukšgaitā, gan slodzes režīmā, t. i., neatslēdzot transformatoru no tīkla. Pirmajā gadījumā pārslēgšanas ierīce ir relatīvi vienkārša un lēta, taču pārslēgšana saistīta ar patērētāju barošanas pārtraukumu. Tāpēc šo paņēmienu lieto galvenokārt tīklu pazeminošajiem transformatoriem, kā arī ieregulējot spriegumu ilgākam laika periodam, piemēram, sezonai. Lieljaudas transformatoriem parasti izmanto sprieguma regulēšanas ierīci, kas ļauj pārslēgt tinuma atzarojumus slodzes režīmā.

Pēdējā laikā, barojot atbildīgus patērētājus, sprieguma stabilitātei tiek izvirzītas paugstinātas prasības, . Aizvien plašāk vijumu pārslēgšanai transformatoros izmanto pusvadītāju tehniku.

Vijumu skaita izmaiņu (pārslēgšanu) ērtāk veikt AS tinumā, jo salīdzinājumā ar ZS tinumu tajā ir mazāka strāva, tāpēc regulēšanas ierīces ir kompaktākas un ekonomiskākas.

Spēka transformatoros ar jaudu līdz 1600 kV·A AS tinumā parasti izmanto piecus atzarojumus, kas ļauj regulēt spriegumu attiecīgi par +5, +2,5, 0, -2,5, -5 %. Kontakta pārslēgšana notiek tukšgaitā, kad gan AS, gan ZS tinumi atslēgti no tīkla. Pārslēdzamos tinumu posmus cenšas izvietot tinuma vidū vai simetriski visā tinuma augstumā, t. i., tā, lai strāvu sadalījums attiecībā pret jūgiem, ieslēdzot dažādus atzarus, būtu simetrisks. Atslēdzot daļu vijumu, izmainās izkļedes magnētiskie lauki, un rodas elektrodinamiskie

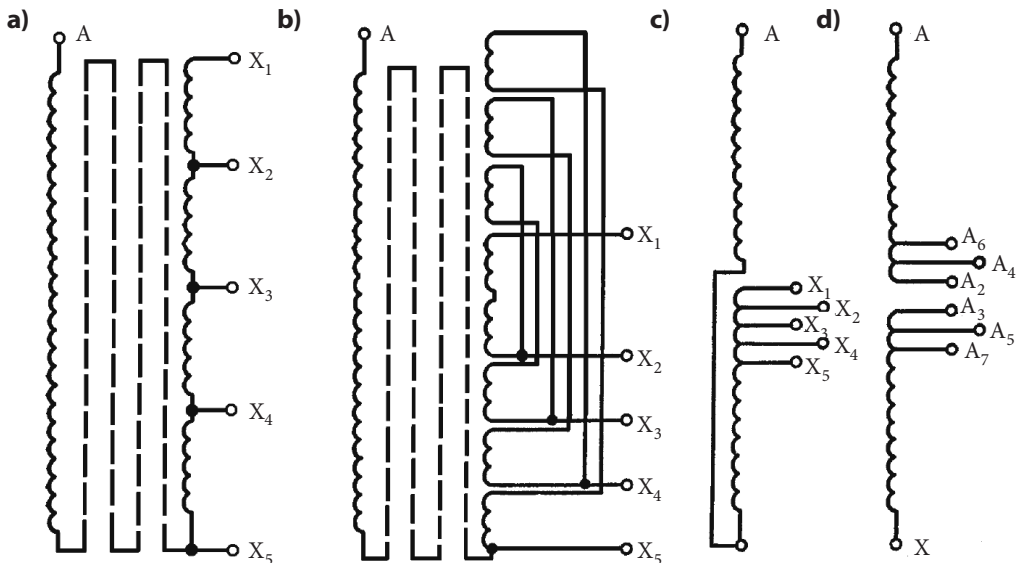
spēki, kas cenšas nobīdīt vijumus tinuma ass virzienā.

Nelielas jaudas transformatoros lieto vienkāršas shēmas bez pārslēdzamo vijumu simetrēšanas visā tinuma augstumā (3.38. att. a). Lielas jaudas transformatoros pie šāda atzarojumu izvietojuma īsslēguma laikā var rasties ievērojami dinamiskie spēki, tāpēc izmanto sarežģītākas shēmas: daudzslāņu (3.38. att. b) un nepārtrauktajiem (3.38. att. c) tinumiem.

Apskatītais sprieguma regulēšanas paņēmieni nevar pilnībā atrisināt sprieguma kvalitātes prasības sakarā ar nepietiekamo mobilitāti, jo ikreiz, kad veic vijumu skaita pārslēgšanu, transformators jāatslēdz no tīkla. Tāpēc aizvien plašāku pielietojumu rod sprieguma regulēšana transformatoros, tos neatslēdzot no tīkla. Parasti šādas sprieguma regulēšanas ierīces (SRI) izmanto transformatoros ar jaudu virs 1000 kV·A. Šādiem transformatoriem ir daudz atzarojumu ar nelielu soli 1–1,5 %, kopumā aptverot 10–20 % regulēšanas zonu.

Tinumu sekcijas regulēšanas zonā ir veidotas tā, lai atvieglotu atzarojumu savienošanu ar SRI, kas izveidota kā atsevišķs bloks transformatora tvertnē. Turklāt loka dzēšanas kameras ir izolētas no transformatora eļļas pamattilpuma.

Palielinoties transformatoru spriegumam un jaudai, pieaug arī SRI izmantošanas ekonomiskā efektivitāte. Galvenais spriegumu diapazons, kurā izmanto SRI, ir 35–330 kV. Transformatoriem ar jaudu virs 100 MV·A sprieguma regulēšanai izmanto arī atsevišķus autotransformatorus. Regulēšanas tinumu šādos transformatoros savieno ar SRI. Tas veido papildvijumus attiecībā pret primāro tinumu un tiek aprēķināts jaudai, kas atbilst regulēšanas diapazonam. Šis apstāklis būtiski palielina visa transformatoru kompleksa gabarītus un aktīvo materiālu izlietojumu.

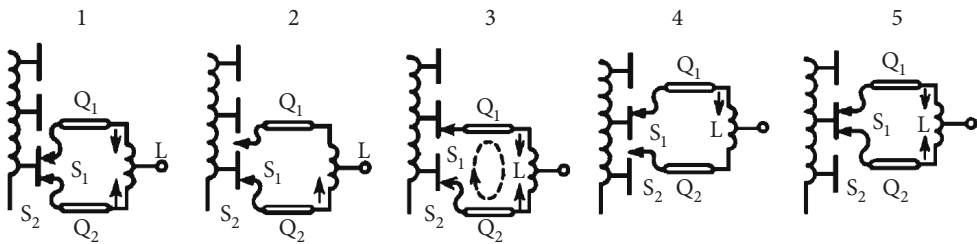


3.38. att. Sprieguma regulēšana, atslēdzot transformatoru no tīkla: a – bez simetrēšanas; b – ar simetrēšanu daudzslāņu cilindriskos tinumos; c, d – ar simetrēšanu nepārtrauktos tinumos.

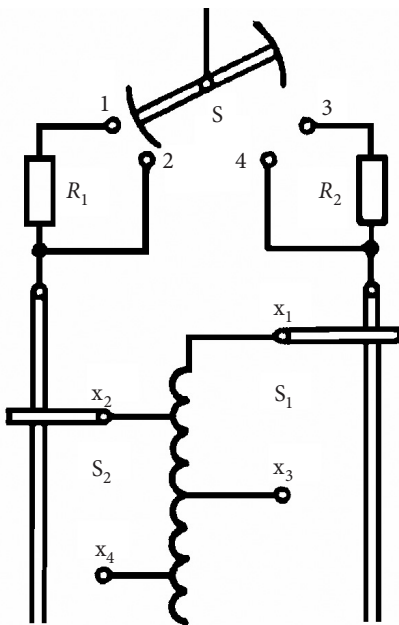
Tomēr spriegumu regulēšanas sistēmas atdalīšanai no galvenā transformatora ir vairākas priekšrocības, kas ļauj vieglāk aizsargāt regulēšanas kontūrus no pārspriegumiem un vajadzības gadījumā atslēgt visu regulēšanas sistēmu, neatslēdzot pamattransformatoru.

Mehāniskām SRI, kas darbojas slodzes režīmā, ir ierobežota kontaktu dilumizturība un nepietiekama ātrdarbība, īpaši gadījumos, kad transformācijas koeficients jāizmaina atbilstoši vairākām regulēšanas pakāpēm. SRI kopumā ir viens no vājākiem elementiem apakšstaciju iekārtās. Statistikas dati rāda, ka aptuveni 40 % transformatoru avāriju saistīti ar SRI bojājumiem. Tāpēc to darbības uzlabošanai pēdējos gados tiek pievērsta pastiprināta uzmanība.

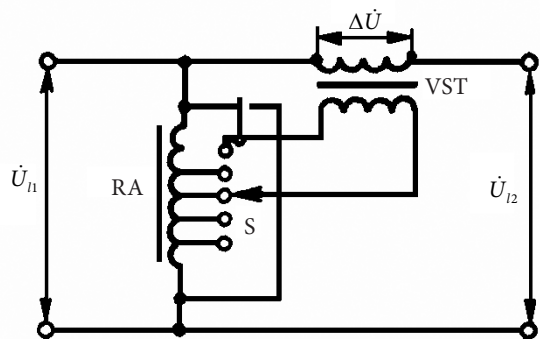
Vienlaikus ar mehānisko SRI uzlabošanu tiek izstrādātas ātrdarbīgas bezkontakta sprieguma regulēšanas sistēmas, kas pamatā bāzējas pusvadītāju tehnikas izmantošanā.



3.39. att. Transformatora sprieguma regulēšana slodzes režīmā ar strāvu ierobežojošiem reaktoriem.



3.40. att. Transformatora sprieguma regulēšana slodzes režīmā ar strāvu ierobežojošām pretestībām.



3.41. att. Virknes slēguma transformatora shēma.

Sprieguma regulēšanai slodzes režīmā izmanto dažādas shēmas. 3.39. attēlā parādīta shēma, kurā strāvas ierobežošanai izmantots reaktors L. Reaktors aprēķināts īslaicīgai darbībai. Darba režīmā, kad abi tā kontakti pieslēgti vienam atzarojumam, reaktora pretestība ir minimāla, jo tā tinuma daļas savienotas pretslēgumā. Reaktors, kā arī kontakti  $S_1$  un  $S_2$  atrodas transformatora eļļas tvertnē, bet slēdži  $Q_1$  un  $Q_2$  novietoti atsevišķā tvertnē. SRI darbības vadība ir automatizēta.

Atzarojumu pārslēgšana notiek šādi. Pozīcijā 1 tiek atslēgts slēdzis  $Q_1$  un kontakts  $S_1$  pārvietojas pozīcijā 2. Pozīcijā 3, kad ieslēgts slēdzis  $Q_1$ , strāvu noslēgtajā kontūrā ierobežo reaktors L. Tālāk tiek atslēgts slēdzis  $Q_2$  un kontakts  $S_2$  tiek pārvietots uz citu atzarojumu (pozīcija 4). Pozīcijā 5 tiek ieslēgts slēdzis  $Q_2$ , un transformators darbojas ar citu transformācijas koeficientu.

Jāatzīmē, ka shēmās ar strāvu ierobežojošiem reaktoriem kontaktos pastiprināti veidojas elektriskais loks, kas pātrina to nodilumu.

3.40. attēlā parādīta shēma atzarojumu pārslēgšanai ar strāvu ierobežojošām pretestībām. Šajā shēmā ir trīs slēdži S,  $S_1$  un  $S_2$ . Pārejot no atzarojuma  $X_1$  uz  $X_2$ , vispirms ieslēdz slēdzi  $S_2$ , tad slēdzi S pārvieto stāvoklī 1–3, un tādējādi tiek ieslēgtas pretestības  $R_1$  un  $R_2$ . Beidzot atslēdz slēdzi  $S_1$ , bet slēdzis S savieno kontaktus 3 un 4.

Dažreiz sprieguma regulēšanai augstsprieguma tīklos ar mērķi pārdalīt jaudas plūsmas izmanto virknes slēguma transformatorus (VST). Šādu transformatoru sekundāro tinumu baro no speciāla transformatora, kuru regulē slodzes režīmā (3.41. att.).

Virknes slēguma transformatorā spriegums  $\Delta \dot{U}$  summējas ar tīkla līnijas spriegumu  $\dot{U}_{11}$  un izmaina to līdz lielumam  $\dot{U}_{12} = \dot{U}_{11} + \Delta \dot{U}$ . Spriegumu  $\Delta \dot{U}$  var izmainīt ar regulējama autotransformatora RA palīdzību. Šajā nolūkā, izmantojot slēdzi S, var panākt sprieguma palielināšanos  $\dot{U}_{12} = \dot{U}_{11} + \Delta \dot{U}$  vai tā pazemināšanos  $\dot{U}_{12} = \dot{U}_{11} - \Delta \dot{U}$  (sk. 3.41. att.).

Vispārīgā gadījumā, izveidojot virknes slēguma transformatorā divus sekundāros tinumus vai kombinējot trīsfāžu tinumu slēgumu shēmas zvaigznē un trīsstūrī, var panākt ne tikai sprieguma  $\Delta \dot{U}$  amplitūdas, bet arī tā fāzes izmaiņu.

## 3.5. TRANSFORMATORU PARALĒLA DARBĪBA

### 3.5.1. Paralēlas darbības nosacījumi

Transformatoru paralēla darbība ļauj efektīvāk tos izmantot, nodrošina nepārtrauktu elektroapgādi kāda transformatora avārijas gadījumā, nodrošina profilaktiska remonta iespējas. Piemēram, slodzes minimuma laikā, atslēdzot zināmu skaitu transformatoru, pārējiem var nodrošināt režīmu, kad lietderības koeficients ir maksimāls vai tuvs tam.

Paralēli strādājošu transformatoru normāla darbība ir iespējama, ja ievēroti šādi paralēlas darbības nosacījumi:

- transformācijas koeficienti ir vienādi, t. i.,  $K_I = K_{II} = \dots = K_n$ ;
- tinumu slēgumu grupas ir vienādas;
- īsslēguma spriegumi ir vienādi, t. i.,  $u_{kI} = u_{kII} = \dots = u_{kn}$ .



Pirmie divi nosacījumi nodrošina transformatoru normālu darbību tukšgaitas un slodzes režīmā. Trešais nosacījums attiecas tikai uz slodzes režīmu un tā ievērošana novērš atsevišķu paralēli strādājošo transformatoru pārslodzi. Neizpildot otro nosacījumu, transformatoru paralēla darbība vispār nav iespējama, toties pirmā nosacījuma izpildē pieļaujamas zināmas nelielas novirzes, bet trešā prasība nav tik stingra.

### 3.5.2. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem transformācijas koeficientiem

Vispirms apskatīsim divu vienādas jaudas transformatoru paralēlu darbību ar dažādiem transformācijas koeficientiem tukšgaitas režīmā. Parādību būtību var noskaidrot, aplūkojot vienfāzes transformatoru paralēlu slēgumu (3.42. att.). Uzskatīsim, ka šajā gadījumā otrais un trešais paralēlas darbības nosacījums ir izpildīts. Pieņemsim, ka  $K_I < K_{II}$ . Tā kā primārais spriegums ir uzdots un abiem transformatoriem ir vienāds, tad

$$\dot{E}_{2I} = \frac{U_1}{K_I} > \dot{E}_{2II} = \frac{U_1}{K_{II}}.$$

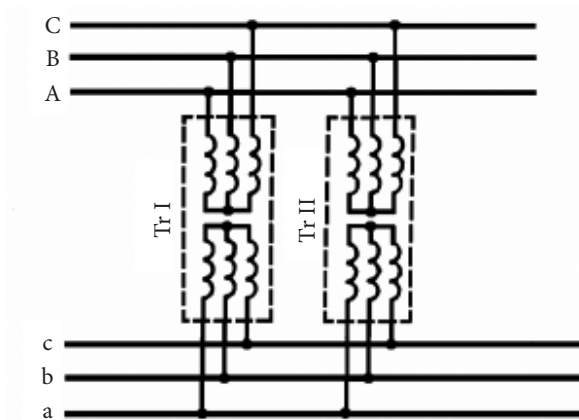
Tādējādi sekundāro tinumu izveidotajā kontūrā darbojas rezultējošais EDS  $\Delta E$  (3.43. att.). Atkarībā no tā, pret kuru transformatoru apskatām šo EDS starpību, iegūstam

$$\Delta E_{I-II} = E_{2I} - E_{2II} = OD$$

vai

$$\Delta E_{I-II} = E_{2II} - E_{2I} = OF.$$

Attiecībā pret šo  $\Delta E$  transformatori atrodas īsslēguma režīmā, tāpēc noslēgtajos kontūros, ko veido abu transformatoru primārie un sekundārie tinumi, plūst izlīdzinošās strāvas. Pirmā transformatora izlīdzinošā strāva  $I_{izII} = OM$  atpauz atpauz fāzē no EDS  $\Delta E_{I-II}$  par leņķi  $\psi_k$ . Par tādu pašu leņķi otrā transformatora izlīdzinošā strāva  $I_{izIII} = ON$  atpauz atpauz no EDS  $\Delta E_{II-I}$  (3.43. att.).



3.42. att. Transformatoru paralēlais slēgums.

Strāva  $I_{izlI}$  rada sprieguma kritumus  $\dot{I}_{izlI}R_{kI}$  un  $j\dot{I}_{izlI}X_{kI}$ , kas ģeometriski summējas ar  $E_{2I}$ . Savukārt strāva  $I_{izlII}$  rada sprieguma kritumus  $\dot{I}_{izlII}R_{kII}$  un  $j\dot{I}_{izlII}X_{kII}$ , kas ģeometriski summējas ar  $E_{2II}$ . Tā kā iepriekš tika pieņemts, ka  $P_I = P_{II}$  un  $u_{kI} = u_{kII}$ , trīsstūri  $A_1B_1C_1$  un  $A_{II}B_{II}C_{II}$  ir vienādi. Nogrieznis  $A_1A_{II}$  punktā C tiek dalīts uz pusēm. Tādējādi strāva  $I_{izlI}$  šajā gadījumā samazina EDS  $E_{2II}$  līdz vidējam spriegumam  $U_{20} = OC$  sekundārajā tīklā, bet strāva  $I_{izlII}$  attiecīgi par tādu pašu lielumu palielina EDS  $E_{2II}$ . Tāda ir izlīdzinošo strāvu loma šajā gadījumā.

Ja pieņem, ka  $Z_{kI} = Z_{kII} = Z_k$ , izlīdzinošo strāvu var aprēķināt pēc formulas:

$$\dot{I}_{izl} = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{kI} + Z_{kII}} = \frac{\Delta \dot{E}}{2Z_k}. \quad (3.84.)$$

Ērtāk strāvu aprēķinus veikt no primārās tinumu puses. Tad  $\Delta E = U_{20}(K_{II} - K_I)$  un

$$I_{izl} = \frac{U_{20}(K_{II} - K_I)}{2Z_k} = \frac{U_{20} \left( \frac{K_{II} - K_I}{K} \right) \cdot K}{2Z_k}, \quad (3.85.)$$

kur  $K = \sqrt{K_{II}K_I}$  – abu transformatoru vidējais transformācijas koeficients.

Ar pietiekamu precizitāti var pieņemt, ka  $U_{20}K = U_1$ . Attiecinot teikto pret nominālo spriegumu un izsakot išslēguma spriegumu  $u_k = I_N Z_k$  procentos no nominālā sprieguma, iegūstam:

$$I_{izl} = \frac{U_N \frac{K_{II} - K_I}{K} \cdot 100}{2 \frac{Z_k I_N}{U_N} \cdot 100 \frac{U_N}{I_N}} = \frac{\Delta K}{2u_k} \frac{1}{I_N}$$

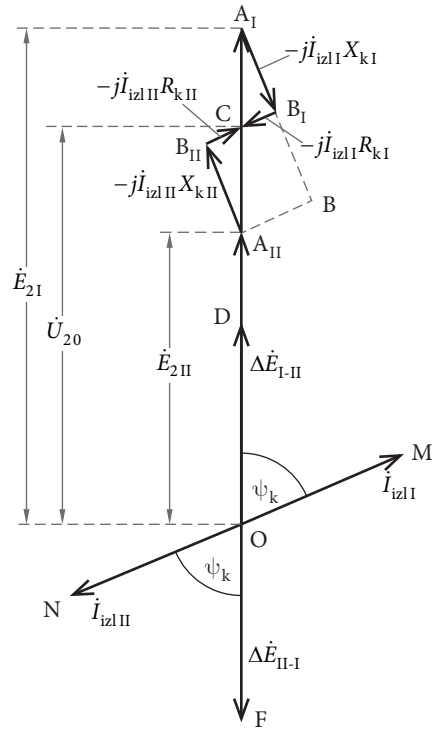
vai

$$\frac{I_{izl}}{I_N} \cdot 100 = \frac{\Delta K \cdot 100}{2u_k}, \quad (3.86.)$$

kur  $\Delta K = \frac{K_{II} - K_I}{K} \cdot 100$  – transformācijas koeficientu starpība, kas izteikta procentos no vidējā koeficienta  $K$ .

Piemēram, ja  $\Delta K = 1\%$  un  $u_k = 5,5\%$ , tad

$$\frac{I_{izl}}{I_N} = \frac{100}{2 \cdot 5,5} \approx 9\%.$$



3.43. att. Izlīdzinošo strāvu vektoru diagramma tukšgaitā.

Apskatot gadījumu, kad paralēli tukšgaitas režīmā darbojas divi dažādas jaudas transformatori, uzskatīsim, tāpat kā iepriekš, ka otrais un trešais paralēlas darbības nosacījums ir izpildīts,  $K_I < K_{II}$ , bet  $P_I \neq P_{II}$ .

Pieņemsim, ka  $P_I < P_{II}$ . Spriežot analogiski kā iepriekš, varam iegūt

$$I_{izl} = \frac{U_{20}(K_{II} - K_I)}{Z_{kI} + Z_{kII}} = \frac{(U_{20}K) \frac{K_{II} - K_I}{K} \cdot 100}{\frac{Z_{kI}I_{NI}}{U_N} \cdot 100 \frac{U_N}{I_N} + \frac{Z_{kII}I_{NII}}{U_N} \cdot 100 \frac{U_N}{I_N}} = \frac{\Delta K}{\frac{u_{kI}}{I_{NI}} + \frac{u_{kII}}{I_{NII}}}.$$

Izsakot strāvu  $I_{izl}$  procentos no mazākās jaudas transformatora nominālās strāvas  $I_{NI}$ , iegūstam:

$$\frac{I_{izl}}{I_{NI}} \cdot 100 = \frac{\Delta K \cdot 100}{u_{kI} + u_{kII} \cdot \frac{I_{NI}}{I_{NII}}} = \frac{\Delta K \cdot 100}{u_{kI} + u_{kII} \cdot \frac{P_{NI}}{P_{NII}}}. \quad (3.87)$$

Piemēram, ja  $\Delta K = 1\%$ ,  $u_{kI} = u_{kII} = 5,5\%$  un  $P_{NI}/P_{NII} = 0,3$ , tad  $(I_{izl}/I_{NI}) \cdot 100 \approx 14\%$ .

No izklāstītā var secināt, ka, paralēli slēdzot transformatorus ar dažādu nominālo jaudu un dažādiem transformācijas koeficientiem, vairāk ar izlīdzinošām strāvām noslogosies mazākās jaudas transformators. Attiecīgi trīsstūris  $A_1B_1C_1$  3.42. attēlā kļūs lielāks nekā trīsstūris  $A_{II}B_{II}C_{II}$  un punkts C pārvietojas uz leju pa nogriezni  $A_1A_{II}$ . Robežgadījumā, ja

$$P_{NII} \gg P_{NI}, \quad \frac{I_{izl}}{I_{NI}} = \frac{\Delta K \cdot 100}{u_{kI}},$$

un iepriekšējā piemērā būtu  $I_{izl} = 18,2\%$ ; trīsstūris  $A_1B_1C$  pārietu trīsstūrī  $A_1BA_{II}$  un punkts C sakristu ar punktu  $A_{II}$ . Šajā gadījumā  $U_{20} = OA_{II}$ .

Tagad apskatīsim, kādas izmaiņas notiek, ja divi dažādas jaudas transformatori ar dažādiem transformācijas koeficientiem paralēli darbojas slodzes režīmā. Joprojām uzskatīsim, ka otrais un trešais paralēlas darbības nosacījums izpildās, bet  $K_I < K_{II}$  un  $P_I < P_{II}$ .

Izmantojot superpozīcijas metodi, parādības var apskatīt šādā secībā. Izlīdzinošā strāva noved abu transformatoru sekundāros spriegumus pie vienas vērtības OC (3.43. att.). Ieslēdzot slodzi, transformatoru tinumos parādās arī idealizētās slodzes strāvas  $I_{sl.i}$ , kas ir proporcionālas transformatoru jaudām. Īstenībā eksistē viena strāva, kas ir strāvu  $I_{izl}$  un  $I_{sl.i}$  ģeometriskā summa.

Tā kā, ieslēdzot slodzi, sekundārie spriegumi abiem transformatoriem izmainās gandrīz vienādi, tad  $\Delta E$  un izlīdzinošās strāvas normālo slodžu robežās praktiski nav atkarīgas no darba režīma.

Strāvu vektoru diagramma apskatāmajam gadījumam parādīta 3.44. attēlā. Idealizētās slodzes strāvas abiem transformatoriem attēlotas attiecīgi ar vektoriem OA un OB. Šajā gadījumā pieņemts:

$$\frac{OA}{OB} = \frac{I_{sl.iI}}{I_{sl.iII}} = \frac{P_{NI}}{P_{NII}} = \frac{1}{2}.$$

Vektori OA un OB nobīdīti attiecībā pret sprieguma vektoru OC par vienādu leņķi  $\varphi_2$ . Abu transformatoru rezultējošās strāvas ir:

$$\dot{I}_I = \dot{I}_{izII} + \dot{I}_{sl,iI} = OD;$$

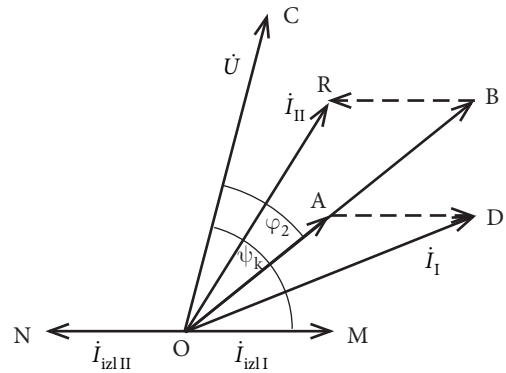
$$\dot{I}_{II} = \dot{I}_{izIII} + \dot{I}_{sl,iII} = OR.$$

Ja pieņem, ka idealizētās slodzes strāvas vienādas ar nominālajām, tad pirmais transformators (mazākās jaudas) ir jūtami pārslogots. Transformatoru pārslodzi ar izlīdzinošām strāvām var novērtēt ar attiecību  $I_I/I_{izII}$  un  $I_{II}/I_{izIII}$ . Piemēram, ja  $P_{NII}/P_{NI} = 3,2$ ,  $I_{izII}/I_{sl,iI} = I_{izIII}/I_{NI} = 0,16$  un  $\psi_k = 75^\circ$ . Tādējādi pirmais transformators būs pārslogots par 16 %, bet otrais nepilnīgi noslogots par  $16 \cdot (1/3,2) = 5$  %. Samazinoties leņķim  $\varphi_2$ , samazināsies arī pirmā transformatora pārslodze. Tomēr, ja  $\varphi_2 = 45^\circ$  ( $\cos \varphi_2 = 0,7$ ), pārslodze vēl ir 14 %, un tikai tad, ja  $\varphi_2 = 0$ , tā krītas līdz aptuveni 5 %.

Līdz šim mēs pieņēmām, ka  $K_I < K_{II}$ . Ja šī attiecība mainās, proti,  $K_I > K_{II}$ , tad izlīdzinošo strāvu vektori  $I_{izII} = OM$  un  $I_{izIII} = ON$  mainās vietām. Tādā gadījumā būtu pārslogots otrais (lielākās jaudas) transformators. Saglabājot iepriekšējā piemēra datus, tā pārslodze nepārsniegtu 5 %. Tanī pašā laikā pirmais transformators būtu nepilnīgi noslogots. Šis rezultāts ir labvēlīgāks salīdzinājumā ar iepriekšējo. Jāatzīmē, ka rezultāts gan mainās, pārejot uz kapacitīvu slodzes raksturu, bet tādi gadījumi sastopami retāk. Tāpēc, slēdzot paralēli transformatorus ar dažādiem transformācijas koeficientiem, labāki rezultāti būs tad, ja mazākās jaudas transformatoram ir lielāks transformācijas koeficients.

Tā kā transformatori nav paredzēti ilgstošas pārslodzes apstākļiem, jāsamazina to slodze tiktāl, lai pārslogotajam transformatoram radītu normālus darba apstākļus. Otrs transformators šajā gadījumā būs nepilnīgi noslogots un visas sistēmas izmantošana nebūs pietiekami efektīva. Ja izmanto iepriekšējā piemēra datus  $P_{NII}/P_{NI} = 3,2$ ,  $I_{izII}/I_{NI} = 0,16$ ,  $I_{sl,iI} = I_{NI}$  un  $\psi = 75^\circ$ , tad pirmais transformators ir pārslogots aptuveni par 10 %. Tas nozīmē, ka tādā pašā mērā jāsamazina ārējā slodze.

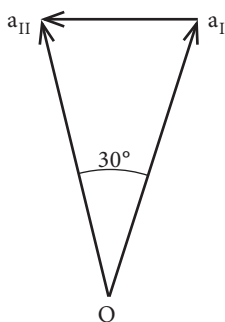
No iepriekš teiktā var secināt, ka transformatoru paralēla darbība ar visai atšķirīgiem transformācijas koeficientiem nav pieļaujama. Tāpēc atkarībā no transformatoru tipa un izmantošanas sfēras  $\Delta K$  nedrīkst pārsniegt 0,5 % vai 1 %.



3.44. att. Strāvu diagramma slodzes režīmā.

### 3.5.3. Transformatoru paralēla darbība ar dažādām tinumu savienojumu grupām

Apskatīsim divu trīsfāžu transformatoru paralēlu darbību, ja tiem ir vienādi transformācijas koeficienti, bet dažādas tinumu savienojumu grupas, piemēram,  $\Delta/Y-11$  un  $Y/Y-0$ . Šo transformatoru sekundārie līnijas spriegumi ir skaitliski vienādi, bet nobīdīti



3.45. att. EDS vektoru diagramma transformatoriem ar dažādām tinumu savienojumu grupām.

fāzē par  $30^\circ$ . Tādējādi starp šiem transformatoriem vienmēr darbojas spriegums, ko nosaka vektors  $a_I a_{II}$  (3.45. att.). Tā kā  $a_I a_{II} = 2 \cdot a_I O \cdot \sin 15^\circ = 0,52 \cdot a_I O = 0,52 \cdot a_{II} O$ , izlīdzinošā strāva šajā gadījumā pārsniegtu nominālo vērtību vairākas reizes. Tāpēc transformatoru paralēla darbība ar dažādām tinumu savienojumu grupām nekādā gadījumā nav pieļaujama.

Transformatoros ar tinumu savienojumu grupām 0 un 6 vai 11 un 5 var viegli izveidot vienādas savienojumu grupas. Nepieciešams AS vai ZS tinumam sākumu un beigas apmainīt vietām. Par tinumu savienojumu grupām sīkāk sk. 3.2.7. apakšnodaļu.

### 3.5.4. Transformatoru paralēla darbība ar dažādiem īsslēguma spriegumiem

Pieņemsim, ka paralēli darbojas  $n$  transformatori, kuru īsslēguma spriegumi ir dažādi, bet pārējie paralēlas darbības nosacījumi ir ievēroti. Tā kā primārie un sekundārie spriegumi ir vienādi, vienādi ir arī sprieguma kritumi:

$$\dot{I}_I Z_{kI} = \dot{I}_{II} Z_{kII} = \dots = \dot{I}_n Z_{kn}$$

vai

$$\dot{I}_I : \dot{I}_{II} : \dots : \dot{I}_n = \frac{1}{Z_{kI}} : \frac{1}{Z_{kII}} : \dots : \frac{1}{Z_{kn}}. \quad (3.88.)$$

Tādējādi transformatoru slodzes strāvas  $I_I, I_{II} \dots I_n$  ir apgriezti proporcionālas to pilnajām pretestībām. Atbilstošā vektoru diagramma divu transformatoru strāvām parādīta 3.46. attēlā. Transformatoriem ir vienādas jaudas, bet  $u_{kI} < u_{kII}$ . No diagrammas redzams, ka, neskatoties uz būtiski atšķirīgiem īsslēguma parametriem, leņķis  $\varphi_{kI} - \varphi_{kII}$  ir neliels. Tāpēc strāvu  $I_I$  un  $I_{II}$  ģeometrisko saskaitīšanu var aizstāt ar algebrisku saskaitīšanu un vienādojumu (3.88.) pārrakstīt šādā veidā:

$$I_I : I_{II} : \dots : I_n = \frac{1}{Z_{kI}} : \frac{1}{Z_{kII}} : \dots : \frac{1}{Z_{kn}}$$

vai

$$P_I : P_{II} : \dots : P_n = \frac{1}{Z_{kI}} : \frac{1}{Z_{kII}} : \dots : \frac{1}{Z_{kn}}. \quad (3.89.)$$

No formulas (3.89.) izriet, ka

$$\frac{P_n}{\sum_1^n P_n} = \frac{\frac{1}{Z_{kn}}}{\sum_1^n \frac{1}{Z_{kn}}} = \frac{1}{Z_{kn} \sum_1^n \frac{1}{Z_{kn}}} = \frac{1}{\frac{I_{Nn} Z_{kn}}{U_1} \cdot 100 \cdot \frac{1}{I_{Nn}} \sum_1^n \frac{I_{Nn}}{I_{Nn} Z_{kn}} \cdot 100} = \frac{1}{\frac{u_{kn}}{P_{kn}} \sum_1^n \frac{P_{Nn}}{u_{kn}}}$$

Tādējādi  $n$ -tā transformatora jauda

$$P_n = \frac{\sum_1^n P_n}{\sum_1^n \frac{P_{Nn}}{u_{kn}}} \cdot \frac{P_{Nn}}{u_{kn}}. \quad (3.90.)$$

Iegūtās formulas paskaidrosim ar piemēru. Doti trīs transformatori ar jaudu 100 kV·A, turklāt to īsslēguma spriegumi ir dažādi, proti,  $u_{kI} = 3,5 \%$ ,  $u_{kII} = 4 \%$  un  $u_{kIII} = 5,5 \%$ . Aprēķinot slodzes sadalījumu starp šiem transformatoriem, ja summārā jauda

$$\sum_1^n P_n = 300 \text{ kV}\cdot\text{A},$$

iegūstam šādus rezultātus:

$$\sum_1^n \frac{P_{Nn}}{u_{kn}} = \frac{100}{3,5} + \frac{100}{4} + \frac{100}{5,5} = 71,8$$

un

$$P_I = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{3,5} = 119,5 \text{ kV}\cdot\text{A};$$

$$P_{II} = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{4} = 104,5 \text{ kV}\cdot\text{A};$$

$$P_{III} = \frac{300}{71,8} \cdot \frac{100}{5,5} = 76 \text{ kV}\cdot\text{A}.$$

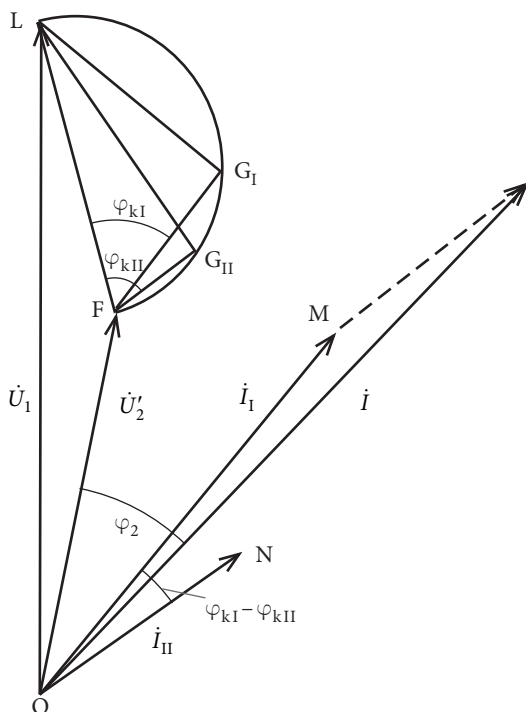
No iegūtajiem rezultātiem redzams, ka pirmais transformators pārslogots par 19,5 %, bet trešais nav noslogots par 24 %.

Samazinot ārējo slodzi par 19,5 %, iegūsim jaunu slodzes sadalījumu  $P_I = 100 \text{ kV}\cdot\text{A}$ ,  $P_{II} = 87,2 \text{ kV}\cdot\text{A}$  un  $P_{III} = 63,5 \text{ kV}\cdot\text{A}$ .

Šajā gadījumā pirmais transformators ir normāli noslogots. Acīm redzams, ka transformatoru paralēlu darbību ar īsslēguma spriegumiem, kas jūtami atšķiras, nevar atzīt par apmierinošu. Tiek uzskatīts par pieļaujamu, ja katra paralēli strādājošā transformatora īsslēguma spriegums neatšķiras vairāk par 10 % no to vidējās aritmētiskās vērtības.

Ja diviem transformatoriem, kas darbojas paralēli, ir dažādas jaudas, tad labāk, lai mazākās jaudas transformatoram ir lielāks īsslēguma spriegums. Tādā gadījumā mazākās jaudas transformators ir nepietiekami noslogots un tas ietekmē sistēmas kopējo jaudu mazāk nekā lielākās jaudas transformatora nepilnīga noslodze. Pretējā gadījumā, ja mazākās jaudas transformatoram būtu arī mazāks īsslēguma spriegums, tas limitētu sistēmas darbību un nāktos to atslogot, lai nepārslogotu mazākās jaudas transformatoru. Netiek rekomendēts paralēlam darbam slēgt transformatorus, kuru nominālās jaudas atšķiras vairāk nekā trīs reizes.

Jāatzīmē, ka, izvedot formulu (3.90.), strāvas  $I_I$  un  $I_{II}$  3.46. attēlā tika saskaitītas algebriski. Īstenībā tās var nesakrist fāzē pat tad, ja īsslēguma spriegumi ir vienādi, bet



3.46. att. Transformatoru vektoru diagramma ar dažādiem īsslēguma spriegumiem.

nav vienādas šo spriegumu komponentes. Šāda aina vērojama atšķirīgu jaudu transformatoros. Tā īsslēguma sprieguma aktīvā komponente, pieaugot transformatora jaudai, samazinās. Tāpēc panākt, lai starp paralēli strādājošiem transformatoriem slodze sadalītos proporcionāli to nominālajām jaudām, ir visai grūti.

## 3.6. AUTOTRANSFORMATORI UN DAUDZTINUMU TRANSFORMATORI

### 3.6.1. Autotransformatori

Autotransformatorā daļa tinuma vienlaikus pieder gan primārajai, gan sekundārajai sistēmai, t. i., ZS tinums ir daļa no AS tinuma. Tādējādi autotransformatora primārā un sekundārā ķēde ir saistītas savā starpā ne tikai magnētiski, bet arī elektriski. Pārējais konstruktīvais izveidojums un darbības princips autotransformatoram ir tāds pats kā parastajam divtinumu transformatoram.

Autotransformators var kalpot gan sprieguma pazemināšanai (3.47. att. a), gan paugstināšanai (3.47. att. b). Ja vijumu skaitu starp spailēm A un X apzīmē ar  $W_1$ , bet vijumu skaitu starp spailēm a un x – ar  $W_2$ , tad sakarības starp spriegumiem un strāvām autotransformatorā būs tādas pašas kā parastajā transformatorā

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{W_1}{W_2} = K.$$

Tomēr autotransformatoram piemīt vairākas atšķirības.

Strāva  $I_{12}$ , kas plūst tinumā a-x, ir vienāda ar primārās un sekundārās strāvas ģeometrisku summu:

$$\dot{I}_{12} = -\dot{I}_1 + \dot{I}_2.$$

Neņemot vērā tukšgaitas strāvu, var uzskatīt, ka strāvas  $I_1$  un  $I_2$  atrodas pretfāzē un to ģeometriskā summa ir vienāda ar aritmētisko starpību. Pazeminošā transformatorā  $I_2 > I_1$  un

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (3.91.)$$

Paaugstinošā transformatorā  $I_1 > I_2$  un

$$I_{12} = I_1 - I_2. \quad (3.92.)$$

Pieņemot, ka  $I_0 = 0$ ,  $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1}$  un pazeminošam transformatoram iegūstam

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_2 \left( 1 - \frac{W_2}{W_1} \right) = \dot{I}_2 \left( 1 - \frac{1}{K} \right). \quad (3.93.)$$

Paaugstinošam transformatoram izteiksme (3.93.) izskatās šādi:

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 \left( 1 - \frac{W_1}{W_2} \right) = \dot{I}_1 (1 - K). \quad (3.94.)$$

Atrisinot vienādojumu (3.91.) attiecībā pret  $I_2$  un pareizinot iegūto izteiksmi ar spriegumu  $U_2$ , iegūstam:

$$I_2 U_2 = I_1 U_2 + I_{12} U_2 = I_1 U_2 + I_2 U_2 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \quad (3.95.)$$

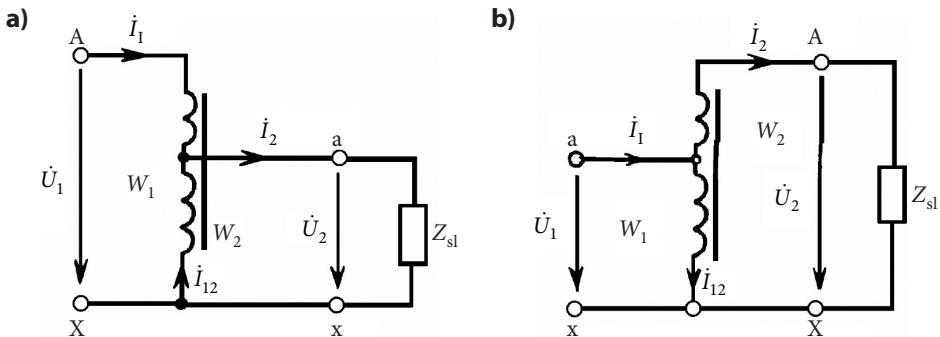
vai

$$S_2 = S_e + S_{em},$$

kur  $S_2$  – autotransformatora pilnā jauda;

$S_e$  – autotransformatora elektriskā jauda, t. i., pilnās jaudas daļa, kas no primārā tīkla sekundārajā tiek nodota elektriskā ceļā (pa vadiem);

$S_{em}$  – autotransformatora elektromagnētiskā jauda, kas no primārā tīkla sekundārajā tiek nodota elektromagnētiskā ceļā. Šo jaudu sauc par aprēķina jaudu.



3.47. att. Vienfāzes pazeminoša (a) un paaugstinoša (b) autotransformatora shēma.



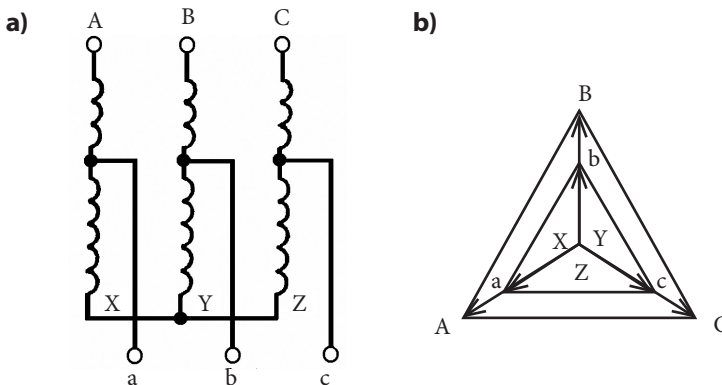
Transformatora izmērus gan autotransformatora, gan parastā transformatora gadījumā nosaka tikai elektromagnētiskā jauda. Šī jauda saskaņā ar izteiksmi (3.96.) ir:

$$S_{em} = S_2 - S_e = S_2 \left( 1 - \frac{1}{K} \right). \quad (3.96.)$$

No formulas (3.96.) var secināt, ka autotransformatora elektromagnētiskā jauda ir  $1/(1-1/K)$  reizes mazāka salīdzinājumā ar divtinumu transformatoru. Turklāt, jo tuvāks 1 ir autotransformatora transformācijas koeficients, jo mazāka tā masa un izmēri. Aprēķina jauda šajā gadījumā samazinās sakarā ar to, ka pazeminošā autotransformatora tinumu, kurā plūst primārā strāva, un paaugstinošā autotransformatora tinumu, kurā plūst sekundārā strāva, aprēķina primārā un sekundārā sprieguma starpībai. Parastajā transformatorā, kā zināms, šos tinumus aprēķina pilnam spriegumam. Turklāt autotransformatora ieejas un izejas tinumos plūst strāvu starpība atšķirībā no parastā transformatora, kur tinumos plūst pilnā strāva. Pateicoties tam, autotransformatori rod plašu pielietojumu dažādu augstsprieguma tīklu savienošanai un citās jomās.

Autotransformatoros, pateicoties mazākai tinumu un magnētvasda masai salīdzinājumā ar tādas pašas jaudas parasto transformatoru, zudumi un sprieguma izmaiņas ir mazākas, bet lietderības koeficients augstāks.

Tanī pašā laikā autotransformatoriem piemīt vairāki trūkumi, kas ierobežo to izmantošanu. Tā kā īsslēguma spriegums autotransformatorā ir  $1/(1-1/K)$  reizes mazāks salīdzinājumā ar parasto transformatoru, īsslēguma strāva tajā ir tikpat reizu lielāka. Turklāt īsslēguma režīmā šajā gadījumā notiek magnētvasda pastiprināta piesātināšanās un tukšgaitas strāvas palielināšanās. Tas izskaidrojams ar to, ka, noslēdzot, piemēram, īsi tinumu a-x vai A-X (3.47. att.), spriegums, kas pielikts tinumam A-a, pieaug no vērtības  $U_1-U_2$  līdz  $U_1$ . Kā būtisks autotransformatora trūkums jāatzīmē augstākā sprieguma nokļūšanas iespēja zemākā sprieguma pusē. Tas var būt bīstami apkalpojošam personālam un iekārtām. Tāda situācija, piemēram, var rasties, ja 3.47. attēla a shēmā rodas pārrāvums tinumā a-x. Tā kā autotransformatorā abi tinumi savā starpā saistīti elektriski, zemākā



3.48. att. Trīsfāžu autotransformators ar tinumu slēgumu trīsstūrī: a – tinumu shēma; b – vektoru diagramma.

sprieguma tinuma izolācijai jābūt tādai pašai kā augstākā sprieguma tinumam. Tāpēc autotransformatorus galvenokārt izmanto, ja  $K \leq 2$ , kad ieguvums no transformatora masas un zudumu samazināšanās ir lielāks par izolācijas sadārdzināšanos.

Trīsfāžu autotransformatoros var izmantot tādas pašas tinumu savienojumu shēmas kā parastajos trīsfāžu transformatoros. Visbiežāk trīsfāžu autotransformatoros tinumus slēdz zvaigznē, kad primārie un sekundārie spriegumi sakrīt fāzē (3.48. att.)

Savienojot autotransformatora tinumus trīsstūrī (3.49. att.), primāro un sekundāro spriegumu trīsstūri ir nobīdīti fāzē par leņķi

$$\alpha = \arctg \sqrt{3} \frac{K-1}{3-K},$$

kur

$$K = \frac{AB}{aB} = \frac{U_{A-a} + U_{a-X}}{U_{a-X}} = 1 + \frac{U_{A-a}}{U_{a-X}}.$$

No 3.49. attēlā b parādītās vektoru diagrammas var iegūt:

$$U_{a-X} = \frac{U_{AB}}{2} + \sqrt{\frac{U_{ab}^2}{3} - \frac{U_{AB}^2}{12}}; \quad (3.97.)$$

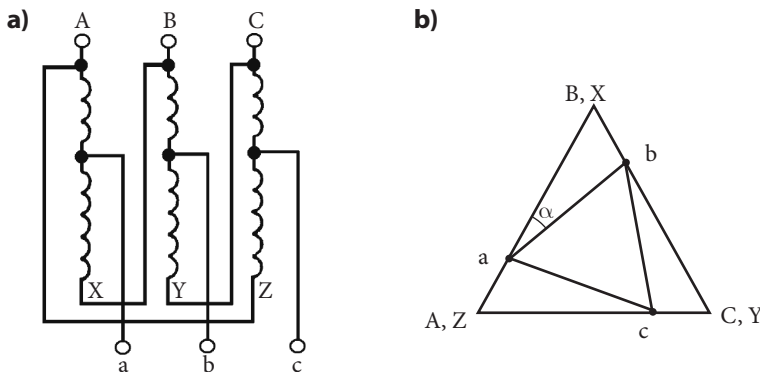
$$U_{A-a} = \frac{U_{AB}}{2} - \sqrt{\frac{U_{ab}^2}{3} - \frac{U_{AB}^2}{12}}. \quad (3.98.)$$

No formulām (3.97.) un (3.98.) izriet, ka autotransformatorā ar tinumu slēgumu trīsstūrī  $U_2 \geq U_1/2$  un līnijas spriegumu transformācijas koeficients

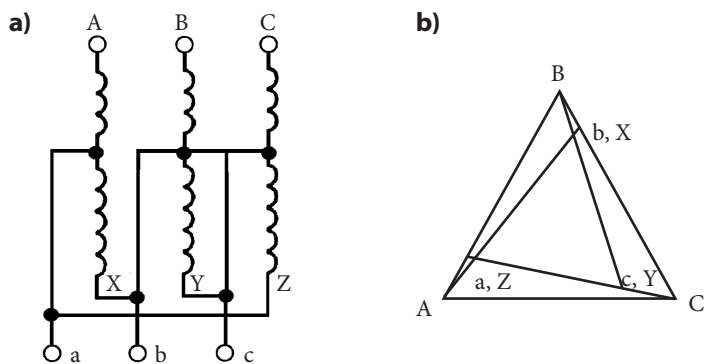
$$K_l = \frac{K}{\sqrt{K^2 - 3K + 3}}$$

var būt robežās  $1 \leq K_l \leq 2$ .

Gadījumos, kad, savienojot autotransformatora tinumus trīsstūrī, vēlams iegūt lielāku līnijas spriegumu transformācijas koeficientu, var lietot 3.50. attēlā parādīto shēmu. Šajā shēmā spriegums A–a tinumā



3.49. att. Trīsfāžu autotransformators ar tinumu slēgumu trīsstūrī: a – tinumu shēma; b – vektoru diagramma.



3.50. att. Trīsfāžu autotransformators ar modificēto tinumu slēgumu trīsstūrī: a – tinumu shēma; b – vektoru diagramma.

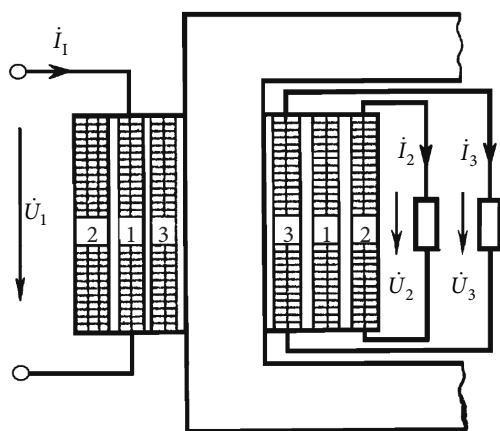
$$U_{A-a} = -\frac{U_{ab}}{2} + \sqrt{\frac{U_{AB}^2}{3} - \frac{U_{ab}^2}{12}}$$

Trīsfāžu autotransformatora tinumu savienojumu zigzagzvaigznē izmanto reti, jo tas ir visai sarežģīti.

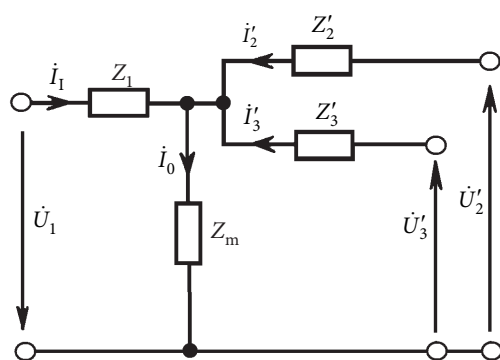
### 3.6.2. Daudztinumu transformatori

Transformatorus, uz kuru serdes stieņiem novietoti vairāk nekā divi elektriski izolēti tinumi, sauc par daudztinumu transformatoriem. Tādu transformatoru uzstādīšana, piemēram, gadījumos, kad elektroenerģija jāaizvada dažādos attālumos ar dažādiem spriegumiem, ir ekonomiski izdevīgākā salīdzinājumā ar vairākiem divtinumu transformatoriem.

Daudztinumu transformatora konstrukcija un darbības princips ir tāds pats kā divtinumu transformatoram. Atšķirība ir tā, ka daudztinumu transformatoros uz serdes stieņiem novietoti vairāki tinumi.



3.51. att. Trīstinumu transformators.



3.52. att. Trīstinumu transformatora ekvivalentā shēma.

Daudztinumu transformatora MS vienādojumu var uzrakstīt analogiski kā divtinumu transformatoram

$$\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 + \dot{I}_3 W_3 + \dots + \dot{I}_n W_n = \dot{I}_0 W_1. \quad (3.99.)$$

Ja neņem vērā magnētiskos zudumus, tinumu spriegumu vienādojumi ir šādi:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega (\dot{I}_1 L_1 + \dot{I}_2 M_{12} + \dot{I}_3 M_{13} + \dots + \dot{I}_n M_{1n}) + \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{U}_2 &= -j\omega (\dot{I}_2 L_2 + \dot{I}_1 M_{21} + \dot{I}_3 M_{23} + \dots + \dot{I}_n M_{2n}) - \dot{I}_2 R_2; \\ \dot{U}_3 &= -j\omega (\dot{I}_3 L_3 + \dot{I}_1 M_{31} + \dot{I}_2 M_{32} + \dots + \dot{I}_n M_{3n}) - \dot{I}_3 R_3; \\ &\dots \\ \dot{U}_n &= -j\omega (\dot{I}_n L_n + \dot{I}_1 M_{n1} + \dot{I}_2 M_{n2} + \dots + \dot{I}_{n-1} M_{n(n-1)}) - \dot{I}_n R_n. \end{aligned} \right\} \quad (3.100.)$$

Šie vienādojumi apraksta elektromagnētiskos procesus daudztinumu transformatoros.

No visiem daudztinumu transformatoriem visplašāko pielietojumu rod trīstinumu transformatori, t. i., tādi, kuriem ir viens primārais un divi sekundārie tinumi (3.51. att.). Šādi transformatori bieži tiek lietoti sadales tīklos ar dažādiem spriegumiem.

Spriegumu un strāvu vienādojumus trīstinumu transformatoram iegūst pēc analogijas ar divtinumu transformatoru:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 R'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2; \\ \dot{U}'_3 &= \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 R'_3 - j\dot{I}'_3 X'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 Z'_3; \\ \dot{I}_0 &= \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3, \end{aligned} \right\} \quad (3.101.)$$

kur

$$U'_2 = U_2 \frac{W_1}{W_2} = U_2 K_{12};$$

$$U'_3 = U_3 \frac{W_1}{W_3} = U_3 K_{13};$$

$$I'_2 = I_2 \frac{1}{K_{12}}; I'_3 = I_3 \frac{1}{K_{13}};$$

$$Z'_2 = Z_2 K_{12}^2; Z'_3 = Z_3 K_{13}^2.$$

Vienādojumu sistēmai (3.101.) atbilst transformatora ekvivalentā shēma (3.52. att.) un vektoru diagramma (3.53. att.), no kurām redzama abu sekundāro tinumu savstarpējā saistība. Tāpēc, mainoties slodzei (strāvai) vienā sekundārajā tinumā, mainās spriegums abos tinumos. Lai mazinātu šo ietekmi, parasti primāro tinumu novieto starp sekundārajiem tinumiem (sk. 3.51. att.). Tā izdodas samazināt primārā tinuma induktīvo izkliedes pretestību un sprieguma kritumu  $I_1 Z_1$ .

Ekvivalentās shēmas parametrus aprēķina vai nosaka eksperimentāli, tāpat kā divti-

numu transformatoram. Pretestību  $Z_1$ ,  $Z'_2$  un  $Z'_3$  eksperimentālai noteikšanai nepieciešams veikt trīs īsslēguma mēģinājumus:

- barojot tinumu 1 ar pazeminātu spriegumu, tinumu 2 saslēdz īsi, bet tinumu 3 atstāj nenoslēgtu. No šī mēģinājuma rezultātiem nosaka:

$$Z_{k12} = R_{k12} + jX_{k12} = Z_1 + Z'_2 = (R_1 + R'_2) + j(X_1 + X'_2); \quad (3.102.)$$

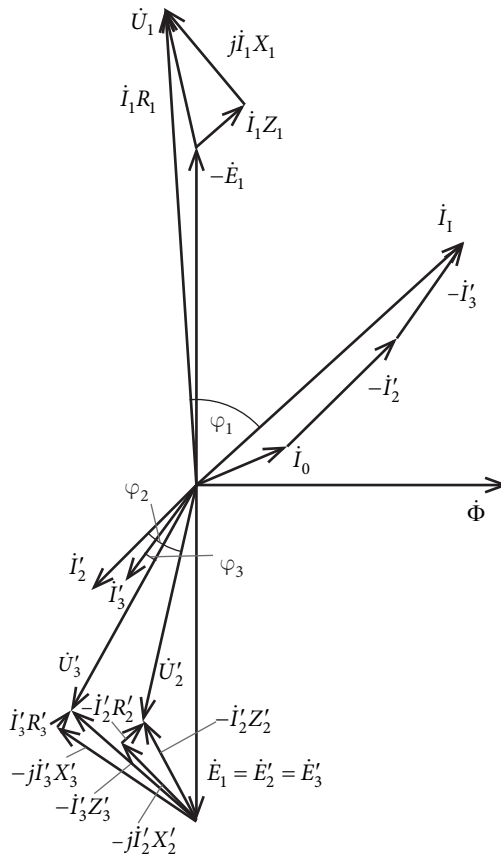
- barojot tinumu 1 ar pazeminātu spriegumu, tinumu 3 saslēdz īsi, bet tinumu 2 atstāj nenoslēgtu. No šī mēģinājuma rezultātiem aprēķina:

$$Z_{k13} = R_{k13} + jX_{k13} = Z_1 + Z'_3 = (R_1 + R'_3) + j(X_1 + X'_3); \quad (3.103.)$$

- barojot ar pazeminātu spriegumu tinumu 2, noslēdz īsi tinumu 3, bet tinumu 1 atstāj nenoslēgtu. No šī mēģinājuma rezultātiem aprēķina:

$$Z'_{k23} = R'_{k23} + jX'_{k23} = Z'_2 + Z'_3 = (R'_2 + R'_3) + j(X'_2 + X'_3). \quad (3.104.)$$

Risinot kopā vienādojumus (3.102.–3.104.), var noteikt pretestības  $Z_1$ ,  $Z'_2$  un  $Z'_3$  un to komponentes:



3.53. att. Trīstinumu transformatora vektoru diagramma.

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{k12} + Z_{k13} - Z'_{k23}}{2}; \\ Z'_2 &= \frac{Z_{k12} + Z'_{k23} - Z_{k13}}{2}; \\ Z'_3 &= \frac{Z_{k13} + Z'_{k23} - Z_{k12}}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (3.105.)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{R_{k12} + R_{k13} - R'_{k23}}{2}; \\ R'_2 &= \frac{R_{k12} + R'_{k23} - R_{k13}}{2}; \\ R'_3 &= \frac{R_{k13} + R'_{k23} - R_{k12}}{2}; \end{aligned} \right\} \quad (3.106.)$$

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{X_{k12} + X_{k13} - X'_{k23}}{2}; \\ X'_2 &= \frac{X_{k12} + X'_{k23} - X_{k13}}{2}; \\ X'_3 &= \frac{X_{k13} + X'_{k23} - X_{k12}}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.107.)$$

Jāatzīmē, ka pretestības  $X_1$ ,  $X'_2$  un  $X'_3$  nav vienādas ar patiesajām tinumu induktīvajām pretestībām. Tās atbilst tinumu induktivitātēm un savstarpējām induktivitātēm, tām var būt arī negatīvas vērtības.

Magnetizēšanas zara pretestību  $Z_m$  atrod tāpat kā divtinumu transformatoram – no tukšgaitas mēģinājuma.

Trīstinumu transformatora procentuālo sprieguma izmaiņu var aprēķināt no šādām formulām:

$$\begin{aligned} \Delta u_{12\%} &= \frac{U_{1N} - U'_2}{U_{1N}} \cdot 100 = u_{ka12} \cos \varphi_2 + u_{kr12} \sin \varphi_2 + u_{ka1(3)} \cos \varphi_3 + \\ &+ u_{kr1(3)} \sin \varphi_3 + \frac{1}{200} \left( u_{ka12} \sin \varphi_2 - u_{kr12} \cos \varphi_2 + u_{ka1(3)} \sin \varphi_3 - u_{kr1(3)} \cos \varphi_3 \right)^2; \end{aligned} \quad (3.108.)$$

$$\begin{aligned} \Delta u_{13\%} &= \frac{U_{1N} - U_3}{U_{1N}} \cdot 100 = u_{ka13} \cos \varphi_3 + u_{kr13} \sin \varphi_3 + u_{ka1(2)} \sin \varphi_2 + \\ &+ u_{kr1(2)} \sin \varphi_2 + \frac{1}{200} \left( u_{ka13} \sin \varphi_3 - u_{kr13} \cos \varphi_3 + u_{ka1(2)} \sin \varphi_2 - u_{kr1(2)} \cos \varphi_2 \right)^2. \end{aligned} \quad (3.109.)$$

Formulās (3.108.) un (3.109.):

$$\begin{aligned}
u_{ka12} &= \frac{I_2 R_{k12}}{U_{1N}} \cdot 100; & u_{kr12} &= \frac{I_2 X_{k12}}{U_{1N}} \cdot 100; \\
u_{ka1(3)} &= \frac{I_3 R_1}{U_{1N}} \cdot 100; & u_{kr1(3)} &= \frac{I_3 X_1}{U_{1N}} \cdot 100; \\
u_{ka13} &= \frac{I_3 R_{k13}}{U_{1N}} \cdot 100; & u_{kr13} &= \frac{I_3 X_{k13}}{U_{1N}} \cdot 100; \\
u_{ka1(2)} &= \frac{I_2 R_1}{U_{1N}} \cdot 100; & u_{kr1(2)} &= \frac{I_2 X_1}{U_{1N}} \cdot 100.
\end{aligned}$$

Vienādojumi (3.108.) un (3.109.) apstiprina, ka sprieguma izmaiņa katram no sekundārajiem tinumiem ir atkarīga ne tikai no strāvas savā tinumā, bet arī no strāvas otrajā sekundārajā tinumā.

Trīstinumu transformatora lietderības koeficientu aprēķina pēc formulas:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3}{S_2 \cos \varphi_2 + S_3 \cos \varphi_3 + P_0 + I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3}. \quad (3.110.)$$

Trīstinumu transformatora pilnajām jaudām ir spēkā šāda sakarība:

$$S_1 \leq S_2 + S_3 \quad (3.111.)$$

jo jaudas koeficienti  $\cos \varphi_2$  un  $\cos \varphi_3$  vispārīgā gadījumā ir dažādi, strāvas  $I'_2$  un  $I'_3$  ir nobīdītas fāzē, tāpēc  $I_1 \leq I'_2 + I'_3$ .

Par trīstinumu transformatora nominālo jaudu pieņem lielāko no tinumu jaudām (parasti primārā tinuma jaudu). Ja AS tinuma jaudu pieņem par 100 %, tad VS un ZS tinumus izgatavo ar jaudām 100 % un 67 % dažādās kombinācijās.

Parasti trīsfāžu trīstinumu transformatorus izgatavo ar tinumu slēgumiem  $Y_0/Y_0/\Delta-0-11$  un  $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$ .

## 3.7. TRANSFORMATORU NESIMETRISKIE DARBA REŽĪMI

### 3.7.1. Vispārīgi norādījumi

Trīsfāžu transformatoru nesimetriskos režīmus rada vienfāzes lieljaudas patērētāji, nesimetriski primārie spriegumi, vienfāzes un divfāžu īsslēgumi elektriskajos tīklos, kā arī pārrāvumi atsevišķā fāzē. Nesimetriska slodze izraisa transformatora sekundārā sprieguma nesimetriju, un šis apstāklis var nelabvēlīgi ietekmēt transformatora un tam pieslēgto patērētāju darbību. Tā, piemēram, barojot maiņstrāvas trīsfāžu dzinējus ar nesimetrisku spriegumu, krītas to pieļaujamā jauda. Kvēlspuldzēm, palielinot barošanas spriegumu, strauji krītas kalpošanas laiks, bet pazeminot – gaismas stiprums. Pašam transformatoram nesimetriska slodze var izraisīt atsevišķu tinumu pārslodzi, fāzes sprieguma palielināšanos un magnētva da piesātināšanos. Transformatoru nesimetrisko režīmu analīzei ir arī praktiska nozīme, jo tā ļauj noteikt pieļaujamo nesimetrijas pakāpi, kad tiek nodrošinātas patērētāju un paša transformatora darba spējas.

Transformatoru nesimetrisko režīmu izpētē plaši izmanto simetrisko komponentu metodi. Saskaņā ar šo metodi katru nesimetriskās sistēmas vektoru var izteikt ar simetrisko sistēmu komponentu summu:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0}. \end{aligned} \right\} \quad (3.112.)$$

Pieņemot A fāzi par izejas fāzi, simetrisko komponentu sistēmas var izteikt šādi: tiešai secībai –  $\dot{I}_{a1}$ ;  $\dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1} e^{-j2\pi/3} = a^2 \dot{I}_{a1}$ ;  $\dot{I}_{c1} = \dot{I}_{a1} e^{-j4\pi/3} = a \dot{I}_{a1}$ ; pretējai secībai –  $\dot{I}_{a2}$ ;  $\dot{I}_{b2} = \dot{I}_{a2} e^{-j4\pi/3} = a \dot{I}_{a2}$ ;  $\dot{I}_{c2} = \dot{I}_{a2} e^{-j2\pi/3} = a^2 \dot{I}_{a2}$ ; nullsecībai –  $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ .

Šeit  $a$  ir vienības vektors, tā sauktais fāzes operators, kura reizinājums ar jebkuru vektoru rezultātā dod tāda paša garuma vektoru, kas pagriezts par  $120^\circ$  jeb  $2\pi/3$  radiāniem vektoru griešanās virzienā (t. i., pretēji pulksteņa rādītāju kustības virzienam).

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j2\pi/3}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j4\pi/3},$$

tātad  $a^3 = 1$  un  $a^2 + a + 1 = 0$  (līdzsvarota sistēma). Rezultātā vienādojumu sistēma (3.112.) ir uzrakstāma šādā veidā:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{bmatrix} \quad (3.113.)$$

jeb  $\dot{I} = A\dot{I}_S$ ,

kur  $\dot{I}$  – nesimetrisko strāvu vektoru matrica,

$\dot{I}_S$  – simetrisko strāvu vektoru matrica,

$A$  – pārveidošanas matrica.

Kā redzams, ja ir noteiktas simetriskās komponentes vienai fāzei, kas pieņemta par



izejas fāzi, tad bez sevišķām grūtībām var atrast divu pārējo fāžu komponentes un pēc tam arī nesimetrisko fāžu strāvu un spriegumu pilnās vērtības (3.113.).

Dažkārt aprēķinu praksē nepieciešams noteikt simetriskās komponentes, ja zināmas nesimetriskās komponentes. Tādos gadījumos lieto vienādojumu:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (3.114.)$$

jeb  $\dot{I}_S = A^{-1}\dot{I}$ , kur  $A^{-1}$  ir apgriezta pārveidošanas matrica.

No vienādojumiem (3.113.) un (3.114.), zinot simetrisko komponentu vektorus, var atrast nesimetriskās sistēmas rezultējošos vektorus.

Analoģiski var iegūt simetrisko komponentu izteiksmes nesimetriskai trīsfāžu spriegumu sistēmai:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} \quad (3.115.)$$

un

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (3.116.)$$

Simetrisko komponentu metodes priekšrocība ir tāda, ka tā ļauj operēt ar katru simetrisko komponenti neatkarīgi, izmantojot matemātisko un grafisko analīzi. Tomēr jāatzīmē, ka šī metode balstīta uz superpozīcijas principu, kuru korekti var izmantot tikai lineārās sistēmās. Šis apstāklis noved pie pieņēmuma, ka transformatora magnētvars nav piesātināts, t. i.,  $Z_m = const$ , vai  $I_0 = 0$ , t. i.,  $Z_m = \infty$ . Turpmāk šajā apakšnodaļā bez īpašām atrunām un apzīmējumiem uzskatīsim, ka transformatoru sekundārie tinumi ir reducēti uz primārā tinuma vijumu skaitu.

Jāatzīmē, ka transformatorā kā statiskā ierīcē tiešās un pretējās secības pretestības ir vienādas. Tiešām, ja transformatoram, kas darbojas ar simetrisku slodzi, apmaina vietām divus tinumu spailēm pievienotos vadus, piemēram, B un C AS pusē un b un c ZS pusē, tad patērētāju un paša transformatora darba režīms nemainās. Bet strāvas vektoru fāžu secība šajā gadījumā ir mainījusies uz pretējo, t. i., atbilst pretējās secības strāvām, tas nozīmē, ka pretējās secības strāvas no sekundārā tinuma transformējas primārajā tinumā, tāpat kā tiešās secības strāvas, un tām ir analoģiska ekvivalentā shēma.

Tādējādi iepriekš aplūkotās shēmas (sk. 3.31., 3.32. att.) ir spēkā gan tiešās, gan pretējās secības strāvām. Transformatora pretestība attiecībā pret šīm strāvām ir maza un vienāda ar išslēguma pretestību  $Z_k$ . Šis apstāklis ļauj vienkāršot analīzi, jo nav nepieciešams atsevišķi apskatīt tiešās un pretējās secības komponentes, bet gan to ģeometrisku summu, t. i.,

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0}; \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} = \dot{I}'_b + \dot{I}_{b0}; \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} = \dot{I}'_c + \dot{I}_{c0}, \end{aligned} \right\} \quad (3.117.)$$

kur  $\dot{I}'_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}$ ;  $\dot{I}'_b = \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2}$ ;  $\dot{I}'_c = \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2}$ .

Pretestības nullsecības strāvām atšķiras no pretestībām tiešās un pretējās secības strāvām gan pēc lieluma, gan pēc rakstura, jo nullsecības strāvas visās fāzēs ir vienādas un sakrīt fāzē. To summa  $\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{c0} \neq 0$ .

Kā tiks parādīts turpmāk, ekvivalentās shēmas un pretestības nullsecības strāvām ir atkarīgas gan no tinumu savienojumu shēmas, gan no transformatora magnētvasda konstrukcijas.

### 3.7.2. Ekvivalentās shēmas un pretestības nullsecības strāvām

Trīsfāžu transformatora tinumā, kas slēgts zvaigznē, nullsecības strāvas var plūst tikai gadījumā, ja ir nullvads (3.54. att. a), jo strāvas  $I_{a0}$ ,  $I_{b0}$  un  $I_{c0}$  ir vienādas pēc lieluma un sakrīt fāzē. Katrā laika momentā visās fāzēs šīs strāvas vērstas vienā virzienā, tāpēc nullvadā plūst strāva

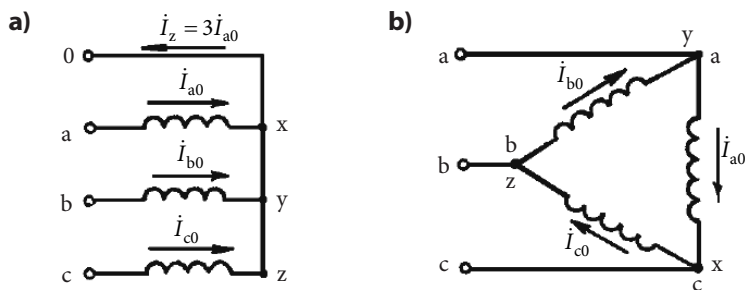
$$\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{c0} = 3\dot{I}_{a0}. \quad (3.118.)$$

Nullvada lomu var pildīt arī zeme, ja transformatora tinuma nullpunkts ir iezemēts.

Transformatora tinumos, ja tie slēgti trīsstūrī, nullsecības strāvas var plūst noslēgtajā kontūrā. Tomēr līnijas strāvas, kas ir fāžu strāvu starpība, nullsecības komponentes nesatur. Tāpēc tinumā, kas slēgts trīsstūrī, nullsecības strāvas var rasties, tikai inducējoties no otra tinuma (3.54. att. b)

Nullsecības strāvas visās fāzēs rada nullsecības magnētiskās plūsmas  $\Phi_0$ , kas sakrīt fāzē. Šajā ziņā tās ir analogiskas trīsfāžu transformatoru plūsmas trešajām harmoniskām, kas rodas magnētvsadam piesātinoties. Atšķirība ir tikai tāda, ka pēdējās mainās ar trīskāršu frekvenci, bet nullsecības plūsmas mainās ar pamatfrekvenci.

Apvalka tipa un grupas transformatoros plūsmas  $\Phi_0$  noslēdzas galvenokārt pa tērauda serdi, kur ir maza magnētiskā pretestība. Tāpēc jau samērā nelielas nullsecības strāvas



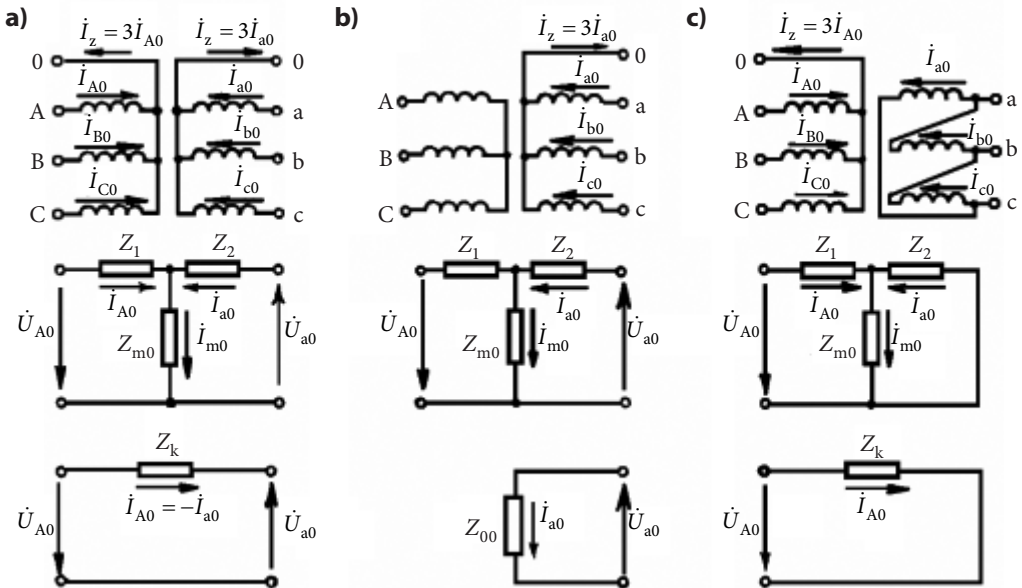
3.54. att. Nullsecības strāvas tinumos, kas slēgti zvaigznē ar nullvadu (a) un trīsstūrī (b).

izraisa lielas plūsmas. Tiešām, ja nullsecības strāva ir vienāda ar tukšgaitas strāvu, magnētiskā plūsma  $\Phi_0$  jau ir tāda pati kā normālā darba režīmā.

Trīsstieņu transformatorā nullsecības magnētiskās plūsmas katrā laika momentā visos stieņos vērstas vienā virzienā, tāpēc var noslēgties tikai caur transformatora eļļu un tvertnes elementiem. Šeit magnētiskā pretestība ir ievērojama un magnētiskās plūsmas  $\Phi_0$  būs mazākas. Tās gan tvertnes sienīnās, gan citos elementos izraisa virpuļstrāvas un silšanu.

Nullsecības magnētiskās plūsmas transformatora primārajā un sekundārajā tinumā inducē EDS, kuriem atbilst attiecīgās pašindukcijas un savstarpējās indukcijas pretestības. Šīs pretestības veido tādu pašu T veida ekvivalento shēmu, kā tiešās secības strāvām (3.55. att. a). Šīs shēmas atsevišķu elementu parametri ir atkarīgi no magnētivada un tinumu izveidojuma, bet nav atkarīgi no tinumu savienojumu shēmas. No tās ir atkarīga shēmas konfigurācija attiecībā pret izejas spailēm un nullsecības pretestībām kopumā.

Transformatorā ar tinumu slēgumu shēmu  $Y_0/Y_0$ , nullsecības strāvas var eksistēt gan pašos tinumos, gan ārējās ķēdēs. Tāpēc šajā gadījumā nullsecības ekvivalentā shēma (3.55. att. a) neatšķiras no tiešās secības ekvivalentās shēmas. Gadījumā, ja transformatora tinumi savienoti pēc shēmas  $Y/Y_0$ , nullsecības strāvas tinumā bez nullvada plūst nevar. No šī tinuma puses nullsecības strāvām shēma ir pārtraukta (3.55. att. b) un uz tā spailēm eksistē fāzes nullsecības spriegums  $U_{A0}$ , kuru inducē nullsecības strāvas, kas plūst  $Y_0$  slēgtajā tinumā. Transformatora tinumos, kas slēgti  $Y_0/\Delta$ , nullsecības strāvas arī var plūst abos tinumos. Tomēr trīsstūrī slēgtais tinums attiecībā pret nullsecības strāvām ir saslēgts īsi, tāpēc nullsecības strāvas ārējā ķēdē eksistēt nevar. Šajā sakarā ekvivalentās shēmas (3.55. att. c) spaiļes no trīsstūrī savienotā tinuma puses saslēgtas īsi.



3.55. att. Transformatora ekvivalentās shēmas nullsecības strāvām dažādām tinumu savienojumu shēmām: a –  $Y_0/Y_0$ ; b –  $Y/Y_0$ ; c –  $Y_0/\Delta$ .

3.55. attēlā parādītās ekvivalentās shēmas satur pretestības:

$$Z_1 = R_1 + jX_1; \quad Z_2 = R_2 + jX_2,$$

kuru vērtības praktiski neatšķiras no tām vērtībām, kādas ir šīm pretestībām tiešās secības shēmās.

Apvalka tipa un grupas transformatoru ekvivalento shēmu magnetizēšanas zara pretestība  $Z_{m0}$  praktiski ir tāda pati, kā attiecīgā pretestība  $Z_m$  tiešās secības strāvām, jo abos gadījumos plūsmas noslēdzas pa noslēgto magnēt vadu. Ja nullsecības strāvas plūst abos tinumos, magnetizēšanas strāva veido visai nelielu daļu no pilnās nullsecības strāvas un to var neņemt vērā. Tad iegūstam vienkāršotās ekvivalentās shēmas, kas parādītas 3.55. attēla a un c apakšējā daļā. Turklāt  $Z_k = Z_1 + Z_2$ .

Trīsstieņu transformatoru ekvivalentajā shēmā pretestība  $Z_{m0}$  ir desmitiem un simtiem reižu mazāka par  $Z_m$ , jo nullsecības plūsma noslēdzas gaisā. Parasti  $Z_{m0} \approx (7-15)Z_k$  un bez lielām kļūdām arī šajā gadījumā var izmantot vienkāršotās shēmas (3.54. att. a, c). EDS, ko inducē nullsecības plūsma, ir atkarīgs no pretestības  $Z_{m0}$ , t. i.,

$$\dot{E}_{a0} = -Z_{m0}\dot{I}_{m0}. \quad (3.119.)$$

Nullsecības pretestību  $Z_0$ , ko trīsfāžu transformators uzrāda nullsecības strāvām kopumā, var noteikt gan no viena, gan no otra tinuma puses. Piemēram, 3.55. attēlā a shēmai ir divas  $Z_0$  vērtības. Šīs vērtības, ja sekundārais tinums ir reducēts uz primāro, praktiski ir vienādas.

Apvalka tipa transformatoram un transformatoru trīsfāžu grupai  $Z_{m0} \gg Z_1 \approx Z_2$ , tāpēc

$$Z_0 \approx Z_1 + Z_2 = Z_k. \quad (3.120.)$$

Arī stieņu tipa transformatoros ar pietiekamu precizitāti var izmantot izteiksmi (3.120.).

Pretestības  $Z_0$  noteikšana 3.55. attēla b shēmai no zvaigznē slēgtā tinuma puses zaudē jēgu, jo  $I_{A0} = 0$ , bet no otras tinuma puses šī pretestība ir

$$Z_0 = Z_2 + Z_{m0}. \quad (3.121.)$$

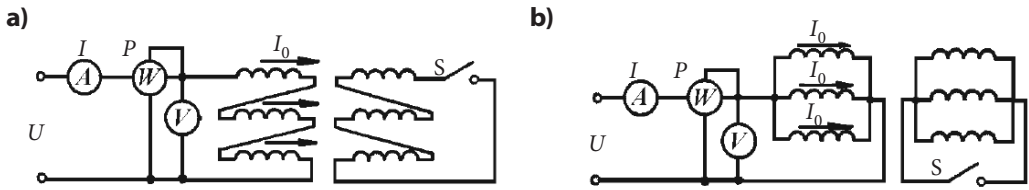
Apvalka tipa un trīsfāžu grupas transformatoros nullsecības pretestība  $Z_0 \approx Z_m$  un tā ir liela salīdzinājumā ar iepriekšējo gadījumu un vienāda ar tukšgaitas pretestību tiešās secības strāvām. Stieņu tipa transformatoriem nullsecības pretestība ir gandrīz tāda pati kā transformatora īsslēguma pretestība, t. i.,  $Z_0 \approx Z_k$ .

Transformatoros ar slēgumu  $Y/\Delta$  sekundārais tinums nullsecības strāvām ir slēgts īsi un

$$Z_0 = Z_1 + \frac{Z_2 Z_{m0}}{Z_2 + Z_{m0}} \quad (3.122.)$$

vai

$$Z_0 \approx Z_1 + Z_2 = Z_k. \quad (3.123.)$$



3.56. att. Shēmas nullsecības pretestību eksperimentālai noteikšanai: a – slēdzot tinumus virknē; b – slēdzot tinumus paralēli.

Tādējādi atkarībā no transformatora serdes konstrukcijas un tinumu savienojumu shēmas nullsecības pretestība  $Z_0$  var mainīties no  $Z_k$  līdz  $Z_m$ .

Nosakot pretestību  $Z_0$  eksperimentāli, transformatora tinumos jārada strāvas

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_0.$$

Šim nolūkam tinumus saslēdz virknē (3.56. att. a) vai paralēli (3.56. att. b). Tinumu slēgšanai virknē dodama priekšroka, jo šeit nullsecības strāvu vienādība izpildās visos gadījumos. Slēdzis S ir saslēgts, ja sekundārajā tinumā var plūst nullsecības strāvas (tinumi savienoti trīsstūrī vai zvaigznē) un atslēgts, ja sekundārajā tinumā nevar eksistēt nullsecības strāvas, t. i., ja tinums slēgts zvaigznē bez nullvada.

Ja 3.56. attēla shēmās izmēra spriegumu  $U$ , jaudu  $P$  un strāvu  $I$ , tad nullsecības parametrus var aprēķināt no šādām formulām:

a shēmai

$$Z_0 = \frac{U}{3I}; \quad R_0 = \frac{P}{3I^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, \quad (3.124.)$$

b shēmai

$$Z_0 = \frac{3U}{I}; \quad R_0 = \frac{3P}{I^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (3.125.)$$

Spēka transformatoriem parasti  $R_0 \ll X_0$ , tāpēc var pieņemt, ka  $Z_0 \approx X_0$ .

### 3.7.3. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu Y/Δ-11

Transformatoru tinumu slēgumu Y/Δ-11 elektriskajos tīklos lieto gadījumos, kad nav nepieciešams izvadīt neitrāli. Parasti to izmanto pazeminošos transformatoros.

3.57. attēlā dotajā shēmā nesimetriskā slodze parādīta ar pretestībām  $Z_a, Z_b, Z_c$ . Šajā shēmā primārajā tinumā, kas slēgts zvaigznē bez nullvada, nullsecības strāvas nevar plūst. Tāpat nav nullsecības strāvu arī sekundārā tinuma līnijas vados, jo

$$\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c = 0. \quad (3.126.)$$

Sekundārajā tinumā fāzes spriegums ir vienāds ar slodzes līnijas spriegumu. Pēdējais nesatur nullsecības komponenti, neraugoties uz to, ka fāzes spriegums to satur. Jāatceras, ka līnijas vados nav nullsecības strāvas. Tāpēc EDS no galvenās plūsmas nesatur null-

secības komponentes. Tādā gadījumā no primārā sprieguma vienādojumiem, piemēram,  $\dot{U}_a = -\dot{E}_A + \dot{I}_A Z_1$ , izriet, ka arī primārie fāžu spriegumi nesatur nullsecības komponentes.

Ņemot vērā, ka transformatora pretestība tiešās un pretējās secības strāvām ir vienādas un nav jāapskata atsevišķi, var rakstīt:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_A Z_k &= -\dot{U}_a; \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B Z_k &= -\dot{U}_b; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C Z_k &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \right\} \quad (3.127.)$$

Vienādojumi (3.127.) ir analogiski vienfāzes transformatoru vienādojumiem, kas darbojas neatkarīgi.

Slodzes spriegumiem (sk. 3.57. att.) varam uzrakstīt šādus vienādojumus:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= (\dot{I}_a - \dot{I}_c) Z_a - (\dot{I}_b - \dot{I}_a) Z_b; \\ \dot{U}_b &= (\dot{I}_b - \dot{I}_a) Z_b - (\dot{I}_c - \dot{I}_b) Z_c; \\ \dot{U}_c &= (\dot{I}_c - \dot{I}_b) Z_c - (\dot{I}_a - \dot{I}_c) Z_a. \end{aligned} \right\} \quad (3.128.)$$

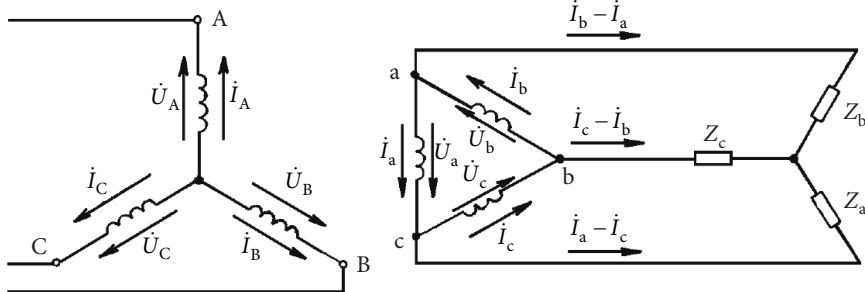
Risinot kopā vienādojumus (3.126.–3.128.), iegūstam:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A (Z_k + Z_b + 2Z_c) + \dot{U}_B (Z_b - Z_a)}{(Z_k + 2Z_a + Z_b)(Z_k + Z_b + 2Z_c) + (Z_b - Z_c)(Z_a - Z_b)}; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B (Z_k + 2Z_a + Z_c) + \dot{U}_C (Z_c - Z_b)}{(Z_k + 2Z_b + Z_c)(Z_k + 2Z_a + Z_c) + (Z_c - Z_a)(Z_b - Z_c)}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C (Z_k + Z_a + 2Z_b) + \dot{U}_A (Z_a - Z_c)}{(Z_k + 2Z_c + Z_a)(Z_k + Z_a + 2Z_b) + (Z_a - Z_b)(Z_c - Z_a)}. \end{aligned} \right\} \quad (3.129.)$$

Par uzdotiem šajā gadījumā tiek uzskatīti primārie līnijas spriegumi

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_B - \dot{U}_A; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_C - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_A - \dot{U}_C.$$

No šīm izteiksmēm var aprēķināt fāzes spriegumus



3.57. att. Transformatora tinumu savienojumu shēma Y/Δ-11.

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}'_A + \dot{U}_{A0}; \\ \dot{U}_B &= \dot{U}'_B + \dot{U}_{B0}; \\ \dot{U}_C &= \dot{U}'_C + \dot{U}_{C0}, \end{aligned} \right\} \quad (3.130.)$$

$$\text{kur } \dot{U}'_A = \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BA}}{3}; \quad \dot{U}'_B = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{BC}}{3}; \quad \dot{U}'_C = \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{CA}}{3};$$

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C).$$

Šajā gadījumā  $\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = 0$ , tāpēc fāžu spriegumi satur tikai tiešās un pretējās komponentes:

$$\dot{U}_A = \dot{U}'_A; \quad \dot{U}_B = \dot{U}'_B; \quad \dot{U}_C = \dot{U}'_C. \quad (3.131.)$$

No izteiksmes (3.131.) redzams, ka fāžu spriegumu vektoru diagrammu veido vektori, kas iziet no trīsstūra smaguma centra, ko veido līnijas spriegumi.

Ja uzdotas slodzes pretestības  $Z_a, Z_b, Z_c$ , un līnijas spriegumi  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ , primāros fāzes spriegumus atrod no formulām (3.131.), primārās fāžu strāvas – no (3.129.), sekundāros reducētos fāžu spriegumus – no (3.127.), bet sekundārās reducētās fāžu strāvas nosaka kā

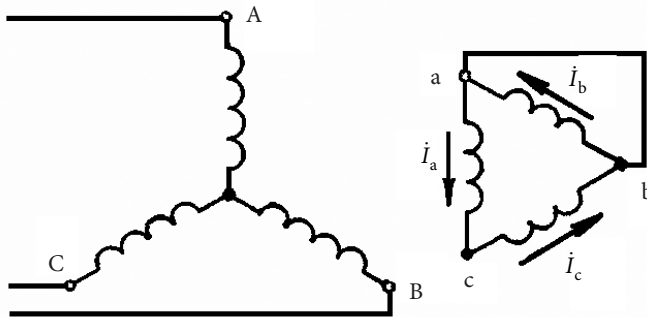
$$\dot{I}_a = -\dot{I}_A; \quad \dot{I}_b = -\dot{I}_B; \quad \dot{I}_c = -\dot{I}_C. \quad (3.132.)$$

Apskatīsim galējo nesimetriskā režīma gadījumu – vienfāzes išslēgumu sekundārajā tinumā (3.58. att.). Visas strāvas un spriegumus var noteikt no iepriekš iegūtajām izteiksmēm, ievietojot tajās  $Z_b = Z_c = 0, Z_a = \infty$ . Tā kā  $U_b = 0$ , no (3.127.) iegūstam:

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_k}. \quad (3.133.)$$

No 3.58. attēla shēmas redzams, ka  $I_a = I_c$ . Tad, ņemot vērā (3.132.) un to, ka shēmā bez nullsecības strāvām

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0, \quad (3.134.)$$



3.58. att. Vienfāzes išslēguma shēma tinumu slēgumam Y/Δ-11.

iegūstam:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_C = -\frac{\dot{I}_B}{2} = -\frac{\dot{U}_B}{2Z_k}. \quad (3.135.)$$

3.59. attēlā parādīta vektoru diagramma, kas konstruēta saskaņā ar vienādojumiem (3.127., 3.133., 3.135), pieņemot, ka  $Z_k = jX_k$  un primārie līnijas spriegumi ir simetriski.

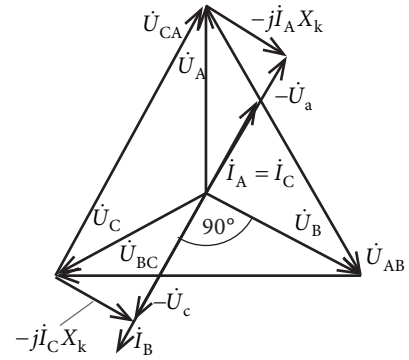
Apskatot atsevišķu gadījumu, kad slodze ir simetriska, bet nesimetriska ir primāro spriegumu sistēma, vienādojumos (3.129.) un (3.127.) jāievieto  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{sl}$ .

Tad iegūsim:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_e}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_e}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_e};$$

$$-\dot{U}_a = n\dot{U}_A; \quad -\dot{U}_b = n\dot{U}_B; \quad -\dot{U}_c = n\dot{U}_C,$$

$$\text{kur } Z_e = Z_k + 3Z_{sl}; \quad n = 3Z_{sl}/Z_e.$$



3.59. att. Vienfāzes īsslēguma vektoru diagramma tinumu slēgumam Y/Δ-11.

### 3.7.4. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu Δ/Y<sub>0</sub>-11

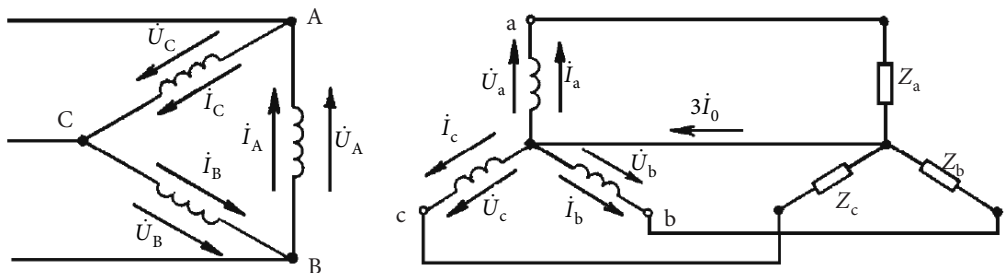
Transformatorus ar tinumu savienojumu shēmu Δ/Y<sub>0</sub> (3.60. att.) izmanto elektroenerģijas pārvades sistēmās gan sprieguma paaugstināšanai, gan pazemināšanai.

Saskaitot spriegumu vienādojumus tiešās un apgrieztās secības komponentēm, fāzei A varam rakstīt:

$$\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} - (\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2})Z_k = -(\dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2}). \quad (3.136.)$$

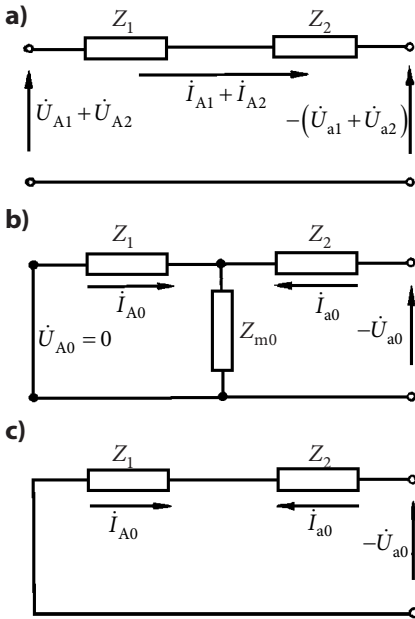
Analoģiski var uzrakstīt vienādojumus pārējām divām fāzēm.

Apskatāmajā shēmā sekundārajos tinumos plūdis nullsecības strāvas, jo tās var noslēgties caur nullvadu. Nullsecības strāvu radītā magnētiskā plūsma inducēs nullsecības EDS fāžu tinumos. Primāros tinumos, kas slēgti trīsstūrī, cirkulēs nullsecības strāvas. Tomēr līnijas vados, kā tika noskaidrots iepriekš, nullsecības strāvas neparādās. Tāpēc



3.60. att. Transformatora tinumu savienojumu shēma Δ/Y<sub>0</sub>-11.





3.61. att. Transformatora ekvivalentās shēmas tinumu slēgumam  $\Delta/Y_0$ :  
 a – tiešās un pretējās secības strāvām; b, c – nullsecības strāvām.

primārais tinums attiecībā pret nullsecības strāvām ir slēgts īsi.

Transformatora ekvivalentās shēmas dažādas secības strāvām tinumu slēgumam  $\Delta/Y_0$  parādītas 3.61. attēlā. Salīdzinot 3.61. attēla b, c ekvivalentās shēmas un nullsecības pretestības ar iepriekš aplūkotajām (sk. 3.55. att. c) tinumu slēgumam  $Y_0/\Delta$ , var secināt, ka būtībā tās ir analogiskas. Atšķirība ir tikai tā, ka primārajā vai sekundārajā pusē ir trīsstūrī slēgtais tinums, t. i., attiecībā pret nullsecības strāvām īsi slēgtais tinums.

No ekvivalentajām shēmām var rakstīt:

$$-\dot{I}_{A0}Z_1 + \dot{I}_{a0}Z_2 = -\dot{U}_{a0}; \quad (3.137.)$$

$$\dot{I}_{a0} = -\dot{I}_{A0} \left( 1 - \frac{Z_1}{Z_{m0}} \right). \quad (3.138.)$$

Ievietojot (3.138.) formulā (3.137.), iegūstam nullsecības sprieguma vienādojumu:

$$-\dot{I}_{A0} \left( Z_1 + Z_2 - \frac{Z_1 Z_2}{Z_{m0}} \right) = -\dot{U}_{a0}. \quad (3.139.)$$

Stieņu tipa transformatoros  $Z_1 Z_2 / Z_{m0}$  ir ne vairāk par 6–7 % no  $Z_1 + Z_2$ , bet trīsfāžu transformatoru grupai vēl mazāk. Tāpēc, neņemot vērā  $Z_1 Z_2 / Z_{m0}$ , aptuveni var rakstīt:

$$-\dot{I}_{A0} Z_k = -\dot{U}_{a0}. \quad (3.140.)$$

Analoģiski var iegūt nullsecības spriegumu vienādojumus citām fāzēm. Vienādojumam (3.140.) atbilst 3.61. attēlā c parādītā vienkāršotā ekvivalentā shēma.

Saskaitot vienādojumus (3.136.) un (3.140.) un analoģiskus vienādojumus B un C fāzei, iegūstam:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - I_A Z_k &= -\dot{U}_a; \\ \dot{U}_B - I_B Z_k &= -\dot{U}_b; \\ \dot{U}_C - I_C Z_k &= -\dot{U}_c. \end{aligned} \right\} \quad (3.141.)$$

Slodzes spriegumu vienādojumi ir:

$$\dot{U}_a = \dot{I}_a Z_a; \quad \dot{U}_b = \dot{I}_b Z_b; \quad \dot{U}_c = \dot{I}_c Z_c. \quad (3.142.)$$

Tā kā tiešās, pretējās un nullsecības primārā un sekundārā reducētā strāva ir vienādas un pretēji vērstas, fāžu strāvām ir spēkā vienādojumi (3.132.). Ievērojot minēto apstākli un (3.141.), strāvas  $I_A, I_B, I_C$  var noteikt pēc formulām:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_k + Z_a}; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{Z_k + Z_b}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{Z_k + Z_c}. \end{aligned} \right\} \quad (3.143.)$$

Fāžu primārie spriegumi  $U_A, U_B, U_C$  ir vienādi ar līnijas spriegumiem. Fāžu sekundārās strāvas nosaka izteiksmes (3.132.), bet fāžu sekundāros spriegumus aprēķina pēc formulām:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= -\dot{U}_A \frac{Z_a}{Z_k + Z_a}; \\ \dot{U}_b &= -\dot{U}_B \frac{Z_b}{Z_k + Z_b}; \\ \dot{U}_c &= -\dot{U}_C \frac{Z_c}{Z_k + Z_c}. \end{aligned} \right\} \quad (3.144.)$$

Normālos darba apstākļos slodzes pretestības  $Z_a, Z_b, Z_c$  ir daudzkārt lielākas par transformatora īsslēguma pretestību  $Z_k$ . Tas izriet no (3.144.), sekundāro spriegumu nesimetriju praktiski nosaka tikai primāro spriegumu nesimetrija.

Apskatīsim galējo nesimetrisko režīmu – vienfāzes īsslēgumu tukšgaitā. Visas strāvas un spriegumus šajā gadījumā var noteikt no iepriekš iegūtajām izteiksmēm, ja tajās ievieto  $Z_a=0, Z_b=Z_c=\infty$ . Tā no (3.143.) un (3.132.) iegūstam:

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_A}{Z_k}; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_b = \dot{I}_C = 0. \quad (3.145.)$$

Saskaņā ar (3.144.)

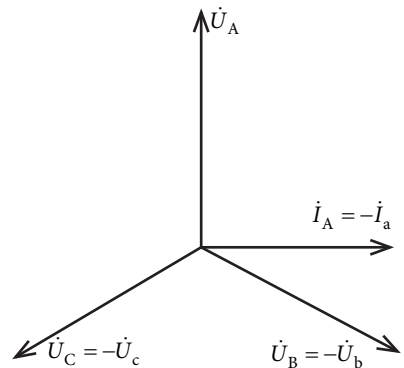
$$\dot{U}_a = 0; \quad \dot{U}_b = -\dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = -\dot{U}_C. \quad (3.146.)$$

3.62. attēlā parādīta vektoru diagramma vienfāzes īsslēguma režīmam, ja  $Z_k = jX_k$  un primāro līnijas spriegumu sistēma ir simetriska.

Apskatot gadījumu, kad slodze ir simetriska, bet primārie spriegumi nav simetriski, formulās (3.144.) jāievieto  $Z_a=Z_b=Z_c=Z_{sl}$ . Tad

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{Z_{e1}}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_{e1}}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_{e1}}; \\ -\dot{U}_a &= n_1 \dot{U}_A; \quad -\dot{U}_b = n_1 \dot{U}_B; \quad -\dot{U}_c = n_1 \dot{U}_C, \end{aligned}$$

kur  $Z_{e1} = Z_k + Z_{sl}$ ;  $n_1 = Z_{sl} / Z_{e1}$ .



3.62. att. Vienfāzes īsslēguma vektoru diagramma tinumu slēgumam  $\Delta / Y_0 - 11$ .

### 3.7.5. Nesimetriski darba režīmi transformatoros ar tinumu slēgumu Y/Y<sub>0</sub>-0

Transformatorus ar tinumu slēgumu Y/Y<sub>0</sub> izmanto sadales elektriskajos tīklos, kuros ir spēka un apgaismošanas slodze, kam nepieciešami dažādi spriegumi. Sekundārajā tinumā lietotais nullvads ļauj iegūt divus spriegumus: fāzes un līnijas.

Tinumu savienojumu shēmā Y/Y<sub>0</sub> (3.63. att.), tāpat kā iepriekš aplūkotajā shēmā, sekundārajā pusē plūst nullsecības strāvas, kas rada attiecīgās magnētiskās plūsmas. Šīs plūsmas transformatora tinumos inducē nullsecības EDS. Atšķirībā no iepriekšējās shēmas (Δ/Y<sub>0</sub>) šajā gadījumā primārajā tinumā nullsecības strāvas noslēgties nevar. Ekvivalentās shēmas, kas atbilst šim gadījumam, parādītas 3.55. attēlā b.

Vispārīgā gadījumā sekundārā tinuma strāvas saskaņā ar izteiksmi (3.117.) var izteikt kā visu secību strāvu summu. Šo strāvu saistību ar primārajām strāvām nosaka vienādojumi (1.132.).

Transformatora spriegumu vienādojums (3.136.) tiešās un pretējās secības komponentēm visām tinumu savienojumu shēmām ir vienāds.

Nullsecības spriegumu vienādojums saskaņā ar ekvivalento shēmu ir šāds:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{I}_{a0} Z_{m0} = -\dot{I}_{a0} Z_2 - \dot{U}_{a0}, \quad (3.147.)$$

t. i., primārā tinuma nullsecības spriegums ir pretēji vērst un vienāds ar EDS, ko šajā tinumā inducē nullsecības magnētiskā plūsma.

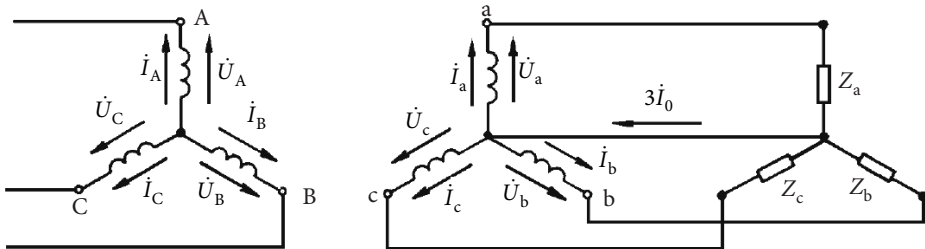
Saskaitot vienādojumus (3.136.) un (3.147.), atrodam:

$$\dot{U}_A - \dot{I}_A Z_k = -\dot{I}_{a0} Z_2 - \dot{U}_a = -\dot{I}_{a0} Z_2 - \dot{I}_a Z_1. \quad (3.148.)$$

Ievietojot izteiksmē (3.148.)  $\dot{I}_a = \dot{I}'_a + \dot{I}_{a0} = -\dot{I}_A + \dot{I}_{a0}$  un atmetot indeksu a nullsecības strāvai, varam iegūt spriegumu vienādojumu fāzei A un analogiski arī fāzei B un C:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A - \dot{I}_A (Z_k + Z_a) + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_a) &= 0; \\ \dot{U}_B - \dot{I}_B (Z_k + Z_b) + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_b) &= 0; \\ \dot{U}_C - \dot{I}_C (Z_k + Z_c) + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_c) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.149.)$$

Izdalot iegūtos vienādojumus ar primāro strāvu koeficientiem un ņemot vērā izteiksmes (3.131.), kā arī sistēmas (3.149.) pirmo vienādojumu, iegūstam primārā sprieguma nullsecības komponentes:



3.63. att. Transformatora tinumu savienojumu shēma Y/Y<sub>0</sub>-0.

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = -\frac{\dot{U}'_A Y_A + \dot{U}'_B Y_B + \dot{U}'_C Y_C}{(1-Y_0)(Y_A + Y_B + Y_C) + 3Y_0}, \quad (3.150.)$$

$$\text{kur } Y_A = \frac{1}{Z_k + Z_a}; \quad Y_B = \frac{1}{Z_k + Z_b}; \quad Y_C = \frac{1}{Z_k + Z_c};$$

$$Y_0 = \frac{1}{Z_{m0}}; \quad Z_k = Z_1 + Z_2.$$

Spriegumus  $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$  nosaka no formulām (3.131.). Sekundārās strāvas nullsecības komponenti atrod no izteiksmēm (3.147.) un (3.150.):

$$\dot{I}_0 = \dot{U}_{A0} Y_0. \quad (3.151.)$$

Primāro tinumu strāvas var noteikt no (1.149.), ņemot vērā (1.131.) un (1.151.):

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_a)}{Z_k + Z_a} = \left\{ \dot{U}'_A + \dot{U}_{A0} [1 + Y_0 (Z_2 + Z_a)] \right\} Y_A; \\ \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_b)}{Z_k + Z_b} = \left\{ \dot{U}'_B + \dot{U}_{B0} [1 + Y_0 (Z_2 + Z_b)] \right\} Y_B; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C + \dot{I}_0 (Z_2 + Z_c)}{Z_k + Z_c} = \left\{ \dot{U}'_C + \dot{U}_{C0} [1 + Y_0 (Z_2 + Z_c)] \right\} Y_C. \end{aligned} \right\} \quad (3.152.)$$

Izmantojot izteiksmes (3.151.) un (3.152.), sekundāro tinumu fāžu strāvas aprēķina no formulām:

$$\dot{I}_a = \dot{I}'_a + \dot{I}_0 = -\dot{I}_A + \dot{I}_0;$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}'_b + \dot{I}_0 = -\dot{I}_B + \dot{I}_0;$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}'_c + \dot{I}_0 = -\dot{I}_C + \dot{I}_0.$$

Fāžu primāros spriegumus nosaka izteiksmes (3.130.) un (3.150.), bet sekundāros fāžu spriegumus aprēķina:

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_a &= \dot{U}_A - \dot{I}_A Z_k + \dot{I}_0 Z_2 = \dot{U}'_A - \dot{I}_A Z_k + \dot{U}_{A0} (1 + Y_0 Z_2); \\ -\dot{U}_b &= \dot{U}_B - \dot{I}_B Z_k + \dot{I}_0 Z_2 = \dot{U}'_B - \dot{I}_B Z_k + \dot{U}_{B0} (1 + Y_0 Z_2); \\ -\dot{U}_c &= \dot{U}_C - \dot{I}_C Z_k + \dot{I}_0 Z_2 = \dot{U}'_C - \dot{I}_C Z_k + \dot{U}_{C0} (1 + Y_0 Z_2). \end{aligned} \right\} \quad (3.153.)$$

Apskatīsim nesimetriskā režīma robežgadījumu – vienfāzes īsslēgumu sekundārā tinuma a fāzē, ja slodze atslēgta. Strāvas un spriegumus šajā gadījumā var noteikt no iepriekš iegūtajām izteiksmēm, ja tajās ievieto  $Z_a = 0, Z_b = Z_c = \infty$ , jeb  $Y_A = 1/Z_k, Y_B = Y_C = 0$ . Tad no (3.150.) un (3.151.) iegūstam:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = -U'_A \frac{Z_m}{Z_m + Z_2 + 2Z_k}; \quad \dot{I}_0 = -\frac{\dot{U}'_A}{Z_m + Z_2 + 2Z_k}. \quad (3.154.)$$

Jāatzīmē, ka šajā gadījumā visu secību pretestību summa ir vienāda ar  $Z_m + Z_2 + 2Z_k$ , bet  $Z_m + Z_2 = Z_0$ . Tad no (3.152.) atrodam, ka  $\dot{I}_B = \dot{I}_C = \dot{I}_0$  un

$$\dot{I}_A = \left[ \dot{U}'_A - \dot{U}'_A \frac{Z_m}{Z_m + Z_2 + 2Z_k} \left( 1 + \frac{Z_2}{Z_m} \right) \right] \frac{1}{Z_k} = \frac{2\dot{U}'_A}{Z_m + Z_2 + 2Z_k} = -2\dot{I}_0. \quad (3.155.)$$

Sekundārie fāžu spriegumi saskaņā ar (3.153.) ir:

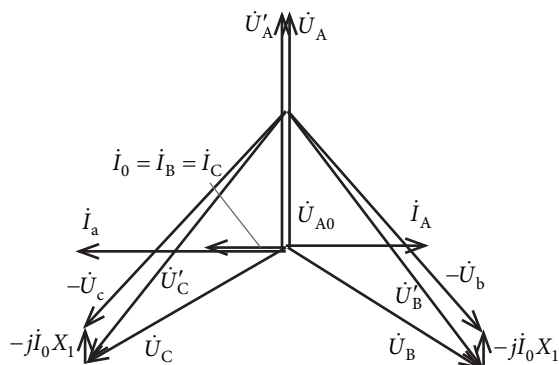
$$\dot{U}_a = 0; \quad (3.156.)$$

$$\left. \begin{aligned} -\dot{U}_b &= \dot{U}'_B - \dot{I}_0 Z_k + \dot{U}_{B0} (1 + Y_0 Z_2) = \dot{U}'_B + \dot{U}_{B0} (1 - Y_0 Z_1); \\ -\dot{U}_c &= -\dot{U}'_C - \dot{I}_0 Z_k + \dot{U}_{C0} (1 + Y_0 Z_2) = \dot{U}'_C + \dot{U}_{C0} (1 - Y_0 Z_1). \end{aligned} \right\} \quad (3.157.)$$

3.64. attēlā parādīta vienfāzes īsslēguma vektoru diagramma, kas atbilst vienādojumiem (3.154.), (3.156.) un (3.157.). Šajā gadījumā pieņemts, ka  $Z_k = jX_k$  un primāro līnijas spriegumu sistēma ir simetriska.

Apskatot atsevišķu gadījumu, kad primārie spriegumi ir nesimetriski, bet slodze ir simetriska, iegūtajās izteiksmēs jāievieto  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_{sl}$ .

Tad  $Y_A = Y_b = Y_c = 1/(Z_k + Z_{sl})$ .



3.64. att. Vienfāzes īsslēguma vektoru diagramma tinumu slēgumam  $Y/Y_0$ .

Kā redzams no (3.150.), šajā gadījumā primāro spriegumu nullsecības komponente ir vienāda ar nulli, jo  $\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0$ . Acīmredzot nullsecības komponentes nesatur arī sekundārie spriegumi un strāvas. Primārās strāvas un sekundāros spriegumus var aprēķināt no formulām, kas dotas analogiskam 3.7.4. apakšnodaļā dotajam gadījumam.

### 3.7.6. Nesimetriskas slodzes ietekme uz transformatoru darbību

Visjutīgākais nesimetriskas slodzes gadījumā ir transformators ar tinumu slēgumu  $Y/Y_0$ . Tinumu sekundārie spriegumi šādā transformatorā veido nesimetrisku sistēmu, jo šajos tinumos inducējas nullsecības EDS  $E_0$ . Nullsecības strāvu radītais MS sekundārajos tinumos netiek līdzsvarots ar attiecīgajiem MS primārajos tinumos, jo primārajā pusē nullsecības strāvas noslēgties nevar. Rezultātā transformatorā parādās nullsecības magnētiskā plūsma, kas tinumos inducē EDS, un fāžu spriegumi kļūst nesimetriski (3.65. att.). Spriegumu vektoru diagrammas nullpunkts  $O'$  nesakrīt ar līnijas spriegumu trīsstūra smaguma centru  $O$ , kā tas ir diagrammā transformatoram ar simetrisku slodzi.

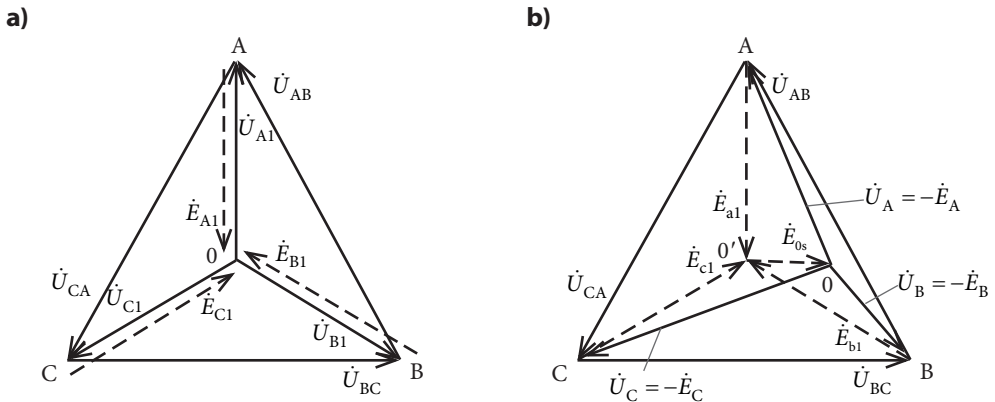
Ievērojama sekundāro spriegumu nesimetrija iespējama apvalka tipa transformatoros un transformatoru trīsfāžu grupā ar tinumu slēgumu  $Y/Y_0$ , jo šādos transformatoros pat nelielas nullsecības strāvas var radīt lielas nullsecības magnētiskās plūsmas un nullsecības EDS. Šī iemesla dēļ slēgumu  $Y/Y_0$  šiem transformatoriem parasti nelieto.

Tomēr atsevišķos gadījumos, kad nepieciešams abus tinumus slēgt zvaigznē, katrā fāzē papildus izveido trešo tinumu (terciāro), kuru savieno trīsstūrī. Ja šis tinums paredzēts tikai nullsecības plūsmas līdzsvarošanai, tam nav paredzēti izvadi, bet, ja tas paredzēts arī slodzei, izveidojas trīstinumu transformators. Jāatzīmē, ka nullvada esamība vai nullpunkta iezemēšana gan primārajā, gan sekundārajā pusē negarantē nullsecības strāvu līdzsvarošanu, jo primārā kontūra pretestība šīm strāvām var izrādīties liela.

Stieņu tipa transformatoros ar tinumu slēgumu  $Y/Y_0$  fāžu spriegumu asimetrija izteikta daudz mazākā mērā, jo, kā tika norādīts iepriekš, tiem ir mazāka pretestība nullsecības strāvām. Šādus transformatorus parasti ražo ar nominālo jaudu līdz 600 kV·A. Turklāt tiek izvirzīta prasība, lai strāva nullvadā nepārsniegtu 25 % no nominālās.

Tinumu slēgumā  $\Delta/Y_0$  nullsecības strāvas abos tinumos savstarpēji līdzsvarojas, tāpēc rezultējošā nullsecības magnētiskā plūsma un nullsecības EDS ir mazs. Nesimetriska slodze šajā gadījumā, tāpat kā slēgumos bez nullvada, rada nelielu spriegumu nesimetriju, kas transformatora un patērētāja darbību praktiski neietekmē.

Jāatzīmē, ka transformatori ar tinumu slēgumu  $Y/Z$  labi iztur nesimetrisku slodzi ar nullsecības strāvām, jo tās līdzsvarojas sekundārajos tinumos. Šis apstāklis izskaidrojams ar to, ka zigzagzvaigznes slēgumā uz katra stieņa atrodas tinuma divas daļas, kurās nullsecības strāvas plūst pretējos virzienos (sk. 3.2. apakšnodaļu).



3.65. att. Sekundāro spriegumu vektoru diagramma transformatoram ar tinumu slēgumu  $Y/Y_0$ : a — simetriskai slodzei; b — slodzei ar tiešās un nullsecības strāvām.

## 3.8. PĀREJAS PROCESI TRANSFORMATOROS

### 3.8.1. Transformatora pieslēgšana tīklam

Jebkura darba režīma pēkšņa izmaiņa, t. i., pāreja no viena stacionāra režīma citā, transformatorā izraisa pārejas procesu.

Pieslēdzot transformatoru tīklam, vērojams īslaicīgs pārejas process, kura laikā magnetizēšanas strāva strauji pieaug, atsevišķos gadījumos pārsniedzot transformatora nominālo strāvu.

Aplūkosim vienfāzes transformatora pieslēgšanu tīklam tukšgaitā. Pieņemsim, ka tīkla spriegums mainās sinusoidāli. Pārejas procesam šajā gadījumā var uzrakstīt šādu vienādojumu:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \Psi_0) = W_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_0 R_1, \quad (3.158.)$$

kur  $\Psi_0$  – leņķis, kas raksturo sprieguma fāzi ieslēgšanas sākuma momentā  $t=0$ .

Vienādojums (3.158.) ir nelineārs, jo nelineāra ir sakarība  $\Phi = f(i_0)$ . Tāpēc aprobežosimies ar tuvinātu (3.158.) risinājumu, pieņemot, ka:

$$\frac{W_1 \Phi}{i_0} = L_1 = \text{const}, \quad (3.159.)$$

kur  $L_1$  – primārā tinuma induktivitāte, kas atbilst visai magnētiskajai plūsmai, kas saķēdēta ar šo tinumu.

Atrisinot  $i_0$  no (3.159.) un ievietojot iegūto rezultātu (3.158.), iegūstam:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi = \frac{U_{1m}}{W_1} \sin(\omega t + \Psi_0). \quad (3.160.)$$

Kā zināms, šāda diferenciālvienādojuma atrisinājums sastāv no divām daļām:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (3.161.)$$

kur  $\Phi'$  – uzspiestā jeb stacionārā plūsma, kas ir atkarīga no sinusoidālā tīkla sprieguma;

$\Phi''$  – brīvā jeb pārejas plūsma, kas pastāv tikai pārejas procesa laikā.

Uzspiesto plūsmu  $\Phi'$  nosaka no izteiksmes:

$$\Phi' = \Phi_m \sin\left(\omega t + \Psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) = -\Phi_m \cos(\omega t + \Psi_0), \quad (3.162.)$$

kur  $\Phi_m = U_1 / 4,44fW_1$ .

Brīvā plūsma  $\Phi''$  no ārpuses netiek uzturēta, un to var aprēķināt, pielīdzinot (3.160.) nullei:

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi''}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi'' &= 0, \text{ t.i.,} \\ \Phi'' &= C e^{\frac{-R_1 t}{L_1}}, \end{aligned} \quad (3.163.)$$

kur  $C$  – integrēšanas konstante.

Ievietojot izteiksmē (3.161.)  $\Phi'$  un  $\Phi''$  vērtības no izteiksmēm (3.162.) un (3.163.), iegūstam:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \Psi_0) + Ce^{\frac{-R_1 t}{L_1}}. \quad (3.164.)$$

Integrēšanas konstanti  $C$  nosaka, ievērojot sākuma noteikumus. Tā kā ieslēgšanas brīdī ( $t=0$ ), transformatora serdē var būt paliekošā plūsma  $\pm\Phi_p$ , tad no izteiksmes (3.164.) laika momentam  $t=0$  atrodam, ka

$$\pm\Phi_p = -\Phi_m \cos \Psi_0 + C \quad (3.165.)$$

un

$$C = \Phi_m \cos \Psi_0 \pm \Phi_p. \quad (3.166.)$$

Ievietojot  $C$  vērtību izteiksmē (3.164.), iegūstam:

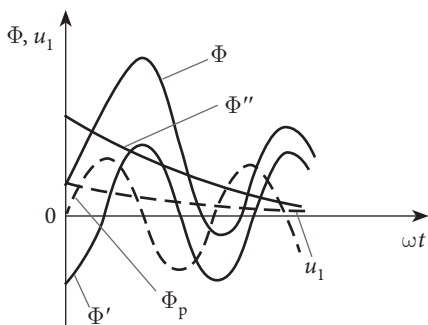
$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \Psi_0) + (\Phi_m \cos \Psi_0 \pm \Phi_p) e^{\frac{-R_1 t}{L_1}}. \quad (3.167.)$$

Analizējot izteiksmi (3.167.), var secināt, ka vislabvēlīgākie apstākļi transformatora pieslēgšanai tīklam ir tad, kad tīkla sinusoidālais spriegums sasniedz maksimālo vērtību, t. i., ja  $\Psi_0 = \pi/2$  un  $\Phi_p = 0$ . Tad

$$\Phi = -\Phi_m \left( \cos \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \Phi_m \sin \omega t. \quad (3.168.)$$

Šajā gadījumā  $\Phi'' = 0$  un magnetizēšanas strāva sasniedz stacionāro vērtību jau praktiski pieslēgšanas brīdī. Visnelabvēlīgākie transformatora pieslēgšanas apstākļi ir tad, kad  $\Psi_0 = 0$  un paliekošā plūsma  $\Phi_p$  ir pretfāzē attiecībā pret plūsmu  $\Phi'$ . Tad

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_p) e^{\frac{-R_1 t}{L_1}} \quad (3.169.)$$



3.66. att. Transformatora magnētiskās plūsmas izmaiņa laikā, pieslēdzot to tīklam, ja  $\Psi_0 = 0$ , un paliekošā plūsma vienāda ar  $+\Phi_p$ .

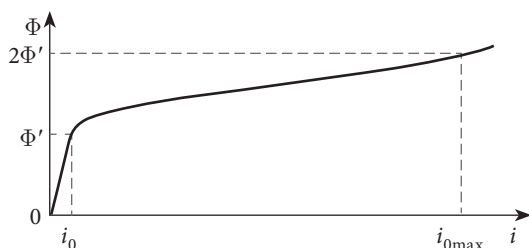
un pārejas procesa laikā (3.66. att.) magnētiskā plūsma sasniedz maksimālo vērtību  $\Phi_{\max}$  praktiski pēc pusperioda no pieslēgšanas ( $\omega t = \pi$ ).

Spēka transformatoros  $R_1 \ll \omega L_1$  un  $\Phi_p = (0,2 \div 0,3)\Phi'$ , tāpēc

$$\Phi_{\max} = 2\Phi_m + \Phi_p = (2,2 \div 2,3)\Phi_m. \quad (3.170.)$$

Tas nozīmē, ka  $\Phi_{\max}$  vairāk nekā divas reizes var pārsniegt normālā darba režīma plūsmu un magnētiskā ķēde strauji piesātinās. Tas savukārt izraisa ļoti lielu magnetizēšanas strāvas pieaugumu, tās vērtību var noteikt no transformatora





3.67. att. Transformatora magnetizēšanas likne.

magnetizēšanas liknes (3.67. att.). Spēka transformatoros  $i_{0\max}$  vērtība var 50–80 reizes pārsniegt magnetizēšanas strāvu normālā režīmā vai 2–5 reizes nominālo strāvu. Ņemot vērā, ka pārejas process, pieslēdzot transformatoru tīklam, noris ļoti īsā laikā, šāda strāva transformatora tinumiem, no termiskā viedokļa, nav

bīstama. Tomēr šis apstāklis jāņem vērā, izvēloties un regulējot attiecīgo aparātūru.

Pieslēdzot tīklam trīsfāžu transformatorus, vienmēr sagaidāms strāvas trieciens, jo kādā fāzē sprieguma sākuma fāzes leņķis  $\Psi_0$  būs tuvs nullei.

### 3.8.2. Transformatora pēkšņais īsslēgums

Apskatīsim pārejas procesu vienfāzes transformatorā, ja tā sekundārais tinums tiek saslēgts īsi.

Analizējot transformatora pēkšņo īsslēgumu, tāpat kā stacionārā īsslēguma gadījumā, var neievērot tukšgaitas strāvu un aprēķinos izmantot vienkāršoto ekvivalento shēmu (sk. 3.32. att.) ar parametriem:

$$R_k = R_1 + R_2' \text{ un } L_k = \frac{X_k}{\omega} = \frac{X_1 + X_2'}{\omega}.$$

Pārejas procesu šādā shēmā, kurai pieslēgts sinusoidāls spriegums  $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \Psi_0)$ , apraksta lineārs diferenciālvienādojums ar nemainīgiem koeficientiem  $R_k$  un  $L_k$

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = U_{1m} \sin(\omega t + \Psi_0). \quad (3.171.)$$

Vienādojums (3.171.) pēc struktūras ir pilnīgi analogisks vienādojumam (3.160.), tāpēc arī tā risināšanas gaita ir analogiska.

Īsslēguma strāva sastāv no divām komponentēm – uzspiestās  $i'$  un brīvās  $i''$  strāvas, t. i.,

$$i_k = i' + i''. \quad (3.172.)$$

Uzspiesto jeb stacionārā īsslēguma strāvu nosaka no ekvivalentās shēmas (sk. 3.32. att.)

$$i' = I_{km} \sin(\omega t + \Psi_0 - \varphi_k), \quad (3.173.)$$

$$\text{kur } I_{km} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}; \quad \varphi_k = \text{arctg} \frac{X_k}{R_k}.$$

Brīvo strāvu atrod no homogēnā diferenciālvienādojuma

$$\frac{di''}{dt} + \frac{R_k}{L_k} i'' = 0$$

atrisinājuma:

$$i'' = Ce^{\frac{-R_k t}{L_k}}. \quad (3.174.)$$

Integrēšanas konstanti  $C$  nosaka no sākuma noteikumiem. Pieņemot, ka īsslēgums notiek tukšgaitā,  $i_k = 0$ , ja  $t = 0$  un

$$0 = i' + i'' = C + I_{km} \sin(\Psi_0 - \varphi_k),$$

no kurienes

$$C = -I_{km} \sin(\Psi_0 - \varphi_k). \quad (3.175.)$$

Ievietojot  $C$  vērtību izteiksmē (3.174.), iegūstam:

$$i'' = -I_{km} \sin(\Psi_0 - \varphi_k) e^{\frac{-R_k t}{L_k}}. \quad (3.176.)$$

Tad, ņemot vērā (3.173.) un (3.176.), var pārrakstīt (3.172.) un iegūt pēkšņā īsslēguma strāvu:

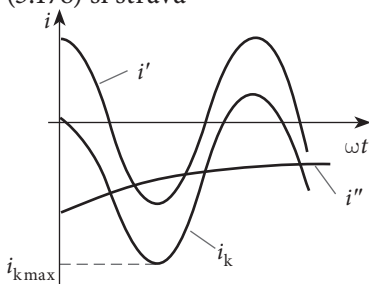
$$i_k = I_{km} \sin(\omega t + \Psi_0 - \varphi_k) - I_{km} \sin(\Psi_0 - \varphi_k) e^{\frac{-R_k t}{L_k}}. \quad (3.177.)$$

Pārejas procesa ilgums ir atkarīgs no brīvās strāvas rimšanas. Ja  $t = L_k/R_k$ , brīvā strāva samazinās  $e$  reizes, bet, ja  $t = 3L_k/R_k$ , tā praktiski ir rimusi. Spēka transformatoros  $L_k/R_k$  parasti ir robežās no 0,1 līdz 0,2 s.

No izteiksmes (3.177.) redzams, ka īsslēguma strāva ir atkarīga no sprieguma fāzes  $\Psi_0$ . Ja  $\Psi_0 = \varphi_k$ , brīvā strāva vienāda ar nulli un strāva uzreiz sasniedz to vērtību, kāda ir stacionārā īsslēgumā. Visnelabvēlīgākie apstākļi ir tad, ja  $\Psi_0 - \varphi_k = \pm\pi/2$ . Piemēram, ja  $\Psi_0 - \varphi_k = -\pi/2$ , no (3.177.) iegūstam:

$$i_k = -I_{km} \cos(\omega t) + I_{km} e^{\frac{-R_k t}{L_k}}. \quad (3.178.)$$

Īsslēguma strāvas izmaiņa laikā atbilstoši izteiksmei (3.178.) parādīta 3.68. attēlā. Kā redzams, vislielāko vērtību īsslēguma strāva  $i_{kmax}$  sasniedz pirmajā pusperiodā, t. i., kad  $\omega t = \pi$  jeb  $t = \pi/\omega$ . Strāvu  $i_{kmax}$  sauc par īsslēguma triecienstrāvu, un saskaņā ar izteiksmi (3.178) šī strāva



3.68. att. Transformatora īsslēguma strāvas izmaiņa laikā, ja  $\Psi_0 - \varphi_k = +\pi/2$ .

$$i_{kmax} = I_{km} \left( 1 + e^{\frac{-\pi R_k}{X_k}} \right). \quad (3.179.)$$

Lielumu

$$k_m = 1 + e^{\frac{-\pi R_k}{X_k}} \quad (3.180.)$$

sauc par triecienkoeficientu, kas raksturo, cik reižu īsslēguma triecienstrāva pārsniedz stacionārā īsslēguma strāvas amplitūdas vērtību. Lieljaudas transformatoriem koeficients  $k_m$  ir robežās no 1,7 līdz 1,8.

Tā kā stacionārā īsslēguma strāvas efektīvā vērtība (sk. 3.3. apakšnodaļu) ir:

$$I_k = \frac{100}{u_{k\%}} I_N,$$

tad var iegūt izteiksmi, pēc kuras īsslēguma trieciensrāvu var aprēķināt no transformatora pasēs datiem:

$$i_{k\max} = \frac{100\sqrt{2}}{u_{k\%}} k_m I_N. \quad (3.181.)$$

Spēka transformatoriem  $i_{k\max} = (20 - 60)I_N$ . Šādas strāvas var izraisīt pastiprinātu transformatoru tinumu silšanu. Taču mūsdienu elektriskajās sistēmās un tīklos ir uzstādītas ātrdarbīgas aizsardzības ierīces, kas īsslēguma gadījumā transformatoru dažu sekundes desmitdaļu laikā atslēdz no tīkla. Tāpēc tinumi nespēj sasilt līdz temperatūrai, kas bīstama izolācijai, un īsslēguma strāvu termiskā darbība transformatoram nav bīstama.

Tomēr transformatoru ekspluatācijas laikā var rasties īsslēgumi vienā vai vairākos vijumos pašā tinumā. Strāva bojātā vijumā šādā gadījumā var pārsniegt nominālo vērtību desmitām un simtām reižu, kas izraisa vietējo pārkaršanu. Turklāt no tīkla patērētā strāva var mainīties maz. Šis apstāklis apgrūtina aizsardzības izveidošanu no transformatora iekšējiem vijumu īsslēgumiem un to diagnosticēšanu.

Visai bīstami ir elektrodinamiskie spēki, kas īsslēgumu laikā iedarbojas uz transformatora tinumiem. Šo spēku darbība apskatīta nākamajā apakšnodaļā.

### 3.8.3. Elektrodinamiskie spēki

Elektrodinamiskie spēki, kas darbojas uz transformatora tinumiem, rodas šo tinumu strāvu un izkliedes magnētisko lauku mijiedarbības rezultātā. Šie spēki ir sevišķi bīstami pēkšņo īsslēgumu laikā, jo tie pieaug proporcionāli strāvas kvadrātam un var izraisīt nopietnus bojājumus.

Elektrodinamisko spēku aprēķini un tinumu mehāniskās stiprības analīze ir visai sarežģīta tāpēc, ka magnētiskā lauka sadalījums tinumu zonā ir visai sarežģīts un šo spēku darbībai ir īpatnējs raksturs.

Kā zināms, spēks, kas iedarbojas uz garuma vienību katram no diviem paralēliem vadiem, kuros plūst strāva  $i_1$  un  $i_2$ , ir:

$$f = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{4\pi a}, \quad (3.182.)$$

kur  $\mu_0$  – vides magnētiskā caurlaidība, kurā atrodas vadi;  
 $a$  – attālums starp vadiem.

Atzīmēsim, ka vadi ar vienādiem strāvas virzieniem pievelkas, bet ar pretējiem – atgrūžas.

Spēkus, kas iedarbojas uz transformatora tinumiem, var iedalīt iekšējos, t. i., tādos, kas darbojas starp viena tinuma elementiem, un ārējos – tādos, kas darbojas starp atsevišķiem tinumiem.

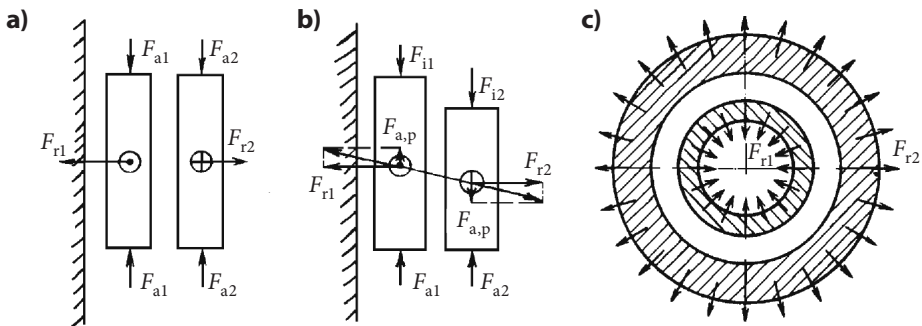
3.69. attēlā a, b parādīti transformatora tinumi un iekšējo  $F_{a1}$ ,  $F_{a2}$  un ārējo radiālo  $F_{r1}$ ,  $F_{r2}$  spēku darbības virzieni, ja MS sadalījums ir vienmērīgs. Ass virzienā vērstie spēki cenšas samazināt tinumu augstumu, bet radiālie spēki – saspiest iekšējo un atraut ārējo tinumu.

Radiālie spēki sadalās vienmērīgi pa katras spoles aploci (3.69. att. c). Šie spēki maksimālo vērtību sasniedz tinuma vidusdaļā, kur ir lielāka magnētiskā laika indukcija.

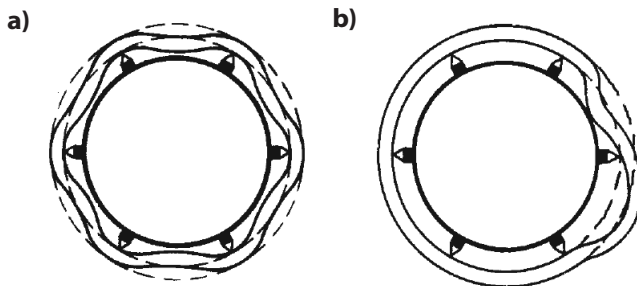
Iekšējo tinumu bieži uztin uz izolējošā cilindra novietotām latīņām. Tāpēc bez tinuma saspiešanas iespējama vēl tā lieces deformācija. Tinums pieņem tādu formu, kā parādīts 3.70. attēlā a. Dažreiz paliekošām deformācijām ir cits raksturs: vienā vietā starp divām latīņām tinums ieliecas, bet blakus posmā tiek izspiests uz ārpusi (3.70. att. b). Tādā gadījumā jārunā par tinuma stabilitātes zaudēšanu.

Radiālie spēki, kas darbojas uz ārējo tinumu, cenšas atraut tā vadus no serdes. Sevišķi bīstami šie spēki ir skrūves tinumam, jo var to “atskrūvēt” un atraut tā galus. Tāpēc skrūves tinumu ļoti reti izmanto kā ārējo, bet vienmēr veic speciālus pasākumus pret tā “atskrūvēšanos”.

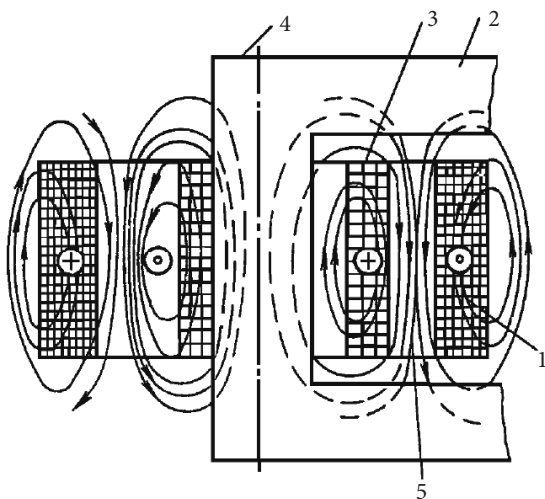
Gadījumos, kad tinumu augstumi nav vienādi (sk. 3.69. att. b), MS sadalās nevienmērīgi, un pieaug izkliedes lauka radiālā komponente. Tāpēc ārējiem spēkiem šajā gadījumā ir ne tikai radiālās, bet arī aksiālās komponentes  $F_{a,p}$ , kas pastiprina spēkus  $F_{i1}$ ,  $F_{i2}$ . Spē-



3.69. att. Radiālo un aksiālo spēku darbība divtinumu transformatorā: a – ar vienāda augstuma tinumiem; b – ar dažāda augstuma tinumiem; c – radiālo spēku diagramma.



3.70. att. Iekšējā tinuma deformācija: a – tinuma zvaigznes forma; b – tinuma stabilitātes zaudēšana.



3.71. att. Koncentrisko tinumu izkļiedes lauks: 1 – AS tinums; 2 – ZS tinums; 3 – jūgs; 4 – stienis. 5 – izkļiedes magnētiskā plūsma.

rādītas arī izkļiedes lauka spēka līnijas. Šo lauku var apskatīt kā divu lauku summu: aksiālo, kura spēka līnijas ir paralēlas tinuma asij, un radiālo, kura spēka līnijas vērstas radiālā virzienā. Abu lauku indukcijas sadalījums parādīts 3.72. attēlā.

Atbilstoši šim iedalījumam noteiksim atsevišķi arī aksiālos un radiālos mehāniskos spēkus. Kā parādīts 3.70. attēlā, uz ārējo tinumu iedarbojas spēks  $F_r$ , kas cenšas atgrūst to no iekšējā tinuma. Šo spēku var aprēķināt pēc formulas:

$$F_r = 0,028 \left( i_{k\max} W \right)^2 \alpha k_p \cdot 10^{-6}, \quad (3.183.)$$

kur  $W$  – vijumu skaits tinumā;

$\alpha$  – koeficients, ko aprēķina kā  $\alpha = \pi D_{12} / H_0$ ;

$k_p$  – Rogovska koeficients.

Tāds pats spēks kā  $F_r$ , tikai pretēji vērsts, iedarbojas uz iekšējo tinumu, cenšoties to saspīest. Abi spēki vienmērīgi sadalās pa tinumu aplocēm, kā tas parādīts 3.69. attēlā c.

Summārais aksiālais spēks rodas radiālā lauka un tinumu strāvu mijiedarbības rezultātā. Nosakot šo spēku, jāņem vērā šādas īpatnības. Radiālā izkļiedes lauka spēka līniju virziens abu tinumu augšējā un apakšējā daļā ir pretējs, tāpēc spēki, kas rodas tinumu augšējā daļā, vērsti uz leju, bet apakšējā daļā – uz augšu. Tādējādi aksiālie spēki  $F_a$  saspīest tinumus ass virzienā.

Radiālām izkļiedes laukam ir visai sarežģīts raksturs, tāpēc ar to saistīto spēku aprēķini ir mazāk precīzi nekā ar aksiālo lauku saistīto spēku aprēķini. Turklāt precīzāk iespējams aprēķināt summāros spēkus un mazāk precīzi spēkus, kas iedarbojas uz atsevišķiem vijumiem un spolēm.

Aksiālo spēku  $F_a$  var noteikt pēc formulas:

ki  $F_{a,p}$  vērsti tā, ka cenšas pastiprināt asimetriju. Piemēram, spēki  $F_{a,p}$  3.69. attēlā b cenšas vēl vairāk samazināt ārējā tinuma augstumu un palielināt iekšējā tinuma augstumu. Šie spēki daļēji vai pilnībā tiek pielikti jūgiem, cenšoties tos atraut no stieņiem. Spēki  $F_{a,p}$  kopā ar spēkiem  $F_{a1}$  un  $F_{a2}$  cenšas izlikt vadus vertikālā virzienā un saspīest spoļu starplikas.

Lai noteiktu summāros mehāniskos spēkus, aplūkosim vienkāršāko divu koncentrisko tinumu savstarpējo novietojumu, kas parādīts 3.71. attēlā. Abiem tinumiem ir vienāds augstums. To vijumi vertikālajā virzienā sadalīti vienmērīgi. Attēlā pa-

$$F_a = \frac{F_r a_p}{2H_0}, \quad (3.184.)$$

kur  $a_p$  – reducētais kanāla platums  
 $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2)/3$ .

Spēks  $F_a$  ir summārais aksiālais spēks. Tas iegūts, summējot elementāros spēkus, kas darbojas uz atsevišķiem tinuma vadiem. Šis spēks savu maksimālo vērtību sasniedz tinuma vidusdaļā. Spēki  $F_a$  saspiež starpviļņu un starpspoļu izolāciju. Cilindriskajos tinumos aksiālie spēki var izraisīt ārējā slāņa nobīdi, ja tas nav pietiekami nostiprināts.

Gadījumos, kad tinumu MS ir sadalīti nevienmērīgi vai primārais un sekundārais tinums novietots nesimetriski, lauka sadalījums kļūst sarežģītāks. Tad elektrodinamiskos spēkus aprēķina, balstoties uz Bio-Savāra likumu diferenciālā formā:

$$d\mathbf{f} = [J \times B] dV, \quad (3.185.)$$

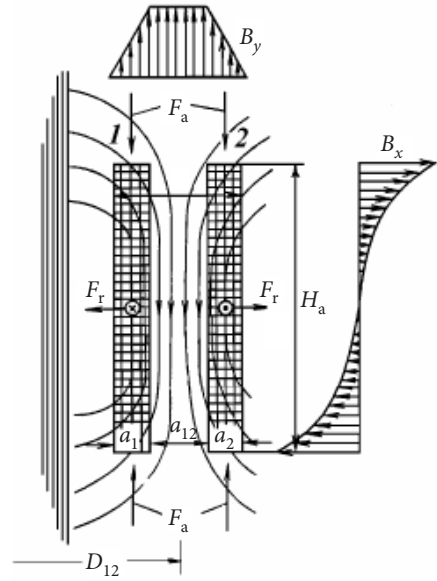
kur  $d\mathbf{f}$  – spēka vektors, kurš iedarbojas uz vada elementu ar tilpumu  $dV$ ;  
 $B$  – magnētiskā lauka indukcija;  
 $J$  – strāvas blīvums vadā.

Vektoriālais reizinājums  $[J \times B]$  parāda, ka aksiālā izkliedes lauka un strāvas mijiedarbības rezultātā rodas radiālie spēki  $F_r$  (3.72. att.). Savukārt radiālais izkliedes lauks izraisa aksiālos spēkus  $F_a$ .

Ja ir zināms magnētiskā lauka sadalījums un strāvas blīvums tinumos, spēku, kas iedarbojas uz tinumu, var aprēķināt integrējot:

$$F = \int_V [J \times B] dV. \quad (3.186.)$$

Kā rāda transformatoru ekspluatācijas pieredze, lielāko bīstamību tinumiem rada aksiālie spēki, pakļaujot tinumu vadus lieces deformācijai, saspiežot un bojājot izolāciju.



3.72. att. Koncentrisko tinumu aksiālais un radiālais magnētiskais lauks: 1 – iekšējais tinums; 2 – ārējais tinums.

## 3.9. TRANSFORMATORU MAGNĒTVADI

### 3.9.1. Transformatoros izmantojamie elektrotehniskie tēraudi

Magnētvids transformatorā kalpo par mehānisko pamatu. Tajā lokalizējas magnētiskā plūsma. Transformatoros ar racionāli projektētu magnētvidu ir relatīvi mazi zudumi un tukšgaitas strāva.

Magnētvidus izgatavo no speciālo elektrotehnisko tēraudu loksņēm ar paaugstinātu (līdz 5 %) silīcija saturu. Silīcijs palielina magnētisko caurlaidību un elektrisko pretestību, samazina histerēzes zudumus. Tērauda elektriskās pretestības palielināšana ļauj tajā samazināt virpuļstrāvu zudumus. Turklāt silīcijs kavē tērauda novecošanos (zudumu palielināšanos laika gaitā), samazina magnetostrīkiju (ķermeņa formas un izmēru izmaiņa magnetizēšanās procesā) un trokšņus. Tanī pašā laikā silīcija klātbūtne palielina tērauda trauslumu un apgrūtina tā mehānisko apstrādi.

Elektrotehniskā tērauda īpašības ir atkarīgas no tā, kādā virzienā loksnes ir magnetizētas. Tas izskaidrojams ar to, ka elektrotehniskā tērauda kristāliskais režģis veido telpiski centrētu kubu, kuram piemīt magnētiskā anizotropija, tas nevienādi magnetizējas dažādos virzienos. Kubiskajā kristālā ir trīs kristalogrāfiskie virzieni: kuba ribas virzienā I, plaknes diagonālā virzienā II un telpiskās diagonāles virzienā III. Zināms, ka elektrotehniskais tērauds virzienā I magnetizējas viegli, virzienā II – vidēji, bet virzienā III – samērā grūti. Tāpēc, lai iegūtu vienādu indukcijas vērtību minētajos virzienos, jārada dažāds magnētiskais lauks.

Daudzu gadu laikā transformatoru magnētvidu izgatavošanai tika izmantotas 0,5 mm un 0,35 mm biezas karsti velmēta elektrotehniskā tērauda loksnes ar darba indukciju robežās no 1,4 līdz 1,45 T. Šāds ierobežojums izskaidrojams ar to, ka, pieaugot indukcijai, tērauds piesātinās, kas savukārt izraisa magnetizēšanas strāvas strauju pieaugumu. Tā, piemēram, ja indukcija mainās no 1,4 uz 1,5 T, magnetizēšanas strāva pieaug divas reizes, bet, ja indukcija palielinās līdz 1,8 T, strāva pieaug aptuveni 20 reizi. Rezultātā palielinās transformatora reaktīvā jauda un tukšgaitas zudumi.

Karsti velmētam tēraudam ir polikristāliska struktūra, kurā kristāli orientēti haotiski. Tāpēc tā magnētiskās īpašības dažādos virzienos ir praktiski izotropas. Tomēr īpatnējie zudumi karsti velmētā tēraudā ir relatīvi lieli.

Mūsdienās spēka transformatoros izmanto 0,35, 0,30 un 0,27 mm biezas auksti velmēta tērauda loksnes, kurās īpatnējie zudumi ir 2–2,5 reizes mazāki salīdzinājumā ar karsti velmēto tēraudu. Indukciju magnētvidā no auksti velmēta tērauda izdodas palielināt līdz 1,6–1,65 T, tādējādi samazinot tā masu un tukšgaitas zudumus. Šie zudumi lieljaudas transformatoros ir 0,1–0,2 % no nominālās jaudas. Serdēs, kas izgatavotas no karsti velmēta tērauda, minētie zudumi ir aptuveni 0,3 %.

Auksti velmēto tēraudu karstā stāvoklī velmē tikai līdz 3 mm biezumam, pēc tam – līdz vajadzīgajam biezumam – aukstā stāvoklī. Rezultātā tēraudā veidojas struktūra, kurā kristāli orientēti vienā noteiktā virzienā. Tāpēc indukcija un zudumi auksti velmētā

tēraudā ir būtiski atkarīgi no magnetizēšanas virziena. Šis apstāklis jāņem vērā, projektējot un izgatavojot transformatoru magnētvadus.

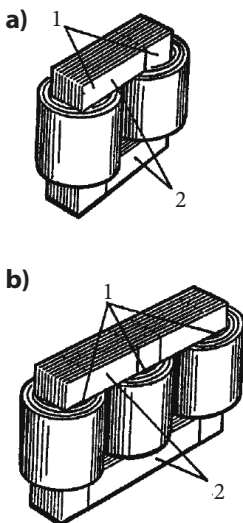
Parasti tērauda loksnes, ko lieto magnētvalu izgatavošanai, no abām pusēm pārklāj ar siltumizturīgu izolāciju. Pārklājuma biezums ir 0,005 mm, bet lokšņu aizpildījuma koeficients – 0,94–0,96. Elektrotehniskā tērauda blīvums un īpatnējā elektriskā pretestība attiecīgi ir 7650 kg/m<sup>3</sup> un 0,45–0,5 Ω mm<sup>2</sup>/m.

### 3.9.2. Magnētvalu konstrukcijas

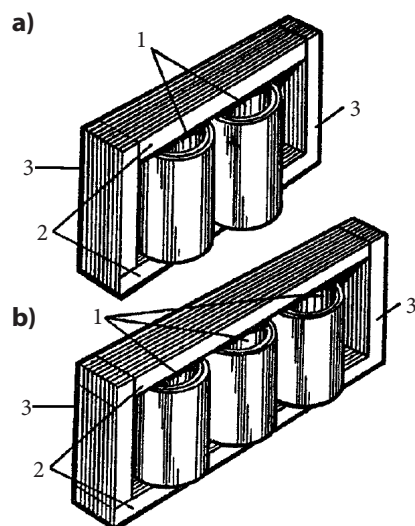
Visus transformatoru magnētvalus var iedalīt divās lielās grupās: stieņu tipa un apvalka tipa.

Stieņu tipa magnētvals (3.73. att.) sastāv no stieņiem un jūgiem. Turklāt jūgā un stienī magnētiskās plūsmas ir vienādas. Šo magnētvalu tipu galvenokārt izmanto spēka transformatoros.

Apvalka tipa magnētvaldos jūgi aptver tinumus ne tikai no augšas un apakšas, bet arī no sāniem. Turklāt jūga magnētiskā plūsma ir divas reizes mazāka nekā serdes plūsma. Spēka transformatoros ar jaudu virs 100 MV·A izmanto apvalka tipa magnētvalus ar sazarotiem jūgiem (3.74. att.). Šādā magnētvaldā vienfāzes variantā katram stienim ir viens sānu jūgs, kurā magnētiskā plūsma ir divas reizes mazāka nekā plūsma stienī, bet trīsfāžu variantā tikai diviem no trim stieņiem ir sānu jūgi. Plūsma jūgos šajā gadījumā ir  $\sqrt{3}$  reizes mazāka nekā stieņos. Sānu jūgu izmantošana ļauj būtiski samazināt augšējā un apakšējā jūga un visa transformatora augstumu. Tam ir izšķiroša nozīme, ja transformatora gabarītus ierobežo noteikumi transportēšanai pa dzelzceļu.



3.73. att. Stieņu tipa magnētvaldi vienfāzes (a) un trīsfāžu (b) transformatori: 1 – stieņi; 2 – jūgi.



3.74. att. Apvalka tipa magnētvaldi vienfāzes (a) un trīsfāžu (b) transformatori: 1 – stieņi; 2 – augšējie un apakšējie jūgi; 3 – sānu jūgi.



Atkarībā no stieņu un jūgu savienojumiem izšķir serdes ar taisnleņķa vai slīpām sadurvietām, šīhtētās un lentes tipa serdes. Pirmajā gadījumā stieņus un jūgus saliek no skārdiem atsevišķi, bet vēlāk pēc tinumu novietošanas savieno savā starpā sadurvietās. Relatīvi lielās spraugas sadurvietās izraisa tukšgaitas strāvas palielināšanos.

Lai mazinātu iepriekš minēto trūkumu, plaši lieto magnētvadus, kuros stieņu un jūgu plāksnes saliek pamišus. Izšķir magnētvadus ar taisnleņķa, slīpām un kombinētām sadurvietām (3.75. att.). Shēmas izvēle ir atkarīga no tērauda markas, magnētvida konstrukcijas un transformatora jaudas.

Lietojot taisnleņķa sadurvietas, magnētvadā ir zonas, kurās magnētiskās plūsmas virziens nesakrīt ar tērauda velmēšanas virzienu. Karsti velmēta tērauda gadījumā šis apstāklis praktiski neietekmē tukšgaitas strāvu un zudumus, jo tā magnētiskās īpašības ir izotropas.

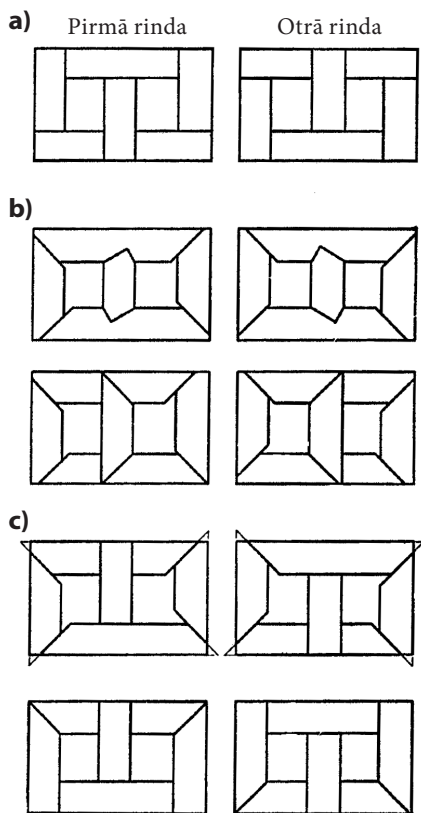
Citāda aina ir auksti velmētam tēraudam, kuram piemīt spēcīgi izteikta anizotropija. To zonu samazināšanai, kurās plūsmas un tērauda velmēšanas virzieni nesakrīt, plaši lieto slīpās sadurvietas. Tā izdodas tukšgaitas zudumus samazināt par 10–12 % un tukšgaitas

strāvu par 25–30 % salīdzinājumā ar gadījumu, kad izmanto magnētvadus ar taisnleņķa sadurvietām. Jāatzīmē, ka magnētvalu izgatavošana ar slīpām sadurvietām ir visai darbietilpīga, tāpēc plašu pielietojumu guvušas serdes ar kombinētām sadurvietām (3.75. att. c).

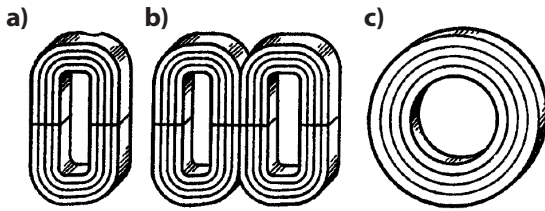
Lai tinumus novietotu uz stieņiem, vispirms jānoņem augšējais jūgs un pēc tinumu uzlikšanas jāsaliek atpakaļ.

Mazjaudas transformatoriem izmanto lentes serdes. Šīs serdes satin no 0,08–0,35 mm biezas lentes, kas izgatavota no auksti velmēta elektrotehniskā tērauda vai speciāla sakausējuma. Lentes viena puse pārklāta ar izolācijas un saistvielas slāni. Pēc izgatavošanas serdi parasti sazāgē divās daļās, lai uz tās varētu novietot jau iepriekš izgatavotas tinumu spoles (3.76. att.). Lentes magnētvalu konstrukcijas ļauj mehanizēt un daļēji automatizēt to izgatavošanas procesu. Turklāt pāreja no stieņa jūgā šādos magnētvaldos notiek pakāpeniski, ar tādu trajektoriju, kura vairāk sakrīt ar plūsmas virzienu. Tādējādi tiek labāk izmantotas auksti velmēta tērauda anizotropās īpašības.

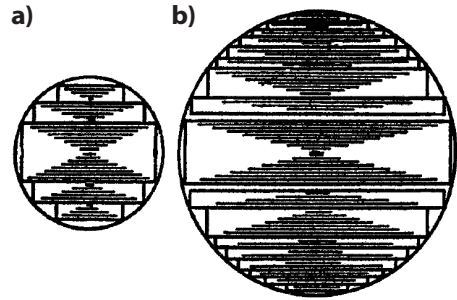
Vidējas un lielas jaudas spēka transformatoros visplašāk izmanto stieņu tipa magnētvadus



3.75. att. Magnētvalu salikšanas shēmas: a – ar taisnleņķa sadurvietām; b – ar slīpām sadurvietām; c – ar kombinētām sadurvietām.



3.76. att. Lentas magnētvasdi: a – stienju tips; b – apvalka tips; c – toroidālais.



3.77. att. Transformatora serdes šķērsgriezums: a – ar mazu pakāpju skaitu; b – ar lielu pakāpju skaitu.

(3.73. att.). Stienju šķērsgriezums šādos magnētvdos veido simetrisku pakāpjuveida figūru, kas iekļaujas aplocē (3.77. att.). Tas izskaidrojams ar to, ka spēka transformatoru tinumiem parasti ir cilindriska forma. Tāpēc arī stienja formu vēlams tuvināt cilindriskai.

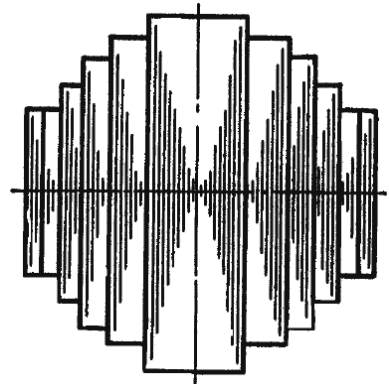
Katru stienja pakāpi veido no vienāda izmēra plāksnēm. Stieņiem ar lielāku diametru veido dzesēšanas kanālus.

Pakāpju skaits stienja šķērsgriezumā, pieaugot tā diametram, arī palielinās. Attiecīgi pieaug arī riņķa aizpildījuma koeficients. Tā, piemēram, trīspakāpju stienim (3.77. att. a) riņķa aizpildīšanas koeficients ir 0,851, bet deviņpakāpju stienim (3.77. att. b) tas ir 0,913. Tomēr jāņem vērā, ka, pieaugot pakāpju skaitam, palielinās arī darbietilpība. Mūsdienu transformatoros stienju pakāpju skaits ir no 5 līdz 16, bet aizpildījuma koeficients attiecīgi no 0,89 līdz 0,92.

Lai palielinātu aizpildījuma koeficienta vērtību un izveidotu stieņus ar praktiski apaļu šķērsgriezumu, dažkārt izmanto radiālo šihtēšanu un plāksnes, kas izliektas evolventas formā. Tomēr šādas formas magnētvasdi plašu lietojumu nav guvuši to lielās darbietilpības dēļ.

Jūga šķērsgriezuma forma mūsdienu stienja tipa transformatoros praktiski ir tāda pati kā stieņiem. Atšķirība ir tā, ka jūgam 2–3 malējās paketes veido ar vienādu platumu (3.78. att.). Tas uzlabo jūga fiksēšanu un presēšanu. Lai samazinātu zudumus un tukšgaitas strāvu, jūga šķērsgriezumu izvēlas par 2–5 % lielāku salīdzinājumā ar stienju šķērsgriezumu. Jāatzīmē, ka sakarā ar to, ka jūga forma nav saistīta ar tinumu formu, nav nepieciešams to tuvināt aplim. Tomēr jāņem vērā, ka iespējama plūsmas nevienmērīga sadalīšanās starp magnētvasda paketēm. Tas palielina tukšgaitas zudumus un strāvu.

Šihtēto magnētvasdu stieņus un jūgus savēlk un fiksē tā, lai to šķērsgriezumā nodrošinātu vajadzīgo formu un izmērus.

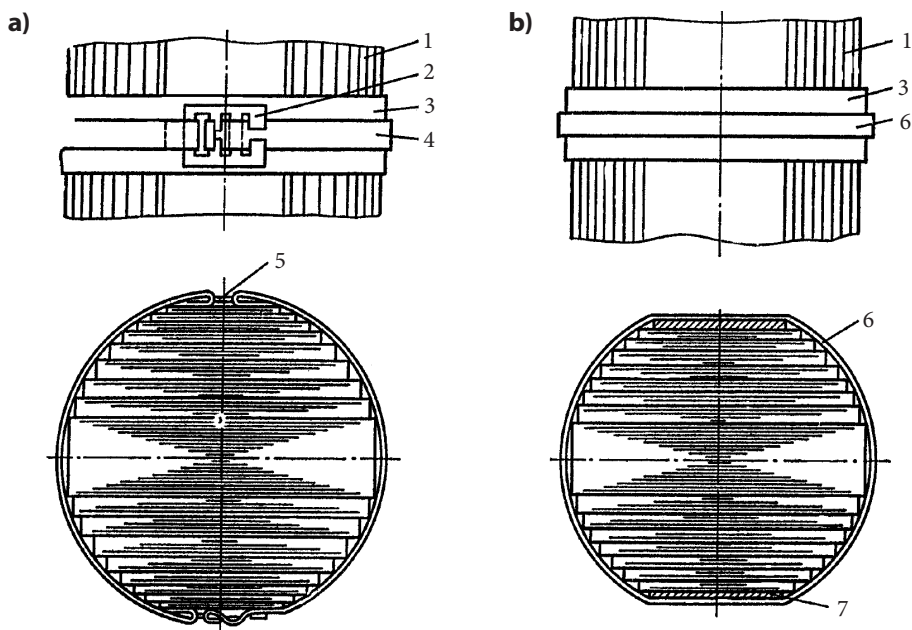


3.78. att. Jūga šķērsgriezums.

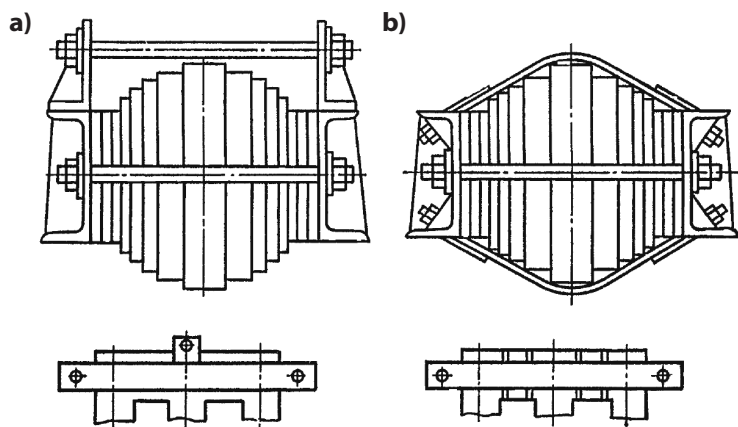
Nelielas jaudas spēka transformatoriem (līdz 630 kV·A) serdes stieņus sapresē ar koka vai nemagnētiska tērauda ķīļiem, kurus iedzen starp iekšējā tinuma izolējošo cilindru un magnētvida stieni.

Lieljaudas transformatoros stieņus presē ar tērauda vai stiklauduma lentes bandāžu, kuru izvietoj 12–24 cm attālumā vienu no otra (3.79. att.).

Jūgus nelielas jaudas spēka transformatoros savēl ar bultskrūvēm, kas atrodas ārpus jūga (3.80. att. a). Lielākas jaudas transformatoros jūgu papildus presē ar tērauda pusbandāžu (3.80. att. b).



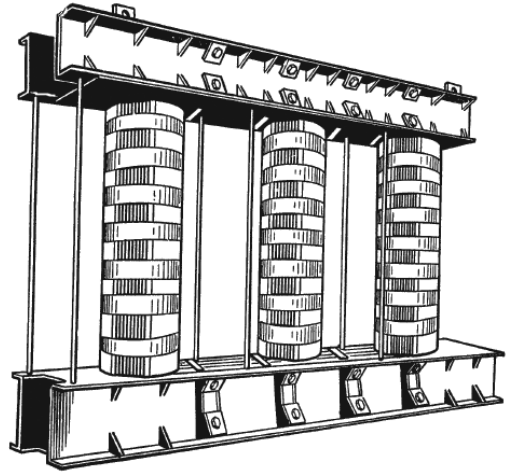
3.79. att. Stieņu presēšana ar tērauda (a) un stiklauduma (b) bandāžu: 1 – stienis; 2 – tērauda aizslēgs; 3 – elektrokartons; 4 – tērauda lente; 5 – izolējošais aizslēgs; 6 – stiklauduma bandāža; 7 – tērauda plāksne.



3.80. att. Jūga presēšana ar bultskrūvēm (a) un tērauda pusbandāžu (b).

Magnētvalu kopā ar visiem mezgliem un detaļām, kas veido vienotu konstrukciju, sauc par transformatora karkasu. Šāds karkass trīsfāžu transformatoram ar jaudu 25 000 kV·A parādīts 3.81. attēlā.

Transformatora tinumu radītā elektriskā lauka darbības rezultātā karkasa metāla daļas uzlādējas. Tā kā karkasa atsevišķo daļu elektriskie lādiņi nav viēnādi, rodas potenciālu starpība, kas var izraisīt bīstamas izlādes. Tāpēc visas transformatora karkasa daļas, kas izgatavotas no metāla, jāiezemē.



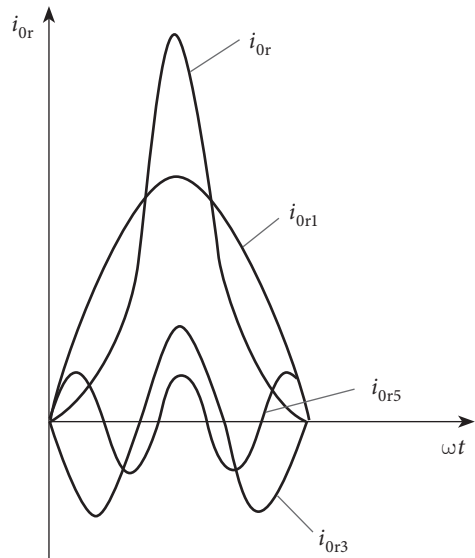
3.81. att. Trīsfāžu transformatora karkass.

### 3.9.3. Trīsfāžu transformatoru serdes magnetizēšanas īpatnības

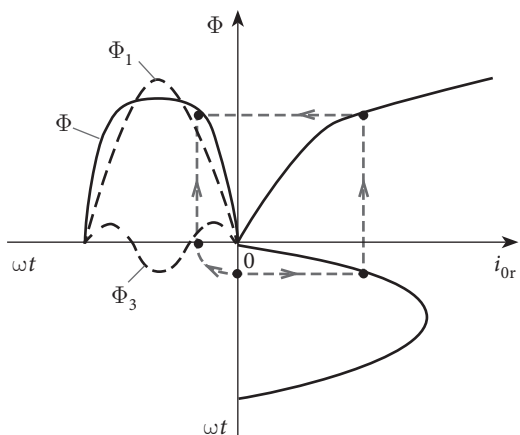
Apskatot vienfāzes transformatora tukšgaitas režīmu (sk. 3.2. apakšnodaļu), tika noskaidrots, ka sinusoidālam spriegumam atbilst sinusoidāla magnētiskā plūsma un EDS, bet magnetizēšanas strāva  $i_{0r}$  sakarā ar magnetizēšanas līknes nelineāro raksturu ir nesinusoidāla.

Nesinusoidāla magnetizēšanas strāva  $i_{0r}$  vispārīgā gadījumā bez pamatharmonikas satur visas nepāra harmonikas (3.82. att.). Vislielāko ietekmi rada trešā harmonika, jo tās amplitūda ir vislielākā. Dažos gadījumos transformatoros ar piesātinātām magnētiskām sistēmām tā var sasniegt 50–60 % no pirmās harmonikas amplitūdas. Turpmāk, apskatot trīsfāžu transformatoru magnetizēšanas īpatnības, neņemsim vērā harmonikas, kas augstākas par trešo, jo to amplitūdas ir samērā mazas un tās no praktiskā viedokļa nevar izraisīt vērā ņemamu interesi.

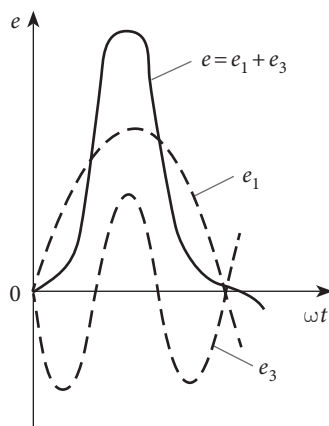
Trīsfāžu transformatoros magnetizēšanas strāvas pirmās harmonikas nobīdītas fāzē par  $120^\circ$ , bet trešās harmonikas – par  $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$ , t. i., sakrīt fāzē. Tāpēc atsevišķu slēgumu tinumos strāvas trešās harmonikas nevar eksistēt.



3.82. att. Magnetizēšanas strāvas sadalīšana pamata un augstākās harmonikās.



3.83. att. Plūsmas līknes konstruēšana, ja magnetizēšanas strāva ir sinusoidāla.



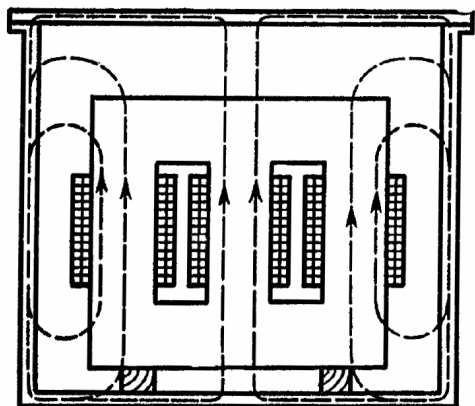
3.84. att. Fāzes EDS līkne transformatora trīsfāžu grupai ar tinumu slēgumu Y/Y.

**Trīsfāžu transformatoros ar tinumu slēgumu Y/Y vai Z/Y** magnetizēšanas strāvas trešās harmonikas nevar izveidoties, jo tām nav noslēgšanās ceļa. Šajā gadījumā magnetizēšanas strāva ir sinusoidāla, bet magnētiskā plūsma ir nesinusoidāla, un trešās harmonikas parādās plūsmas līknē (3.83. att.).

Sevišķi izteikta magnētiskās plūsmas trešā harmonika ir transformatoru trīsfāžu grupai un apvalka tipa transformatoros, jo šī plūsma noslēdzas pa ceļu ar mazu magnētisko pretestību, t. i., pa to pašu ceļu, kur plūsmas pirmā harmonika. Plūsmas trešā harmonika var sastādīt 10–20 % no pirmās harmonikas. Ņemot vērā, ka plūsmas trešā harmonika mainās ar trīskāršu frekvenci, šīs plūsmas inducētā EDS amplitūdas vērtība var sasniegt 40–60 % no EDS pirmās harmonikas amplitūdas.

Tādējādi transformatora EDS un fāžu spriegumi ir stipri kropļoti. EDS amplitūdas vērtība var pieaugt par 30–60 % (3.84. att.), apdraudot izolāciju. Līnijas spriegumi, kas

vienādi ar fāžu spriegumu starpību, trešās harmonikas nesatur, jo šīs harmonikas visu fāžu tinumos sakrīt fāzē.



3.85. att. Magnētiskās plūsmas trešās harmonikas trīsfāžu stieņu tipa transformatorā.

Trīsfāžu stieņu tipa transformatoros plūsmas trešās harmonikas nevar noslēgties pa magnētvaudu, jo tām visos trijos stieņos ir vienādi virzieni un iespēja noslēgties tikai gaisā, tvertnes sienās un citās konstruktīvajās daļās (3.85. att.), t. i., pa ceļiem ar lielu magnētisko pretestību. Tāpēc magnētiskās plūsmas trešā harmonika šajā gadījumā ir maza. Tomēr plūsmas trešā harmonika stieņu tipa transformatoros izraisa virpuļstrāvu papildzudumus tvertnē un citās konstruk-

tīvajās detaļās. Tā kā plūsmas trešā harmonika mainās ar trīskāršu frekvenci, šādi papildzudumi var būt relatīvi lieli.

Jāatzīmē, ka shēmās  $Y_0/Y$  un  $Z_0/Y$  magnetizēšanas strāvas trešās harmonikas noslēdzas pa nullvadu. Tāpēc magnetizēšanas strāvas visās fāzēs ir nesinusoidālas, bet plūsmas un EDS – sinusoidāli.

**Trīsfāžu transformatoros ar tinumu slēgumu  $\Delta/Y$  un  $\Delta/Z$**  magnetizēšanas strāvas trešās harmonikas var noslēgties tinumā, kas slēgts trīsstūrī. Tātad tukšgaitas strāva ir nesinusoidāla, bet magnētiskā plūsma un fāžu EDS – sinusoidāli. No šejienes var secināt, ka minētajiem tinumu slēgumiem ir priekšrocības, jo nevēlamās parādības, kuras izraisa nesinusoidāla magnētiskā plūsma, šeit nav.

**Trīsfāžu transformatoros ar tinumu slēgumu  $Y/\Delta$  vai  $Z/\Delta$**  tukšgaitas strāvas trešā harmonika nevar izveidoties. Tāpēc, tāpat kā slēgumos  $Y/Y$  un  $Z/Y$ , trešās harmonikas satur magnētiskā plūsma. Tomēr plūsmas trešās harmonikas ir mazas un transformatora darbību praktiski neietekmē, jo plūsmas trešā harmonika inducē sekundārajā tinumā EDS, kas atpaliek no plūsmas fāzē par  $90^\circ$ . Šie EDS visās fāzēs vērsti vienā virzienā un to kopīgās darbības rezultātā noslēgtajā sekundārajā tinuma kontūrā plūst strāva. Tā kā transformatora tinumam pārsvarā ir induktīva pretestība, strāva atpaliek fāzē no EDS par leņķi, kas tuvs  $90^\circ$ . Tādējādi šīs strāvas radītā plūsma gandrīz pilnībā kompensē primāro plūsmu. Tāpēc rezultējošā trešās harmonikas plūsma transformatora serdē ir maza un EDS un fāžu spriegumi ir praktiski sinusoidāli.

Ņemot vērā iepriekš izklāstīto, var secināt, ka slēgumos  $Y/Y$  vai  $Z/Y$  transformatorā rodas nevēlamas parādības. Tāpēc šādus slēgumus lieljaudas transformatoros parasti nelieto. Ja tomēr rodas nepieciešamība izmantot minētos slēgumus, tad transformatorā izveido terciāro tinumu bez izvadiem, kuru slēdz trīsstūrī. Šā tinuma vadu šķērsriezumu parasti aprēķina tikai trešās harmonikas strāvām.

### 3.9.4. Transformatora magnētiskās ķēdes aprēķins

Transformatora projektēšanas laikā, lai noteiktu tukšgaitas strāvu un ekvivalentās shēmas magnetizēšanas zara parametrus, jāveic tā magnētiskās ķēdes aprēķins. Tas ļauj atrast sakarību starp transformatora galveno magnētisko plūsmu un magnetizēšanas strāvu.

Magnētiskās ķēdes aprēķinu veic saskaņā ar pilnās strāvas likumu:

$$\oint H dl = i_{0r} W_1.$$

Vienfāzes transformatora primārā tinuma magnetizējošo spēku

$$F_0 = \sqrt{2} I_{0r} W_1,$$

kas nepieciešams plūsmas radīšanai serdē (3.86. a att.), nosaka saskaņā ar izteiksmi:

$$\sqrt{2} I_{0r} W_1 = 2H_s l_s + 2H_j l_j + H_\delta n_\delta \delta, \quad (3.187.)$$

kur  $H_s$ ,  $H_j$ ,  $H_\delta$  – magnētiskā lauka intensitāte attiecīgi stienī, jūgā un spraugā;

$l_s, l_j$  – vidējās magnētiskās spēka līnijas garums attiecīgi stienī un jūgā;  
 $\delta$  – nemagnētiska sprauga starp stieņiem un jūgiem (šihētā magnētavadā  
 $\delta = 0,035 - 0,05$  mm);

$n_\delta$  – nemagnētisko spraugu skaits magnētavadā starp stieņiem un jūgiem  
 (vienfāzes transformatoros  $n_\delta = 4$ , trīsfāžu transformatoros  $n_\delta = 7$ ).

Lauka intensitātes  $H_s$  un  $H_j$  vērtības atrod no attiecīgās markas tērauda magnetizēšanas līknēm, bet indukciju stieņos un jūgos aprēķina pēc formulas

$$B_{s(j)} = \frac{U_{1f}}{4,44 f W_1 S_{s(j)}},$$

kur  $S_s$  un  $S_j$  – stieņa un jūga šķērsriezuma laukums.

Magnētiskā lauka intensitāti spraugās  $H_\delta$  aprēķina, izejot no indukcijas  $B_\delta$  un gaisa magnētiskās vadāmības  $\mu_\delta$ . Parasti pieņem  $B_\delta = B_s$  un  $\mu_\delta = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Atrisinot (3.187.) attiecībā pret  $I_{0r}$ , iegūstam:

$$I_{0r} = \frac{2H_s l_s + 2H_j l_j + H_\delta n_\delta \delta}{\sqrt{2} W_1}. \quad (3.188.)$$

Trīsfāžu transformatorā vispirms nosaka magnetizēšanas strāvu malējām fāzēm, pieņemot  $n_\delta = 3$ :

$$I_{0rm} = \frac{H_s l_s + 2H_j l_j + H_\delta n_\delta \delta}{\sqrt{2} W_1}, \quad (3.189.)$$

bet pēc tam vidējai fāzei ( $n_\delta = 1$ )

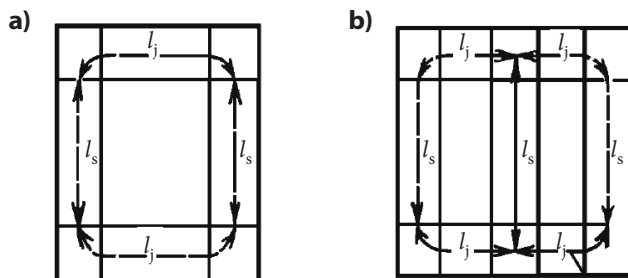
$$I_{0rv} = \frac{H_s l_s + H_\delta n_\delta \delta}{\sqrt{2} W_1}. \quad (3.190.)$$

Magnetizēšanas strāvas aprēķinu vērtību nosaka kā vidējo aritmētisko:

$$I_{0r} = \frac{2I_{0rm} + I_{0rv}}{3}. \quad (3.191.)$$

Jāatzīmē, ka strāvu  $I_{0r}$  vēl var noteikt, zinot reaktīvo jaudu  $Q_0 = m U_{1f} I_{0r}$ , kas nepieciešama transformatora magnetizēšanai. Šo jaudu var aprēķināt no formulas:

$$Q_0 = \sum q_t G_t + \sum q_\delta n_\delta S_\delta. \quad (3.192.)$$



3.86. att. Vienfāzes (a) un trīsfāžu (b) transformatora magnētiskā ķēde.



kur  $q_t$  un  $q_\delta$  – attiecīgi īpatnējā tērauda un nemagnētisko spraugu magnetizēšanas jauda;

$G_t$  – magnētvida posma tērauda masa;

$S_\delta$  – nemagnētiskās spraugas laukums.

Tukšgaitas strāvas aktīvo komponenti  $I_{0a}$  nosaka kā

$$I_{0a} = \frac{P_0}{mU_{1f}}, \quad (3.193.)$$

kur  $P_0 = \sum p_t G_t$  – transformatora tukšgaitas zudumi, kurus aprēķina, zinot īpatnējos zudumus  $p_t$ , katram magnētvida posmam.

Transformatora tukšgaitas strāva ir:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}. \quad (3.194.)$$

Ekvivalentās shēmas magnetizēšanas zara parametrus aprēķina šādi:

$$Z_m = \frac{U_{1f}}{I_0}; \quad R_m = \frac{P_0}{mI_0^2}; \quad X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_m^2}.$$

## 3.10. TRANSFORMATORU TINUMI

### 3.10.1. Tinumu tipi un konstrukcijas

Tinumi ir transformatora svarīgākais elements. No izmaksu viedokļa tie veido aptuveni pusi no visa transformatora izmaksām. Transformatoru kalpošanas ilgumu gandrīz vienmēr nosaka tieši tinumu kalpošanas laiks. Tinumi darbojas smagos apstākļos. Tāpēc tiem tiek izvirzītas augstas prasības attiecībā uz elektrisko, mehānisko un termisko izturību. Īpaša uzmanība, konstruējot tinumus, jāpievērš to izolācijai un tehnoloģiskumam.

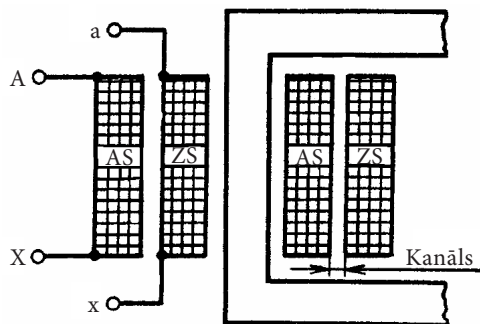
Spēka transformatoru tinumu konstruktīvais izveidojums atkarībā no to sprieguma un jaudas var būt dažāds. Konstrukcijas izvēli būtiski ietekmē vijumu skaits, to šķēsgriezuma laukums un nominālais spriegums AS tinumam.

Tinuma vadu, kurš vienreiz aptver magnētvida stieni un kurā magnētiskais lauks inducē EDS, sauc par vijumu. Vijums ir tinuma pamatelements. Tajā var būt viens vai vairāki paralēlie vadi.

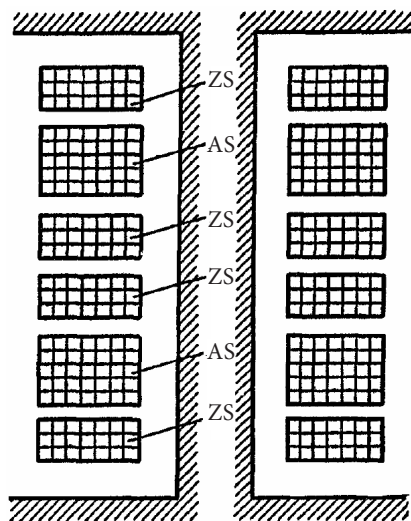
Vijumi, kas saslēgti vienotā elektriskā ķēdē un kuros summējas inducētie EDS, veido transformatora tinumu. Tinuma izolācijas detaļas pasargā vijumus no elektriskas caursīšanas un neļauj elektromagnētiskajiem spēkiem tos deformēt vai pārvietot.

Atkarībā no tinumu novietojuma uz stieņiem izšķir koncentriskos un jauktos tinumus. Koncentriskos tinumus izgatavo cilindru formā, kurus novieto uz stieņiem koncentriski vienu otrā (3.87. att.). Jauktā tinuma gadījumā AS un ZS tinumi mainās vietām (3.88. att.). Šo tinumu sadala simetriskās grupās. Katras grupas vidū atrodas AS tinuma daļa un tai abās pusēs ZS tinuma daļas. No minētajām grupām lielu strāvu gadījumā var viegli izveidot paralēlos zarus.





3.87. att. Koncentriskie tinumi.



3.88. att. Jauktie tinumi.

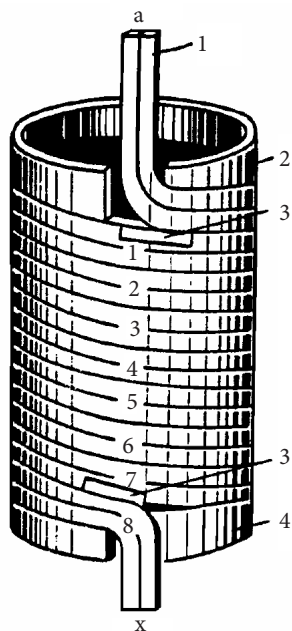
Jauktos tinumus vairāk izmanto speciālajos transformatoros, piemēram, elektrokrāšņu barošanai. Vairāk izplatīti ir vienslāņu un daudzslāņu koncentriskie tinumi. Parasti koncentriskajos tinumos tuvāk stienim novieto ZS tinumu.

Atkarībā no uztīšanas veida un konstrukcijas koncentriskos tinumus iedala spoļu un skrūves tinumos. Eksistē arī lokšņu un kopņu tinumi, ko izmanto speciālajos transformatoros.

Vijumu kopu, kas uztīta uz cilindriskas virsmas, sauc par tinuma slāni. Vienā slānī var būt no viena līdz dažiem desmitiem vijumu, bet vijumā līdz 6–8 un vairāk paralēlo vadu.

Tinumu, kurā vijumi vienā slānī novietoti uz cilindriskas virsmas cits pie cita bez intervāliem, sauc par vienkāršo cilindrisko tinumu (3.89. att.), bet tādu, kurā vijumi novietoti divos vai vairāk slāņos – par divslāņu vai daudzslāņu cilindrisko tinumu (3.90. att.).

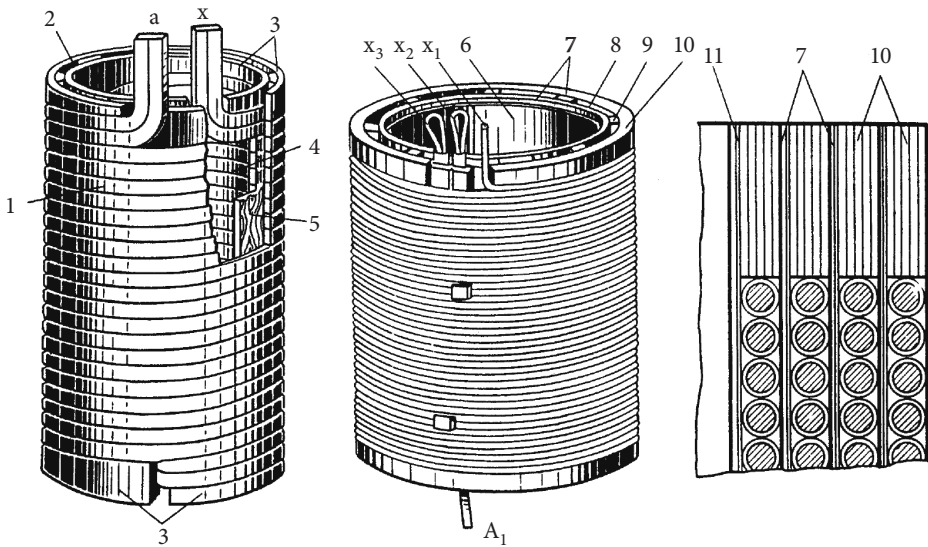
Pāreja no viena slāņa otrā šādos tinumos notiek bez vada pārtraukšanas, bet uztīšanas virziens mainās uz pretējo. Divslāņu tinumu parasti uztin no taisnstūra vada. Lai piešķirtu tinumam cilindra formu, tā galos malējiem vijumiem piestiprina bakelīta ķīļveida gredzenus. Ķīļi pasargā tinumu no mehāniskiem bojājumiem un kalpo par atbalsta elementu tinumam. Starp slāņiem atrodas elektrokartona izolācija vai starplikas, kas veido dzesējošo kanālu.



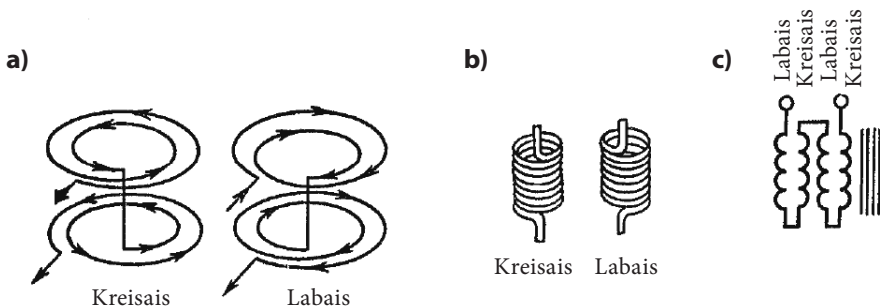
3.89. att. Vienkāršais cilindriskais tinums: 1 – astoņu vijumu tinums; 2, 4 – izlīdzinošie gredzeni; 3 – izolācijas starplika.

Transformatoros ar spriegumu līdz 690 V un jaudu līdz 630 kV·A izmanto vienslāņa vai divslāņu cilindriskos tinumus. Daudzslāņu tinumus parasti uztin no apaļa šķērs-griezuma vadiem. Vadus novieto cieši citu pie cita. Pirmo tinuma slāni uztin uz papīra bakelīta cilindra, bet nākamos slāņus atdala ar kabelpapīru. Lai uzlabotu dzesēšanas apstākļus starp atsevišķiem slāņiem, ass virzienā izveido kanālus. Šādus tinumus izmanto transformatoros ar spriegumu līdz 35 kV un jaudu līdz 400 kV·A. Līdzīgi kā vītnei izšķir tinumus ar labo un kreiso uztīšanas virzienu. Tas attiecas uz cilindriskiem, spoļu un skrūves tinumiem. Daudzslāņu tinumos par uztīšanas virzienu pieņem pirmā iekšējā slāņa virzienu. Uztīšanas virziens nosaka EDS virzienu, kas inducējas spolēs. Tāpēc arī spolēm izšķir labo un kreiso uztīšanas virzienu (3.91. att.).

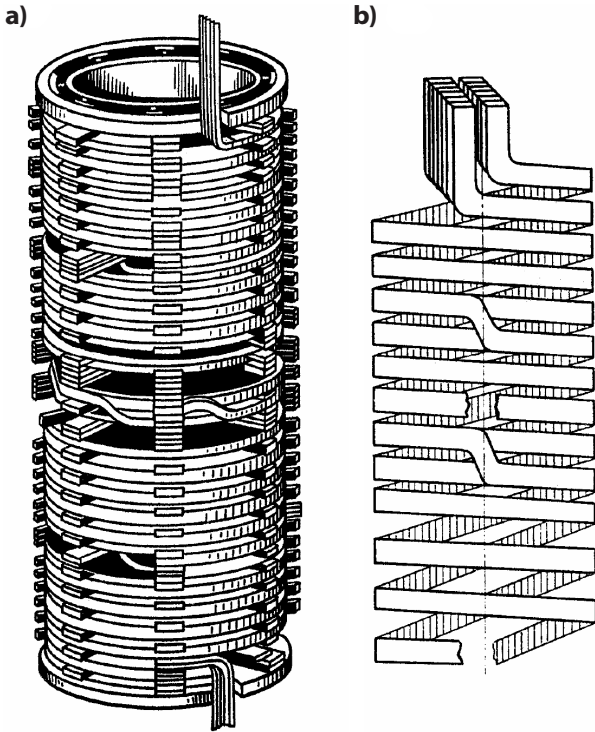
Skrūves tinumi var būt viengājiens (3.92. att. a) un divgājiens (3.92. att. b). Viengājiens tinumā vijumi seko cits citam pa vītnes līniju, nepieciešamības gadījumā veidojot kanālus



3.90. att. Daudzslāņu cilindriskais tinums: 1, 4 – vijumi; 2, 5 – līstes; 3 – izlīdzinošais gredzens; 6 – bakelīta papīra cilindrs; 7 – starpslāņu izolācija; 8 – kanāls; 9 – līste; 10 – izolējošais gredzens; 11 – bakelīta cilindrs;  $x_1, x_2, x_3$  – sprieguma regulēšanas atzari.



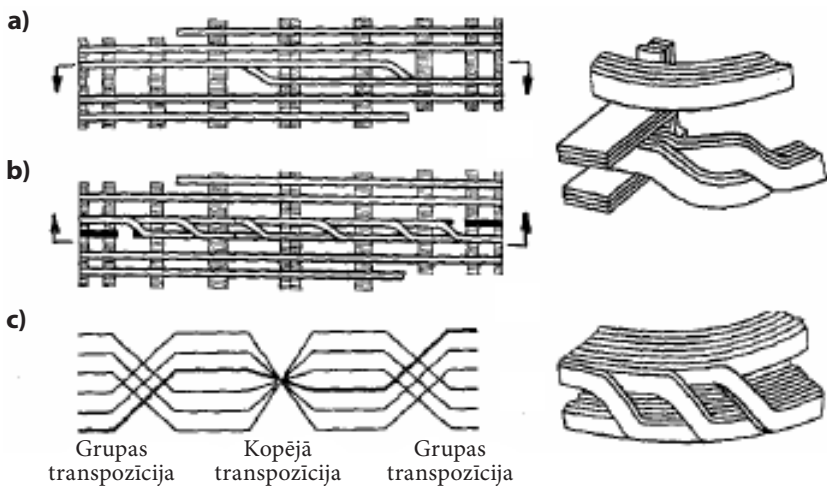
3.91. att. Tinumu uztīšanas virzieni: a – spoļu tinumam; b – vienslāņa cilindriskam tinumam; c – daudzslāņu cilindriskam tinumam.



3.92. att. Skrūves tinumi: a – viengājienu ar vienu vadu vijumā; b – divgājienu.

starp vijumiem. Vijumā var būt viens vai vairāki paralēlie vadi, kas radiālā virzienā novietoti cieši viens pie otra (3.92. a att.).

Divgājienu (daudzgājienu) skrūves tinums sastāv no diviem (vai vairākiem) viengājienu tinumiem. Kanālus starp viengājienu tinumiem un starp vijumiem izveido ar starpliku un latiņu palīdzību. Skrūves tinuma vijums sastāv no daudziem paralēliem vadiem, kas novietojas koncentriski dažādā attālumā no ass. Tāpēc tuvāk asij novietotie vadi ir īsāki, bet tālāk novietotie – garāki. Šī garumu atšķirība, kā arī dažāda novietojums izkļiedes laukos nosaka dažādas to aktīvās un induktīvās pretestības. Savukārt dažādās pretestības izraisa strāvu nevienmērīgu sadalījumu starp paralēliem vadiem, pārslodžot vienus un nepietiekami noslogojot citus. Lai izlīdzinātu



3.93. att. Viengājienu tinuma transpozīcija: a – grupas; b – kopējā; c – transpozīcijas shēma.

strāvu sadalījumu un samazinātu papildzudumus skrūves tinumos, paralēlos vadus maina vietām, t. i., veic to transpozīciju.

Vienģājiena tinumā ar paralēlo vadu skaitu vijumā līdz 12 parasti izmanto vairāku transpozīcijas metožu kombināciju: divas reizes grupas transpozīciju, kad vadus vijumā sadala divās daļās un maina vietām, un kopējo, kad mainās visu vadu novietojums (3.93. att.). Ja vienģājiena tinumā paralēlo vadu skaits vijumā ir lielāks par 12, lieto sarežģītākas transpozīcijas metodes.

Divģājienu skrūves tinumā lieto vienmērīgo transpozīciju, kad visi vadi novietojas vienādi attiecībā pret izkliedes lauku garenass virzienā. Arī garums visiem paralēliem vadiem iznāk praktiski vienāds.

Nepārtrauktie spoļu (spirāles) tinumi sastāv no diskveida spolēm, kas uztītas pa spirāli. Spoles savstarpēji savienotas bez lodēšanas. Aksiālā virzienā tās cita no citas atdalītas ar kanāliem (3.94. att.). Šādus tinumus izmanto gan AS, gan ZS pusē, jo tiem ir augsta mehāniskā izturība un drošuma pakāpe.

Spoļu skaits nepārtrauktā tinumā ar retiem izņēmumiem parasti ir pārskaitlis. Turklāt tinuma sākuma un beigu spaiļes var būt novietotas gan tinuma ārpusē, gan iekšpusē (3.94. att. b, c). Nepārskaitļa spoļu skaitu izmanto tikai tad, kad nepieciešams vienu spaili izvadīt tinuma ārpusē, bet otru iekšpusē.

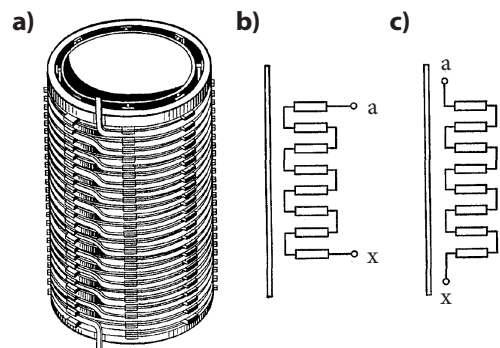
Gadījumos, kad no montāžas vai izolācijas viedokļa ir grūti izveidot nepārtrauktu tinumu, lieto spoļu diskstinumu, kas sastāv no atsevišķi uztītu dubultspoļu komplekta. Tinumu veido kā diskstinumu, ja spolēm ir papildizolācija, kas aptver visus spoles vijumus.

Vijumi, kas kalpo sprieguma regulēšanai AS tinumos, jānovieto tā, lai atzari atrastos pārejas vietās no vienas spoles otrā, nevis vijuma vidū. Tāpat atsevišķās spolēs novieto ieejas vijumus ar pastiprinātu izolāciju. Pastiprināta izolācija no kabelpapīra vai lakauduma var būt atsevišķiem vadiem, kā arī visai spolei (sk. 3.11. apakšnodaļu).

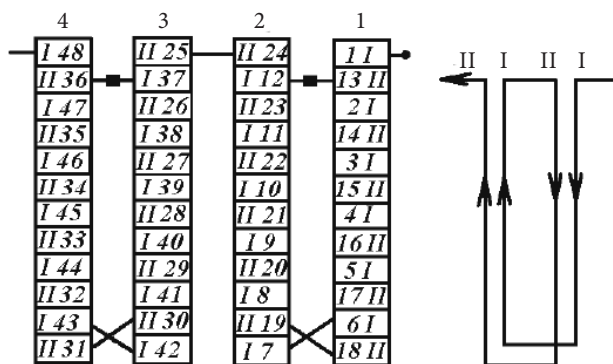
Novietojot vijumus spolē, jācenšas panākt, lai dažādu tipu spoļu radiālie izmēri būtu aptuveni vienādi. Ja to nav iespējams panākt, vienkārši pārvietojot vijumus spolē, izmanto elektrokartona starplikas.

Transformatoros ar spriegumu 220 kV un augstāku lieto savītos tinumus. Tāda tinuma vijumu savienojumu shēma parādīta 3.95. attēlā. Savītiem nepārtrauktiem tinumiem ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar parastiem nepārtrauktiem tinumiem, jo blakus spoļu vijumu savīšana nodrošina vienmērīgu kapacitīvā sprieguma sadalījumu. Šī tinuma uztīšana principā ir tāda pati kā parastam nepārtrauktam tinumam. Atšķirība ir tā, ka uztīšana notiek ar diviem vadiem un vienā apgriezienā tiek uztīti divi vijumi.

Ir izveidota jauna cilindrisko tinumu



3.94. att. Nepārtrauktais tinums: a – kopskats; b, c – tinuma spaiļu novietojums.

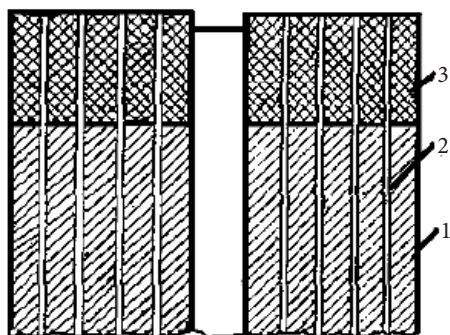


3.95. att. Savitā tinuma shēma: I, II – savītās spoles; 1, 2–12 – I spoles vijumi; 13, 14–24 – II spoles vijumi.

modifikācija – tinumi no neizolētas alumīnija folijas (3.96. att.). Tādus tinumus izmanto transformatoros ar jaudu no 25 līdz 630 kV·A. Folijas lentes platums ir vienāds ar spoles augstumu vai visa tinuma augstumu transformatoros ar spriegumu līdz 1 kV. Izolāciju starp vijumiem šajā gadījumā veido no kondensatorpapīra vai kabelpapīra. Folijas lenti kopā ar papīra lenti uztin uz cilindriskā veidņa. Pēc uztīšanas tinumu noņem no veidņa. Papīra slāni, kas 3–4 mm augstumā izvirzīts virs folijas, piesūcina ar epoksīdsveķiem un ieloka, veidojot tinuma galos monolītu izolācijas slāni.

Alumīnija folijas tinumus ir viegli uztīt, tie labi iztur mehāniskos triecienus transformatora īsslēgumu laikā, tiem ir augsta siltumvadāmība aksiālā un radiālā virzienā. Pēdējais apstākļi nodrošina vienmērīgāku siltuma sadalījumu tinumā un pazemina viskarstākā punkta temperatūru salīdzinājumā ar tinumiem no izolēta vada.

Alumīnija folijas tinumu galvenais trūkums saistīts ar pašas folijas augstām izmaksām. Tās pārsniedz izolēta alumīnija vada izmaksas aptuveni par 40 %. Turklāt rodas grūtības 10 un 35 kV AS tinumu izgatavošanā, ja tie ir sadalīti spolēs, kuras savā starpā savieno ar lodēšanu. Tāpat grūti izveidot atzarus, ja folijas biezums mazāks par 0,1 mm. Lai palielinātu pirmā un pēdējā vijuma mehānisko stiprību, tiem ar punktveida metināšanu piestiprina kopni. Minētās problēmas AS tinuma izgatavošanā atsevišķos gadījumos noved pie tā, ka ZS tinumu izgatavo no alumīnija folijas, bet AS tinumu no izolētiem vadiem.



3.96. att. Daudzslāņu cilindriskais tinums no alumīnija folijas: 1 – folija; 2 – starpslāņu izolācija; 3 – gala izolācija.

Mūsdienu apstākļos tiek izmantotas šādas alumīnija folijas tinumu konstrukcijas:

- vienas spoles tinums, ko izmanto kā ZS tinumu, kurā folijas platums vienāds ar spoles augstumu. Šī konstrukcija nodrošina magnētvasda loga maksimālu aizpildījumu. Tinumam ir minimāls atzaru un starpspoļu

savienojumu skaits, tam maza darbietilpība izgatavošanā;

- vairāku spoļu tinums, ko izmanto kā AS tinumu. Tas parasti sastāv no četrām vai sešām spolēm, kas cita no citas atdalītas ar kanāliem.

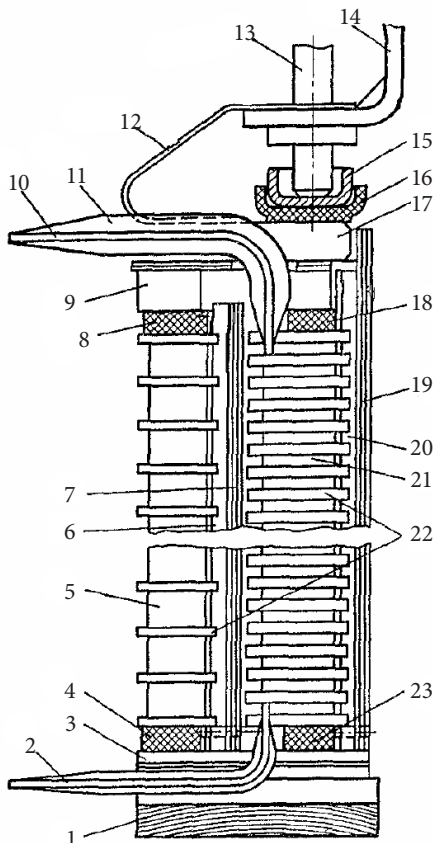
### 3.10.2. Izolācijas galvenie mezgli un detaļas

Atkarībā no sprieguma, jaudas, sprieguma regulēšanas paņēmiena un citām specifiskām īpatnībām transformatoru izolācijas konstrukcijas ir dažādas (sk. 3.11. apakšnodaļu). Tomēr lielākajā daļā transformatoru to izolācijas galvenie mezgli un detaļas ir vienādas. Apskatīsim tādas izolācijas detaļas kā cilindrus, līstes vai latas, distances starplikas, paplāksnes un atbalsta gredzenus, izmantojot par piemēru 1600 kV-A jaudas transformatoru (3.97. att.).

Izolācijas cilindru pamatuzdevums ir radīt izolācijas barjeru starp tinumiem vai starp tinumu un magnēt vadu. Cilindri var būt cietie (papīra, bakelīta), kas reizē kalpo par tinuma karkasu, vai mīkstie, kas uztīti no elektrokartona.

Līstes vai latiņas kalpo vertikālo kanālu izveidošanai starp cilindru un tinuma vijumiem. Uz tām novieto distances starplikas. Līstes parādītas 3.98. attēlā d.

Distanču starplikas (3.98. att. g) kalpo horizontālo kanālu izveidošanai starp vijumiem



3.97. att. Izolācijas izveidojums transformatorā ar spriegumu 35 kV un jaudu 1600 kV-A:

- 1 – izlīdzinošā izolācija;
- 2, 10 – ZS sprieguma apakšējais un augšējais izvads;
- 3, 9 – apakšējā un augšējā jūga izolācija;
- 4, 8 – AS tinuma apakšējais un augšējais atbalsta gredzens;
- 5, 21 – AS un ZS tinumi;
- 6 – AS tinuma atbalsta ķīlis (liste);
- 7, 19 – izolācijas cilindri;
- 11 – ZS tinuma augšējā izvada papīra izolācija;
- 12 – zemējuma lente; 13 – presējošā skrūve;
- 14 – jūga sija;
- 15, 16 – tērauda un izolācijas ietveres;
- 17 – presējošais gredzens;
- 18, 23 – ZS tinuma augšējais un apakšējais atbalsta gredzens;
- 20 – ķīlis (liste);
- 22 – starplikas.

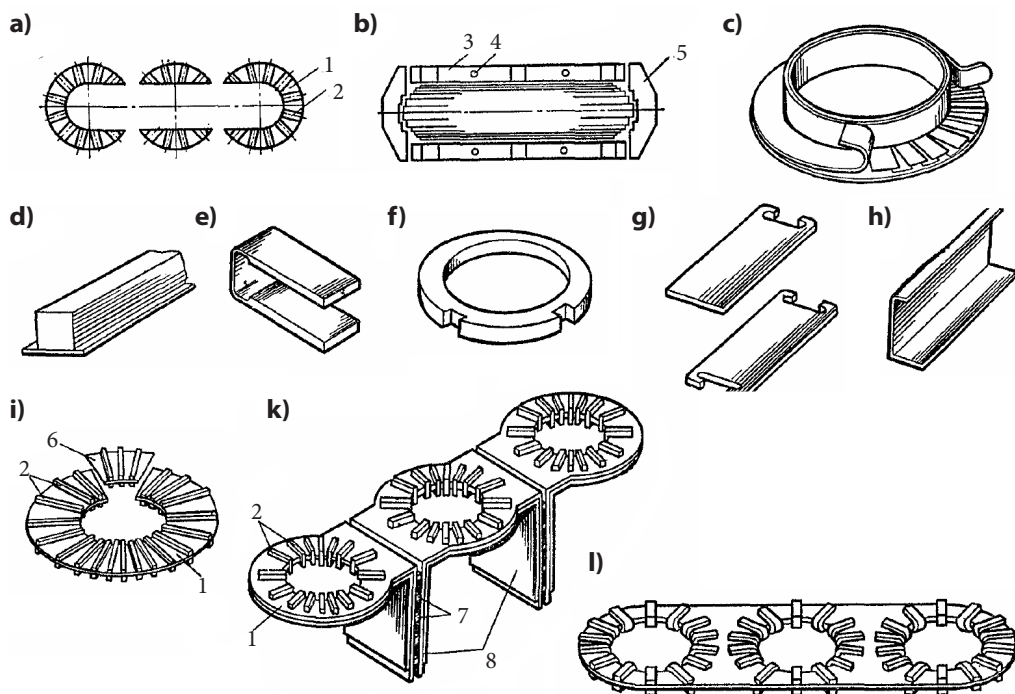


un spolēm. Starplikas veido to atbalsta laukumu, caur kuru tiek uztverti spēki un triecieni, kas iedarbojas uz tinumu. Tās uztver jūtamu mehānisko slodzi, īpaši īsslēgumu laikā. Starpliku izveido no atsevišķām 0,5–3 mm biežām plāksnītēm. To galos tiek štancētas speciālas rievas sastiprināšanai ar līstēm. Plaši izmanto starplikas ar divām rievām. Tādā gadījumā izveido to papildstiprinājumu ar ārējām līstēm.

Dažos tinumos, piemēram, jauktajos, līstes izmantot ir grūti. Tādā gadījumā lieto speciālas starpspoļu starplikas (3.99. att.). Aksiālo kanālu starp tinumu un cilindru izveido speciālas starplikas ar caurejošām rievām. Šīs starplikas un starplikas, kas veido radiālos kanālus starp spolēm, tiek cauršūtas ar kartona plāksnīti, kuru noliec starpspoļu telpā.

Paplāksnes izmanto kā gala izolācijas elementu vai starpliku vietā starp spolēm. 3.99. attēlā parādītajā gadījumā kanāli starp spolēm mijas ar elektrokartona paplāksnēm. Paplāksnes parasti veido divdaļīgas.

Tinumu gala izolācijas detaļas kalpo to izolācijas nodrošināšanai no jūga, jūga sijām un tērauda presējošiem gredzeniem. Gala izolāciju veido izlīdzinošā un jūga izolācija. Jūga izolācija (sk. 3.97. att.) izolē tinumus no magnētva da jūgiem. 6–110 kV transformatoros jūga izolāciju veido 2–3 mm biezas elektrokartona paplāksnes ar pielīmētām vai no abām pusēm piekniedētām starplikām. Starplikas veido kanālus, pa kuriem eļļa piekļūst



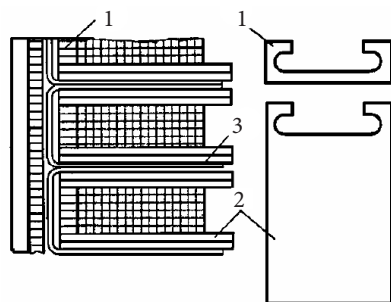
3.98. att. Spēka transformatora izolācijas detaļas: a, b – elektrokartona un koka izlīdzinošā izolācija; c – lenča paplāksne; d – ķīlis (līste); e – dubultstarplika; f – atbalsta gredzens; g – spoļu starplika; h – barjera; i – jūga izolācija; k, l – augšējā un apakšējā jūga izolācija; 1 – elektrokartona paplāksne; 2, 7 – presētā elektrokartona starplikas; 3, 5 – koka detaļas; 4 – urbumi presējošām bultskrūvēm; 6 – jūga izolācijas segments; 8 – starpfāžu barjera.

tinumiem. Jūga izolācijas starpliku skaits un izvietojums atbilst starpliku skaitam un izvietojumam tinumā. Tinuma galu ērtākai izvadīšanai caur jūga izolāciju tajā izveido izgriezumu vai izņemamu segmentu (sk. 3.98. att. i).

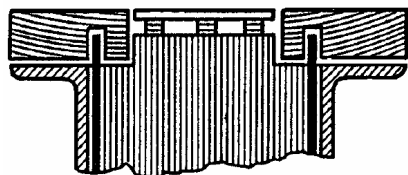
Izlīdzinošā izolācija kalpo jūga sijas un jūga virsmu izlīdzināšanai. 3.98. attēlā b parādītājā gadījumā tā izgatavota no koka. Transformatoros ar jaudu virs 4000 kV·A izlīdzinošo izolāciju izgatavo no elektrokartona segmentu vai pusgredzenu veidā ar piekniedētām starplikām (sk. 3.98. att. a).

Nelielas jaudas spēka transformatoros (līdz 250 kV·A un spriegumu līdz 15 kV) izolācijas spraugas izmēri starp tinumu un jūgu ir nelieli. Gala izolāciju var izveidot no samērā vienkāršas formas koka vai elektrokartona detaļām, kas zināmā mērā apvieno jūga un izlīdzinošo izolāciju (3.100. att.).

Speciālas formas paplāksnes (3.98. att. c) apgrūtina daļējās izlādes veidošanos gan radiālā, gan jūga virzienā. Pēdējā laikā izstrādātas to izgatavošanas tehnoloģijas, atlejšot no celulozes.



3.99. att. Tinums ar speciālām starplikām bez listēm: 1 – rieva; 2 – radiālie kanāli; 3 – kartona plāksnīte.



3.100. att. Izolācijas izveidojums transformatorā ar spriegumu 6 kV un jaudu 160 kV·A.

### 3.10.3. Tinumu un izolācijas materiāli

Transformatora tinumus izgatavo no vara un alumīnija vadiem vai alumīnija folijas.

Elektrotehniskā vara īpatnējā elektriskā pretestība 20 °C temperatūrā ir 0,0175 m $\Omega$ ·m. Vara stiepli, kas izgatavota no mīksta apdedzināta vara, lieto tinumu veidošanai, bet no cieta vara – kopņu, strāvu vadošu stieņu un citu mehāniski izturīgu vadu izgatavošanai.

Alumīnija mehāniskās un elektriskās īpašības ir sliktākas salīdzinājumā ar varu. Tā alumīnija īpatnējā elektriskā pretestība 20 °C temperatūrā ir 0,029 m $\Omega$ ·m, t. i., 1,65 reizes lielāka nekā varam. Tomēr, pateicoties mazākām izmaksām un svaram, arī alumīniju plaši izmanto transformatoros.

Tinumu izgatavošanai izmanto vadus ar dažādu izolāciju (lente, kabelpapīrs, augstsprieguma kabelpapīrs, emalja, ar laku piesūcināts stiklaudums u. c.). Siltumizturības ziņā piesūcinātā vadu izolācija pieder pie A klases, bet stiklauduma izolācija atkarībā no lietotās lakas pieder pie B vai F klases.

Tinumu atzarojumu izveidei izmanto apaļa šķērsriezuma lokanus vara vadus vai kopnes ar papīra izolāciju. Vadi var sastāvēt no daudziem tieviem vadiņiem ar kopējo šķērsriezuma laukumu no 16 mm<sup>2</sup> līdz 400 mm<sup>2</sup> un vairāk.

Mūsdienās, izgatavojot transformatoru tinumus ar lielu vadu skaitu vijumā, izmanto vara transponētos vadus. Tie sastāv no liela skaita emaljēto elementāro vadu, kuri novie-



toti divās rindās. Šie vadi nepārtraukti visā garumā pāriet no vienas rindas otrā. Tāpēc šādiem vadiem nav jāveic transpozīcija, kas ir visai darbietilpīga operācija.

Tinumu izgatavošanai izmantotās vara stieples diametrs parasti ir robežās no 1,2 mm līdz 5,2 mm, bet divkāršās izolācijas biezums – no 0,02 mm līdz 5,76 mm. Taisnstūrveida vadu īsākās malas izmēri parasti ir no 1,4 mm līdz 5,6 mm, bet garākās malas attiecīgi no 3,75 mm līdz 19,5 mm. Divkāršās izolācijas biezums ir no 0,3 mm līdz 4,4 mm.

Alumīnija vadiem gan ar apaļu, gan ar taisnstūrveida šķērsgriezumu divkāršās izolācijas izmēri ir tādi paši kā vara vadiem. Apaļvada diametrs parasti ir 1,35–8 mm, bet taisnstūrveida alumīnija vadam īsākās malas izmēri ir no 1,8 mm līdz 7 mm, garākās malas – no 4,1 mm līdz 22 mm.

Elektroizolācijas materiāli transformatorā kalpo tam, lai strāvu vadošās daļas ar dažādiem potenciāliem izolētu vienu no otras un no iezemētajām daļām.

Ekspluatācijas laikā izolācija transformatorā tiek pakļauta dažāda rakstura iedarbēm – elektriskām, mehāniskām, siltuma, fizikālķīmiskām. Izolācijai jāiztur šīs iedarbes, tāpēc transformatoros izmanto samērā ierobežota klāsta izolācijas materiālus. Izmantotie materiāli neprasa sarežģītu tehnoloģisko apstrādi, tie ir relatīvi lēti.

Elektroizolācijas materiālus, kā zināms, no siltumizturības viedokļa iedala septiņās klasēs: Y, A, F, B, E, H un C. Lielākā daļa izolācijas materiālu, ko izmanto eļļas transformatoros, pieder pie A klases ar pieļaujamo ilgstoša darba temperatūru 105 °C.

Tinumu vadu un atzaru, kā arī starpslāņu un citu ierīču izolācijai plaši izmanto dažādu marku elektroizolācijas papīru, kas izgatavots no ķīmiski apstrādātas koksnes celulozes. Bez noteiktām prasībām attiecībā pret dielektrisko caurlaidību, elektrisko stiprību, dielektriskiem zudumiem ļoti svarīga prasība, kas jāizvirza papīra izolācijai, ir tās izturība pret novecošanos mitruma, paaugstinātas temperatūras, skābekļa un citu faktoru ietekmē. Pasaules praksē ir zināmi izolācijas papīri un kartons, kuru īpašības ar speciālu apstrādi uzlabotas tā, ka tie iztur par 15–20 °C lielākas temperatūras salīdzinājumā ar parasto izolācijas papīru. Siltumizturīgo papīru lietošana vijumu izolācijai ļauj palielināt transformatoru noslodzi par 15–20 %.

No izolācijas papīriem izmanto transformatorpapīru agrāk izmantotā kabelpapīra vietā. Tā biezums atkarībā no markas ir 80 vai 120 mm. Transformatorpapīru piegādā 500–1000 mm platos ruļļos. Sausa transformatorpapīra elektriskā stiprība ir 6–9 kV/mm, bet piesūcinātam ar sausu transformatoru eļļu atkarībā no biezuma tā ir 70–90 kV/mm. Sausa papīra dielektriskā caurlaidība ir 2,2–2,7.

Vijumu un starpslāņu izolācijai nelielas jaudas transformatoros (līdz 100 kV·A) izmanto 50 mm biezu telefonpapīru. Atzarojumu izolēšanai lieto gofrētu elektroizolācijas papīru, kam ir palielināta elastība.

Otrs svarīgākais izolācijas materiāls, ko izmanto transformatoros, ir elektrokartons. To izgatavo no koksnes celulozes. Atkarībā no biezuma kartona elektriskā stiprība gaisā ir 7–15 kV/mm, sausā transformatora eļļā 90 °C temperatūrā tā ir 30–55 kV/mm. Kartona dielektriskā caurlaidība ir 4,3–4,5. Elektrokartonam, kas paredzēts darbam eļļā, ir augsta mehāniskā stiprība, izturība pret virsmas izlādēm, tas maz saraujas pēc žāvēšanas. Dažādu

marku elektrokartonu izmanto galveno izolācijas detaļu izgatavošanai transformatoros ar spriegumu līdz 750 kV un augstāk.

Lokšņu elektrokartona biezums ir 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 un 3,0 mm. Ruļļos piegādāta kartona biezums parasti ir 0,5 mm.

Elektroizolācijas lakaudumu izgatavo no kokvilnas vai zīda auduma, kas piesūcināts ar laku. Transformatoros parasti izmanto 0,17, 0,20 un 0,24 mm biezu un 2–3 cm platu gaišu lakaudumu atzaru izolācijai un citās vietās, kur vajadzīga pietiekama elastība un mehāniskā stiprība. Sausos transformatoros, kas darbojas paaugstinātas temperatūras apstākļos, izmanto stiklaudumu.

Elektrotehnisko getinaksu iegūst, sapsesējot ar laku piesūcinātu papīru. To izmanto sprieguma regulēšanas ierīces detaļām, tinumu un atzaru stiprināšanai. Getinaksu ražo plātņu veidā ar dažādu biezumu no 8 mm līdz 50 mm. Tam piemīt augsta mehāniskā un elektriskā stiprība.

Papīra bakelīta izolācijas detaļas parasti izgatavo caurulišu un cilindru veidā. Tās izmanto viena tinuma izolēšanai no otra un no magnētvasda stieniem, kā arī atzaru un pārslēgšanas ierīču izolēšanai.

Transformatoru tinumu piesūcināšanai lieto dažādas elektroizolācijas lakas. Bakelīta laku izmanto kartona starpliku, gredzenu un citu detaļu salīmēšanai. Sauso transformatoru tinumu piesūcināšanai izmanto eļļas bituma laku.

Ar laku piesūcināto tinumu un sauso transformatoru tērauda detaļu pārklāšanai lieto dažādas emaljas.

Spēka transformatoros kopā ar cieto izolāciju izmanto arī šķidros dielektriķus, tādus kā transformatoru eļļa, vai sintētiskos dielektriķus, piemēram, sovtolu. Šķidrie dielektriķi bez izolācijas funkciju veikšanas uzlabo transformatora dzesēšanu. Transformatoru eļļai tiek izvīrītas visai augstas prasības. Transformatoru ekspluatācijas laikā tiek rūpīgi kontrolēts eļļas stāvoklis.

Transformatoros samērā plaši lieto dažādas izolācijas un konstruktīvās detaļas, kas izgatavotas no dižskābarža koksnes. Koksni pirms detaļu izgatavošanas žāvē un piesūcina ar transformatoru eļļu. Šādas detaļas lieto tinumu atbalsta izolācijai, kā arī magnētvasda, atzaru un pārslēgu stiprināšanai.

## **3.11. TRANSFORMATORU IZOLĀCIJA**

### **3.11.1. Faktori, kas iedarbojas uz izolāciju**

Transformatora kalpošanas laiku pamatā nosaka izolācija. Ekspluatācijas laikā tai bez bojājumiem jāiztur elektriska, termo, mehāniska un fizikālķīmiska rakstura iedarbība. Turklāt dažādi faktori iedarbojas vienlaikus.

Ekspluatācijas laikā transformators ilgstoši atrodas ieslēgtā stāvoklī un uz tā izolāciju iedarbojas elektriskais lauks, kas atbilst nominālam darba spriegumam. Izolācijai šī

iedarbība bez bojājumiem jāiztur neierobežoti ilgi.

Transformatora darbības laikā elektroenerģētiskajā sistēmā iespējami īslaicīgi pārspriegumi. Tie var rasties normālu komutācijas procesu rezultātā, piemēram, ieslēdzot vai izslēdzot lielas jaudas patērētājus, īsslēgumu laikā vai no zibens izlādes. Izolācijai jāiztur šādi pārspriegumi.

Transformatoru tinumos un visās tā strāvu vadošajās daļās darba laikā rodas zudumi, kā rezultātā minētās daļas sasilst. Augstas temperatūras izraisa izolācijas novecošanos – tā zaudē elastību, kļūst trausla, samazina elektrisko stiprību un mehāniski sabrūk. Normālas ekspluatācijas laikā pareizi projektēta transformatora izolācija var kalpot 25 un vairāk gadu. Lai nodrošinātu pienācīgu izolācijas siltumizturību, ierobežo darba temperatūru, izvēlas attiecīgas klases izolācijas materiālus, kā arī veido tādas tinumu izolācijas detaļu konstrukcijas, kas veicina efektīvu dzesēšanu.

Transformatora izolācijā pievadītā sprieguma iespaidā rodas dielektriskie zudumi. To lielums ir proporcionāls pieliktajam spriegumam un zudumu leņķa tangensam, t. i., izolācijas aktīvās un reaktīvās strāvas attiecībai  $\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r$ . Palielinoties temperatūrai,  $\operatorname{tg} \delta$  eksponenciāli pieaug. Tas vēl lielākā mērā palielina dielektriskos zudumus. Turklāt, pieaugot temperatūrai, samazinās izolācijas materiāla īpatnējā pretestība un elektriskā stiprība. Tas var novest pie izolācijas caursīšanas, kas cietai, bet atsevišķos gadījumos arī šķidrai izolācijai ir neatgriezeniska.

Uz tinumiem, pa kuriem plūst strāva, iedarbojas mehāniskie spēki. Šie spēki neatstāj jūtamu iespaidu uz tinumiem un izolāciju normālos darba režīmos, bet sasniedz visai ievērojamus lielumus avārijas režīmos, piemēram, īsslēgumu laikā. Tie var izraisīt sagraujošas deformācijas tinumos un izolācijā.

Tādi transformatoros plaši izmantotie izolācijas materiāli kā elektrokartons, kabelpapīrs u. c. pieļauj ievērojamus mehāniskos spriegumus. Pareiza izolācijas materiālu izvēle un tinumu racionāla konstrukcija un izvietojums nodrošina tiem nepieciešamo mehānisko stiprību.

Transformatoru eļļai iedarbojoties uz izolāciju, rodas sarežģīti fizikālķīmiski procesi. Šie procesi var izraisīt sevišķi negatīvas sekas paaugstinātā temperatūrā un, ja eļļā ir piemaisījumi. Ievērojama loma izolācijas elektriskās stiprības nodrošināšanā ir tās apstrādes tehnoloģijai. Viena no svarīgākajām izolācijas apstrādes operācijām ir transformatora vakuumbūvēšana pirms eļļas uzpildīšanas.

### 3.11.2. Izolācijas klasifikācija

Apskatot elektriskās stiprības jautājumus, transformatoru var nosacīti dalīt trijās daļās: daļa, kas atrodas zem sprieguma, iezemētā daļa un izolācija.

Zem sprieguma atrodas tinumu vadi, atzari, pārējās kopnes, kā arī visas ar tiem galvaniski saistītās detaļas.

Iezemētajā daļā ietilpst magnētqvads ar metāla stiprinājuma detaļām, tvertne un dzesēšanas sistēma eļļas transformatoros, aizsargapvalks sausajos transformatoros.

Ievadu apakšējā daļa eļļas transformatoros atrodas tvertnē, bet augšējā – ārpusē. Atbilstoši tam izšķir iekšējo izolāciju (eļļā) un ārējo izolāciju (gaisā).

Iekšējo izolāciju savukārt iedala galvenajā un garenizolācijā.

Galvenā izolācija atdala katru tinumu no iezemētām daļām un citiem tinumiem, kas savā starpā nav elektriski saistīti.

Garenizolācija ir izolācija starp viena tinuma elementiem (vijumiem, spolēm u. c.).

Analoģiski var iedalīt atzaru un pārslēgu izolāciju.

Pie ārējās izolācijas pieskaita ievadu izolāciju, gaisa atstarpes starp ievadiem un no ievadiem līdz iezemētām daļām. Ārējās izolācijas elektrisko stiprību ietekmē atmosfēras apstākļi.

### 3.11.3. Pārspriegumi transformatoros

Izolācijas stiprība ir viens no transformatora galvenajiem rādītājiem, pēc kura spriež par tā derīgumu ekspluatācijai. Izolācijai neierobežoti ilgi jāiztur darba sprieguma iedarbība un īslaicīgi dažādi pārspriegumi, kas darba spriegumus var pārsniegt vairākkārt.

Pārspriegumu lielums uz ievadiem ir atkarīgs no transformatora elektriskās aizsardzības, ko isteno izlādņi vai citas ierīces, kā arī no tā, vai tīkla neitrāle ir iezemēta vai izolēta.

Pārsprieguma iedarbība uz izolāciju ir atkarīga gan no tā amplitūdas vērtības, gan ilguma. Zibens izlādes radītie pārspriegumi parasti ir lielāki par tiem, kas rodas komutācijas procesos. Tie var pat desmitkārt pārsniegt fāzes spriegumus. Tomēr to ilgums parasti nav lielāks par dažiem desmitiem mikrosekunžu.

Pārspriegumi izplatās pa elektropārvades līniju ar ātrumu, kas tuvs gaismas ātrumam. Pārsprieguma vilnim ir aperiodiska impulsa forma ar stāvu fronti (3.101. att. a). Laika sprādis, kurā spriegums pieaug no nulles līdz amplitūdas vērtībai  $U_m$  atbilst viļņa fronte  $\tau_f$ . Tas ir mikrosekunžu daļas vai dažas mikrosekundes. Viļņa garums, ko mēra ar laiku, kurā spriegums samazinās divas reizes salīdzinājumā ar amplitūdas vērtību, ir daži desmiti mikrosekunžu. Standartvilnim, ko izmanto transformatoru pārbaudē, fronte ir  $1,2 \cdot 10^{-6}$  s un garums  $50 \cdot 10^{-6}$  s.

Lai samazinātu pārspriegumu, kas iedarbojas uz izolāciju, transformatoros lieto izlādņus  $I_z$  (3.101. att. b). Spriegums, kas lielāks par  $U_m$ , caursit izlādņus, tādējādi transformatora tinumu sasniedz pārspriegums, kas daudzkārt mazāks par  $U_{m0}$ .

3.101. attēlā c parādīts tā sauktais nogrieztais pārsprieguma vilnis. Tādi viļņi parasti rodas, ja notiek izolācijas pārklājums kādā no apakšstacijas elementiem netālu no transformatora. Šajā gadījumā aperiodiskais process pāriet svārstību procesā. Izolācija tiek pakļauta straujām sprieguma izmaiņām.

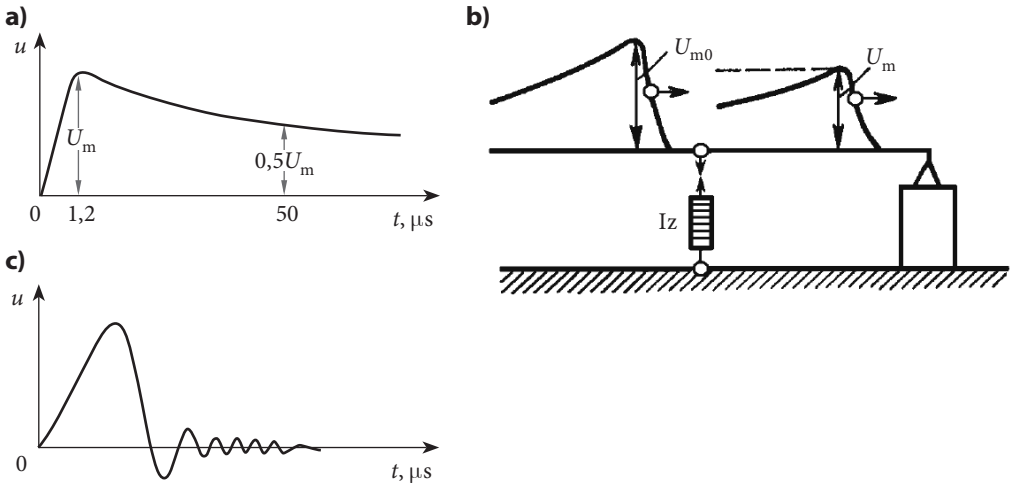
Procesu laikā, kad spriegums pieaug no 0 līdz  $U_m$ , zināmā mērā var uzskatīt par līdzīgu transformatora ieslēgšanai maiņstrāvas tīklā ar amplitūdas vērtību  $U_m$  un periodu  $T = 4 \tau_f$  (pārtrauktā līnija 3.101. attēlā a). Šim spriegumam ir visai augsta frekvence. Piemēram, standartvilnim:

$$f_p = \frac{1}{T} = \frac{1}{4\tau_f} = \frac{1}{4 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}} = 2,08 \cdot 10^5 \text{ Hz.} \quad (3.195.)$$

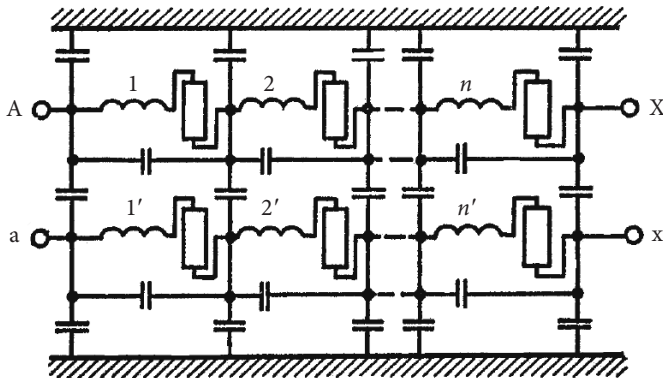
Šādām frekvencēm jāņem vērā kapacitīvās saites starp atsevišķiem tinuma elementiem un starp tinuma elementiem, no vienas puses, un iezemētajām daļām – no otras. Iepriekš apskatītās ekvivalentās shēmas ņem vērā tikai induktīvās saites un to izmantošana šajā gadījumā vairs nav korekta. Tāpēc jālieto daudz sarežģītākas shēmas, kurās ietvertas gan induktīvās, gan kapacitīvās saites starp tinumu elementiem un iezemētajām daļām. Šāda shēma vienkāršotā variantā parādīta 3.102. attēlā.

Katram augstākā sprieguma (1, 2, ... n) un zemākā sprieguma (1', 2', ... n') tinuma elementam ir induktivitāte, savstarpējā induktivitāte ar citiem elementiem (shēma nav parādīta), aktīvā pretestība un kapacitāte attiecībā pret blakus elementiem un iezemētajām daļām. Nosakot aktīvās pretestības, šajā gadījumā jāņem vērā virsmas efekts.

3.102. attēlā parādītās shēmas analīze ir visai sarežģīta, tāpēc apskatīsim vienkāršotu shēmu (3.103. att.), kurā induktivitāte  $L$  iekļauj sevī arī katra elementa pašinduktivitāti, bet aktīvās pretestības netiek ņemtas vērā.



3.101. att. Pārsprieguma viļņa iedarbība uz transformatoru: a – pārsprieguma vilnis; b – transformatora aizsardzība ar izlādēni; c – aperiodiskais vilnis.



3.102. att. Transformatora ekvivalentā shēma pārspriegumu gadījumā.

Kā tika norādīts iepriekš, sākumā vilnis ar stāvu fronti rada līdzīgus apstākļus tiem, kuri rodas, pieslēdzot transformatoru maiņspriegumam ar ļoti augstu frekvenci  $f_p$ . Ņemot vērā, ka induktīvās pretestības  $X_L = 2\pi f_p L$  ir ļoti lielas, bet garenkapacitātēm  $X_{Cd} = 1/2\pi f_p C_d$  un šķērskapacitātēm  $X_{Cq} = 1/2\pi f_p C_q$  ir ļoti mazas pretestības, var uzskatīt, ka strāvas plūdis tikai caur divām pēdējām. Tāpēc sākuma momentam var izmantot ekvivalento shēmu, kas sastāv tikai no kapacitātēm (3.104. att.).

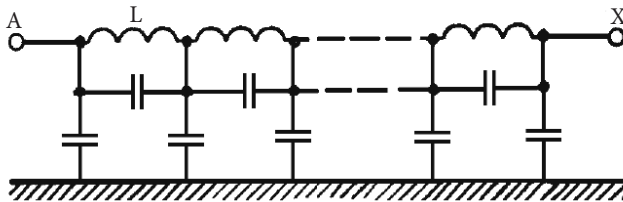
Tādējādi transformators pret pārsprieguma vilni sākuma brīdī uzrāda zināmu kapacitāti  $C_{ie}$ , sauktu par ieejas kapacitāti (3.105. att.).

Saskaņā ar teorētiskās elektrotehnikas nostādnēm spriegums  $U_c$  uz transformatora spailēm mainās pēc šāda likuma:

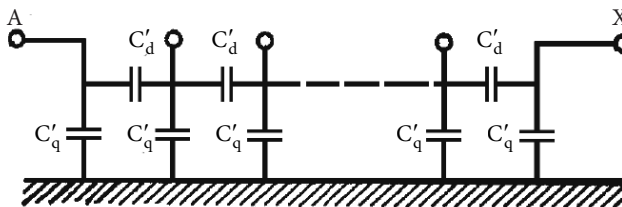
$$U_C = 2U \left( 1 - e^{\frac{-1}{ZC_{ie}}} \right), \quad (3.196.)$$

kur  $U$  – krītošā viļņa spriegums;  
 $Z$  – līnijas viļņa pretestība.

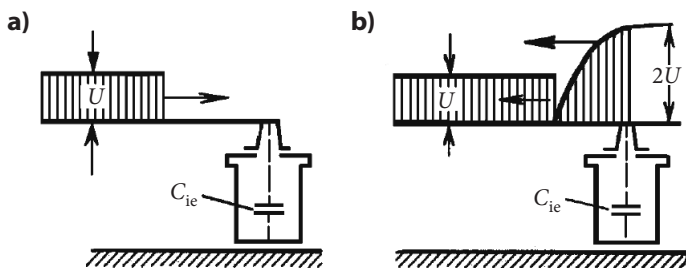
Kapacitātes uzlādes laikā viļņa spriegums  $U$  uz transformatora ievadiem sākumā samazinās līdz nullei, bet tad pieaug robežgadījumā līdz  $2U$ . Uzlādes laiks parasti ir ļoti īss. Tā, piemēram, gaisvadu elektrolīnijai viļņa pretestība aptuveni vienāda ar  $500 \Omega$ , bet transformatora ieejas kapacitāte  $C_{ie} = (10^{-10} - 10^{-12})$  F. Tādējādi laika sprīdī  $t = 3Z \cdot C_{ie} = 3,500(10^{-10} - 10^{-11})$  s = 0,15 – 0,015 mks spriegums ir  $1,95U$ . Tas nozīmē, ka spriegums sasniedz gandrīz divkārtu viļņa amplitūdu aptuveni pēc vienas mikrosekundes desmitdaļas.



3.103. att. Vienkāršotā ekvivalentā shēma.



3.104. att. Ekvivalentā shēma pārsprieguma sākuma momentam.



3.105. att. Taisnstūra viļņa iedarbība uz transformatoru: a – vilnis pienāk transformatoram; b – vilnis uzlādē ieejas kapacitāti.

Apskatīsim, kā spriegumi pēc kondensatoru uzlādes sadalās transformatora tinumā. Ķēdes pilno garenkapacitāti  $C_d$  un šķērskapacitāti  $C_q$  var aprēķināt pēc formulām:

$$C_d = \frac{1}{\sum \frac{1}{C'_d}}; \quad (3.197.)$$

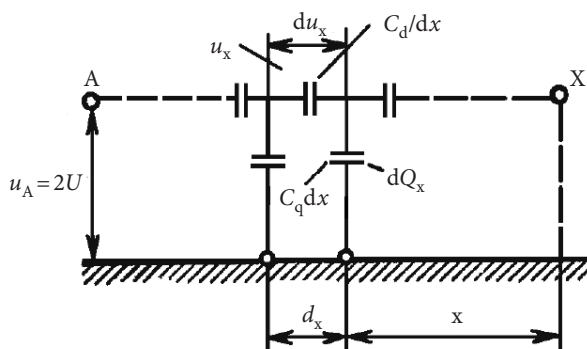
$$C_q = \sum C'_q. \quad (3.198.)$$

Pieņemot visa tinuma garumu par 1, apskatīsim tinuma elementu, kas atrodas attālumā  $x$  no tā beigām un kura spriegums ir  $du_x$ , bet attiecībā pret zemi  $u_x$ . Tinuma elementu kapacitātes pret zemi slēgtas paralēli, tāpēc jebkura posma kapacitāte ir proporcionāla tā garumam. Tādējādi elementa  $dx$  kapacitāte vienāda ar  $C_q dx$ . Garenkapacitātes slēgtas virknē, tāpēc posma kapacitāte apgriezti proporcionāla tā garumam, bet elementam  $dx$  tā ir vienāda ar  $C_d/dx$  (3.106. att.).

Ja šķērskapacitātes lādiņu apzīmē ar  $dQ_x$ , tad tinuma blakus elementu lādiņi būs attiecīgi vienādi ar  $Q_x$  un  $Q_x - dQ_x$  (sk. 3.106. att.).

Ņemot vērā zināmo sakarību  $U = Q/C$ , kapacitātēm  $C_q/dx$  un  $C_d/dx$  varam uzrakstīt šādas izteiksmes:

$$u_x = \frac{dQ_x}{C_q dx}; \quad (3.199.)$$



3.106. att. Tinuma elementa shēma.

$$du_x = \frac{Q_x}{C_d} dx. \quad (3.200.)$$

Izsakot no (3.200.) lielumu  $dQ_x/dx$  un ievietojot to (3.199.), iegūstam sprieguma  $u_x$  lineāru diferenciālvienādojumu ar nemainīgiem koeficientiem:

$$\frac{d^2 u_x}{dx^2} - \frac{C_q}{C_d} u_x = 0. \quad (3.201.)$$

Vienādojumu (3.201.) atrisina šādā formā:

$$u_x = A_1 e^{\alpha x} + A_2 e^{-\alpha x}, \quad (3.202.)$$

$$\text{kur } \alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}.$$

Integrēšanas konstantes atrodam no robežnosacījumiem: tinuma iezemētajā galā X, ja  $x=0$ ,  $u_x=0$  un tinuma otrā galā A, ja  $x=1$ ,  $u_x=u_A$ , kur  $u_A=2U$  – spriegums uz tinuma spailēm pēc uzlādēšanās.

Tādējādi

$$\begin{aligned} u_A &= A_1 e^{\alpha} + A_2 e^{-\alpha}, \text{ ja } x=1, \\ u_x &= A_1 + A_2 = 0, \text{ ja } x=0. \end{aligned} \quad (3.203.)$$

No šejienes

$$A_1 = -A_2 = \frac{u_A}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}} = \frac{u_A}{2 \operatorname{sh} \alpha}. \quad (3.204.)$$

Sprieguma sākuma sadalījums iezemētā tinumā

$$u_x = u_A \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{2 \operatorname{sh} \alpha} = u_A \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha}, \quad (3.205.)$$

kur  $\operatorname{sh} \alpha$  – hiperboliskais sinuss.

Mūsdienu transformatoriem koeficients  $\alpha$  parasti ir robežās no 5 līdz 15. Jāuzsver, ka sprieguma sākuma sadalījums transformatorā ir visai nevienmērīgs (3.107. att.).

Ideālā gadījumā, kad spriegums sadalās vienmērīgi,  $\alpha \approx 0$  un

$$u_x = u_A \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha} = u_A \frac{\alpha x}{\alpha} = u_A x. \quad (3.206.)$$

Sprieguma kritums tinuma pirmajā elementā  $\Delta x$ , skaitot no tā sākuma, ir:

$$\Delta u = u_A \Delta x. \quad (3.207.)$$

Reālā tinumā  $\alpha \geq 3$  un, pieņemot, ka hiperboliskais  $\operatorname{tg} \operatorname{cth} \alpha = 1$ , sprieguma kritumu pirmajā elementā var aprēķināt no izteiksmes:

$$\Delta u = \left( \frac{du_x}{dx} \right)_{x=1} \Delta x = (u_A \alpha \operatorname{cth} \alpha) \Delta x = u_A \alpha \Delta x. \quad (3.208.)$$

No formulas (3.208.) redzams, ka sprieguma kritums uz pirmā elementa ir  $\alpha$  reizes lielāks salīdzinājumā ar vienmērīgu sadalījumu.

Analoģiski var noteikt sprieguma sadalījumu tinumam, ja spaiļe X nav iezemēta. Šajā



gadījumā var uzskatīt, ka pēdējā elementa garenkapacitāte (tuvāk X spaiļei) nav uzlādēta, jo tās kapacitāte pret zemi ir visai niecīga. Tad robežnosacījumi būs šādi:

$$\text{ja } x=0, Q_x=0 \text{ un } x=1, u_x=u_A.$$

No pirmā robežnosacījuma un izteiksmes (3.199.) iegūstam:

$$\left(\frac{du_x}{dx}\right)_{x=0} = 0.$$

Atvasinot (3.201.), ja  $x=0$ , iegūstam

$$\frac{du_x}{dx} = \alpha A_1 - \alpha A_2 = 0,$$

no kurienes redzams, ka  $A_1 = A_2$ .

No otrā robežnosacījuma redzams, ka, ja  $x=1$ , tad

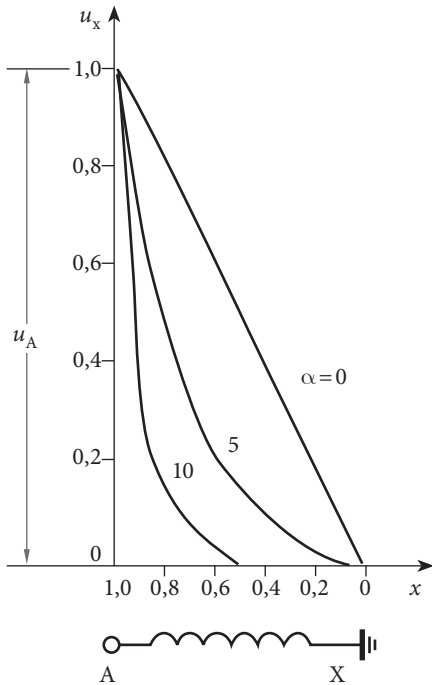
$$u_A = A_1(e^\alpha + e^{-\alpha})$$

un

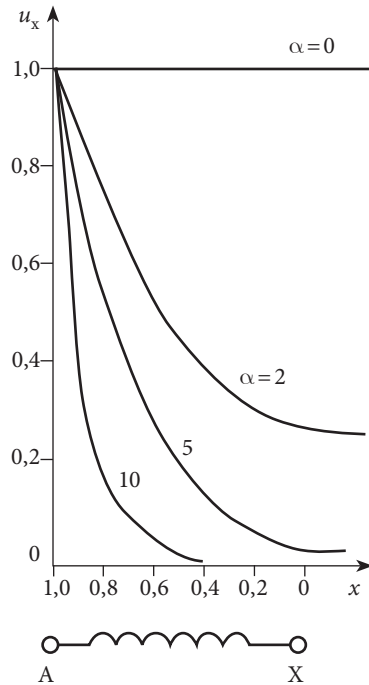
$$A_1 = A_2 = \frac{u_A}{(e^\alpha + e^{-\alpha})}.$$

Tādējādi tinumam ar neiezemētu X spaiļi iegūstam:

$$u_x = u_A \frac{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}}{2 \operatorname{ch} \alpha} = u_A \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha}. \quad (3.209.)$$



3.107. att. Sprieguma sākuma sadalījums tinumā ar iezemētu X spaiļi.



3.108. att. Sprieguma sākuma sadalījums tinumā ar neiezemētu X spaiļi.

Tāpat kā gadījumā ar iezemētu X spaili, sprieguma sākuma sadalījums ir atkarīgs no  $\alpha$  vērtības. Ja  $\alpha \approx 0$ , tad  $u_x = u_A$ . No 3.108. attēla redzams, ka, ja  $\alpha > 5$ , sprieguma sadalījums praktiski nav atkarīgs no spaiļes X sasaistes ar zemi.

Izmantojot (3.209.) izteiksmi, var noteikt sprieguma kritumu tinuma pirmajā elementā, ja  $\alpha > 3$  un  $\text{cth } \alpha \approx \text{th } \alpha \approx 1$ :

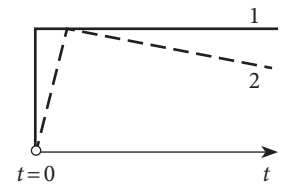
$$\Delta u = \left( \frac{du_x}{dx} \right)_{x=1} \Delta x = (u_A \alpha \text{th } \alpha) \Delta x = u_A \alpha \Delta x. \quad (3.210.)$$

Ja sprieguma sākuma sadalījums būtu lineārs  $u_x = u_A x$ , liknes stāvums visā tinuma garumā paliktu nemainīgs  $du_x/dx = u_A$ . Reālā tinumā, kā redzams no (3.210), liknes maksimālais stāvums ir  $\alpha$  reizes lielāks salīdzinājumā ar gadījumu, kad spriegums sadalās vienmērīgi. Šāds nevienmērīgs sprieguma sadalījums, ja  $\alpha > 5$  (sk. 3.107. att.), var novest pie tā, ka, pienākot pārsprieguma vilnim ar stāvu fronti, uz tinuma pirmajiem elementiem iedarbojas ievērojami spriegumi.

Var noteikt sakarību starp tinuma ieejas kapacitāti  $C_{ie}$  un kapacitāti  $C_d$  un  $C_q$ . Tā kā ieejas kapacitāte pēc definīcijas ir  $C_{ie} = (Q_x/u_x)_{x=1}$ , tad, ievietojot šeit lādiņa vērtību no 3.200. izteiksmes gadījumam  $\alpha > 3$  iegūstam:

$$C_{ie} = \frac{C_d \left( \frac{du_x}{dx} \right)_{x=1}}{u_A} = \alpha C_d = \sqrt{C_d C_q}.$$

Apskatīsim elektromagnētiskā viļņa izplatīšanos tinumā. Pieņemsim, ka transformatoram tuvojas bezgalīgs taisnstūra vilnis (3.109. att.). Turklāt spriegums  $u_A$  tinuma sākumā parādās laikā  $\tau_f \approx 0$  un pēc kāda laika visos tinuma elementos nostabilizēsies zināms spriegums. Ja tinuma spaiļe X ir iezemēta, sprieguma sadalījums būs lineārs (3.110. att.). Gadījumā, ja spaiļe X nav iezemēta, viss tinums iegūst potenciālu, kas vienāds ar viļņa spriegumu (3.111. att.). Šo sadalījumu sauc par sprieguma beigu sadalījumu.



3.109. att. Bezgalīgs taisnstūra sprieguma vilnis (1) un aperioldisks vilnis (2).

Sprieguma viļņa izplatīšanās tinumā ir pakāpenisks process pārejai no sākuma sadalījuma ( $t=0$ ) uz beigu sadalījumu ( $t=\infty$ ). Tā kā tinuma ekvivalentā shēma satur kapacitātes un induktivitātes, pārejai no sākuma uz beigu sadalījumu ir svārstību raksturs. Svārstības pakāpeniski norimst sakarā ar zudumiem aktīvajās pretestībās.

3.110. un 3.111. attēlā parādītas maksimālo spriegumu aptverošās liknes svārstību laikā dažādos tinuma elementos visā tā garumā. Tā, piemēram, tinumā ar iezemētu X spaili punktā a sākuma brīdī spriegumu nosaka ordināta 1, bet beigās – ordināta 2. Ideālā tinumā (bez zudumiem) spriegums pārejas procesa laikā pieaug no vērtības 1 līdz 2. Tomēr process neapstājas punktā 2 sakarā ar to, ka tinumam piemīt elektromagnētiskā inerce, tāpēc spriegums turpina pieaugt līdz vērtībai, ko nosaka ordināta 3. Svārstības notiek ap stacionāro sprieguma vērtību diapazonā, ko ierobežo punkti 1 un 3. Reālā tinumā šīs svārstības pakāpeniski norimst.

Sasniedzot tinuma neiezemēto spaili, pārsprieguma vilnis atstarojas un izraisa sprieguma palielināšanos.

Svārstību procesi izpaužas spēcīgāk, ja būtiski atšķiras sprieguma sākuma un beigu sadalījums. Tinumā ar neiezemētu X spaili spriegums tā beigās var sasniegt divkārtu lielumu salīdzinājumā ar to, kas ir tinuma sākumā.

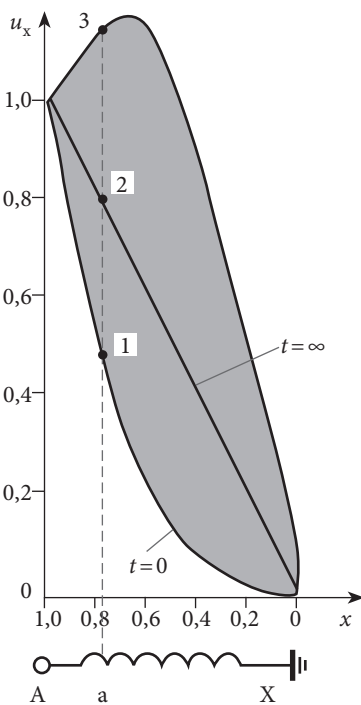
Ja uz tinumu iedarbojas galīga garuma vilnis ar stāvu fronti, kvalitatīvi process nemainās. Pārspriegumi nedaudz samazinās līdz sprieguma samazinājumam uz transformatora ievadiem (sk. 3.109. att., 2. līkne)

Jāatzīmē, ka sakarā ar samērā sarežģīto matemātisko analīzi šeit pārējas procesus apskatīsim tikai no kvalitatīvās puses.

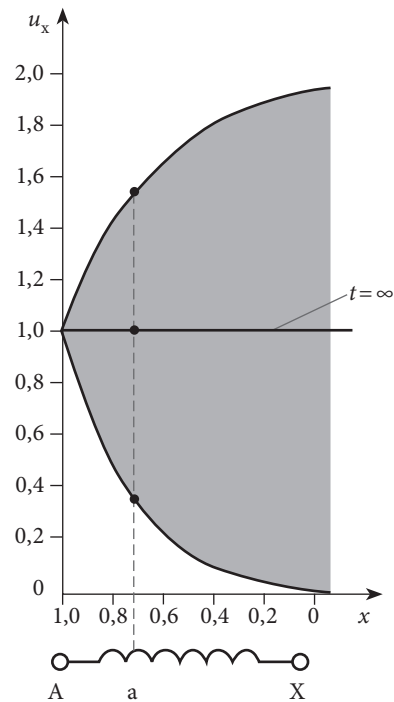
Svārstību procesā tinuma atsevišķu punktu potenciāli var ievērojami pārsniegt darba sprieguma amplitūdu. Šādi spriegumi iedarbojas gan uz galveno izolāciju, gan uz garenizolāciju. Pirmie vijumi un spoles vislielākajam pārspriegumam ir pakļauti procesa sākumā.

Trīsfāžu transformatorā ar iezemētu neitrāli procesi noris tāpat kā iepriekš aprakstītajā gadījumā ar iezemētu X spaili. Elektromagnētiskās svārstības ir atkarīgas tikai no tā viļņa impulsa, kas iedarbojas uz fāzi.

Trīsfāžu transformatoros ar izolētu neitrāli vai neitrāli, kas iezemēta caur reaktoru, ievērojami pārspriegumi tiek pielikti neitrālei, ja visās trīs fāzēs vienlaikus tuvojas pār-



3.110. att. Sprieguma sadalījums tinumā ar iezemētu X spaili.



3.111. att. Sprieguma sadalījums tinumā ar neiezemētu X spaili.

spriegumu viļņi ar vienādu zīmi. Pārspriegumu iedarbība šajā gadījumā ir analogiska 3.111. att. parādītajai.

Autotransformatoros, kurus izmanto augstsprieguma tīklā, impulsvēda pārspriegumi rada daudz lielāku bīstamību nekā transformatoros. Tas izskaidrojams ar to, ka autotransformatoros tinumi savā starpā saistīti elektriski. Tāpēc sprieguma vilnis, kas radies augstsprieguma pusē, var nokļūt arī zemsprieguma pusē. Turklāt tinuma daļā ar mazāku vijumu skaitu var inducēties pārspriegumi, kas pārsniedz pienākošā viļņa amplitūdu.

Pienākot pārsprieguma vilnim, autotransformatorā no AS puses (3.112. att.) tinumu spaiļes a un X iezemētas caur līnijas viļņa pretestību Z. Pārsprieguma vilnis pirmajā brīdī krīt uz virknes tinumu A-a. Elektromagnētiskie procesi tajā ir līdzīgi tiem, kas parādīti 3.110. attēlā. Tinumā a-X inducētā sprieguma maksimālā vērtība pielikta tinuma vidū, jo abi tā gali ir iezemēti.

Pārsprieguma vilnim pienākot no ZS puses, pirmajā tuvinājumā tinumus a-X un A-X var aplūkot neatkarīgi vienu no otra. Tinumā a-X rodas svārstības, kas ir analogiskas 3.110 attēlā parādītajām, jo spaiļe X ir iezemēta. Tinumam A-a ir iespējami divi varianti:

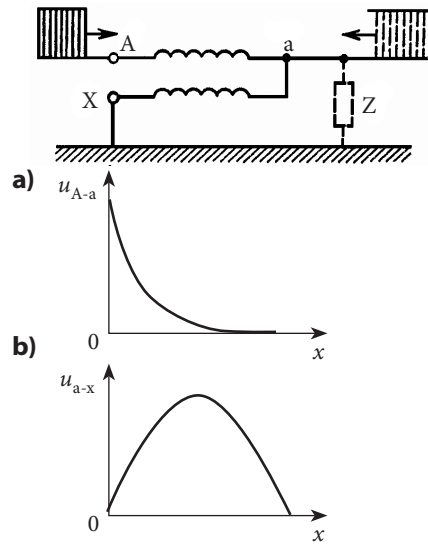
- tinums pieslēgts AS līnijai un spaiļe a iezemēta caur viļņa pretestību. Elektromagnētiskās svārstības šajā gadījumā analogiskas jau apskatītajām tinumā a-X;
- viļņa pienākšanas brīdī tinums a-A atslēgts no līnijas. Procesu tinumā noris analogiski 3.111. attēlā parādītiem.

No iepriekš apskatītā redzams, ka starp tinuma atsevišķiem punktiem un zemi, kā arī starp spolēm, vijumiem un slāņiem rodas ievērojami pārspriegumi. Tāpēc transformatora izolācija var tikt bojāta.

Lai pasargātu transformatorus no pārspriegumiem, vispirms nepieciešams nepieļaut, lai tajos nokļūtu viļņi ar amplitūdu, kas pārsniedz dotai izolācijas klasei pieļaujamo. Lai izpildītu šo nosacījumu, transformatoru apakšstacijas aizsargā ar iezemētām trosēm un pārsprieguma novadītājiem. Bez tam tiek veikti pasākumi izolācijas elektriskās stiprības palielināšanai.

Elektrisko stiprību var uzlabot ar diviem paņēmieniem: pastiprinot izolāciju tinuma pirmajiem vijumiem un spolēm un tuvinot sākuma un beigu sprieguma sadalījumu. Pēdējo paņēmieni var realizēt, lietojot kapacitīvo aizsardzību un kompensāciju. Piemēram, tinumos ar iezemētu X spaiļi izmanto elektrostatiskos ekrānus pārgriezta paplākšņa veidā (3.113. att.). Ekrānu izgatavo no elektrokartona ar metālpārklātu virsmu.

Sprieguma sākuma sadalījums transformatoram bez kapacitīvās aizsardzības atbilst

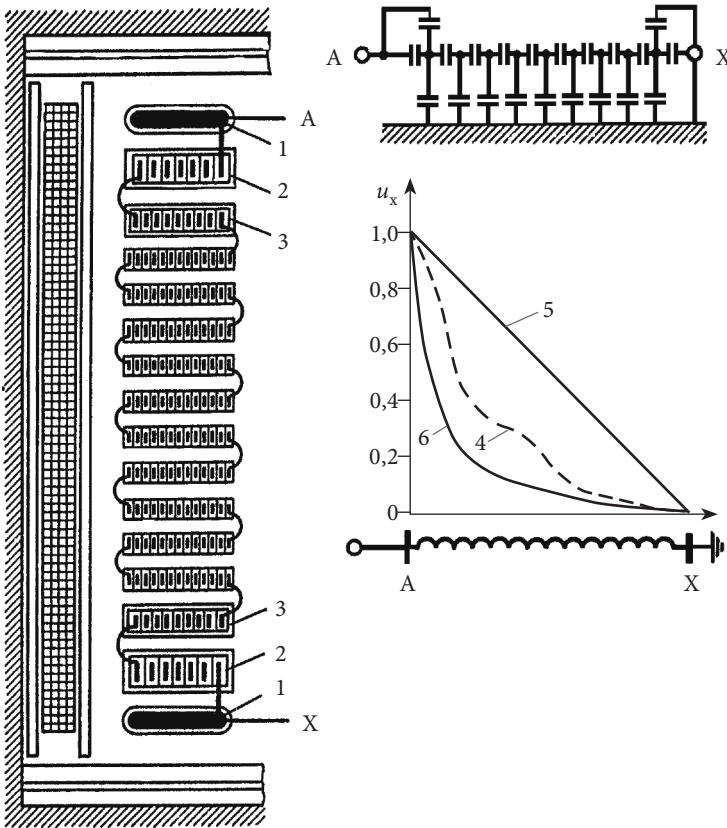


3.112. att. Pārsprieguma viļņa iedarbība autotransformatorā no augstsprieguma puses: A – sprieguma sadalījums virknes tinumā A-a; b – inducētais spriegums tinumā a-X.

3.104. att. shēmai. Tinumam, kas sastāv no horizontālām diskveida spolēm ar radiāliem kanāliem, sprieguma sākuma sadalījums būtiski atšķiras no lineārā (līkne 4 3.113. attēlā). Tas izskaidrojams ar to, ka šim tinumam šķērskapacitātes ir samērā lielas. To uzlādes strāvas plūst caur garenkapacitātēm. Gadījumā, ja tiek lietots kapacitīvs ekrāns, šķērskonkondensatoru uzlāde notiek galvenokārt caur ekrāna kapacitātēm, apejot garenkapacitātes. Tādā veidā tiek tuvināti sākuma un beigu spriegumu sadalījumi. Tomēr transformatoriem ar spriegumu 35 kV un augstāk ieejas spoļu izolācija jāpastiprina.

Transformatoros izmantotās kapacitīvās aizsardzības shēma parādīta 3.114. attēlā. Transformatoriem ar spriegumu 110 kV un augstāk šī shēma sastāv no kapacitīvā gredzena KG un pieciem ekrānvijumiem EV katrā tinuma galā. Ekrānvijumus izgatavo no tinumu vada, izolējot no spolēm un iezemētām daļām. Realizējot šādu shēmu, palielinās gabarītu izmēri, īpaši gadījumā, ja aizsargājamais tinums ir vidējais trīstinumu transformatorā. Šajā variantā katrā tinuma galā novieto tikai divus gredzenus (3.115. att.)

Mūsdienu transformatoros ar spriegumu 220 kV un augstāku bez kapacitīviem gredzeniem vēl izmanto savītos spoļu tinumus. Šajos tinumos vijumu savienošanas secība



3.113. att. Sprieguma sadalījums tinumā ar kapacitīviem gredzeniem un iezemētu X spaili: 1 – kapacitīvais gredzens; 2, 3 – spoles ar pastiprinātu izolāciju; 4 – sprieguma sākuma sadalījums; 5 – sprieguma beigu sadalījums; 6 – sprieguma sākuma sadalījums bez gredzeniem.

atšķiras no to novietošanas secības (3.116. att.). Savijot blakus spoļu vijumus, izdodas palielināt garenkapacitāti  $C_d$  un samazināt koeficientu

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}$$

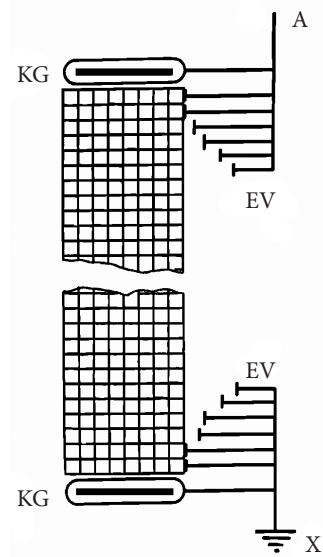
Tomēr savītos tinumos spriegums starp blakus vijumiem ir palielināts. Tas prasa veidot kvalitatīvāku vijumu izolāciju.

Transformatoru daudzslāņu cilindriskajos tinumos ar spriegumu 6 un 10 kV sprieguma sākuma sadalījums atbilst koeficienta  $\alpha$  vērtībām, kas tuvas nullei.

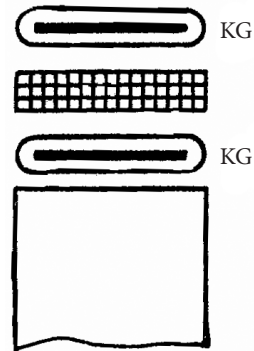
Sprieguma klasei 35 kV daudzslāņu tinuma papild aizsardzībai tiek uzstādīts elektrostatisks ekrāns, kas savienots ar tinumu. Ekrānu novieto zem iekšējā vijumu slāņa. Tas nodrošina labvēlīgāku sprieguma sākuma sadalījumu.

Spriegumu klasei 110 kV un augstāk dažos gadījumos izmanto daudzslāņu ekranēto cilindrisko tinumu (3.117. att.). Elektrostatiskos ekrānus novieto pie tinumu līnijas un neitrāles galiem. Pateicoties slāņu lielai virsmai un tuvam novietojumam, kapacitāte starp slāņiem ir lielāka nekā kapacitāte uz zemi. Rezultātā sprieguma sākuma sadalījums tuvojas beigu sadalījumam.

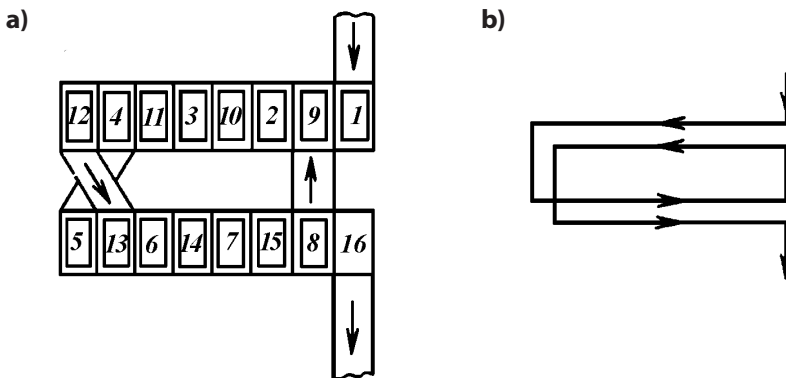
Trīsfāžu transformatoros ar izolētu neitrāli vai ar neitrāli, kas izņemta caur reaktoru, sprieguma impulsa palielināšanos var ierobežot, uzstādot sprie-



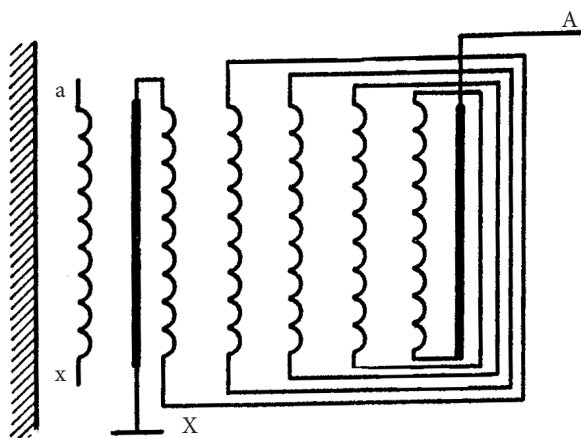
3.114. att. Kapacitīvā aizsardzība spoļu tinumam ar spriegumu 110 kV.



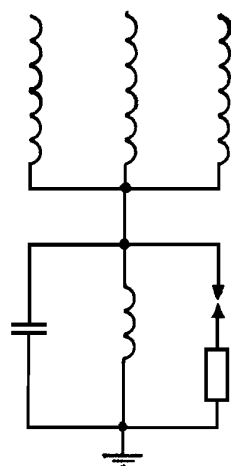
3.115. att. Vienkāršota kapacitīvā aizsardzība.



3.116. att. Vijumu novietojums savītā tinuma spolēs (a) un strāvas virziens vijumos (b).



3.117. att. Daudzslāņu ekranētā tinuma shēma.



3.118. att. Nerezonējoša tinuma shēma.

guma izlādni neitrālē. Tāpat ir iespējams izmantot iepriekš aprakstītās kapacitīvās aizsardzības shēmas neitrāles galam. Papildus vēl neitrālē paralēli novadītājam un strāvu ierobežojošam reaktoram ieslēdz kapacitāti. Kapacitāti aprēķina tā, lai augstfrekvences svārstību laikā pretestība būtu tuva nullei un neitrāle būtu praktiski iezemēta. Nominālās frekvences gadījumā pretestība ir liela un neitrāle praktiski izolēta. Tāda ierīce shematiski parādīta 3.118. attēlā.

Apskatītās tinumu konstrukcijas ļauj palielināt transformatoru elektrisko stiprību. Šādus tinumus sauc par zibensaizsargātiem vai nerezonējošiem. Tajos pārejas procesu laikā ievērojami samazinātas elektromagnētiskās svārstības un praktiski izslēgtas bīstamās rezonanses parādības.

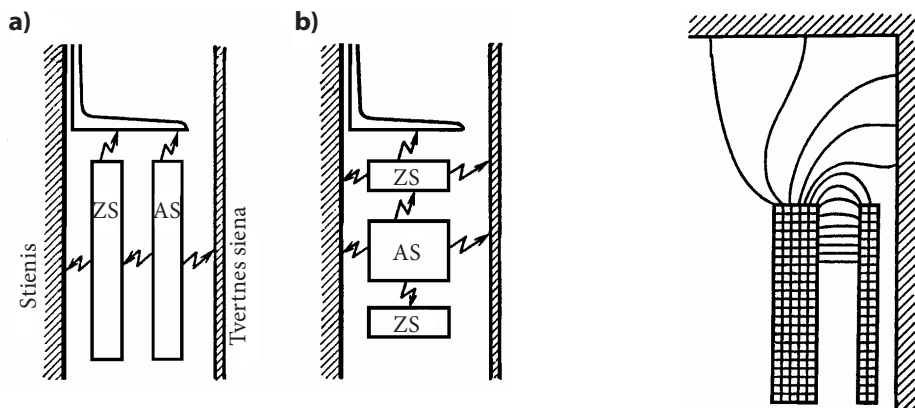
### 3.11.4. Izolācijas konstrukciju pamattipi

Transformatora ekspluatācijas laikā izolācijai jāiztur vesels iedarbību komplekss.

Lai varētu projektēt izolāciju atsevišķām transformatora daļām un elementiem, vispirms jānoskaidro elektriskās iedarbības uz to. Pie tām pieder ilgstoši darba spriegumi, pieļaujамie ilgstošie pārspriegumi, īslaicīgie pārspriegumi no komutācijas procesiem un impulsu pārspriegumi no zibens izlādēšanās atmosfērā.

Elektriskās strāvas jautājumu pētīšanā grūtības rada tas, ka rūpnieciskās frekvences un impulsu spriegumi uz transformatora izolāciju iedarbojas dažādi. Normālie darba spriegumi un komutācijas pārspriegumi galvenokārt iedarbojas uz transformatora galveno izolāciju, bet atmosfēras pārspriegumi – uz garenizolāciju.

Lai vienkāršotu aprēķinus un standartizētu prasības, ko izvirza izolācijas elektriskai stiprībai, aprēķinus veic tā, lai izolācija izturētu normatīvos noteikto pārbaudi. Sastādot pārbaudes normas, ņemtas vērā ekspluatācijas laikā iespējamās elektriskās iedarbības un vajadzīgās rezerves.



3.119. att. Galvenās izolācijas atstarpes transformatorā ar koncentriskiem (a) un jauktiem (b) tinumiem.

3.120. att. Transformatora elektriskā lauka aina.

Apskatīsim galvenās izolācijas atstarpes transformatoriem ar koncentriskiem un jauktiem tinumiem (3.119. att.). Stieņa tipa transformatoros ar koncentriskiem tinumiem galvenās izolācijas atstarpes veido kanāli starp ZS tinumu un stieni, starp AS un ZS tinumiem, starp AS un tvertnes sienām, starp AS un ZS tinumiem un jūgiem u. c. Šīm atstarpēm atbilst noteiktas elektriskās iedarbības pārbaudes laikā.

Atbilstoši sprieguma raksturam transformatorā veidojas elektriskais lauks (mainīgs rūpnieciskās frekvences gadījumā un impulsrakstura atmosfēras radīto pārspriegumu gadījumā). 3.120. attēlā parādīta elektriskā lauka aina, pārbaudot transformatoru ar koncentriskiem tinumiem. AS tinumam pievadīts vienāds potenciāls, bet ZS tinums un magnētqvads iezemēts.

Elektriskais lauks tinumu vidusdaļā ir tuvs homogēnam, bet galos ir nehomogēns. Lielāka lauka intensitāte ir tinuma augšējā un apakšējā daļā. Izolācijas detaļu konstrukcijai un izvietojumam jāatbilst elektriskā lauka ainai.

Visbiežāk izolācija tiek bojāta, ja notiek izlāde pa dielektriķa virsmu. Labāk izveidot slāņu ekvipotenciālo virsmu virzienā. Tad izolācija tiek pakļauta caursites spriegumam, bet ne izlādei pa virsmu. Tāpēc stieņa tipa transformatoros ar koncentriskiem tinumiem galveno izolācija veido cilindriskā vai paplākšņu formā (3.121. att.).

Galvenās izolācijas izveidošanai eļļas transformatoros var būt vairāki varianti:

- eļļas-papīra barjerizolācija, kas izveidojas, piesūcinot papīra izolāciju un elektrokartonu un aizpildot tvertni ar eļļu;
- papīra-eļļas izolācija, kas sastāv no piesūcināta papīra.

Eļļas-papīra barjerizolācijai ir vienkārša izveidošanas tehnoloģija, tāpēc šo izolāciju plaši izmanto. Konstruktiī galvenā izolācija veidojas no eļļas slāņiem un barjerām no elektrokartona vai kabelpapīra.

Aprēķinot izolāciju visām daļām, kas atrodas zem sprieguma, vispirms jānoskaidro elektriskā ziņā visvairāk noslogotie posmi un jānosaka elektriskā lauka intensitāte tajos. Zinot pieļaujamo elektriskā lauka intensitāti un ņemot vērā rezerves koeficientu, nosaka izolācijas atstarpju izmērus. Lauka intensitāti aprēķina analītiski vai nosaka ar matemā-

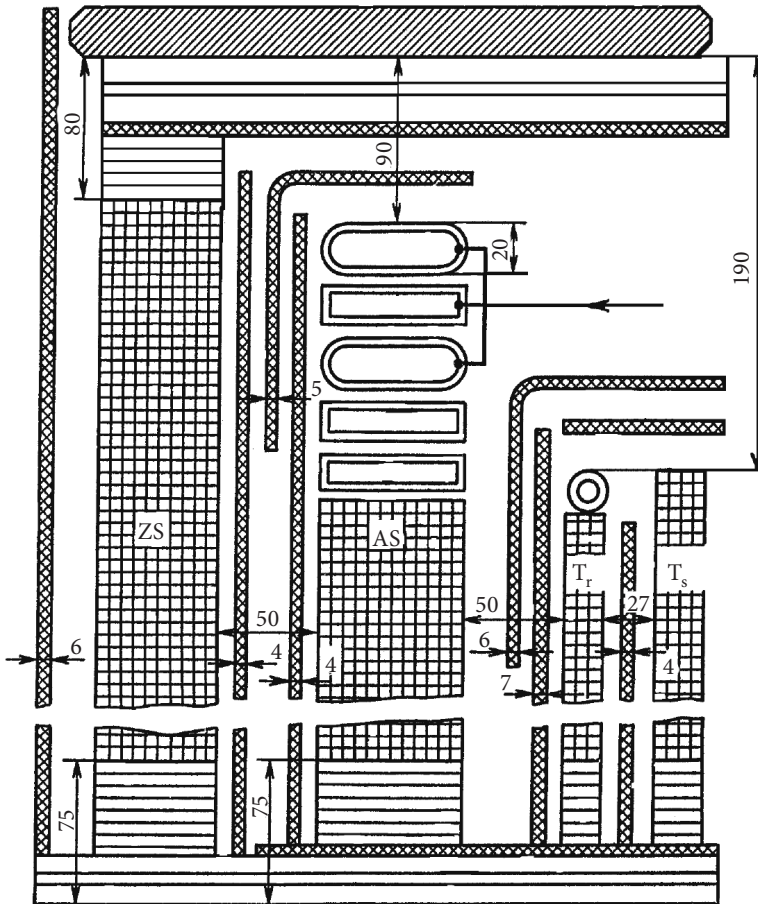


tikās modelēšanas metodēm, izmantojot elektrovadošo papīru vai elektrolītisko vannu.

Minimāli pieļaujamo izolācijas atstarpju noteikšana cieši saistīta ar tām konstrukcijām, kas šīs atstarpes aizpilda. Eļļas transformatoru iekšējā izolācija var sastāvēt no vienkāršu elementu kombinācijas. Šādi elementi ir cietā izolācija starp blakus vijumiem un izolētiem atzariem, eļļas slāņi starp neizolētām atzaru daļām vai ievadu daļām un tvertnes sienām, kombinētā izolācija (tinumu galvenā izolācija, izolācija starp spolēm utt.).

Tā kā lielākai daļai dielektriķu, ko izmanto transformatoros, dielektriskā caurlaidība ir augstāka nekā eļļai, izolācijas cilindru novietošana starp tinumiem nedaudz palielina elektriskā lauka intensitāti. Efektu no barjeru izmantošanas var panākt jau pie to neliela biezuma, kuru nosaka mehāniskā stiprība un tehnoloģiskie apsvērumi.

Transformatoru galvenās izolācijas atstarpes būtiski palielinās, pieaugot sprieguma klasei. Tāpēc palielinās izolācijas materiālu patēriņš un transformatora aktīvās daļas masa un gabarīti. Salīdzināšanai 3.122. attēlā parādīti izolācijas atstarpju izmēri un konstrukcija nosacīti vienādas jaudas 35 kV un 500 kV sprieguma transformatoriem.



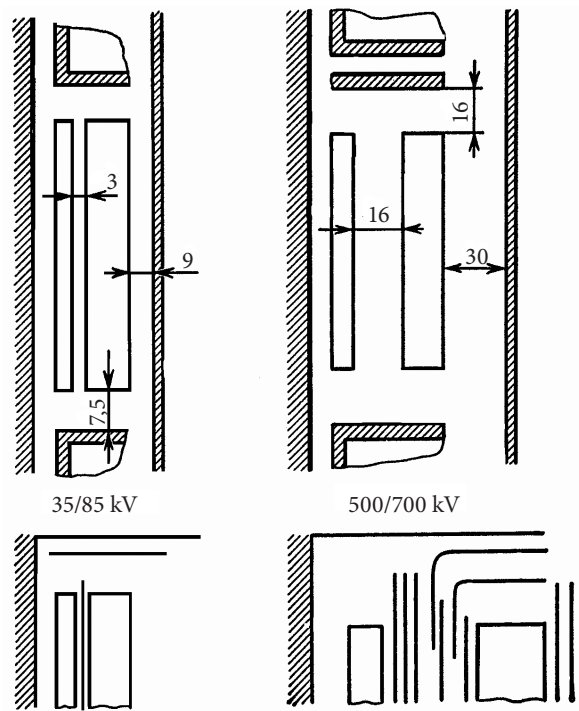
3.121. att. 110 kV AS tinuma galvenā izolācija ar ievadu tinuma augšdaļā.

Zem svītras uzrādīti pārbaudes spriegumi. Izmēri 3.122. attēlā doti centimetros. No attēla redzams, ka 500 kV sprieguma klasei ne tikai palielinās izolācijas atstarpes, bet sarežģītāka kļūst arī izolācijas konstrukcija. Tas saistīts ar to, ka tiek kombinētas barjeras no cilindriem un leņķa paplāksnēm.

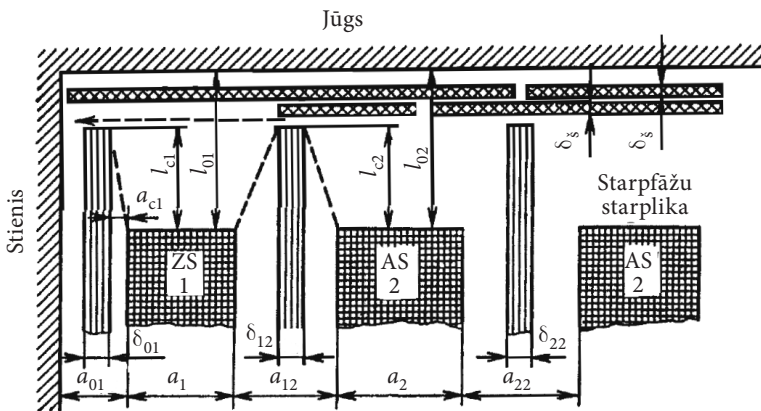
Galveno izolāciju tinumam ar izolētu neitrāles spaili izvēlas atbilstoši pārbaudes spriegumam. Ja neitrāles spaiļes sprieguma klase ir zemāka nekā līnijas spaiļei, galveno izolāciju var veidot pakāpveidā. Šajā gadījumā, attālinoties no līnijas spaiļes, izolācijas atstarpī iespējams samazināt.

Garenizolāciju var noteikt, vadoties gan no elektriskās stiprības darba frekvencei, gan no impulsu iedarbības. Vadu izolācija tinumā parasti nodrošina arī izolāciju starp spolēm. Papildizolāciju var izmantot ieejas spolēm (sk. 3.11.3. apakšnodaļu).

Rekomendācijas galvenās izolācijas atstarpju izvēlei dotas 3.2. un 3.3. tabulā. Šīs rekomendācijas atbilst noteiktai izolācijas konstrukcijai (3.123. att.). Tinuma izolācija no jūga tiek pastiprināta ar elektrokartona starplikām un paplāksnēm. Starp blakus stienņu AS tinumiem novieto starpfāžu elektrokartona starpliku (pozīcija 9 3.124. attēlā).



3.122. att. Izolācijas atstarpes un galvenās izolācijas struktūra dažāda sprieguma transformatoriem.



3.123. att. Galvenās izolācijas uzbūve pārbaudes spriegumiem no 5 līdz 85 kV.

3.2. tabula. Galvenā izolācija. Minimālie izolācijas izmēri ZS tinumam

Transformatora jauda $S$ , kV·A	$U_p$ ZS tinumam, kV	ZS tinums no jūga $l_{01}$ , mm	ZS tinums no stieņa, mm			
			$\delta_{01}$	$\alpha_{c1}$	$\alpha_{01}$	$l_{c1}$
25–250	5	15	kartons $2 \times 0,5$	150	4	–
460–640*	5*	Pieņem vienādu ar pārbaudes spriegumu AS tinumā	kartons $2 \times 0,5$	–	5	–
1000–2500	5		4	6	15	18
630–1600	18, 25, 35		4	6	15	25
2500–6300	18, 25, 35		4	8	17,5	25
630 un vairāk	45		5	10	20	30
630 un vairāk	55		5	13	23	45
Visas jaudas	85		6	19	30	70

\* Skrūves tinumam ar pārbaudes spriegumu  $U_p = 5$  kV izmēri jāņem no nākamās rindīņas jaudām 1000–2500 kV·A.

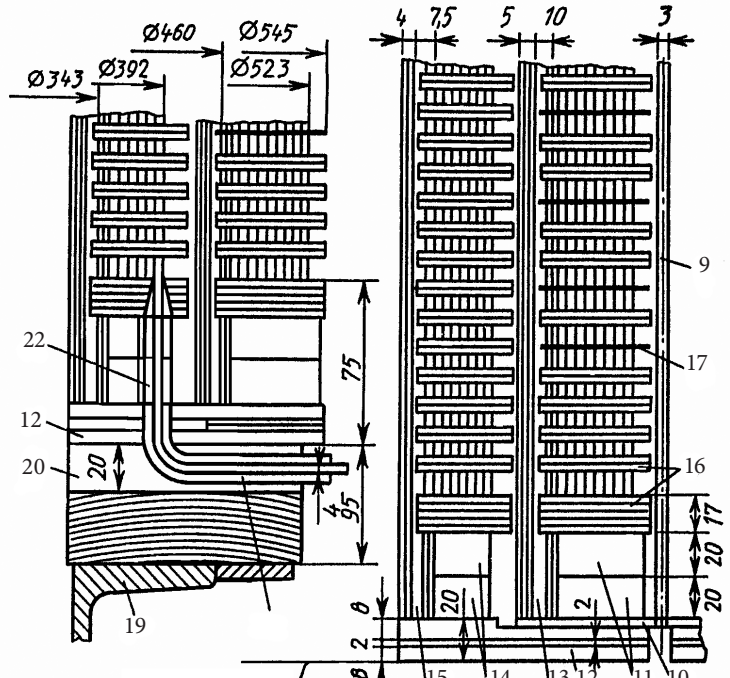
3.3. tabula. Galvenā izolācija. Minimālie izolācijas izmēri AS tinumam

Transformatora jauda $S$ , kV·A	$U_p$ AS tinumam, kV	AS tinums no jūga, mm		Starp AS un ZS, mm		Cilindra izvirzījuma $l_{c2}$ , mm	Starp fāzēm, mm	
		$l_{02}$	$\delta_3$	$\alpha_{12}$	$\delta_{12}$		$\alpha_{12}$	$\delta_{22}$
25–100	18, 25, 35	20	–	9	2,5	10	8	–
160–230	18, 25, 35	30	–	9	3	15	10	–
1000–6300	18, 25, 35	50	–	20	4	20	18	–
630 un vairāk	55	50	2	20	5	30	20	3
160–630	85	75	2	27	5	50	20	3
1000–6300	85	75	2	27	5	50	30	3
10 000 un vairāk	85	80	3	30	6	50	30	3

3.124. attēlā parādīta galvenās izolācijas konstrukcija 35 kV sprieguma transformatoram ar jaudu 1600 kV·A. Izolāciju starp AS un ZS tinumiem izveido no cietiem papīra bakelīta cilindriem vai uztinot tos no elektrokartona. Cilindrus novieto cieši pie AS tinuma, ja tas ir daudzslāņu cilindrisks tinums, vai atstarpē starp tinumiem, ja AS tinums nepārtraukts kā minētajā attēlā.

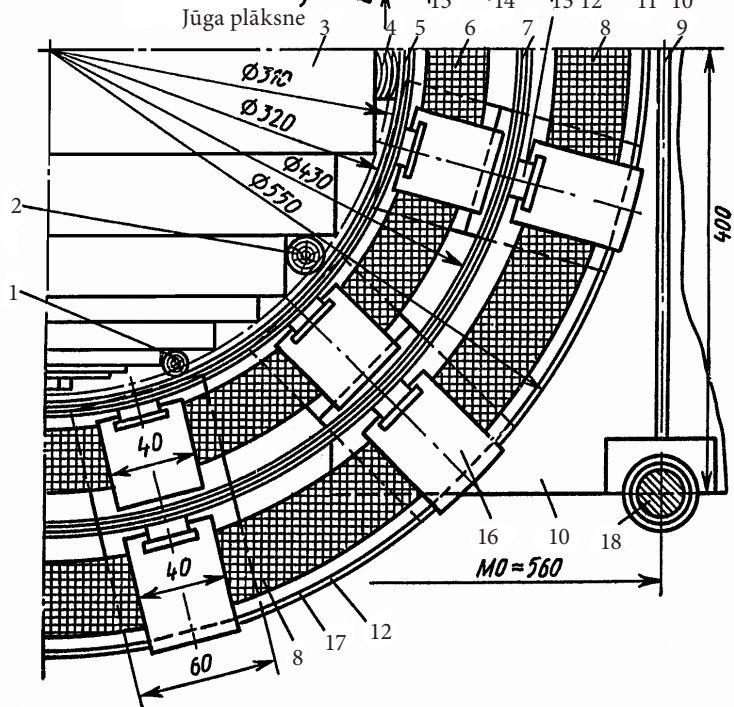
Lai efektīvāk novērstu daļējās izlādes no tinuma malām, cilindra augstumam jābūt lielākam par tinuma augstumu (sk. pārtrauktās līnijas 3.123. attēlā).

110 kV transformatoriem galveno izolāciju parasti veido divos variantos. Divtinumu transformatoros ar sprieguma regulēšanu zem slodzes un nedalītu ZS tinumu. AS tinuma līnijas spaile ievadīta augšdaļā, bet otra spaile apakšdaļā pievienota neitrālei. AS tinuma izolāciju pārbauda ar spriegumu 200 kV, bet no apakšējā jūga – ar spriegumu 100 kV.



3.124. att. Tinumu un izolācija izveidojums 35 kV transformatoram ar jaudu 1600 kV-A:

- 1, 2 – koka stieņi;
- 3 – magnētqvads;
- 4 – koka plāksne;
- 5 – papīra bakelīta cilindrs Z tinumam;
- 6 – ZS tinums;
- 7 – papīra bakelīta cilindrs A tinumam;
- 8 – AS tinums;
- 9 – starpfāžu starplika;
- 10 – izolācijas vairogs;
- 11 – AS tinuma balstgredzeni;
- 12 – jūga izolācija;
- 13 – līste;
- 14 – ZS tinuma balstgredzeni;
- 15 – līste;
- 16 – AS tinuma starplika;
- 17 – elektrokartona paplāksne;
- 18 – vertikāla tērauda tapskrūve, kas izolēta ar papīra bakelīt cauruli;
- 19 – jūga sija;
- 20 – izlīdzinošās izolācijas plāksne;
- 21, 22 – tinuma izolēti atzari.



Galvenās izolācijas konstrukcija parādīta 3.121. attēlā.

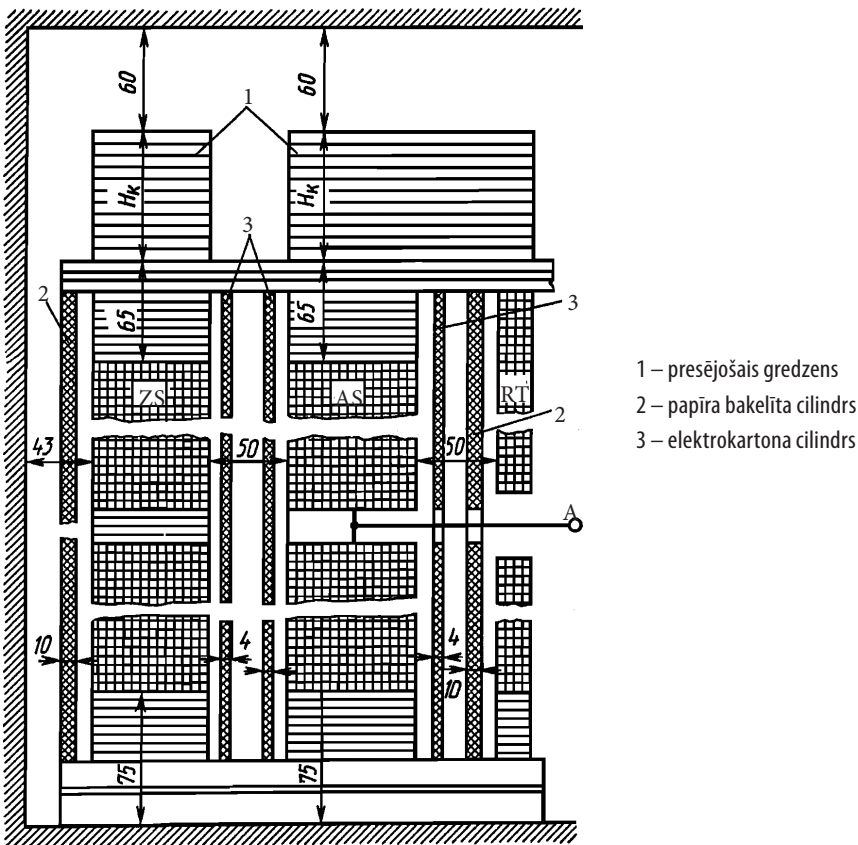
Regulēšanas tinums sadalīts divās daļās: rupjās regulēšanas tinums  $T_r$  un smalkās regulēšanas tinums  $T_s$  (sk. 3.121. att.). Šis tinums ir virs pamattinuma. AS tinuma izolācija no regulēšanas tinuma izveidota analogiski kā starp AS un ZS tinumiem. Starp smalkās regulēšanas tinumiem blakus fāzēs novieto elektrokartona starpliku.

Divtinumu transformatoros ar dalītu ZS tinumu AS tinums sadalīts divās daļās, kas savienotas paralēli. Līnijas vadu A ievada tinuma vidusdaļā. Tinuma konstrukcija šim gadījumam parādīta 3.125. attēlā.

Apskatīsim garenizolācijas konstrukciju starp tinuma vijumiem, vijumu slāņiem un spolēm. Šo izolāciju nosaka gan 50 Hz frekvences spriegums, gan impulsspriegumi.

Izvēloties vijumu izolāciju, jāņem vērā tās konstruktīvais izveidojums un paredzētais aizsardzības veids no impulsu pārspriegumiem.

Daudzslāņu cilindriskos tinumos pārspriegumu sadalījums ir tuvs lineāram. Šī tipa tinumus, kurus uztin no apaļa vai taisnstūrveida vada, plaši izmanto 6–35 kV sprieguma transformatoros ar jaudu līdz 80 000 kV·A. Spriegumiem, kas lielāki par 35 kV, lieto papildu ekrānaizsardzību pret pārspriegumiem.

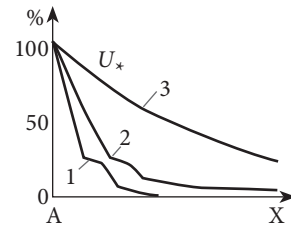


3.125. att. 110 kV transformatora galvenā izolācija ar līnijas vada pievadišanu tā vidusdaļā.

Nepārtrauktos tinumos ar spriegumu 110 kV un augstāk kapacitīvā aizsardzība ietver sevī gredzenus un ekranējošus vijumus, kas nodrošina labvēlīgāku sprieguma sākuma sadalījumu.

Izmantojot savītos tinumus kopā ar kapacitīviem gredzeniem, var panākt gandrīz lineāru sprieguma sākuma sadalījumu.

3.126. attēlā parādīti sprieguma sākuma sadalījumi 35–110 kV spriegumu transformatoros. No šī attēla redzams, ka vislielākais stāvums sprieguma sākuma sadalījumā ir nepārtrauktam tinumam bez kapacitīva gredzena, bet vismazākais – savītā tinumā.



3.126. att. Sprieguma sākuma sadalījums AS tinumos: 1 – nepārtraukts tinums; 2 – nepārtraukts tinums ar kapacitīvu gredzenu; 3 – savīts tinums.

Lai ieejas spoles un vijumus pārspriegumu laikā pasargātu no caursīšanas, izolāciju starp slāņiem un pirmajām spolēm pastiprina ar kabelpapīru.

6, 10 un 15 kV spriegumam vijumu izolācija ir pietiekama, tāpēc to īpaši nepastiprina.

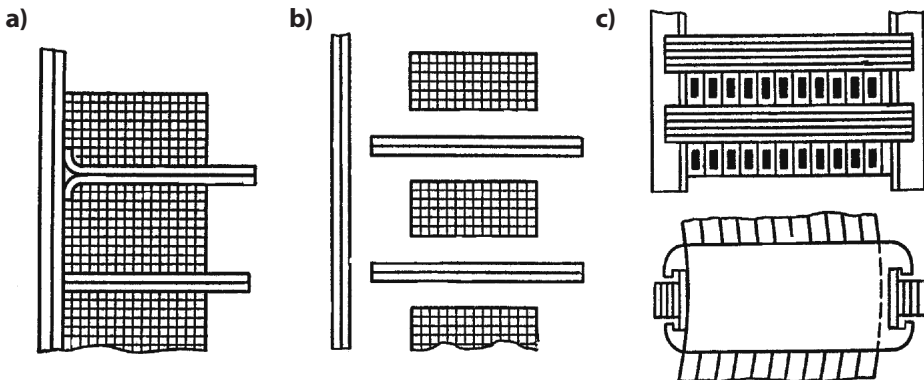
20 un 35 kV transformatoros nepārtrauktiem tinumiem izolāciju pastiprina tikai ieejas spolēm. Piemēram, transformatoros ar 35 kV spriegumu pastiprina izolāciju tikai divām spolēm sākumā un beigās.

Augstākām sprieguma klasēm, ja izmanto 3.112. un 3.114. attēlā parādītās aizsardzības shēmas, ieejas spoļu izolācija ir atkarīga no novietojuma attiecībā pret tinuma līnijas spaili. 110 kV tinumam ar ievadu augšējā daļā (3.121. att.) pirmajai spolei ir 4 mm papildizolācija, otrajai – 3,5 mm, bet trešajai un ceturtajai – 2 mm uz katras puses.

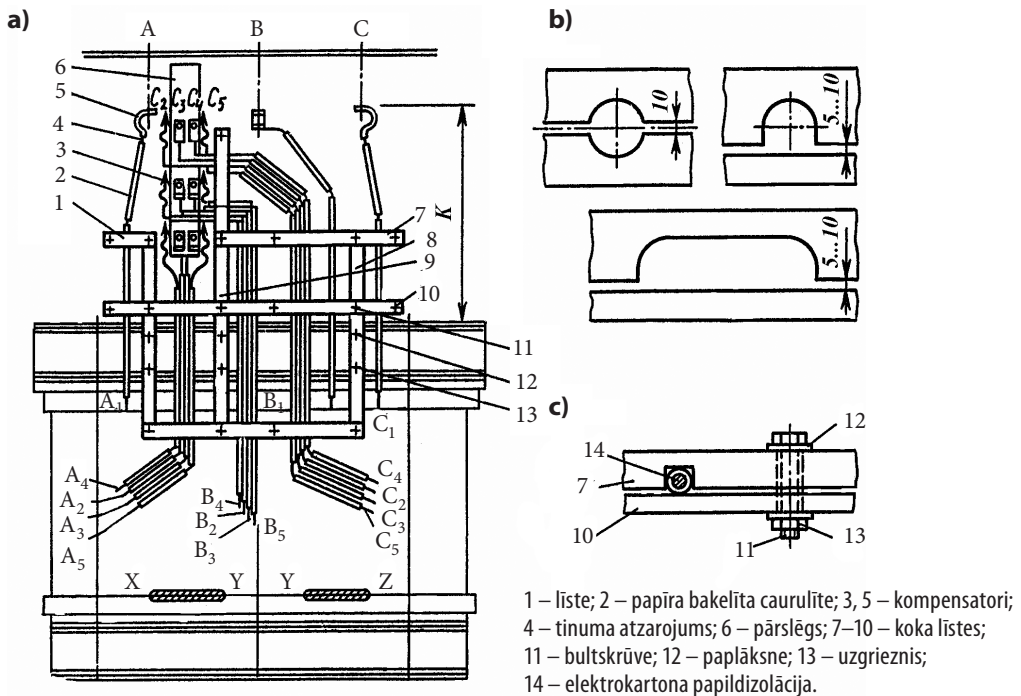
Lai nodrošinātu labvēlīgāku sprieguma sākuma sadalījumu, starpspoļu kanālu izmērus var mainīt atkarībā no to novietojuma.

Starpspoļu izolācijas veidošanai ar eļļas radiālajiem kanāliem izmanto elektrokartona distanču starplikas (3.127. att. c), kā arī vienkāršās un leņķa paplāksnes (3.127. att. a, b).

Atzarojumi, kas savieno atsevišķas tinumu daļas ar ievadiem vai ar pārslēgiem, parasti



3.127. att. Starpspoļu izolācija.



3.128. att. 1600 kV-A jaudas transformatora AS tinuma atzarojumu konstruktīvā shēma: a – shēma; b – izgriezumi listēs; c – atzarojumu stiprinājums.

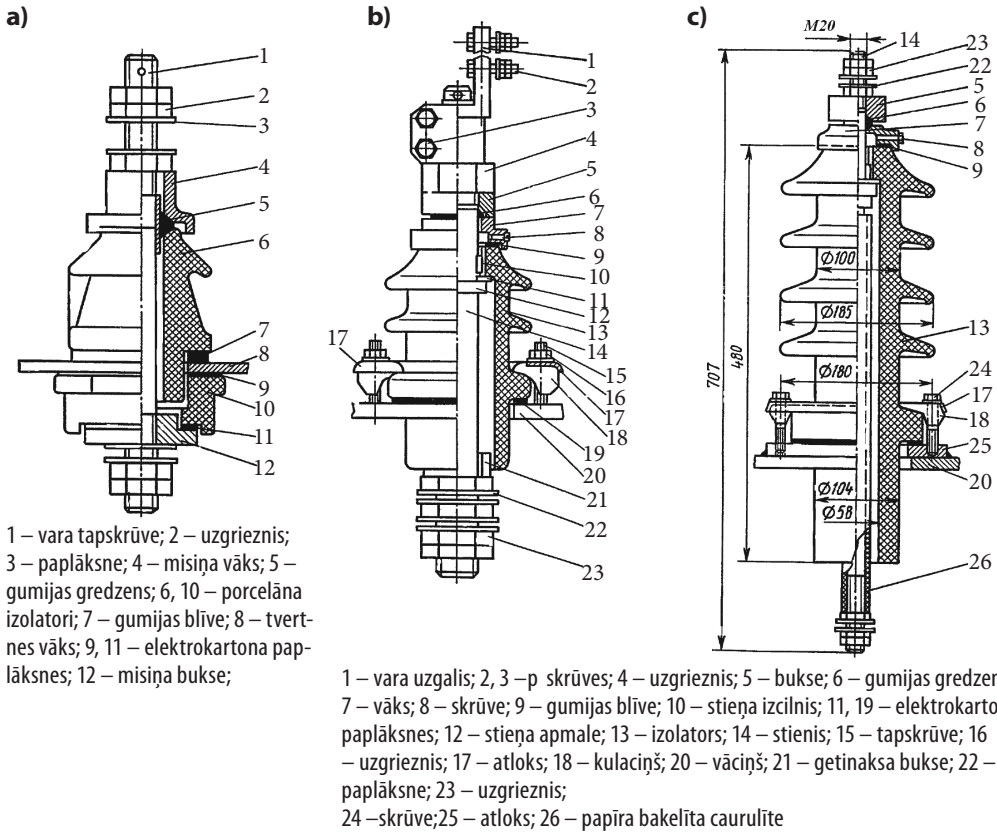
atrodas eļļā starp tinumu un tvertnes sienām un starp jūgu un tvertnes vāku. Tinumu atzariem un pārslēgiem jābūt izolētiem no transformatora tvertnes, stiprinājuma detaļām, un citām iezemētām daļām, kā arī no daļām, kas atrodas zem sprieguma. Atzarus izolē ar lakaudumu, papīra bakelīta caurulītēm u.c. Atzarus pie transformatora aktīvās daļas stiprina ar koka konstrukcijām (3.128. att.).

Transformatora ievadus veido porcelāna izolatori, caur kuriem iet strāvu vadoši stieņi. Tvertnes iekšpusē ievads savienots ar tinumu, bet ārpusē pieslēgts elektriskajam tīklam. Strāvu vadošo stieni izolatora augšdaļā no iezemētā atloka šķir gaisa slānis.

Ievadu izmēri un ārējā konfigurācija ir atkarīga no sprieguma klases, transformatora uzstādīšanas vietas un strāvas lieluma. Transformatoriem, kurus uzstāda ārā, ievadiem jābūt ar aizsargribām, lai lietūs laikā daļu no virsmas pasargātu no mitruma. Ribu apakšējai virsmai piešķir tādu formu, lai ūdens pilieni uz tās nevarētu noturēties (3.129. att.). Tādā konstrukcijā palielinās virsmas izlādes ceļš un pieaug ievada elektriskā stiprība.

110 kV un augstāka sprieguma ievadus iedala divās grupās: eļļas barjeras un papīra eļļas ievados. Pirmajos galvenā izolācija ir eļļa, kas sadalīta slāņos ar papīra bakelīta cilindriem ar alumīnija folijas izlīdzinošiem klājumiem. Papīra eļļas ievados galveno





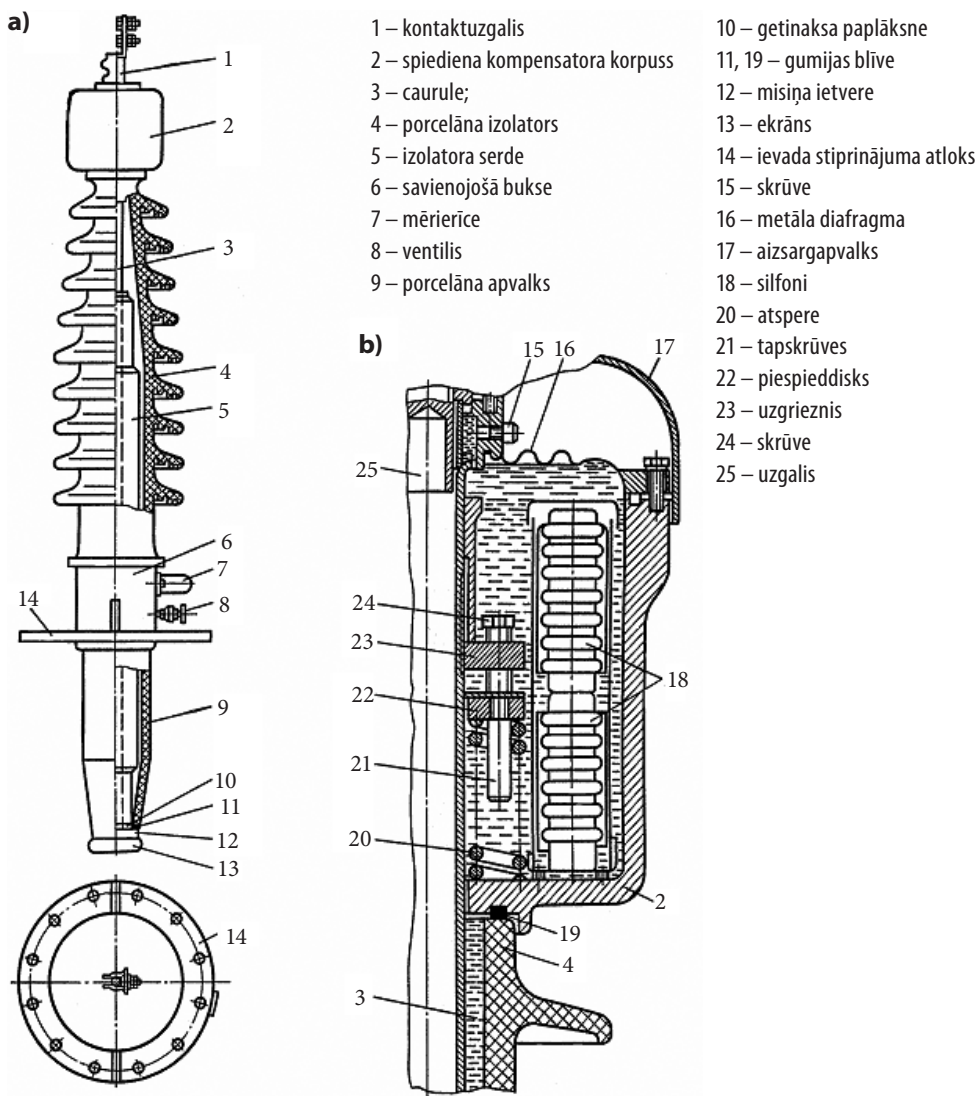
3.129. att. Noņemami ievadi: a – strāvai 400 A un spriegumam 400 kV; b – strāvai 3000 A un spriegumam 6–10 kV; c – 250 A strāvai un spriegumam 35 kV.

izolāciju veido kabelpapīrs, kas cieši uztīts uz vara vai misiņa caurules. Papīrs piesūcināts ar eļļu un sadalīts slāņos ar folijas izlīdzinošiem klājumiem. Klājumi paredzēti elektriskā lauka izlīdzināšanai. Ievadus aizpilda ar degazētu transformatora eļļu, izolējot tos no eļļas tvertne un atmosfēras. Tā izveidojas hermetizēti ievadi (3.130. att.).

### 3.11.5. Izolācijas pilnveidošanas virzieni

Pārspriegumu pētījumi transformatoros ar dažādiem tinumiem un aizsardzības veidiem ļauj uzlabot izolāciju. Optimizētās galvenās izolācijas konstrukcijās ir samazināti izolācijas kanālu izmēri. Garenizolācija tiek pilnveidota, uzlabojot tinumu viļņu parametrus un tādējādi samazinot pārspriegumus, kā arī palielinot pieļaujamās iedarbības uz uzlaboto vijumu izolāciju.





3.130. att. 110 kV sprieguma hermetizēts transformatora ievads: a – kopskats; b – savelkošā un kompensējošā ierīce.

Transformatoriem ar 35 kV spriegumu izolācijas konstrukcija tiek pilnveidota, izmantojot slāņveida koka un plastikāta izolāciju. Nepieciešamo elektrisko stiprību nodrošina, ieviešot eļļas piesūcināšanas vakuumtehnoloģiju. Izolācijas konstrukcijās izmanto cietas leņķa paplāksnes tinuma sākumā un beigās, t. i., vietās, kur elektriskā lauka intensitātei ir maksimālā vērtība (3.131. att.). Tādas izolācijas lietošana ļauj samazināt atstarpes par 15–20 %. Līdzīgā veidā tiek pilnveidota izolācija 110 kV sprieguma klasei.

Turpmākā izolācijas pilnveidošana lieljaudas transformatoros galvenokārt paredzēta, izmantojot tādu aizsardzību, kas nodrošina pārspriegumu ierobežošanu (pārspriegumu ierobežošanas cinka oksīda izlādņi u. c.).

Garenizolācijas pilnveidošanas mērķis – samazināt izolācijas atstarpes starp tinuma elementiem. Īpaša uzmanība jāpievērš konstrukciju tehnoloģiskumam. Šis faktors, piemēram, nepārtraukto AS tinumu izmantošanu 500 kV klases transformatoros nosaka kā visekonomiskāko un ar mazāko darbietilpību. Vienmērīgu impulsspriegumu sadalījumu šajā gadījumā nodrošina sadalīts kapacitīvais ekrāns.

Ekrāna novietošana uz tinuma virsmas un kapacitīvo elementu izvietošana gar visu ekrānu ļauj tiktāl izlīdzināt impulsspriegumu sadalījumu, ka izolāciju starp spolēm var izvēlēties, neņemot vērā iepriekš apskatītās prasības (sk. 3.11.3. apakšodaļu).

Turpmāku vijumu izolācijas izmēru samazināšanu un uzlabošanu var panākt, lietojot emaljas pārklājumu.

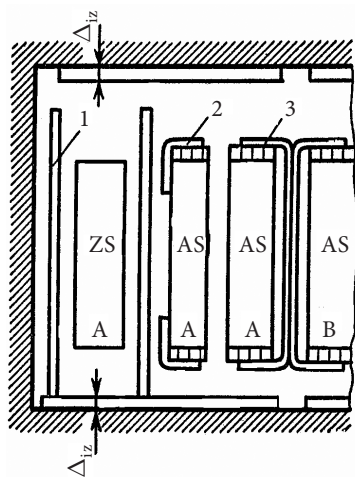
Jāatzīmē, ka progress izolācijas konstrukciju izstrādē cieši saistīts ar progresu tehnoloģijā. Vairāki jaunie konstruktīvie risinājumi ir prasījuši izstrādāt speciālus tehnoloģiskos procesus, piemēram, sarežģītas konfigurācijas izolācijas detaļu izgatavošana no samitrināta kartona vai celulozes ar liešanas vai formēšanas metodi.

Eļļas barjeras izolācijas iespējas vēl nav izsmeltas. Tomēr lieljaudas augstsprieguma transformatoru masas un gabarītu rādītāji sasnieguši robežvērtības no transportēšanas viedokļa. Tāpēc jāmeklē jauni konstruktīvi risinājumi, tanī skaitā izolācijas pilnveidošanas jomā.

No šī viedokļa skatoties, perspektīva ir papīra-eļļas izolācija. Izmantojot to, iespējams samazināt galvenos izolācijas izmērus gandrīz divkārt. Tas ļauj samazināt masu un gabarītus transformatoram kopumā vai palielināt maksimālo jaudu. Diemžēl tinumu izgatavošana ar papīra-eļļas izolāciju ir daudz sarežģītāka nekā ar eļļas barjeras izolāciju.

3.132. attēlā parādīta papīra-eļļas galvenās izolācijas konstrukcija. Visu telpu starp AS un ZS tinumiem aizpilda ar eļļu piesūcināti papīra cilindri.

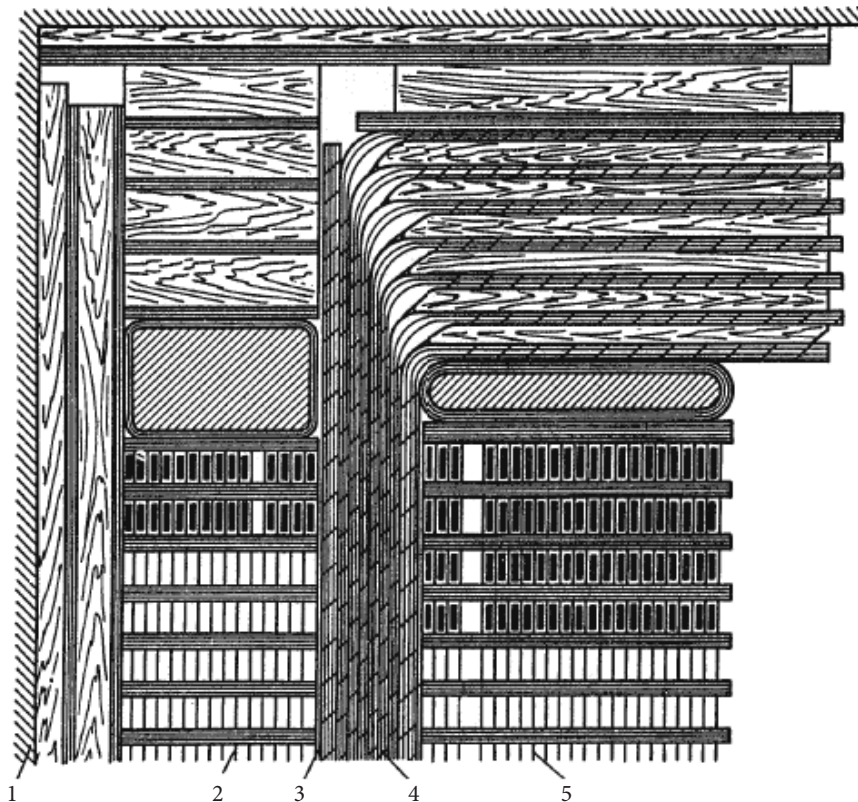
Izgatavojot un ierīkojot šādu izolāciju, jānodrošina, lai tā cieši pieguļ spolēm. Pretējā



3.131. att. 35 kV transformatora uzlabotās galvenās izolācijas konstrukcija: 1 – izolējošs cilindrs; 2, 3 – leņķa paplāksnes.

gadījumā galvenās izolācijas stiprība ir zemāka. Šis izolācijas tips ļauj ievērojami samazināt atstarpes, bet to izveide prasa lielu darba patēriņu.

Transformatoru izbūve ar jaudu, kas lielāka par 2500–3000 MV·A, iespējams, prasīs ieviest principiāli jaunas izolācijas un dzesēšanas konstrukcijas, piemēram, gāzes izolāciju ar iztvaices dzesēšanu.



3.132. att. Papīra-eļļas galvenā izolācija: 1 – magnētvasda stienis; 2 – ZS tinums; 3 – papīra bakelīta cilindrs; 4 – papīra cilindrs; 5 – AS tinums.

### 3.11.6. Sauso transformatoru izolācija

Sauso transformatoru galveno izolāciju izveido no tādiem pašiem konstruktīviem elementiem kā eļļas transformatoros (cilindri, leņķa paplāksnes utt.). Šeit bez pietiekamas elektriskās stiprības nodrošināšanas jāizveido arī dzesēšanas kanāli un izolācijas detaļas jāizvieto tā, lai gaiss viegli piekļūstu tinumiem. Galvenās izolācijas atstarpes sausos transformatoros ir lielākas nekā eļļas transformatoros gaisa mazākās elektriskās stiprības dēļ. Piemēram, sausos transformatoros ar pārbaudes spriegumu 24 kV galvenā izolācijas atstarpe starp AS un ZS tinumiem ir 40 mm, bet eļļas transformatoros ar pārbaudes spriegumu 25 kV – 9 mm.

Starpvijumu izolāciju sausos transformatoros nodrošina vadu izolācija, bet starpspoļu izolāciju veido gaisa horizontālie kanāli. To izmērus nosaka, vadoties no siltuma novadīšanas prasībām. Tinumus, tāpat kā eļļas transformatoros, veido no vara vai alumīnija vadiem. Gadījumos, kad iekārtas darbojas paaugstinātas temperatūras apstākļos, vadiem izmanto H un F klases izolāciju. Sausajos transformatoros lieto arī monolīto izolāciju. Magnētqvads un tinumi tādā gadījumā atrodas kompaundā, kas pēc sacietēšanas ir gan izolācijas materiāls, gan siltuma novadītājs.

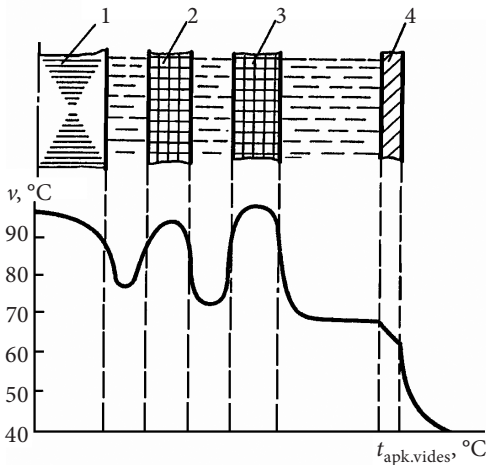
## 3.12. TRANSFORMATORU SILŠANA UN DZESĒŠANA

### 3.12.1. Silšana, siltumpāreja un transformatora pieļaujamās temperatūras

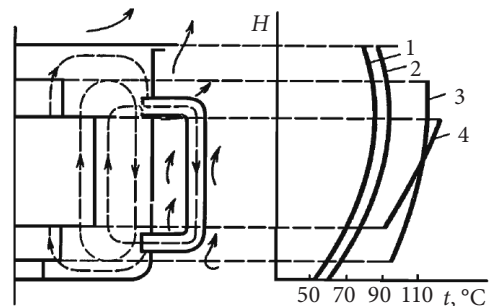
Elektriskās enerģijas zudumi, kas darbības laikā rodas transformatorā, pārvēršas siltumenerģijā un izraisa tā atsevišķu daļu silšanu. Galvenie siltuma avoti transformatorā ir magnētvaids un tinumi. Zudumi tinumos nominālajā darba režīmā sastāda aptuveni 75 % no kopējiem zudumiem. Transformatora silšana ir galvenais iemesls, kas ierobežo tā jaudu dažādos darba režīmos. Tinumu, magnētvaida un citu transformatora daļu maksimāli pieļaujamā temperatūra ir atkarīga no dzesēšanas intensitātes, izolācijas siltumizturības un noteikta kalpošanas ilguma.

Sākumperiodā pēc transformatora ieslēgšanas siltumenerģija, kas izdalās magnētvaidā un tinumos, daļēji pāriet apkārtējā vidē, bet daļēji silda serdi un tinumus, paaugstinot to temperatūru. Sasniedzot zināmu temperatūru, visa siltumenerģija, kas izdalās magnētvaidā un tinumos, pāriet apkārtējā vidē, un transformatora siltumrežīms stabilizējas. Aptuvens temperatūras sadalījums eļļas transformatora garenšķēlumā parādīts 3.133. attēlā. No attēla redzams, ka siltuma plūsmas ceļu no magnētvaida un tinumiem apkārtējā vidē var sadalīt šādos posmos: 1 – no magnētvaida vai tinumu iekšējiem punktiem līdz ārējai virsmai; 2 – no magnētvaida un tinumu ārējās virsmas eļļas slānī; 3 – no eļļas uz tvertnes iekšējo virsmu; 4 – no tvertnes sienas iekšējās virsmas līdz ārējai virsmai; 5 – no tvertnes ārējās sienas apkārtējā vidē. 1. un 4. posmā siltumpārnese notiek siltumvadāmības ceļā, 2. un 3. posmā – konvekcijas ceļā, bet 5. posmā – izstarošanas un konvekcijas ceļā.

Aptuvens temperatūras sadalījums transformatora augstumā parādīts 3.134. attēlā.



3.133. att. Temperatūras sadalījums eļļas transformatora garenšķēlumā: 1 – stienis; 2, 3 – AS un ZS tinums; 4 – tvertnes sieniņa.



3.134. att. Temperatūras sadalījums transformatora augstumā un eļļas plūsmas virzieni: 1 – tvertnes ārējā virsma; 2 – eļļa; 3 – magnētvaids; 4 – tinumi.

Pieļaujamās virstempertūras attiecībā pret apkārtējo vidi atsevišķām transformatora daļām tiek noteiktas normatīvajos dokumentos. Piemēram, Krievijas standarti eļļas transformatoru tinumiem ar A klases izolāciju nosaka šādas pieļaujamās virstempertūras:

- 65 °C – eļļas dabiskai vai piespiedu cirkulācijai bez mērķtiecīgas virzības caur tinumu;
- 70 °C – eļļas piespiedu cirkulācijai ar mērķtiecīgu virzību caur tinumu;
- 75 °C – magnētveda vai citu konstruktīvo daļu virsmai;
- 60 °C – hermētiskiem transformatoriem ar paplašinātāju;
- 55 °C – nehermētiskiem transformatoriem bez paplašinātāja.

Sausajiem transformatoriem tinumu pieļaujamās virstempertūras atkarībā no izolācijas klases ir šādas: A – 60 °C; E – 75 °C; B –p 80 °C; F – 100 °C un H – 125 °C.

Minētās virstempertūras attiecas uz transformatoriem, kas ilgstoši darbojas nominālajā režīmā šādos apstākļos: apkārtējās vides temperatūra ir robežās no +40 °C līdz –45 °C; dzesētāja ieejā ūdens temperatūra nepārsniedz +25 °C; diennakts vidējā temperatūra nepārsniedz +30 °C un gada gaisa vidējā temperatūra nav zemāka par +20 °C.

Transformatoru ekspluatācija ar lielākām virstempertūrām būtiski ietekmē izolācijas novecošanos – strauji samazinās izolācijas elektriskā un mehāniskā stiprība. Piemēram, papīra izolācijas kalpošanas laiks samazinās aptuveni divas reizes, ja pieļaujamā temperatūra tiek pārsniegta par 8 °C. Tāpēc normas tiek noteiktas tā, lai tinuma maksimālā vidējā temperatūra gada karstākajā laikā nepārsniegtu 105–110 °C, ja visa gada vidējā temperatūra ir aptuveni 75 °C. Pieļaujamās ilgstošās un īslaicīgās transformatoru pārslodzes arī tiek normētas.

Visu pieļaujamo lielumu vērtības tiek noteiktas, pamatojoties uz ilgstošu transformatoru ekspluatācijas pieredzi daudzās pasaules valstīs.

### 3.12.2. Transformatoru dzesēšanas sistēmas

Mūsdienās transformatoros izmanto dažādas dzesēšanas sistēmas. Tās būtiski atšķiras sausajiem un eļļas transformatoriem.

Vaļējiem un aizsargātiem sausajiem transformatoriem aktīvā daļa (magnētveds, tinumi, konstruktīvās detaļas) saskaras ar apkārtējo gaisu un dzesēšana notiek dabiskās konvekcijas ceļā.

Hermētiskajos sausajos transformatoros aktīvo daļu novieto tvertnē, kas pildīta ar gāzi, piemēram, ar elegāzi. Dzesēšana šajā gadījumā notiek minētās gāzes un gaisa dabiskās cirkulācijas ceļā.

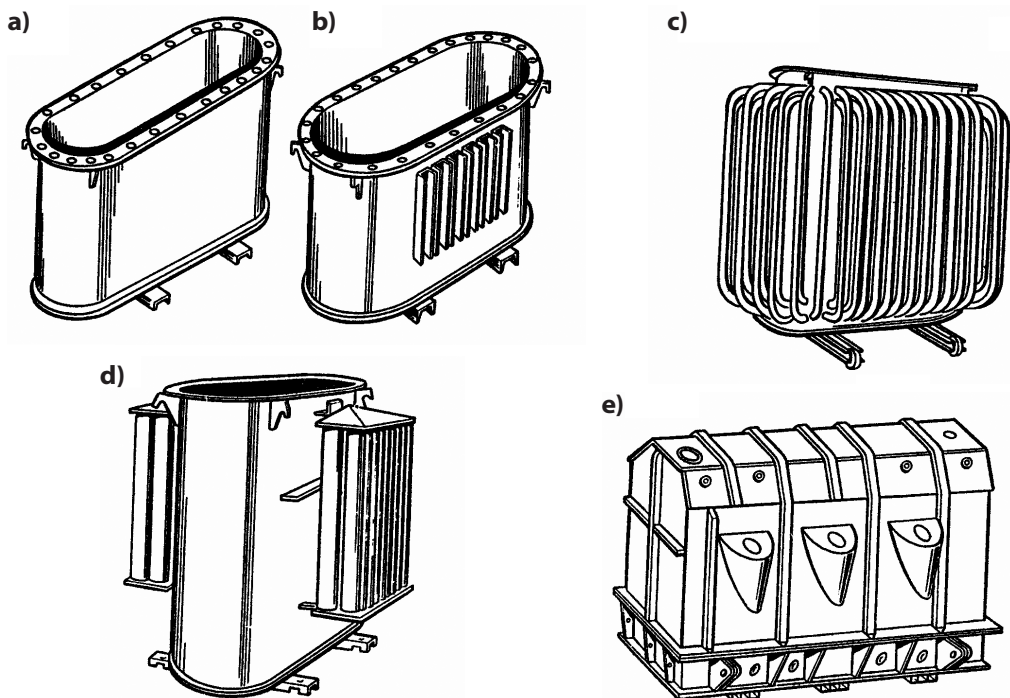
Sausajos transformatoros ar piespiedu gaisa cirkulāciju forsētu gaisa kustību nodrošina ventilatori.

Jāatzīmē, ka sakarā ar to, ka gaisam ir zemāka siltumvadāmība un elektriskā stiprība salīdzinājumā ar eļļu, sausos transformatorus izmanto jaudām līdz 1600–2500 kVA un spriegumiem līdz 15–20 kV. Turklāt tos uzstāda vietās, kurās gaisa mitrums nepārsniedz 80 %.

Eļļas transformatoros ar dabisko gaisa un eļļas cirkulāciju aktīvo daļu novieto tvertnē. Tās konstrukcijas atkarībā no jaudas var būt dažādas (3.135. att.). Tvertni aizpilda ar transformatoru eļļu. Eļļa, saskaroties ar uzsilušo magnēt vadu un tinumiem, arī sasilst, tās blīvums samazinās. Sasilusī eļļa pārvietojas tvertnes augšējā daļā un, saskaroties ar tās sieniņām, atdod daļu siltuma (sk. 3.134. att.). Ja tvertnei ir dzesēšanas caurules vai radiatoru, daļa eļļas nonāk tajos un atdod tiem siltumu. Atdzesētā eļļa pārvietojas zemākos slāņos un atkal nonāk saskarē ar magnēt vadu un tinumiem. Tālāk process turpinās. Rezultātā iestājas dabisks eļļas cirkulācijas process, un siltums no transformatora uzsilušajām daļām tiek novadīts uz tvertnes sieniņām vai radiatoru, kas savukārt dzesējas izstarošanas un gaisa dabiskās konvekcijas ceļā.

Transformatoriem ar jaudu 25–40 kV·A izmanto gludas tvertnes (3.135. att. a). Lielākām jaudām nākas palielināt virsmu ar ribām (3.135. att. b), ar radiatoru (3.135. att. c). Atkarībā no nepieciešamā dzesēšanas laukuma caurules novieto vienā, divās, trijās vai pat četrās rindās. Turpmāka cauruļu rindu skaita palielināšana ir maz efektīva, jo samazinās siltumatdeve no iekšējām rindām. Cauruļradiatorus lieto transformatoriem ar jaudu līdz 1600 kV·A. Tiek izmantotas arī tvertnes ar piekartipa radiatoriem (3.135. att. d). Šiem radiatoriem ir lielākas dzesēšanas virsmas.

Transformatoros ar piespiedu gaisa un dabisko eļļas cirkulāciju uzstāda ventilatorus,



3.135. att. Eļļas transformatoru tvertnes: a – gluda; b – ar ribām; c – ar cauruļu radiatoru; d – ar piekartipa radiatoru; e – zvanveida.



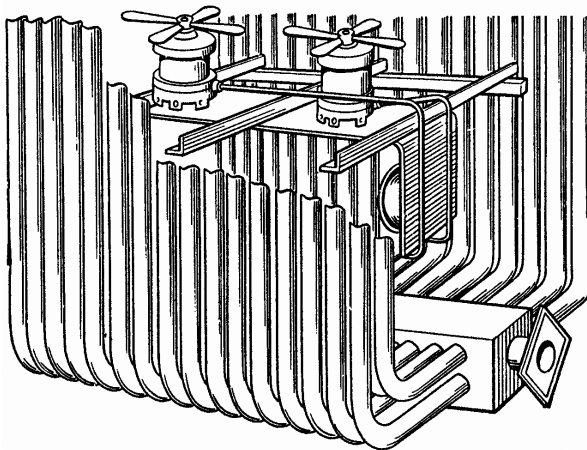
kas nodrošina gaisa plūsmas gar radiatora un tvertnes ārējām sienām (3.136. att.). Siltumatdeve šajā gadījumā salīdzinājumā ar iepriekšējo palielinās gandrīz divas reizes, šādu dzesēšanas sistēmu parasti lieto 10–80 MV·A jaudas transformatoriem. Tā pieļauj transformatoru ilgstošu darbību ar atslēgtiem ventilatoriem, ja slodze nepārsniedz 50 % no nominālās.

Jāatzīmē, ka lieljaudas transformatoros, kuru masa pārsniedz 25 tonnas, tvertni izgatavo ar iespējām atdalīt apakšējo daļu (3.135. att. e). Tas ļauj veikt aktīvās daļas remontu bez tās izcelšanas no tvertnes, t. i., bez lielas celbspējas celtna. Turklāt transformators ar zvanveida tvertni vieglāk iekļaujas dzelzceļa gabarītos.

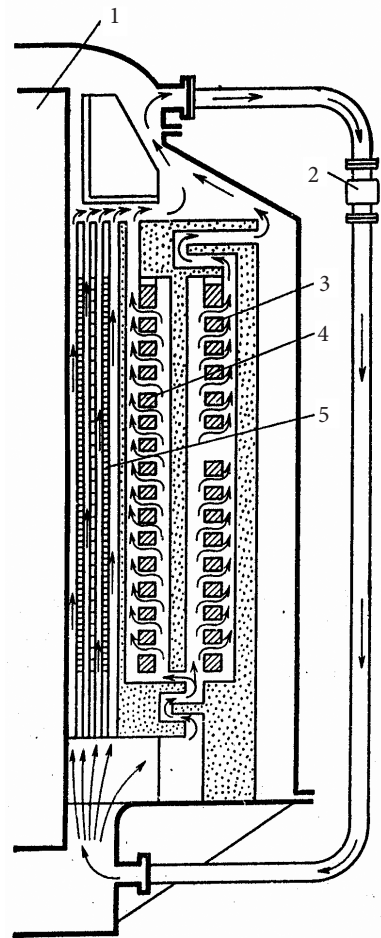
Transformatoros ar dabisko gaisa un piespiedu eļļas cirkulāciju katram radiatoram uzstāda sūkni.

Lai izslēgtu gaisa nokļūšanu eļļas sistēmā, sūkni iebūvē cauruļvadā, kas tvertni savieno ar radiatoru. Transformatoros ar orientētu eļļas cirkulāciju eļļas plūsmas ceļā novieto speciālas starplikas vai vairokus, kuri nodrošina orientētu eļļas virzību tinumu un magnētvasda kanālos. Tā izdodas palielināt siltumatdevi un samazināt transformatora gabarītus (3.137. att.). Šādiem transformatoriem pieļaujama ilgstoša darbība ar atslēgtiem eļļas sūkņiem, ja slodze nepārsniedz 30–40 % no nominālās.

Transformatoros ar piespiedu eļļas un gaisa cirkulāciju eļļas plūsma tiek nodrošināta caur speciāliem mazgabarieta dzesētājiem ar to piespiedu gaisa dzesēšanu (3.138. att.). Eļļa plūst pa ribotām caurulēm ar plānām sienām. Ventilatori virza gaisa plūsmu uz šiem dzesētājiem un nodrošina katrā no



3.136. att. Cauruļu radiators ar ventilatoriem.



3.137. att. Transformatora dzesēšanas sistēma ar piespiedu orientētu eļļas cirkulāciju: 1 – magnētvasda; 2 – elektrosūknis; 3, 4, 5 – attiecīgi AS, VS, ZS tinumi.

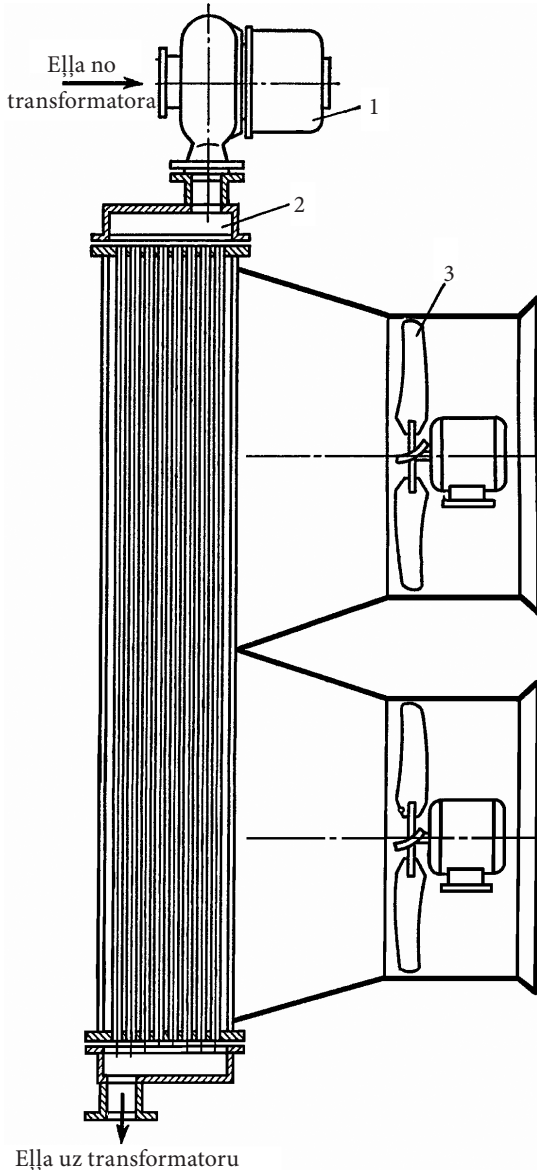


tiem līdz 200 kW zudumu izkliedi. Šādu dzesēšanas sistēmu lieto 80–400 MV·A jaudas transformatoros.

Transformatoros ar ūdens un eļļas piespiedu cirkulāciju eļļa plūst caur ūdens dzesētāju. Šajā gadījumā tiek nodrošināta piespiedu ūdens cirkulācija pa caurulēm un eļļas cirkulācija telpā starp caurulēm. Šajā telpā novieto speciālus vairogus, kas nodrošina eļļas plūsmu vajadzīgajos virzienos un tā palielina visas dzesēšanas sistēmas efektivitāti. Sil-tumpārneses koeficients pārejā no eļļas uz ūdeni ir ievērojami lielāks nekā pārejā no eļļas

uz gaisu. Tāpēc ūdens dzesēšanas sistēmas ir kompaktākas salīdzinājumā ar gaisa dzesēšanas sistēmām. Galvenie trūkumi, kas piemīt transformatoru ūdens dzesēšanas sistēmām, ir to nespēja strādāt ar atslēgtiem sūkņiem un liels ūdens patēriņš.

Transformatoros ar šķidro nede-gošo dielektriķi aktīvo daļu novieto tvertnē ar speciālu sintētisku šķidrumu, kas nedeg un neoksidējas, piemēram, klorēns, piranols, pirohlor, sovtols u. c.



3.138. att. Transformatora dzesēšanas sistēma ar piespiedu eļļas un gaisa cirkulāciju: 1 – elektrosūknis; 2 – dzesētājs; 3 – ventilators.

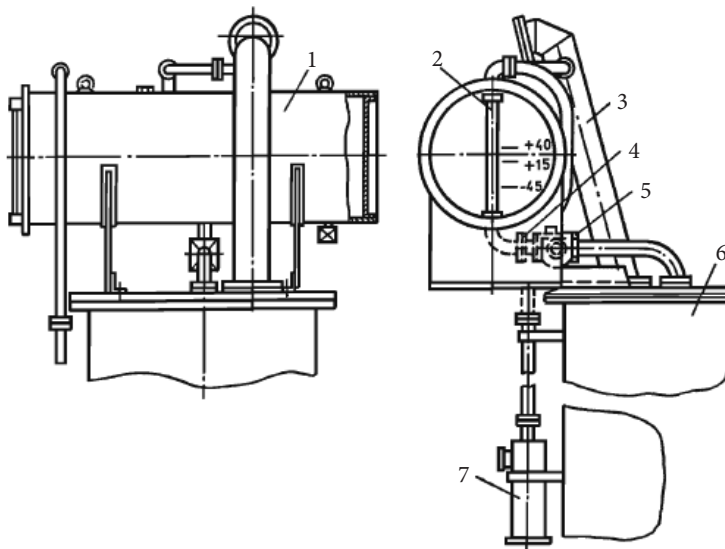
### 3.12.3. Eļļas transformatoru dzesēšanas sistēmu palīgierīces

Eļļas transformatoru dzesēšanas sistēmu palīgierīces kalpo eļļas aizsardzībai no apkārtējās atmosfēras, no tvertnes bojājumiem, kā arī eļļas stāvokļa kontrolei. Pie palīgierīcēm pieder paplašinātājs, eļļas līmeņa rādītājs, termometrs vai temperatūras signalizators, gaisa žāvētājs, termosifona filtrs, izplūdes caurule un tvertnes armatūra.

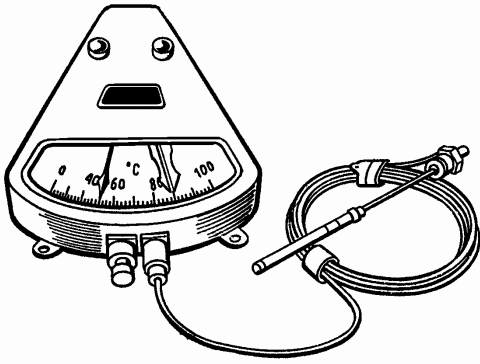
Paplašinātājs kalpo eļļas līmeņa svārstību kompensēšanai transformatorā, temperatūrai mainoties. Turklāt paplašinātājs pasargā eļļu no tiešas saskares ar apkārtējo gaisu. To uzstāda spēka transformatoriem, sākot ar spriegumu 5 kV un jaudu 25 kV·A un vairāk. Konstruktīvi paplašinātājs izveidots kā cilindrisks tilpums, ko novieto horizontāli virs tvertnes vāka un savieno ar tvertni (3.139. att.). Tā tilpums ir aptuveni 10 % no tvertnes tilpuma. Paplašinātājs pasargā transformatora eļļu no oksidēšanās, jo, pirmkārt, eļļas saskarsmes virsmas laukums paplašinātājā ir daudz mazāks nekā tvertnē, otrkārt, eļļas temperatūra paplašinātājā ir zemāka nekā eļļas augšējos slāņos tvertnē un, treškārt, tā kā eļļas cirkulācija paplašinātājā ir ļoti vāja, mitrums, kas nokļūst tajā no gaisa, un oksidēšanās produkti nosēžas un praktiski nenokļūst tvertnē.

Eļļas līmeņa rādītājs kalpo eļļas daudzuma kontrolei transformatorā. To uzstāda paplašinātāja gala plaknē no ZS puses, bet transformatoros bez paplašinātāja – uz tvertnes sienīgas tās augšējā daļā. Līmeņa rādītājam parasti uzrāda trīs kontrolatzīmes, kas atbilst atslēgta transformatora eļļas līmenim, ja eļļas temperatūra ir  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  un  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (sk. 3.139. att.).

Termometrs kalpo eļļas temperatūras kontrolei tvertnes augšējos slāņos. To uzstāda uz tvertnes vāka. Transformatoros ar jaudu līdz 630 kV·A parasti lieto dzīvsudraba stikla termometrus ar skalu no 0 līdz  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Parastajos transformatoros ar jaudu 1000 kV·A



3.139. att. Transformatora dzesēšanas sistēmas palīgierīces: 1 – paplašinātājs; 2 – eļļas līmeņa rādītājs; 3 – izplūdes caurule; 4 – krāns; 5 – gāzes relejs; 6 – tvertne; 7 – gaisa žāvētājs.

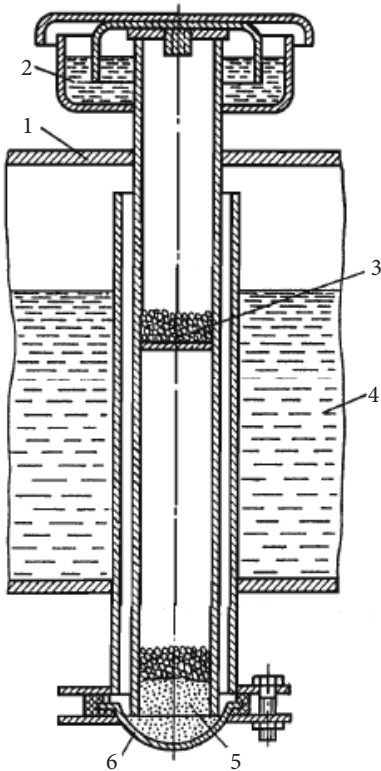


3.140. att. Termometriskais signalizators.

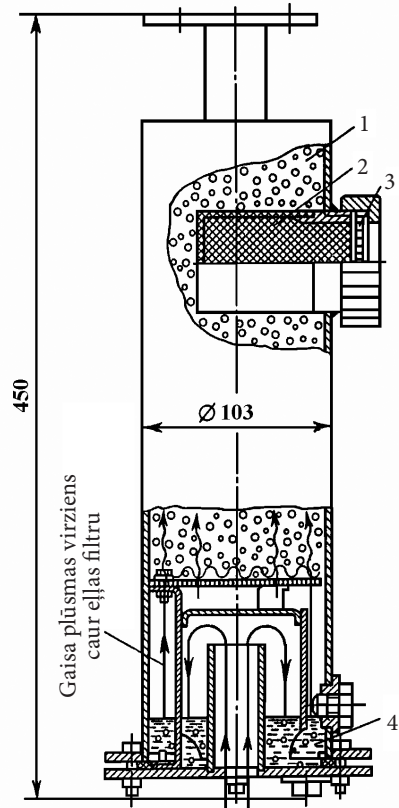
toties. Transformatoros ar jaudu līdz 630 kV·A gaisa žāvētāju iebūvē tieši paplašinātājā (3.141. att.), bet transformatoros ar jaudu 1000 kV·A un vairāk uzstāda virs paplašinātāja (sk. 3.139. un 3.142. att.). Gaisa žāvētājs izveidots kā metāla cilindrs ar eļļas aizvaru. Tas

un vairāk, kā arī hermetizētos transformatoros, sākot ar 160 kV·A jaudu, eļļas temperatūras kontrolei uz tvertnes sienas uzstāda termometriskos signalizatorus (3.140. att.). Transformatoros ar piespiedu gaisa vai eļļas cirkulāciju uzstāda divus termosignalizatorus. Viens no tiem kalpo eļļas temperatūras mērīšanai, bet otrs – sūkņu un ventilatoru automātiskai vadībai.

Gaisa dzesētājs kalpo gaisa attīrīšanai no mitruma un piesārņojuma, tam nonākot transformatorā, eļļas līmenim svārs-



3.141. att. Gaisa žāvētājs, iebūvēts paplašinātājā: 1 – paplašinātājs; 2 – eļļas aizvars; 3 – silikogels; 4 – eļļa; 5 – indikācijas silikogels; 6 – vāciņš.



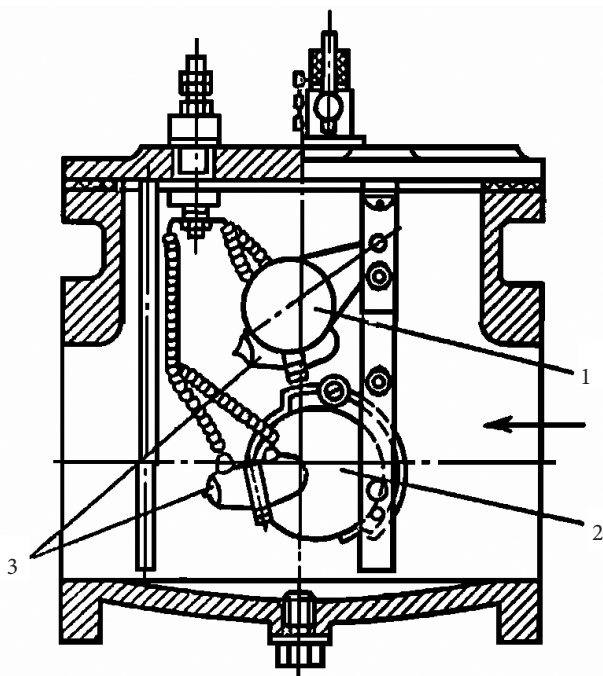
3.142. att. Gaisa žāvētājs transformatoriem ar jaudu 1000 kV·A un lielāku: 1 – silikogels; 2 – patrona ar indikācijas silikogelu; 3 – novērošanas lūka; 4 – eļļas aizvars.

piepildīts ar silikogelu. Eļļas līmenim pazeminoties, paplašinātājā tiek iesūkts gaiss. Gaiss vispirms, izejot caur eļļas aizvaru, tiek attīrīts no piemaisījumiem, tālāk, ejot caur silikogelu, tiek samazināts mitruma saturs. Palielinoties eļļas līmenim, transformatorā gaisa kustība notiek pretējā virzienā. Transformatoros ar spriegumu 220 kV un lielāku, lai paplašinātājā drošāk pasargātu eļļu no oksidēšanās, izmanto tā saukto slāpekļa aizsardzību. Tādā gadījumā paplašinātājā telpu virs eļļas aizpilda ar slāpekli, bet paplašinātāju hermetizē pilnīgi vai ar elastīgu plēvi.

Termosifona filtrs kalpo nepārtrauktai automātiskai eļļas reģenerācijai. To uzstāda transformatoros ar jaudu 1000 kV·A un lielāku. Termosifonu filtrus aizpilda ar silikogelu, kas uzsūc mitrumu un izolācijas novecošanās procesā izdalītos produktus.

Gāzes relejs paredzēts transformatora kontrolei un aizsardzībai no iekšējiem bojājumiem (starpviju savienojums tinumā, izolācijas caursīšana, īssavienojums starp magnētvauda loksņēm u. c.). Šādos gadījumos izdalās gāze, kas kalpo par signālu defektiem un bojājumiem. Gāzes releju (3.143. att.) uzstāda cauruļvadā, kas savieno tvertni un paplašinātāju.

Gāzes releja korpusā atrodas divi pludiņi 1 un 2 ar pārslēgiem. Normālā stāvoklī relejs aizpildīts ar eļļu, pludiņi atrodas augšā un pārslēgu kontakti nav noslēgti. Ja transformatorā rodas bojājums ar nelielu gāzes izdalīšanos, tā paceļas tvertnes augšdaļā un nokļūst gāzes relejā, izspiežot no releja eļļu. Rezultātā pludiņš 1 nolaižas un noslēdz skaņas signalizācijas kontaktus. Ievērojamu bojājumu gadījumā notiek intensīva gāzes izdalīšanās, un



3 143. att. Gāzes relejs: 1 – signālkontakta pludiņš; 2 – transformatora atslēgšanas pludiņš; 3 – dzīvsudraba stikla pārslēgi.

eļļa caur releju plūst uz paplašinātāju. Tā rezultātā pludiņš tiek pārvietots eļļas plūsmas virzienā un noslēdz kontaktus transformatora atslēgšanas ķēdē. Releja nostrādes laiks nepārsniedz 0,1 s. Gāzes releju uzstāda 1000 kV·A un lielākas jaudas transformatoros.

Izplūdes caurule kalpo, lai pasargātu tvertni ievērojamu bojājumu gadījumā, kad transformatora iekšpusē rodas elektriskais loks, intensīvi izdalās gāze un pieaug spiediens tvertnē. Izplūdes cauruli novieto uz tvertnes vāka. Tās apakšējais gals savienots ar tvertni, bet augšējais aizvērts ar stikla membrānu. Spiedienam pieaugot tvertnē gadījumā, ja aizsardzība neatslēdz transformatoru, stikla membrāna saplīst un gāzes kopā ar eļļu izplūst ārpusē. Ar izplūdes caurulēm aprīko transformatorus, sākot ar 1000 kV·A jaudu.

Tvertnes armatūra paredzēta eļļas filtrācijai, uzpildīšanai, noliešanai un paraugu ņemšanai. Pie tvertnes armatūras pieskaita krānus, ventiļus, aizbīdņus un aizbāžņus.

## 3.13. SPECIĀLAS NOZĪMES TRANSFORMATORI

### 3.13.1. Mērtransformatori

Mērtransformatori, kurus sauc arī par mērmaiņiem, ir speciāli mazjaudas divtinumu transformatori, kurus lieto maiņstrāvas mēraparātu mērapjoma paplašināšanai. Ja mērtransformatorus izmanto augstsprieguma ķēdēs, tad apkalpojošam personālam tiek radīti droši darba apstākļi, jo tie elektriski atdala mēraparātus no augstā sprieguma ķēdes. Turklāt mēraparātu strāvu vadošajām daļām var ievērojami samazināt izolācijas biezumu. Vairākos gadījumos mērtransformatorus izmanto, lai releju tinumus pieslēgtu augstsprieguma ķēdēm iekārtu aizsardzībai no avārijas režīmiem.

Mērtransformatorus iedala spriegummaiņos un strāvmaiņos. Pirmie kalpo tādu aparātu pieslēgšanai, kas reaģē uz spriegumu (voltmetri, vatmetru sprieguma spoles, elektroenerģijas skaitītāji, fazometri, releji). Otrie kalpo ampērmetru un strāvas tinumu pieslēgšanai. Mērtransformatorus izgatavo ar jaudu no 5 līdz dažiem simtiem voltampēru. Tie paredzēti darbam ar standarta mēraparātiem.

**Spriegummaiņi.** Spriegummaiņus izgatavo kā spriegumu pazeminošus (3.144. att.). Lai radītu personālam drošus darba apstākļus transformatora sekundāro tinumu rūpīgi izolē no primārā tinuma un iezemē.

Tā kā transformatora sekundārajam tinumam pieslēgto voltmetru tinumu pretestība ir liela, tas praktiski darbojas tukšgaitas režīmā. Tāpēc

$$U_1 = U_2' = KU_2, \quad (3.211.)$$

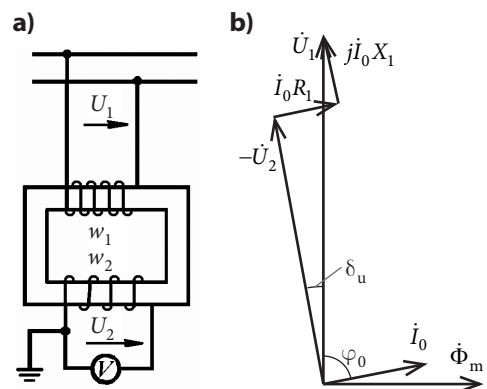
kur  $K$  – transformācijas koeficients.

Istenībā tukšgaitas strāva  $I_0$ , kā arī nelielā slodzes strāva rada sprieguma kritumu transformatorā (3.144. att. b) un  $U_2' \neq U_1$ . Turklāt minētie spriegumi nobīdīti savā starpā par leņķi  $\delta_u$ , tāpēc rodas zināmas kļūdas.

Lai samazinātu kļūdas, transformatoru tinumu pretestības izvēlas pēc iespējas mazākas un magnēt vadu izgatavo no samērā liela šķērsriezuma augstvērtīga tērauda.

Spriegummaiņu kļūdas, mērot spriegumu, atkarībā no precizitātes klases ir robežās no 0,2 % līdz 3 %.

**Strāvmaiņi.** Strāvmaiņus izgatavo kā divtinumu spriegumu paaugstinošus (3.145. att. a) vai caurvada transformatorus (3.145. att. b), kuriem par primāro tinumu kalpo magnēt vadā ievietots vads. Dažās konstrukcijās magnēt vads un sekundārais tinums novietots uz caurvada izolatora, kas kalpo augstsprieguma ievadīšanai spēka



3.144. att. Spriegummaiņa slēguma shēma (a) un vektoru diagramma (b).

transformatorā vai citā elektroiekārtā. Primārā tinuma uzdevumu šajā gadījumā pilda vara stienis, kas novietots izolatora iekšpusē.

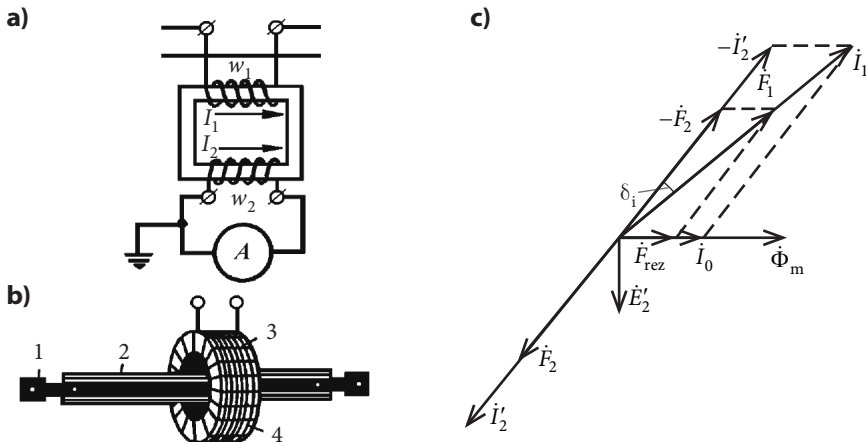
Tā kā ampērmetriem un citiem mēraparātiem, kas pieslēgti sekundārajam tinumam, ir maza pretestība, strāvmaiņi darbojas īsslēguma režīmā. Strāvas  $I_1$  un  $I_2'$  ir daudzkārt lielākas nekā tukšgaitas strāva  $I_0$  un tāpēc var uzskatīt, ka

$$I_1 = I_2' = \frac{I_2}{K}. \quad (3.212.)$$

Īstenībā  $I_0 \neq 0$  un  $I_1 \neq I_2'$ , arī strāvu  $I_1$  un  $I_2'$  vektori nav nobīdīti savā starpā par  $180^\circ$  (3.145. att. c). Tāpēc, mērot strāvas, rodas zināmas kļūdas. Atkarībā no strāvmaiņa precizitātes klases kļūdas ir robežās no 0,2 % līdz 10 %.

Strāvmaiņu magnētvaду izgatavo no augstvērtīga tērauda ar tādu šķērsriezumu, lai indukcijas vērtības nepārsniegtu 0,06–0,1 T. Tādā gadījumā tukšgaitas strāva ir relatīvi maza.

Jāatzīmē, ka strāvmaiņiem nav pieļaujama sekundārās ķēdes pārtraukšana (tukšgaitas režīms). Tādā gadījumā transformatora rezultējošais MS, kas darba režīmā  $\vec{F}_{rez} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ , kļūst vienāds ar  $\vec{F}_1$  (sk. 3.145. att. b). Rezultātā magnētiskā plūsma un indukcija serdē pieaug daudzkārt. Tāpēc zudumi serdē arī būtiski pieaug, un transformators var sadegt. Vēl lielāku bīstamību var izraisīt spriegums uz sekundārā sprieguma spailēm, kas var pieaugt līdz dažiem tūkstošiem voltu. Lai nepieļautu tukšgaitas režīmu, atslēdzot mēraparātus, sekundārais tinums jānoslēdz īsi.



3.145. att. Strāvmaiņa slēguma shēma (a), caurvada strāvmainis (b) un vektoru diagramma (c): 1 – primārā tinuma vara stienis; 2 – izolators; 3 – sekundārais tinums; 4 – magnētvaдs.

### 3.13.2. Taisngriežu iekārtu transformatori

Izmantojot transformatorus taisngriežu iekārtu barošanai, to sekundārajā pusē ir ieslēgti ventiļi, kas strāvu vada tikai vienā virzienā. Šādu transformatoru fāzes netiek slogotas vienlaikus. Tas izskaidrojams ar to, ka ventiļi atveras noteiktā secībā. Šis apstāklis izraisa vairākas nelabvēlīgas sekas minēto transformatoru darbībā. Galvenās no tām – augstākās harmonikas primārā un sekundārā tinuma strāvu liknēs un transformatora serdes papildus uzmagnetizēšana dažām taisngriežu shēmām.

Parasti šādu transformatoru primāros tinumus slēdz zvaigznē vai trīsstūrī. Sekundāros tinumus slēdz tā, lai nodrošinātu vienfāzes vai trīsfāžu spriegumu pārveidošanu daudzfāžu sistēmā atbilstoši pārveidotāja shēmai. Palielinot fāžu skaitu, samazinās iztaisnotā sprieguma pulsācijas.

3.4. tabulā doti visbiežāk lietoto shēmu raksturojošie parametri. Tā, piemēram, shēmā nr. 1 ir 3 izvadi (no tinumu galiem 1 un 2 un no viduspunkta 0). Tāpēc šī shēma pārveido vienfāzes spriegumu divfāžu spriegumos, kas savā starpā nobīdīti fāzē par  $180^\circ$ .

Shēmā nr. 5 divas trīsfāžu spriegumu sistēmas (1–3–5 un 2–4–6) tiek pārveidotas sešfāžu sistēmā ar spriegumu nobīdi fāzē par  $60^\circ$ . Izlīdzinošais reaktors, kas ieslēgts starp zvaigznes slēgumu nullpunktiem, nodrošina divu blakus esošo fāžu paralēlu darbību un ļauj labāk izmantot transformatoru.

Shēmā nr. 6 trīsfāžu spriegums arī tiek pārveidots sešfāžu sistēmā. Ja sekundārā tinuma divām daļām 1–3–5 un 2–4–6 pieslēdz divas trīsfāžu tilta shēmas un savieno tās virknē, tad iztaisnotais spriegums atbildīs divpadsmitfāžu spriegumu sistēmai.

3.4. tabulā lietoti šādi apzīmējumi:

$U_{di0}$  – sprieguma teorētiskā vidējā vērtība uz pārveidotāja izejas spailēm, neņemot vērā sprieguma kritumu taisngriezī un tukšgaitas strāvu shēmā ar izlīdzinošo reaktoru;

$U_0$  – sekundārā tinuma sprieguma efektīvā vērtība (fāzes vai starpfāžu, sk. 3.4. tabulas 2. stabiņu);

$U_{20}$  – sekundārā tinuma fāzes sprieguma efektīvā vērtība;

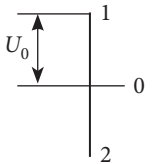
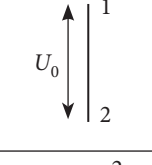
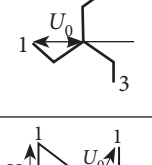
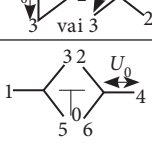
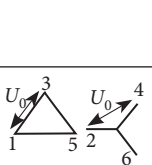
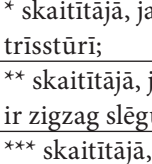
$I_2$  un  $I_1$  – attiecīgi sekundārā un primārā tinuma strāvu efektīvās vērtības (strāvas  $I_1$  vērtība uzrādīta, ja  $K = 1$ );

$I_d$  – strāvas vidējā vērtība pārveidotāja līdzstrāvas pusē;

$S_T$  – transformatora aprēķina jauda;

$P_{dN}$  – nominālā jauda pārveidotāja līdzstrāvas pusē.



Shēmas nosaukums	Sekundārā tinuma shēma vektoru attēlojumā	Strāvas nogludināšanas pakāpe	$\frac{U_{d10}}{U_0}$	$\frac{U_{d20}}{U_{20}}$	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{I_1}{I_d}$	$\frac{S_T}{P_{dN}}$
1. Vienfāzes shēma ar nulles izvadu		Pilnīgi nogludināta					
		Nenogludināta	0,90	0,90	$\frac{0,707}{0,785}$	$\frac{1,00}{1,110}$	$\frac{1,34}{1,48}$
2. Vienfāzes tiltiņshēma		Pilnīgi nogludināta					
		Nenogludināta	0,90	0,90	$\frac{1,00}{1,110}$	$\frac{1,00}{1,110}$	$\frac{1,11}{1,23}$
3. Trīsfāžu zigzagshēma		Pilnīgi nogludināta					
		Nenogludināta	1,17	1,17	$\frac{0,577}{0,587}$	$\frac{0,471}{0,481}$	$\frac{1,34/1,46^{**}}{1,37/1,48^{**}}$
4. Trīsfāžu tiltiņshēma		Pilnīgi nogludināta	1,35	2,34	$\frac{0,816^*}{0,471}$	$\frac{0,816^*}{0,471}$	1,05
5. Divu zvaigznē slēgtu tinumu shēma ar izlīdzinošo reaktoru		Pilnīgi nogludināta	1,17	1,17	0,289	0,408	1,26
6. Divpadsmitfāžu tiltiņshēma		Pilnīgi nogludināta	$\frac{1,35^{***}}{1,35}$	$\frac{4,68^{***}}{2,70}$	$\frac{0,816^{***}}{0,471}$	1,570	1,02
Piezīmes:	* skaitītājā, ja sekundārais tinums slēgts zvaigznē, saucējā, ja tinums slēgts trīsstūrī;						
	** skaitītājā, ja sekundārais tinums slēgts zvaigznē, saucējā, ja tinumam ir zigzag slēgums;						
	*** skaitītājā, ja sekundārais tinums slēgts zvaigznē, saucējā, ja tinums slēgts trīsstūrī.						

Taisngriežu pārveidotāju transformatoros gan primārajā, gan sekundārajā tinumā plūst nesinusoidālas strāvas, kas satur augstākās harmonikas. Tam ir šādi iemesli: ventiļi, kas pieslēgti sekundārā tinuma fāzēm ļauj strāvai plūst tikai noteiktu perioda daļu; pārveidotāja līdzstrāvas pusē ieslēgtā drosele nosaka strāvas taisnstūrveida formu transformatora tinumos.

Vispārīgā gadījumā strāvām  $I_1$  un  $I_2$  ir dažādas efektīvās vērtības. Tādējādi pilnās

jaudas  $S_{1N}$  un  $S_{2N}$  arī nav vienādas. Tāpēc šādiem transformatoriem tiek ieviests aprēķina jaudas jēdziens

$$S_T = 0,5(S_{1N} + S_{2N}) \quad (3.213.)$$

un aprēķina jaudas koeficients

$$k_T = \frac{S_T}{P_{dN}}, \quad (3.214.)$$

kur  $P_{dN} = U_{dN} I_{dN}$  – līdzstrāvas pusē patērētā jauda, t. i., izejas jauda;  
 $U_{dN}$  un  $I_{dN}$  – attiecīgi sprieguma un strāvas nominālās vērtības līdzstrāvas pusē.

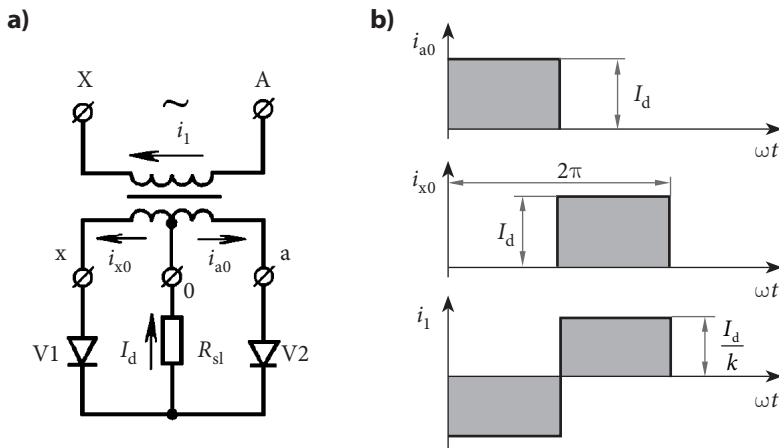
Taisngriežu transformatora aprēķina jauda  $S_T$  ir lielāka par izejas jaudu  $P_{dN}$  nominālajā darba režīmā. Tāpēc gabarītu izmēri šiem transformatoriem ir vienmēr lielāki nekā tādas pašas nominālās jaudas transformatoriem ar sinusoidālu strāvu  $S_N = mU_{2N}I_{2N}$ . Šo apstākli var izskaidrot ar to, ka tinumu silšanu nosaka strāvu  $I_1$  un  $I_2$  efektīvās vērtības, kas šajā gadījumā satur augstākās harmonikas.

Katrai ventiļu ieslēgšanas shēmai un slodzes raksturam, kas nosaka strāvas formu, atbilst noteikta aprēķina jaudas  $S_T$  vērtība. Noteiksim jaudu  $S_T$  piemēram, vienfāzes shēmai ar nulles izvadu (3.146. att.) idealizētiem apstākļiem, kad iztaisnotā strāva  $I_d$  ir pilnībā nogludināta, strāva pāriet no viena ventiļa uz nākamo momentāni, transformatorā neeksistē zudumi un induktīvās pretestības  $X_1$  un  $X_2$  ir niecīgas. Tad primārā un sekundārā tinuma pilnās jaudas ir:

$$S_{1N} = U_{1N} I_{1N} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} K U_{dN} \frac{I_{dN}}{K} = 1,11 P_{dN}; \quad (3.215.)$$

$$S_{2N} = 2U_{2N} I_{2N} = 2 \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dN} \frac{I_{dN}}{\sqrt{2}} = 1,57 P_{dN}, \quad (3.216.)$$

kur attiecību  $U_d/U_2 = U_{dio}/U_{20}$ ;  $I_2/I_d$  un  $I_1/I_d$  vērtības ņemtas no 3.4. tabulas.



3.146. att. Vienfāzes taisngrieža shēma (a) un primārā un sekundārā tinuma strāvu grafiki (b).

Tādējādi transformatora aprēķina jauda

$$S_T = 0,5(S_{1N} + S_{2N}) = 0,5(1,11 + 1,57)P_{dN} = 1,34P_{dN}, \quad (3.217.)$$

bet aprēķina jaudas koeficients  $k_T = 1,34$ .

Vienfāzes tiltiņshēmai (3.147. att.) iegūstam šādas sakarības:

$$S_{1N} = U_{1N} \cdot I_{1N} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} K U_{dN} \frac{I_{dN}}{K} = 1,11P_{dN}; \quad (3.218.)$$

$$S_{2N} = U_{2N} I_{2N} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{dN} I_{dN} = 1,11P_{dN}. \quad (3.219.)$$

Šai shēmai transformatora jauda  $S_T = 1,11P_{dN}$  un aprēķina jaudas koeficients  $K_T = 1,11$ . Tādējādi tiltiņshēmā ventiļi tiek izmantoti labāk nekā vienfāzes shēmā ar nulles izvadu.

Analoģiski var atrast transformatoru aprēķina jaudas koeficientu arī citām shēmām. Tā vērtības idealizētiem apstākļiem dotas 3.4. tabulā.

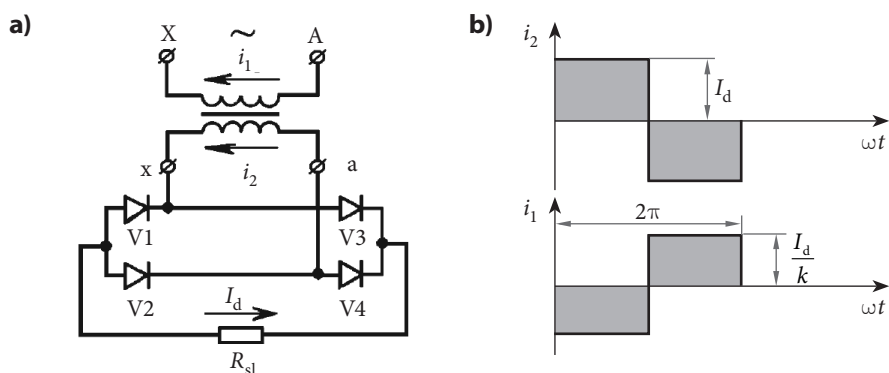
Ja pārveidotāja slodzei ir aktīvs raksturs, primārā un sekundārā tinuma strāvām noteiktos perioda posmos var būt sinusoidāls raksturs. Tāpēc vienādām strāvas  $I_d$  vērtībām to efektīvās vērtības būs lielākas nekā ideāli nogludinātās iztaisnotās strāvas gadījumā. Rezultātā arī transformatora aprēķina jauda būs lielāka.

Gadījumā, ja pārveidotājā izmanto vairākus ventiļus, transformatora aprēķina jauda var pieaugt, ja nominālā izejas sprieguma  $U_{dN}$  vērtība atbilst noteiktam ventiļu regulēšanas leņķim  $\alpha_N$ . Piemēram, ja nepieciešams nodrošināt stabilu spriegumu  $U_d = U_{dN}$ , ja spriegums  $U_1$  samazinās, tad aprēķina jaudas koeficients

$$k_T = \frac{k_{T,0}}{\cos \alpha_N}, \quad (3.220.)$$

kur  $k_{T,0}$  – attiecīgās shēmas aprēķina jaudas koeficients, ja ventiļi netiek regulēti.

Shēmās ar nulles izvadu līdzsvars starp primārā un sekundārā tinuma MS uz viena transformatora stieņa tiek izjaukts. Tāpēc magnētiskā sistēma tiek papildus uzmagnetizēta. Šādas shēmas sauc par vientakts shēmām, jo strāva sekundārā tinuma katrā fāzē plūst tikai vienā virzienā. Transformatora magnētveda papildus uzmagnetizēšana notiek arī taisngriežos ar viensusperioda shēmu.



3.147. att. Vienfāzes taisngrieža tiltiņshēma (a) un primārā un sekundārā tinuma strāvu izmaiņas grafiki (b).

Aplūkosim sīkāk minēto parādību trīsfāžu shēmai ar nulles izvadu (3.148. att.), kas darbojas iepriekš aprakstītajos idealizētajos apstākļos. Šajā gadījumā sekundārā tinuma katrā fāzē  $1/3$  perioda noteiktā secībā plūst taisnstūra formas strāvas  $i_{2a}$ ,  $i_{2b}$  un  $i_{2c}$  (3.148. att. b). Arī primārā tinuma fāzēs plūst taisnstūra formas strāvas  $i_{1A}$ ,  $i_{1B}$  un  $i_{1C}$ .

Perioda pirmās trešdaļas laikā, kad darbojas pirmais ventilis, strāva  $i_{2a}$  vienāda ar  $I_d$ , bet strāvas  $i_{2b}$  un  $i_{2c}$  vienādas ar nulli. Strāvas primārā tinuma fāzēs var noteikt, izmantojot Kirhofa pirmo likumu elektriskajām ķēdēm

$$i_{1A} + i_{1B} + i_{1C} = 0, \quad (3.221.)$$

kā arī no MS līdzsvara nosacījumiem noslēgtiem magnētiskajiem kontūriem. Viens no tādiem kontūriem aptver pirmo un otro transformatora stieni. Šim kontūram:

$$i_{1A} W_1 - i_{2a} W_2 - i_{1B} W_1 = 0. \quad (3.222.)$$

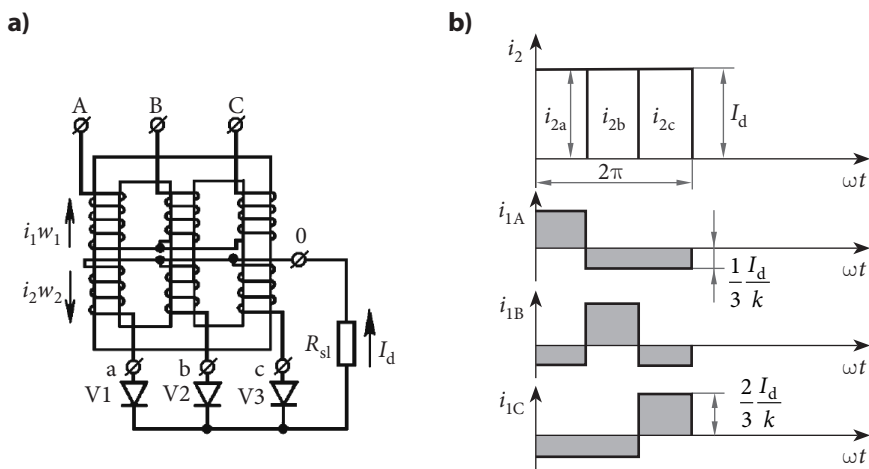
Otrajam un trešajam stieniem:

$$i_{1B} W_1 - i_{1C} W_1 = 0. \quad (3.223.)$$

Risinot kopā vienādojumus (3.222.) un (3.223.) pirmajai perioda trešdaļai, varam iegūt:

$$\left. \begin{aligned} i_{1A} &= \frac{2}{3} i_{2a} \frac{W_2}{W_1} = \frac{2}{3} \frac{I_d}{k}; \\ i_{1B} &= -\frac{1}{3} i_{2a} \frac{W_2}{W_1} = -\frac{1}{3} \frac{I_d}{k}; \\ i_{1C} &= -\frac{1}{3} i_{2a} \frac{W_2}{W_1} = -\frac{1}{3} \frac{I_d}{k}. \end{aligned} \right\} \quad (3.224.)$$

Tādējādi katrā transformatora stienī aplūkojamajā laika periodā darbojas nenokompensēts MS, kas vienāds ar  $i_1 W_1 - i_2 W_2 = -1/3 I_d W_2$ . Šis MS rada papildu magnētisko plūsmu



3.148. att. Trīsfāžu taisngrieža shēma ar nulles izvadu (a) un tinumu strāvu izmaiņas grafiki (b).

$\Phi_d$ , kas uzklājas pamatplūsmai. No 3.148. att. b redzams, ka nākamajās divās perioda trešdaļās, kad atvērti ventiļi V2 un V3, plūsmas  $\Phi_d$  virziens un lielums nemainās, un strāvu sadalījums transformatora primārajos un sekundārajos tinumos saglabājas.

Papildu plūsmu  $\Phi_d$  sauc par piespiedu magnetizēšanas plūsmu. Tā noslēdzas caur transformatora atsevišķu stieni un apvalku, tāpat kā pamatplūsmas trešās harmonikas (sk. 1.9. apakšnodaļu). Lai plūsma  $\Phi_d$  neradītu magnētvasda pārlietu piesātinājumu, nākas palielināt tā šķērsgriezuma laukumu un attiecīgi arī gabarītu izmērus un masu.

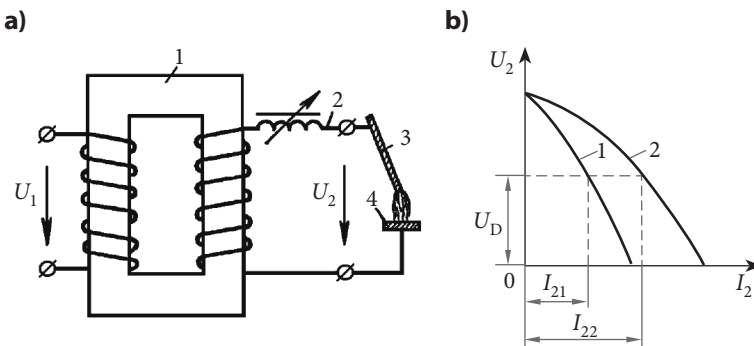
Minēto iemeslu dēļ trīsfāžu shēmu ar nulles izvadu izmanto tikai nelielas jaudas taisngriežos. Vienfāzes vienkusperioda shēma arī nav ieguvusi plašu pielietojumu sakarā ar ievērojamām iztaisnotā sprieguma pulsācijām. Parasti izmanto tikai tādas taisngriežu shēmas, kas nodrošina normālu transformatora serdes uzmagnetizēšanu un MS līdzsvaru katrā stienī. Pie tādām pieder tiltiņshēmas (parasti vienfāzes un trīsfāžu). Šajās shēmās strāva sekundārā tinuma katrā fāzē perioda laikā divreiz izmaina savu virzienu uz pretējo. Nenotiek transformatora serdes piespiedu magnetizēšana arī gadījumā, ja sekundārajos tinumos izmanto divas zvaigznē slēgtas shēmas ar izlīdzinošo reaktoru.

Vientakts taisngriešanas shēmas serdes piespiedu magnetizēšanu var novērst, saslēdzot sekundāros tinumus zigzaga shēmā.

### 3.13.3. Metināšanas transformatori

Metināšanā izmanto vienfāzes pazeminošos transformatorus ar sekundārā tinuma spriegumu tukšgaitā 60–75 V. Šāds spriegums ir nepieciešams elektriskā loka stabilai degšanai. Slodzes režīmā sekundārā sprieguma vērtība samazinās līdz aptuveni 30 V. Īsslēguma režīms metināšanas transformatoram ir normāls ekspluatācijas režīms. Tāpēc metināšanas transformatora ārējai raksturlīknei jābūt strauji krītošai. Tādu raksturlīkni var iegūt, ja transformatoram ir palielinātas induktīvās pretestības.

Visbiežāk izmanto metināšanas transformatorus, kuru sekundārajam tinumam pie-slēgta regulējama drosele (3.149. att.).



3.149. att. Metināšanas transformatora elektriskā shēma (a) un ārējās raksturlīknes (b): 1 – transformators; 2 – drosele ar regulējamu induktivitāti; 3 – elektrods; 4 – metināmā detaļa.

Regulējot gaisa spraugu droseles magnētvdā, mainās tās induktivitāte un ārējās raksturlīknes 1 vai 2 3.149. attēlā b, kā arī strāvas vērtība  $I_{21}$  vai  $I_{22}$ , kas atbilst loka degšanas spriegumam  $U_D$ . Sakarā ar to, ka slodzes ķēdē ieslēgta liela induktivitāte, metināšanas transformatoriem ir zems jaudas koeficients  $\cos\varphi = 0,4-0,5$ .

### 3.13.4. Elektroniskajās ierīcēs, automātiskā un sakaru sistēmās izmantojamie transformatori

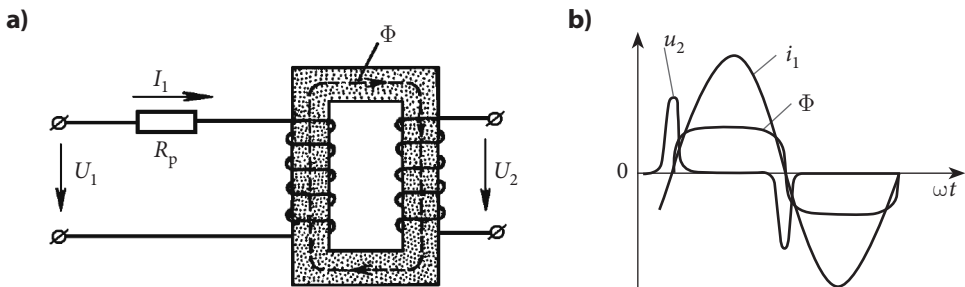
**Impulsu transformatori.** Šādus transformatorus izveido kā divfāžu vai trīsfāžu un plaši izmanto impulsu pārraidei dažādās elektroniskajās ierīcēs, automātikas un sakaru sistēmās. Aplūkojamos transformatorus var izmantot impulsu amplitūdas un polaritātes izmaiņai, atsevišķu signālu pretestību saskaņošanai un citur. Pārraidāmo impulsu jauda var sasniegt vairākus vatus, bet to ilgums no mikrosekunžu daļām līdz dažiem simtiem mikrosekunžu.

Galvenā prasība, kas tiek izvirzīta impulsu transformatoriem ir minimāla pārraidāmā impulsa izkropļošana, ko izraisa izkliedes induktīvās pretestības, kapacitīvās saites starptinumiem un atsevišķiem vijumiem, kā arī virpuļstrāvas, kas inducējas magnētvdos.

Lai impulsu kropļojumi būtu minimāli, transformatora raksturlīknēm jābūt lineārām un laika konstantei tuvai nullei. Lineāras raksturlīknes nodrošina, samazinot indukciju magnētvdā. Magnētvdada izgatavošanai izmanto augstvērtīgus materiālus, piemēram, permaloju. Ātrdarbības palielināšanai transformatora tinumus novieto tā, lai izkliedes induktivitātes būtu minimālas. Šajā sakarā bieži izmanto torroidālas serdes ar visai mazu magnētisko pretestību.

Impulsu transformatoru gabarītu izmēri ir visai nelieli sakarā ar to, ka impulsa ilgums ir daudzkārt mazāks par pauzes laiku. Tāpēc iespējams palielināt strāvas blīvumu tinumos bez riska pārsniegt pieļaujamās temperatūras.

**Smaisprieguma transformatori.** Elektroniskajās ierīcēs vadāmu ventiļu regulēšanai nepieciešami sprieguma impulsi ar smailes formu. Šādus impulsus no sinusoidāla sprieguma var iegūt ar speciālu smaisprieguma transformatoru palīdzību. Tie ir divtinumu transformatori ar spēcīgi piesātinātu serdi. Smaisprieguma transformatora primāro tinumu caur lielu aktīvo  $R_p$  vai induktīvo papildpretestību pieslēdz maiņstrāvas tīklam (3.150. att. a).



3.150. att. Smaisprieguma transformatora shēma (a) un strāvas, sprieguma un magnētiskās plūsmas izmaiņas grafiks (b).

Ja aktīvā pretestība ir pietiekami liela, transformatora primārajā tinumā plūst sinusoidāla strāva  $i_1$ . Magnētiskā plūsma  $\Phi$  šajā gadījumā nevar saglabāt sinusoidālu formu, jo tā pieaug proporcionāli strāvai  $i_1$  tikai pie mazām tās vērtībām, kad serde nav piesātināta.

Rezultātā magnētiskās plūsmas  $\Phi$  izmaiņu grafikam ir saplacināta forma (3.150. att. b), bet transformatora sekundārajā tinumā saskaņā ar elektromagnētiskās indukcijas likumu

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

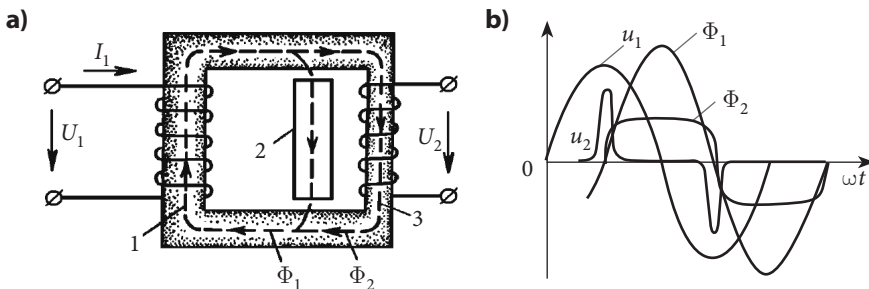
inducējas spriegums  $u_2$ . Šis spriegums smailes vērtību  $U_{2m}$  sasniedz brīdī, kad strāva  $i_1$  un plūsma  $\Phi$  iziet caur nulles vērtību un to izmaiņas ātrums ir maksimāls. Ieslēdzot transformatoru caur aktīvo pretestību, arī spriegums  $u_1$  sakrīt fāzē ar strāvu  $i_1$ . Gadījumos, kad nepieciešams panākt smailes sprieguma nobīdi laikā, transformatora primārā tinumu ķēdē ieslēdz induktīvu pretestību.

Lai palielinātu impulsa stāvumu, transformatora serdi izgatavo no permaloja, kam ir ļoti augsta sākuma magnētiskā caurlaidība un magnetizēšanas likne ar izteiktu piesātinājumu.

Smaile spriegumu transformatoru serdi bieži vien izgatavo ar magnētisko šuntu (3.151. att. a). Tas palielina izkliedes plūsmu un tādējādi arī tinumu induktīvo pretestību. Primāro tinumu šajā gadījumā novieto uz serdes stieņa 1 ar lielāku šķērsriezuma laukumu, bet sekundāro tinumu uz serdes stieņa 3 ar mazāku šķērsriezuma laukumu.

Plūsmai  $\Phi_1$ , kas noslēdzas pa stieni 1 un galvenokārt pa šuntu 2, ir sinusoidāla forma. Stienis 3, uz kura novietots sekundārais tinums, ātri piesātinās un tāpēc plūsmai  $\Phi_2$  ir saplacināta forma. Rezultātā sekundārajā tinumā inducējas spriegums  $u_2$  ar smailes formu (3.151. att. b).

**Augstfrekvences transformatori.** Transformatoros, kas darbojas paaugstinātu frekvenču diapazonā, jānodrošina, lai serdē būtu samazināta indukcija un novērsti nelineārie kropļojumi, kā arī samazināta laika konstante, kapacitīvo saišu, virpuļstrāvu un histerēzes ietekme. Zudumi serdē augstas frekvences gadījumā palielinās. Tāpēc frekvencēm līdz 20 kHz transformatoru serdes izgatavo no dzelzs un niķeļa sakausējuma 0,05–0,08 mm biezām loksņēm, bet lielākām frekvencēm no magnetodielektriķiem un ferītiem.



3.151. att. Smaile sprieguma transformatora shēma ar magnētisko šuntu (a) un strāvas, sprieguma un magnētiskās plūsmas izmaiņas grafiks (b).

**Stabilizētājtransformatori.** Automātiskās regulēšanas sistēmās transformatorus bieži izmanto kā diferencētājposmu, lai iegūtu atgriezeniskās saites signālus, kas proporcionāli regulējamā parametra pirmajam atvasinājumam. Šādus transformatorus sauc par stabilizētājtransformatoriem vai diferencētājtransformatoriem. Tie nodrošina regulēšanas procesa stabilitāti.

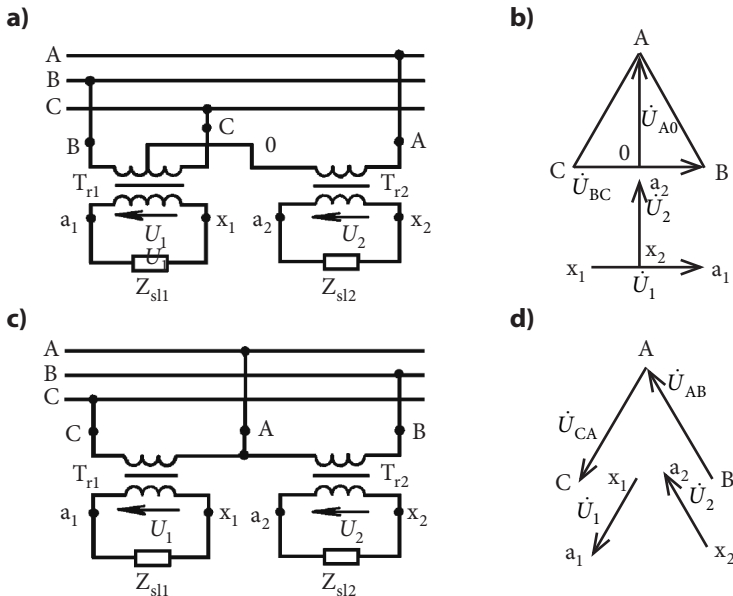
Minēto transformatoru izmantošana balstās uz to apstākli, ka spriegums  $u_2$  ir proporcionāls  $dF/dt$ . Stabilizētājtransformatorus var ieslēgt gan virknē, gan paralēli. Šādus transformatorus izveido ar nepiesātinātu serdi un relatīvi mazu strāvas blīvumu tinumos.

### 3.13.5. Fāžu skaita un frekvences pārveidošanas transformatori

#### Fāžu skaita pārveidošanas transformatori.

Barojot jaudīgus vienfāzes patērētājus no trīsfāžu tīkla var rasties sekundāro spriegumu nesimetrija. Tādos gadījumos, lai izlīdzinātu fāžu slodzes, izmanto speciālas transformatoru slēgumu shēmas: trīsfāžu sprieguma pārveidošanai divfāžu spriegumā un divu vienfāzes transformatoru vai trīsfāžu transformatora divu fāžu ieslēgšanai atvērtā trīsstūrī. Šādas shēmas izmanto, piemēram, elektrotransporta kontakttīkla barošanai.

Shēmā, kas pārveido trīsfāžu spriegumu divfāžu spriegumā (3.152. att.) izmanto divus vienfāzes transformatorus  $T_{r1}$  un  $T_{r2}$  ar atšķirīgiem transformācijas koeficientiem. Transformatoru  $T_{r1}$  sauc par bāzes transformatoru un to pieslēdz trīsfāžu tīkla divām fāzēm. Transformatoru  $T_{r2}$  ieslēdz starp transformatora  $T_{r1}$  trešo fāzi un primārā tinuma viduspunktu. Tādā slēgumā spriegumi  $\dot{U}_{BC}$  un  $\dot{U}_{AO}$  (3.152. att. b) būs nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ .



3.152. att. Transformatoru slēgumu shēmas trīsfāžu strāvas pārveidošanai divfāžu strāvā (a un c) un vektoru diagrammas (b un d).



Par tādu pašu leņķi būs nobīdīti fāzē arī sekundārie spriegumi  $\dot{U}_1$  un  $\dot{U}_2$ . Lai sekundārie spriegumi būtu vienādi, transformatora  $T_{r2}/T_{r1}$  transformācijas koeficientam jābūt  $\sqrt{3}/2$  reizes lielākam nekā transformatora  $T_{r1}$  transformācijas koeficientam. Simetriskas slodzes gadījumā ( $Z_{sl1} = Z_{sl2}$ ) strāvas trīsfāžu primārajā tinumā arī ir simetriskas. Gadījumā, ja  $Z_{sl1} \neq Z_{sl2}$  viena no trīsfāžu tinuma fāzēm būs noslogota ar jaudu  $P_1$  un  $P_2$  starpību.

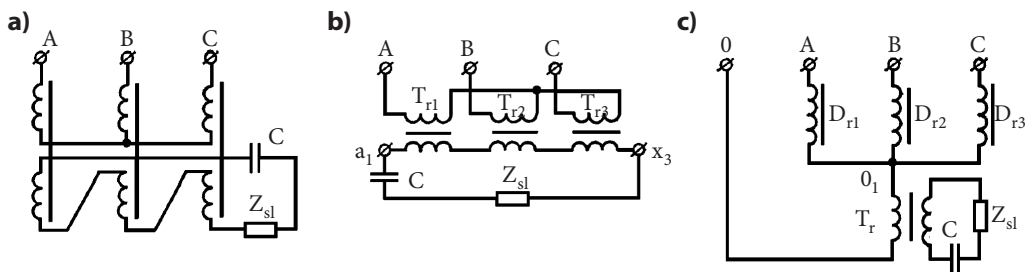
Izmantojot "atvērtā trīsstūra" shēmu (3.152. att. c), ekvivalentā vienfāzes slodze, ar kādu tiek slogots trīsfāžu tīkls, būs līdzīga ar lielāko no jaudām  $P_1$  un  $P_2$ . Ja slodzes pretestības  $Z_{sl1}$  un  $Z_{sl2}$  tiktu barotas no vienfāzes transformatora, tad uz vienu fāzi pieņāktos slodze  $P_1 + P_2$ .

**Frekvences pārveidošanas transformatori.** Plašāku pielietojumu rod transformatori, kurus izmanto frekvences dubultošanai un trīskāršošanai. Frekvences trīskāršošana nepieciešama, piemēram, pārveidotājos, kuros tinumi slēgti divās zvaigznēs ar izlīdzinošu reaktoru.

Frekvences trīskāršošanā izmanto spriegumu trešās harmonikas, kas rodas transformatora serdes piesātinājuma rezultātā.

3.9.3. apakšnodaļā tika parādīts, ka, savienojot transformatora sekundāro tinumu trīsstūrī, EDS trešās harmonikas visās fāzēs sakrīt laikā un tajās plūst trīskāršas frekvences strāvas. Tādējādi panākot transformatora serdes piesātinājumu, lai EDS trešās harmonikas būtu lielākas, un, slēdzot sekundāro tinumu "atvērtā trīsstūrī" (3.153. att. a), slodzei  $Z_{sl}$  var pieslēgt trīskāršas frekvences spriegumu. Tādu pašu rezultātu var iegūt, izmantojot trīs vienfāzes transformatorus  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$  un  $T_{r3}$  (3.153. att. b) vai vienu vienfāzes transformatoru  $T_r$  un trīs droseles  $D_{r1}$ ,  $D_{r2}$  un  $D_{r3}$  ar piesātinātām serdēm (3.153. att. c).

Pēdējā shēmā strāva droselēs ir nesinusoidāla un satur trešās harmonikas. Shēmas nullpunktā  $0_1$  strāvu pamatharmoniku ar frekvenci  $f_1$  summa ir vienāda ar nulli, bet strāvas ar frekvenci  $3f_1$  summējas un noslēdzas caur transformatora  $T_r$  primāro tinumu. Tāpēc arī transformatoram sekundārajā tinumā inducējas trīskāršas frekvences EDS. Lai kompensētu sprieguma kritumu transformatora induktīvajā pretestībā, kura trīskāršas frekvences gadījumā pieaug, virknē ar slodzi  $Z_{sl}$  ieslēdz kondensatoru  $C$ . Frekvences pārveidošanas shēmas parasti izmanto nelielas jaudas patērētāju barošanai.



3.153. att. Frekvences trīskāršošanas shēmas: a) – ar trīsstieņu transformatoru; b) – ar trim vienfāzes transformatoriem; c) – ar vienfāzes transformatoru un piesātinātām droselēm.

# 4. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU TEORIJAS KOPĪGI JAUTĀJUMI

## 4.1. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU PAMATTIPI UN TO UZBŪVE

### 4.1.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi

Izšķir trīs galvenos maiņstrāvas elektrisko mašīnu pamattipus: asinhronās, sinhronās un maiņstrāvas kolektormašīnas.

Visplašāk izplatītas ir trīsfāžu ( $m = 3$ ) maiņstrāvas mašīnas. Atsevišķos gadījumos izmanto divfāžu un sešfāžu maiņstrāvas mašīnas. Vienfāzes mašīnas lieto retāk, galvenokārt ļoti mazām jaudām.

Maiņstrāvas mašīnu teorijā ir vairāki kopīgi jautājumi, turklāt tām ir vairāki līdzīgi konstruktīvie elementi. Tāpēc lietderīgi tos aplūkot pirms konkrētu tipu mašīnu teorētisko un praktisko jautājumu iztirzāšanas.

Visu maiņstrāvas elektrisko mašīnu darbības pamatā ir rotējošs magnētiskais lauks.

Asinhronajā mašīnā rotors un magnētiskais lauks rotē ar atšķirīgām rotācijas frekvencēm, t. i., asinhroni. Asinhronās mašīnas plaši izmanto kā dzinējus dažādās tautsaimniecības nozarēs. Tas izskaidrojams ar to, ka asinhronajiem dzinējiem ir vienkārša konstrukcija un apkalpošana, augsts darbības drošums. Pēdējā laikā aizvien plašāku lietojumu rod asinhronie ģeneratori, piemēram, vējenerģētikā.

Sinhronajās mašīnās normālos darba režīmos rotors un magnētiskais lauks rotē ar vienādu rotācijas frekvenci, t. i., sinhroni.

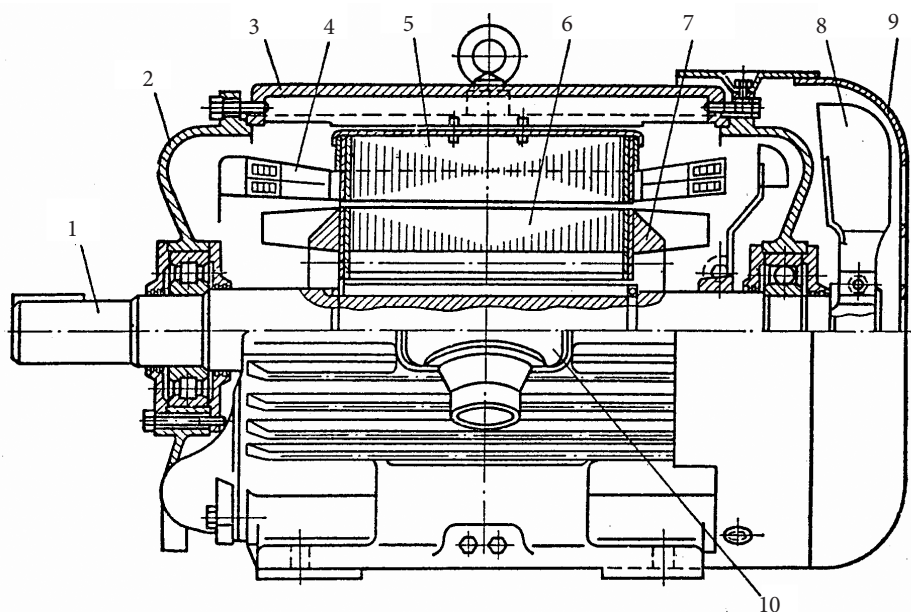
Sinhronās mašīnas galvenokārt izmanto par ģeneratoriem. Lieljaudas ģeneratori praktiski visās elektrostacijās ir sinhronie ģeneratori. Arvien plašāku lietojumu iegūst arī sinhronie dzinēji. Neskatoties uz to, ka šo dzinēju konstrukcija ir sarežģītāka salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem, tehniski ekonomiskie rādītāji noteiktos apstākļos ir ievērojami labāki. Energosistēmās sinhronās mašīnas izmanto arī par sinhronajiem kompensatoriem reaktīvās jaudas ģenerēšanai vai patērēšanai (elektrisko tīklu jaudas koeficienta regulēšanai).

### 4.1.2. Asinhrono mašīnu uzbūve

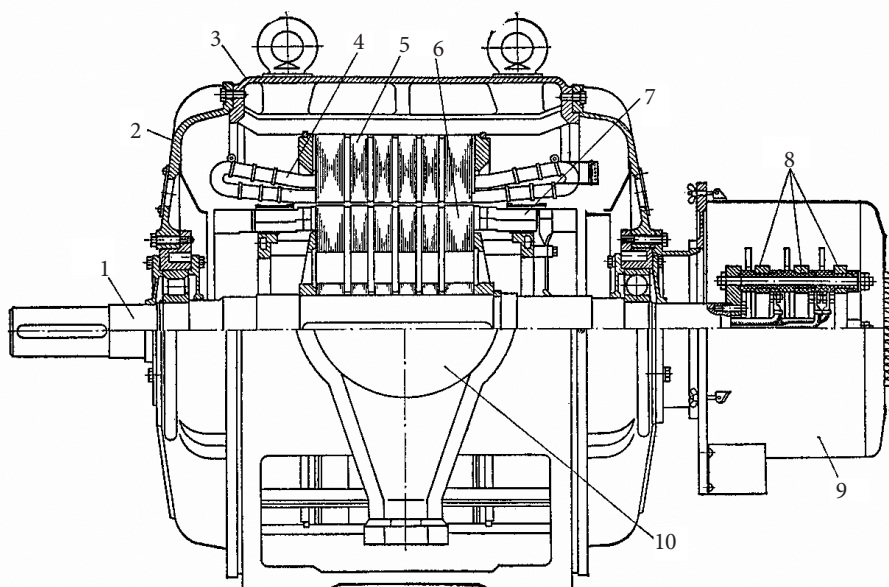
Atkarībā no rotora uzbūves izšķir asinhronās mašīnas ar īsslēgtu rotoru un mašīnas ar fāžu rotoru. Šo mašīnu uzbūve parādīta 4.1. un 4.2. attēlā.

Asinhronās mašīnas stators sastāv no korpusa, serdes un tinuma. Korpusu kalpo serdes un gultņu vairogu stiprināšanai. Nelielas jaudas mašīnām korpusu tiek liets no alumīnija, tērauda vai čuguna, bet lielas jaudas mašīnām – metināts.

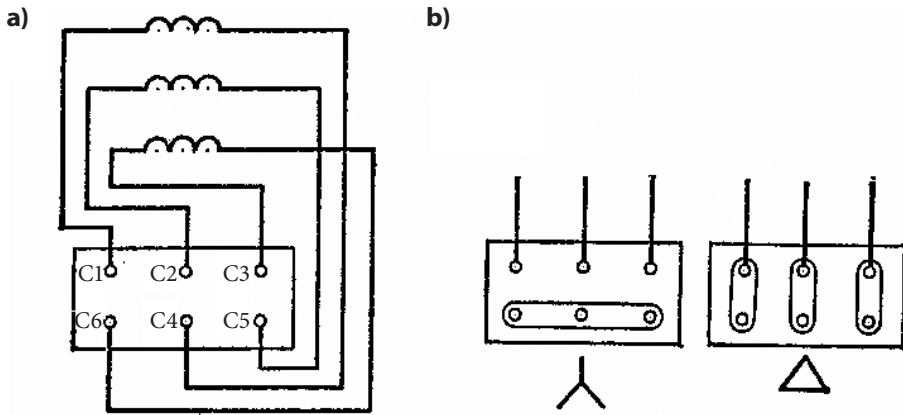
Statora serde salikta no 0,35 vai 0,5 mm biezām elektrotehniskā tērauda loksņēm,



4.1. att. Asinhronā dzinēja ar īsslēgtu rotoru uzbūve: 1 – vārpsta; 2 – gultņu vairogs; 3 – statora korpusis; 4 – statora tinums; 5 – statora serde; 6 – rotora serde; 7 – rotora tinums; 8 – ventilators; 9 – ventilatora apvalks; 10 – izvadu kārba.



4.2. att. Asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru uzbūve: 1 – vārpsta; 2 – gultņu vairogs; 3 – statora korpusis; 4 – statora tinums; 5 – statora serde; 6 – rotora serde; 7 – rotora tinums; 8 – kontaktgredzeni; 9 – apvalks; 10 – izvadu kārba.



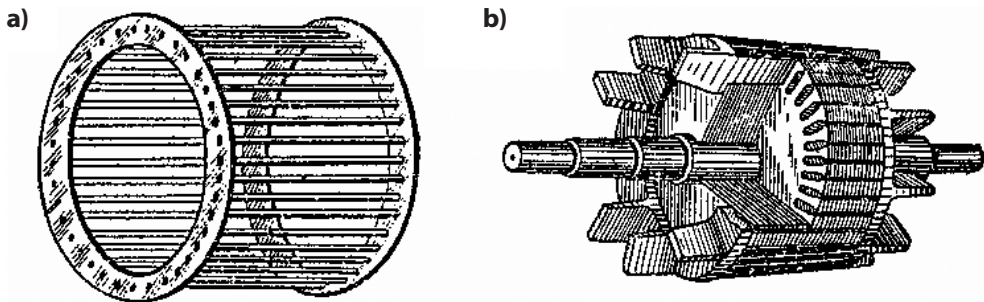
4.3. att. Statora tinumu shēma (a) un to saslēgšana zvaigznes un trīsstūra (b) slēgumā.

kurās pirms salikšanas tiek pārklātas ar laku no abām pusēm, lai tajās mazinātu virpuļstrāvas. Serdes iekšējā virsmā izveidotas rievas, kurās novietots statora tinums (parasti trīsfāžu).

Asinhronās mašīnas statora trīsfāžu tinumam parasti izvada visus sešus galus un pieslēdz pie spaiļu plāksnītes. Šis apstākļi ļauj izmantot dzinējus dažādiem tīkla spriegumiem, kas atšķiras  $\sqrt{3}$  reizes. Piemēram, ja dzinēja pasē uzrādīts spriegums 220/380 V, tad tīkla līnijas spriegumam 380 V statora tinumi jāslēdz zvaigznē, bet spriegumam 220 V – trīsstūrī. Tinumu ērtākai pārslēgšanai to izvadus uz plāksnītes novieto noteiktā secībā (4.3. att.).

Asinhronās mašīnas rotors sastāv no vārpstas, serdes un tinuma. Cilindriskas formas serdi, tāpat kā statora serdi, izveido no elektrotehniskā tērauda loksneņiem ar rievām ārējā virsmā.

Īsslēgtā rotora rievās ievieto tā saukto “vāveres rata” tipa tinumu. Šis tinums ir izveidots no vara vai alumīnija stieņiem un gredzeniem, kas kopā veido īsslēgtu tinumu (4.4. att. a). Nelielas jaudas dzinējiem rotora tinumu izveido, zem spiediena pielejot rievās ar izkausētu alumīniju, vienlaikus atlejoj arī gredzenus kopā ar ventilācijas spārniņiem (4.4. att. b).



4.4. att. Asinhrono mašīnu īsslēgto rotoru izveidojums: a – “vāveres rats”; b – rotors ar lietu alumīnija tinumu.

Asinhronai mašīnai ar fāžu rotoru bez iepriekš minētajām sastāvdaļām uz vārpstas novieto trīs vara kontaktgredzenus un sukas, caur kurām rotora tinumam iespējams pieslēgt papildpretestības. Fāžu rotora tinumu izveido pēc tiem pašiem principiem kā statora tinumu. Parasti to slēdz zvaigznē, izvadus pievienojot kontaktgredzeniem.

Gaisa spraugu starp statoru un rotoru asinhronajās mašīnās izveido minimālu, no to ražošanas un darbības drošuma viedokļa. Jo lielākas jaudas mašīna, jo relatīvi lielāka ir gaisa sprauga. Tā, piemēram, mašīnām ar jaudu dažī kW gaisa sprauga ir 0,4–0,5 mm, bet lielas jaudas mašīnām – dažī milimetri.

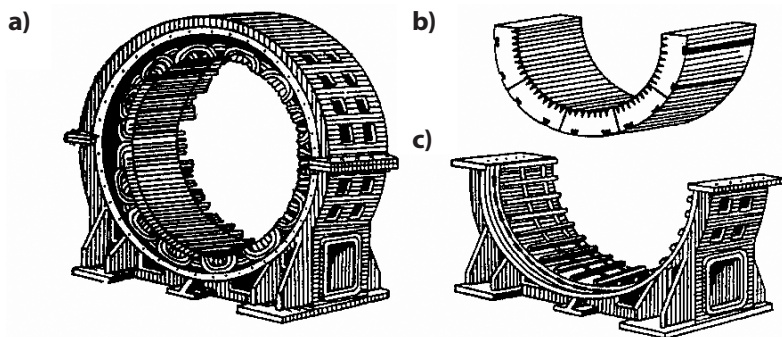
### 4.1.3. Sinhrono mašīnu uzbūve

Sinhronās mašīnas galvenās sastāvdaļas ir stators un rotors. Lieljaudas mašīnām stators var būt arī salikts no atsevišķām daļām (4.5. att.). Statoram ir cilindrisks, no elektrotehniskā tērauda plāksnēm salikta un nekustīgi nostiprināta serde. Cilindra iekšpusē izveidotajās rievās ievietots statora tinums. Šāda tinuma uzbūve aplūkota 4.4. apakšno- daļā. Sinhronās mašīnas statoru kopā ar tinumu sauc arī par enkuru.

Rotoru kopā ar ierosmes tinumu sauc par induktoru. Atkarībā no rotora uzbūves izšķir sinhronās mašīnas ar izvirsītiem un neizvirsītiem poliēm. Izvirsīto polu rotora konstruktīvā shēma parādīta 4.6. attēlā a un tā kopskats – 4.6. attēlā b.

Polu serdes 3 ar ierosmes tinuma spolēm 2 nekustīgi nostiprinātas korpusā 4, kas vienlaikus ir polu magnētiskās ķēdes sastāvdaļa. Pola serde 3 salikta no 1–2 mm bieza elektrotehniskā tērauda loksniem un sastiprināta ar tapskrūvēm. Statora pusē tā beidzas ar uzgali (kurpi) 1. Ierosmes tinuma 2 spoles saslēgtas virknē, un tinuma izvadi pievienoti kontaktgredzeniem 7 – līdzstrāvas pievadišanai tinumam. Ierosmes tinums mašīnā rada galveno magnētisko plūsmu. Uz rotora var būt novietots slāpētājtinums jeb palaišanas tinums 6, kas līdzīgs asinhronās mašīnas išslēgtā rotora tinumam. Šī tinuma stieņi 8 galos savienoti savā starpā (4.6.att. c).

Rotoru ar izvirsītiem poliēm lieto nelielām rotācijas frekvencēm ( $n < 1500 \text{ min}^{-1}$ ): hidroģeneratoros, dīzeļģeneratoros, lēngaitas sinhronajos dzinējos u. c. Ātrgaitas sinhronajās mašīnās ( $n \geq 1500 \text{ min}^{-1}$ ) izvirsīto polu rotora konstrukcija nenodrošina rotora

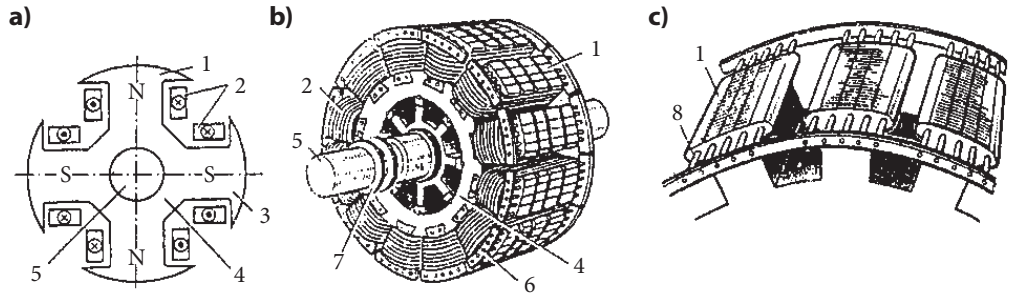


4.5. att. Sinhronās mašīnas stators: a – kopskats; b – serdes daļa; c – statnes daļa.

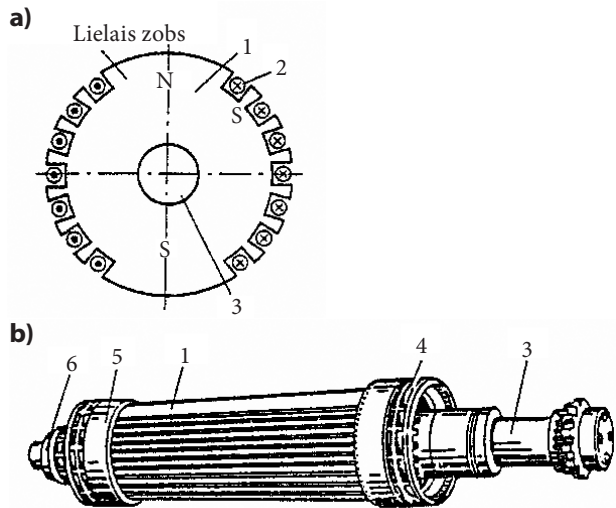
mehānisko izturību, tāpēc tajās lieto neizvirzīto polu rotoru.

Neizvirzīto polu rotora konstruktīvā shēma parādīta 4.7. attēlā a. Rotora serde ir masīvs tērauda cilindrs. Apmēram 2/3 tā virsmas ir ar rievām, kurās ievietots ierosmes tinums. Pārējā rotora virsmas daļā veido lielos zobus (polus).

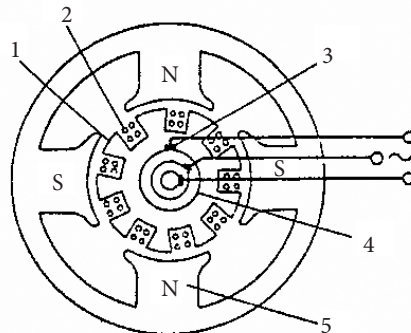
Mazjaudas (līdz 15 kW) sinhronajām mašīnām var būt apgriezta konstrukcija, t. i., poli novietoti statorā, bet maiņstrāvas tinums – rotorā (4.8. att.).



4.6. att. Izvirzīto polu rotora konstruktīvā shēma (a), kopskats (b) un rotora išslēgtais tinums (c): 1 – pola uzgalis (kurpe); 2 – ierosmes tinums; 3 – pola serde; 4 – rotora korpuss (jūgs); 5 – vārpsta; 6 – slāpētājtinums (palaišanas tinums); 7 – kontaktgredzeni; 8 – išslēgtā tinuma stieņi.



4.7. att. Neizvirzīto polu konstruktīvā shēma (a) un kopskats (b): 1 – rotora serde; 2 – ierosmes tinums; 3 – vārpsta; 4 – ventilators; 5 – bandāža; 6 – kontaktgredzeni.



4.8. att. Sinhronās mašīnas apgriezta konstrukcija: 1 – rotors; 2 – trīsfāžu maiņstrāvas tinums; 3 – sukas; 4 – kontaktgredzeni; 5 – poli.



## 4.2. ROTĒJOŠAIS MAGNĒTISKAIS LAUKS

Rotējošo magnētisko lauku var iegūt divējādi:

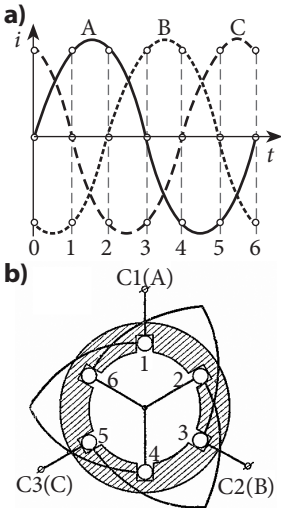
- 1) griežot rotora polus, kas izveidoti kā pastāvīgie magnēti vai kuru tinumus baro ar līdzstrāvu;
- 2) barojot speciāli izveidotu nekustīgu tinumu ar trīsfāžu maiņstrāvu.

Pirmajā gadījumā rotoram pievada mehānisko enerģiju, bet otrajā – rotējošais magnētiskais lauks rodas bez mehāniskās enerģijas līdzdalības.

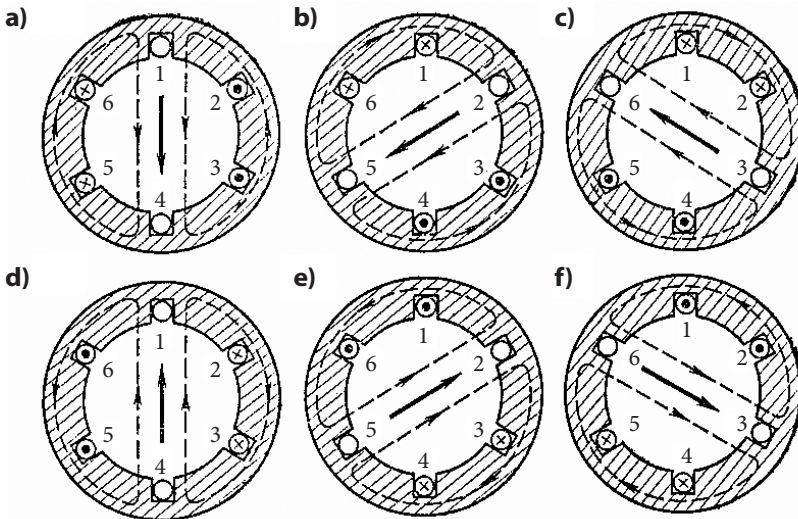
Pieslēdzot trīsfāžu tinumu trīsfāžu maiņstrāvas tīklam, tā fāzēs plūdis strāvas, kas nobīdītas fāzē par 120 elektriskajiem grādiem (4.9. att. a).

Rotējošā magnētiskā lauka veidošanos paskaidrosim, apskatot vienkāršotu trīsfāžu divpolu tinumu, kuram katrā fāzē ir tikai viena spole. Fāžu tinumi savienoti zvaigznē un pieslēgti trīsfāžu tīklam (4.9. att. b). Attēlosim trīsfāžu tinuma MS laika momentiem, kas atzīmēti 4.9. attēlā a ar cipariem 0, 1, 2, 3, 4, 5 un 6. Laika momentā 0 strāva fāzē A vienāda ar nulli, fāzē B tai ir negatīvs virziens, bet fāzē C – pozitīvs. Šie strāvu virzieni atzīmēti 4.10. attēlā a.

Par pozitīvo virzienu pieņemts virziens, kad strāva plūst no spoles sākuma uz beigām. Kā redzams 4.10. attēlā a, strāvas statora tinuma fāzēs rada divpolu magnētisko lauku, kura ass vērsta vertikāli uz leju.



4.9. att. Trīsfāžu strāvas grafiks (a) un trīsfāžu tinums (b).



4.10. att. Rotējoša magnētiskā lauka veidošanās.

Laika momentā 1 strāva fāzē C vienāda ar nulli, fāzē A tai ir pozitīvs virziens, bet fāzē B – negatīvs (4.10. att. b). No šī attēla redzams, ka salīdzinājumā ar laika momentu 0 MS vektors ir pagriezies par  $60^\circ$  pulksteņa rādītāju kustības virzienā.

Līdzīgi apskatot laika momentiem 2, 3, 4, 5 un 6 atbilstošās norises (4.10. att. c, d, e, f), var secināt, ka maiņstrāvas viena perioda laikā magnētiskais lauks pagriežas par  $360^\circ$ .

Četrpolu rotējošo magnētisko lauku iegūst ar 6 spolēm, katrā fāzē ieslēdzot divas spoles un savienojot tās virknē. Apskatot magnētiskā lauka ainu šādam tinumam, līdzīgi kā divpolu mašīnas gadījumā, var konstatēt, ka viena maiņstrāvas perioda laikā četrpolu magnētiskais lauks pagriežas par  $\frac{1}{2}$  no aploces un tā rotācijas frekvence ir divas reizes mazāka nekā divpolu laukam.

Tas nozīmē, ka divpolu rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvence ( $\text{min}^{-1}$ ) ir  $n_1 = 60f_1$ , bet vispārīgā gadījumā:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \text{ min}^{-1} \text{ vai } n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ s}^{-1}, \quad (4.1.)$$

kur  $f_1$  – maiņstrāvas tīkla frekvence (Hz).

Rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvences vērtības, ja tīkla frekvence  $f_1 = 50$  Hz, atkarībā no polu pāru skaita  $p$  ir šādas:

Polu pāru skaits $p$	1	2	3	4	5	6
Magnētiskā lauka rotācijas frekvence $n_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	3000	1500	1000	750	600	500

Lai mainītu rotējošā lauka rotācijas virzienu uz pretējo, nepieciešams izmainīt fāžu tinumu strāvu izmaiņas secību, t. i., apmainīt vietām jebkurus divus no statora tinuma izvadiem.

## 4.3. MAIŅSTRĀVAS TINUMU EDS

### 4.3.1. Tinuma EDS pamatharmonika

Maiņstrāvas mašīnas cenšas izveidot tā, lai tinumā inducētais EDS būtu sinusoidāls. Lai to izpildītu, izmantojot rotējošo magnētisko lauku, gaisa spraugā nepieciešams sinusoidāls magnētiskās indukcijas sadalījums. Šī uzdevuma precīza izpilde praktiski nav iespējama.

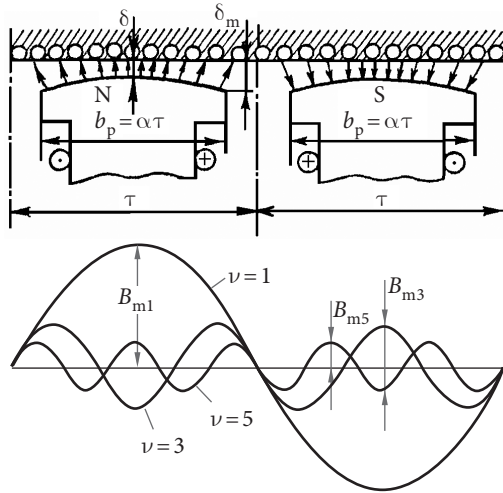
Lai tuvinātu indukcijas sadalījumu sinusoidālam, izmanto atbilstošu magnētiskās sistēmas konstrukciju, piemēram, izvirkzīto polu sinhronajās mašīnās izveido īpašas formas polu uzgaļus tā, lai gaisa sprauga  $d_m$  uzgaļa malā būtu lielāka nekā vidusdaļā  $d$  (4.11. att.). Parasti lielumu  $d_m$  un  $d$  attiecība ir  $d_m/d = 1-2$ . Tomēr arī šajā gadījumā magnētiskās indukcijas līkne līdztekus pirmajai jeb pamatharmonikai satur nepāra augstākās harmonikas, kuru amplitūda samazinās, palielinoties harmonikas kārtas numuram  $\nu$  (sk. 4.11. att.).



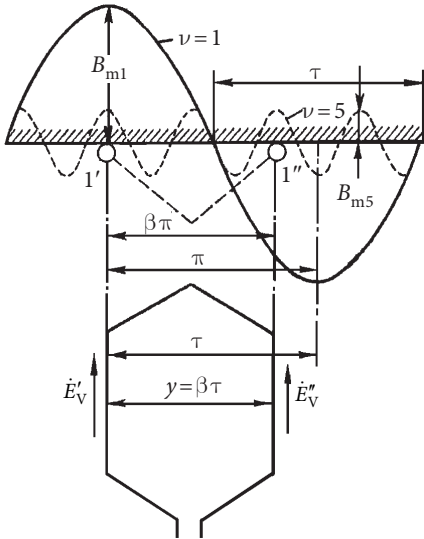
Nosakot maiņstrāvas mašīnu tinumu EDS, ievieš elektriskā grāda  $\alpha$  jēdzienu. 360 elektriskie grādi atbilst magnētiskās indukcijas pirmās harmonikas vienam periodam jeb statora aploces lokam, kas vienāds ar divkāršu pola iedaļu  $2\tau$ . Vispārīgā gadījumā viens ģeometriskais grāds atbilst  $p$  elektriskajiem grādiem.

Noteiksim vispirms EDS, ko maiņstrāvas mašīnas tinumā inducē rotējošā magnētiskā lauka pirmā harmonika ( $\nu = 1$ ).

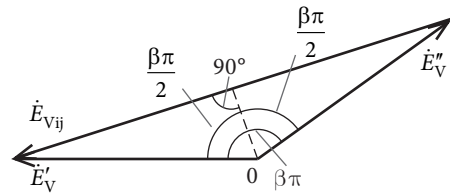
Sinusoidāls rotējošais magnētiskais lauks, kas pārvietojas attiecībā pret vadu ar ātrumu  $V = 2\tau f$ , inducē tajā EDS



4.11. att. Magnētiskās indukcijas sadalījums sinhronās mašīnas gaisa spraugā.



4.12. att. EDS vijuma aktīvajos vados.



4.13. att. Vijuma EDS noteikšana.

$$e_v = E_{vm} \sin \omega t,$$

kur  $E_{vm}$  – EDS amplitūda

$$E_{vm} = B_\delta l_\delta V = 2f B_\delta l_\delta \tau \quad (4.2.)$$

un vada EDS efektīvā vērtība

$$E_v = \frac{E_{vm}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} f B_\delta l_\delta \tau, \quad (4.3.)$$

kur  $B_\delta = B_{m1}$  – indukcijas pirmās harmonikas amplitūdas vērtība;

$l_\delta$  – mašīnas ekvivalentais garums;

$\tau$  – pola iedaļa.

Lai maiņstrāvas tinumos samazinātu EDS augstākās harmonikas, vijumus un spoles parasti izveido ar saīsinātu soli  $y < \tau$  un spoles relatīvais solis

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (4.4.)$$

tādā gadījumā ir mazāks par vienu.

Vijuma divu aktīvo vadu EDS  $\dot{E}'_v$  un  $\dot{E}''_v$  (4.12. att.) ir vienādi pēc lieluma, bet nobīdīti fāzē par leņķi  $\beta\pi$  (4.13. att.). Vijuma EDS ir vienāds ar vadu EDS ģeometrisko starpību,  $\dot{E}_{vij} = \dot{E}'_v - \dot{E}''_v$  un saskaņā ar 4.13. attēlā parādīto vektoru diagrammu:

$$E_{vij} = 2 \sin(\beta 90^\circ). \quad (4.5.)$$

Izteiksmē (4.5.) ietilpstošo lielumu

$$k_y = \sin(\beta 90^\circ) \quad (4.6.)$$

sauc par tinuma soļa saīsinājuma koeficientu. Šis koeficients rāda, cik reižu samazinās EDS spolei ar saīsinātu soli salīdzinājumā ar spoli, kurai ir pilns solis. Acīm redzams, ka tinumam ar saīsinātu soli ( $y < \tau$ )  $k_y < 1$ , bet tinumam ar pilnu soli ( $y = \tau$ )  $k_y = 1$ . Izteiksmes (4.5.) un (4.6.) ir spēkā arī gadījumam ar pagarinātu soli ( $y > \tau$ ,  $b > 1$ ).

Tinuma atsevišķā spolē var būt vairāki virknē saslēgti vijumi  $W_s$ , tāpēc spoles EDS

$$E_s = W_s E_{vij}. \quad (4.7.)$$

Ņemot vērā (4.3.), (4.4.) un (4.6.), izteiksmi (4.7.) var pārrakstīt šādi:

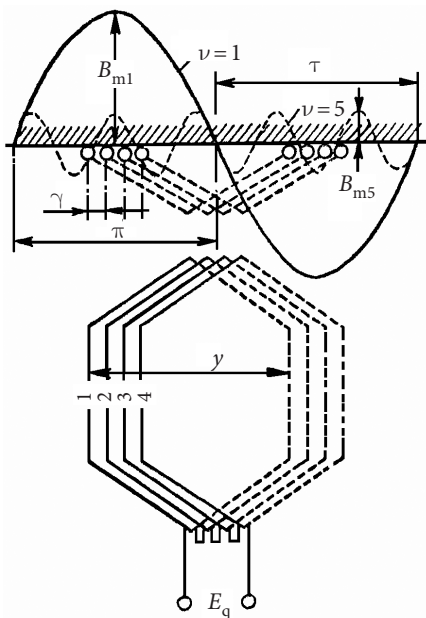
$$E_s = 2\sqrt{2} f W_s B_\delta l_\delta \tau k_y. \quad (4.8.)$$

Viena pola magnētisko plūsmu indukcijas sinusoidāla sadalījuma gadījumā var aprēķināt pēc formulas:

$$\Phi = B_{vid} l_\delta \tau = \frac{2}{\pi} B_\delta l_\delta \tau. \quad (4.9.)$$

Ja lielumu  $B_\delta l_\delta \tau$  no izteiksmes (4.9.) ievieto izteiksmē (4.8.), tad iegūstam:

$$E_s = \pi\sqrt{2} f W_s \Phi k_y = 4,44 f W_s \Phi k_y. \quad (4.10.)$$



4.14. att. Spoļu grupa magnētiskajā laukā.

ir nobīdītas telpā un magnētiskajā laukā, tad EDS, kas inducējas tajās, ir nobīdīti fāzē par leņķi

$$\gamma = \frac{360^\circ p}{Z} \quad (4.12.)$$

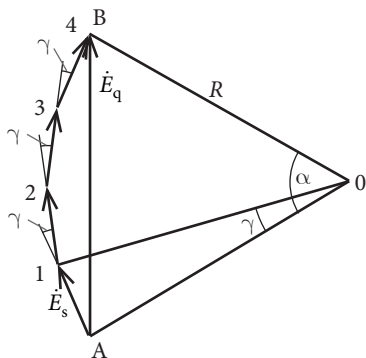
Viena spoļu grupa, kas sastāv no  $q$  spolēm, pa enkura aploci aizņem leņķi

$$\alpha = q\gamma = \frac{360^\circ pq}{Z} \quad (4.13.)$$

kuru sauc par fāzes zonas leņķi.

Spoļu grupas EDS  $E_q$  ir vienāds ar atsevišķu spoļu EDS ģeometrisko summu (4.15. att.). Ņemot vērā fāžu nobīdes, tas ir mazāks par spoļu EDS aritmētisko summu  $qE_s$ . Attiecību

$$k_p = \frac{E_q}{qE_s} \quad (4.14.)$$



4.15. att. Spoļu grupas EDS noteikšana.

Lai iegūtu pietiekami lielu fāzes vijumu skaitu, spoles jāizgatavo ar daudziem vijumiem, bet tādā gadījumā palielinās rievu izmēri. Tāpēc, lai iegūtu pietiekamu vijumu skaitu un saglabātu pieņemamus rievu izmērus, parasti palielina rievu skaitu un spoles katrā fāzē zem viena pola novieto vairākās  $q$  rievās, t. i., izveido sadalītu tinumu (4.14. att.). Šādas  $q$  spoles, kas atrodas blakus rievās, slēgtas virknē un pieder vienai fāzei, sauc par spoļu grupu. Parasti maiņstrāvas mašīnās  $q = 2 \dots 5$ . Tinuma parametru  $q$  – rievu skaits uz fāzi un polu – var aprēķināt pēc izteiksmes:

$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (4.11.)$$

kur  $Z$  – rievu skaits;  
 $m$  – fāžu skaits.

Tā kā spoļu grupā blakus novietotās spoles

sauc par tinuma sadalījuma koeficientu. Šis koeficients raksturo EDS samazināšanos sakarā ar to, ka spoļu grupas vijumi  $qW_s$  ir sadalīti pa  $q$  spolēm.

Saskaņā ar izteiksmi (4.14.) spoļu grupas EDS

$$E_q = qE_s k_p \quad (4.15.)$$

Izmantojot rādiusu  $R$  kā palīgvektoru (4.15. att.), var noteikt, ka

$$E_q = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

un

$$E_s = 2R \sin \frac{\gamma}{2} = 2R \sin \frac{\alpha}{q\alpha}.$$

Ievietojot šīs izteiksmes formulā (4.14.), iegūstam:

$$k_p = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2q}}. \quad (4.16.)$$

Praktiskajos aprēķinos lietderīgi noteikt tinuma sadalījuma koeficientu  $k_p$  atkarībā no tinuma pamatparametriem  $m$  un  $q$ . No izteiksmēm (4.11.) un (4.13.) var iegūt:

$$Z = 2p \, m q; \quad (4.17.)$$

$$k_p = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m}}{q \sin \frac{90^\circ}{mq}}. \quad (4.18.)$$

Ja  $q = 1$ , tad saskaņā ar (4.18.)  $k_p = 1$ , bet, ja  $q > 1$ , tad  $k_p < 1$ .

Ņemot vērā izteiksmes (4.10.) un (4.16.), var aprēķināt spoļu grupas EDS:

$$E_q = 4,44 f q W_s F k_w, \quad (4.19.)$$

kur lielumu

$$k_w = k_y k_p \quad (4.20.)$$

sauc par tinuma koeficientu.

Daudzpolu mašīnās katra fāze satur  $2p$  spoļu grupas, kas atrodas zem dažādiem poliēm. Visizplatītākajos gadījumos visās spoļu grupās ir vienāds spoļu skaits (vienāds ar  $q$ ). Tāpēc visas spoļu grupas aizņem vienādus leņķus  $\alpha$  un nobīdītas savā starpā par veselu polu iedaļu skaitu. Šādā gadījumā EDS visās spoļu grupās ir vienādi un nobīdīti fāzē par  $360^\circ$ , ja nobīde ir pārskaitļa polu iedaļas, vai  $180^\circ$ , ja nobīde ir nepārskaitļa polu iedaļas. Iepriekš minētās spoļu grupas var savienot virknē, lai EDS tajās summētos aritmētiski. Tāpat iespējams spoļu grupas savienot paralēli un izveidot tinuma a paralēlos zarus.

No teiktā var secināt, ka maiņstrāvas mašīnas tinuma fāzes EDS

$$E = \frac{2p}{a} E_q. \quad (4.21.)$$

Ievietojot šajā formulā  $E_q$  no (4.19.), iegūstam sakarību:

$$E = 4,44 f \frac{2pq}{a} W_s \Phi K_w,$$

jeb

$$E = 4,44 f W \Phi k_w, \quad (4.22.)$$

kur

$$W = \frac{2pqW_s}{a} \quad (4.23.)$$

sauc par fāzes vijumu skaitu.

Sarežģītākos gadījumos, kad atsevišķās spoļu grupās ir dažāds spoļu skaits, tāpat spēkā ir formulas (4.21.) un (4.22.), ja attiecīgi ir aprēķināts tinuma sadalījuma koeficients  $k_p$  (sk. 4.4.3. apakšnodaļu).

Trīsfāžu tinumu parasti izveido tā, lai visas rievas būtu aizpildītas un EDS fāzēs būtu vienādi pēc lieluma un nobīdīti fāzē par  $120^\circ$ . Šādu tinumu sauc par simetrisku. Simetriskā tinumā  $Z/m$  ir vesels skaitlis.

Simetrisku trīsfāžu tinumu ar vienādām spoļu grupām var izveidot, ja fāžu zonas ir  $\alpha = 60^\circ$  un  $\alpha = 120^\circ$ . Tinums ar fāžu zonu  $\alpha = 60^\circ$  ir izdevīgāks salīdzinājumā ar  $\alpha = 120^\circ$ , jo spoļu EDS vektori aizņem mazāku leņķi (sk. 4.15. att.) un, summējoties ģeometriski, var panākt lielāku rezultātu.

Speciālas nozīmes mašīnās bieži izmanto divfāžu tinumus ( $m = 2$ ), kuros fāzes EDS nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ . Šādos tinumos aizpilda visas rievas un fāžu zona  $\alpha = 90^\circ$ . Iepriekš dotās formulas (4.18. un 4.11.)  $k_p$  un  $q$  noteikšanai ir spēkā arī šajā gadījumā.

Vienfāzes mašīnas tinumu var izveidot, aizpildot visas rievas. Šādā gadījumā fāžu zona  $\alpha = 180^\circ$  un koeficients  $k_p$  ir relatīvi mazs, tā kā saskaitīti tiek spoļu EDS vektori ar lieliem fāžu nobīdes leņķiem. Tāpēc vienfāzes tinumā parasti aizņem tikai  $2/3$  no visām rievām un  $\alpha = 120^\circ$ .

Šajā apakšnodaļā iegūtās formulas var izmantot arī gadījumos, kad sinusoidāli sadalīts magnētiskais lauks ir nekustīgs attiecībā pret tinumu, bet mainās laikā vai pulsē pēc sinusoidāla likuma ar frekvenci  $f$ .

### 4.3.2. EDS augstākās harmonikas

Iepriekšējā apakšnodaļā iegūtās sakarības var viegli attiecināt, nosakot EDS  $E_\nu$ , kuru tinumā inducē magnētiskā lauka augstākās harmonikas (sk. 4.11. att.). Tiešām, pola iedaļa  $\nu$ -tai harmonikai  $\tau_\nu$  ir  $\nu$  reizes mazāka nekā  $\tau$ . Tāpēc, ja divi vadi nobīdīti attiecībā pret pamatharmoniku ( $\nu = 1$ ) par leņķi  $\beta 180^\circ$ , tad attiecībā pret  $\nu$ -to harmoniku šī nobīde sastāda  $\nu \beta 180^\circ$  (sk. 4.12. att.). Līdz ar to tinuma soļa saīsinājuma koeficients augstākajām harmonikām nosakāms šādi:

$$k_{y\nu} = \sin(\nu \beta 90^\circ). \quad (4.24.)$$

Magnētiskās plūsmas  $\nu$ -tā harmonika inducē blakus rievās EDS, kuru fāžu nobīdes leņķis ir  $\nu 180^\circ / (mq)$ . Tāpēc tinuma sadalījuma koeficientu augstākajām harmonikām var noteikt no šādām izteiksmēm:

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu \alpha}{2}}{q \sin \frac{\nu \alpha}{2q}}; \quad (4.25.)$$

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu 90^\circ}{m}}{q \sin \frac{\nu 90^\circ}{mq}}, \quad (4.26.)$$

bet tinuma koeficientu

$$k_{w\nu} = k_{y\nu} k_{p\nu}. \quad (4.27.)$$

Jāatzīmē, ka gadījumā, ja visas magnētiskā lauka harmonikas telpā rotē ar vienādu ātrumu, kā tas ir, piemēram, sinhronajās mašīnās, tad EDS  $\nu$ -tās harmonikas frekvence ir:

$$f_\nu = \nu f. \quad (4.28.)$$

Nosakot EDS  $E_\nu$ , ko maiņstrāvas tinumā inducē magnētiskā lauka augstākās harmonikas, izteiksmes (4.23.) vietā var izmantot šādu formulu:

$$E_\nu = 4,44 f_\nu W k_{w\nu} \Phi_\nu, \quad (4.29.)$$

bet magnētiskās plūsmas augstākās harmonikas aprēķina no izteiksmes, kas analogiska izteiksmei (4.9.):

$$\Phi_\nu = \frac{2}{\pi} B_{\delta\nu} l_\delta t_\nu = \frac{2}{\pi \nu} B_{\delta\nu} l_\delta \tau. \quad (4.30.)$$

Ja dažādas harmonikas maiņstrāvas tinumā inducē attiecīgos EDS ar dažādām frekvencēm, tad pilnais EDS fāzē nosakāms šādi:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_\nu^2}. \quad (4.31.)$$

### 4.3.3. EDS formas uzlabošana

Ja rotējošā magnētiskā lauka augstākās harmonikas, kā tas ir, piemēram, sinhronajā mašīnā, inducē tinumā EDS augstākās harmonikas, tad tinuma pilnā EDS izmaiņas laikā nebūs sinusoidālas.

EDS augstākās harmonikas gan pašā mašīnā, gan elektriskajos tīklos un patērētājos var izraisīt virkni nevēlamu parādību. Tāpēc tiek veltīta pienācīga uzmanība un pasākumi to samazināšanai. Pirmām kārtām magnētiskā lauka sadalījumu cenšas tuvināt sinusoidālam. Šāds pasākums attiecībā uz izvirzītu polu sinhrono mašīnu tika apskatīts 4.3.1. apakšnodaļā. Tomēr sasniegt vēlamos rezultātus, īpaši mainīgas slodzes apstākļos, neizdodas. Tāpēc EDS augstākās harmonikas samazina, īstenojot īpašas izmaiņas tinumu konstrukcijā. Pie šādām izmaiņām pieder: 1) tinuma soļa saīsināšana; 2) tinuma sadalījums; 3) slīpu rievu izveidošana.

Trīsfāžu tinumā fāzes A, B un C nobīdītas savā starpā attiecībā pret pamatharmoniku ( $\nu = 1$ ) par  $120^\circ$ , pret 3. harmoniku ( $\nu = 3$ ) par  $3 \cdot 120^\circ = 360^\circ$  vai  $0^\circ$ , pret 5. harmoniku ( $\nu = 5$ ) par  $5 \cdot 120^\circ = 600^\circ$  vai  $240^\circ$ , pret 7. harmoniku ( $\nu = 7$ ) par  $7 \cdot 120^\circ = 840^\circ$  vai  $120^\circ$  utt. (4.16. att.).

Par tādiem pašiem leņķiem šajās fāzēs ir nobīdīti EDS. Tādējādi EDS trešās harmonikas un harmonikas, kuru kārtas numuri dalās ar 3 (3, 9, 15, ...), visās tinuma fāzēs A, B, C jebkurā laika momentā ir vērstas vienā virzienā. Tāpēc, savienojot tinumu zvaigznē, (4.17. att. a), līnijas spriegumi šīs harmonikas nesatur. Savienojot trīsfāžu tinumu trīsstūrī (4.17. att. b), visu harmoniku, kuru kārtas numuri dalās ar 3, EDS summējas aritmētiski un uztur strāvas noslēgtajā trīsstūra kontūrā.

Šīs strāvas izraisa papildzudumus tinumā, tāpēc sinhronajiem ģeneratoriem trīsstūra slēgumu parasti nelieto.

Nemot vērā iepriekš teikto, veidojot maiņstrāvas tinumu, galvenā uzmanība tiek pievērsta piektās un septītās harmonikas samazināšanai, jo pēc trešās harmonikas to amplitūdas ir vislielākās. Efektīvs pasākums šajā ziņā ir tinuma soļa saīsināšana.

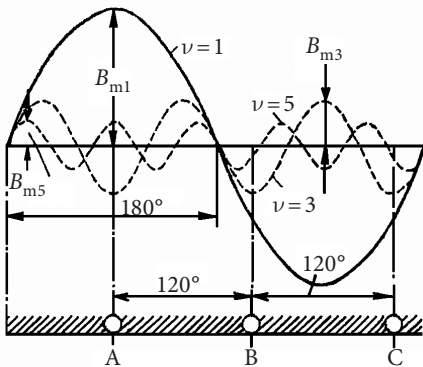
Ja tinuma solis nav saīsināts ( $\beta = 1$ ), tad saskaņā ar formulu (4.5.) visām nepāra harmonikām  $k_{y\nu} = \pm 1$  un tinumā visu harmoniku EDS parādīsies pilnā apmērā. Izvēloties atbilstošu tinuma soli, principā var panākt jebkuras augstākās harmonikas likvidēšanu. Tā, piemēram, ja saīsina tinuma soli par  $1/5$  ( $\beta = 4/5$ ), tad saskaņā ar izteiksmi (4.24.) piektajai harmonikai ( $\nu = 5$ ) iegūstam:

$$k_{y5} = \sin \frac{5 \cdot 4 \cdot 90^\circ}{5} = \sin 360^\circ = 0,$$

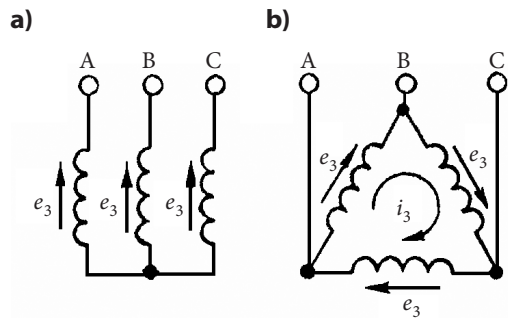
tāpēc EDS no lauka piektās harmonikas arī būs vienāds ar nulli. Šāds rezultāts izskaidrojams ar to, ka šajā gadījumā EDS piektās harmonikas abos vijuma aktīvajos vados sakrīt fāzē un kontūrā vērsti viens otram pretī. Ja vēlams likvidēt EDS septīto harmoniku, tinuma solis jāsaīsina par  $1/7$ , t. i., jāizvēlas  $\beta = 6/7$ .

Likvidēt vienlaikus visas augstākās harmonikas ar tinuma soļa saīsināšanu nav iespējams. Tāpēc cenšas maksimāli samazināt lielākās no tām. Tādas parasti ir piektā un septītā harmonika. Pieņemams variants ir tinuma soļa saīsināšana par  $1/6$  ( $\beta = 5/6$ ), tad

$$k_{y5} = \sin \frac{5 \cdot 5 \cdot 90^\circ}{6} = \sin 375^\circ = \sin 15^\circ = 0,259;$$



4.16. att. Magnētiskā lauka harmoniku novietojums attiecībā pret trīsfāžu tinuma fāzēm.



4.17. att. EDS trešās harmonikas trīsfāžu tinumā: a – zvaigznēs slēgums; b – trīsstūra slēgums.

$$k_{y7} = \sin \frac{7 \cdot 5 \cdot 90^\circ}{6} = \sin 525^\circ = \sin 165^\circ = 0,259$$

un šo harmoniku EDS samazinās gandrīz 4 reizes salīdzinājumā ar gadījumu, kad  $\beta = 1$ . Tanī pat laikā, ja  $\beta = 5/6$  tinuma soļa saīsinājuma koeficients

$$k_{y1} = k_y = \sin \frac{5 \cdot 90^\circ}{6} = \sin 75^\circ = 0,966,$$

t. i., EDS pamatharmonika samazinās nedaudz.

Tinuma soļa saīsināšana iespējama tikai par veselu zobu iedaļu skaitu. Tāpēc ne vienmēr var iegūt  $\beta = 5/6 = 0,833$  un parasti izvēlas  $\beta = 0,8 \div 0,86$ .

Izveidojot sadalītu tinumu ( $q > 1$ ), arī var ievērojami samazināt EDS augstākās harmonikas. Koncentrētā tinumā ( $q = 1$ ) saskaņā ar formulām (4.25. un 4.26.) tinuma sadalījuma koeficients visām harmonikām  $k_{p\nu} = \pm 1$ . Tāpēc EDS harmonikas šādā tinumā netiek vājinātas. Gadījumā, ja izveido sadalītu tinumu ( $q > 1$ ), tinuma sadalījuma koeficients daudzām harmonikām un attiecīgais EDS ievērojami samazinās. Tas izskaidrojams ar to, ka spoļu EDS  $\nu$ -tai harmonikai spoļu grupā nobīdīts par leņķi  $\nu\gamma$ , bet pamatharmonikai par leņķi  $\gamma$  (sk. 4.14. un 4.15. att.). Rezultātā EDS augstākās harmonikas ar lielāku nobīdi summējas un to summa ir mazāka. Tanī pat laikā tinuma sadalījuma koeficients pamatharmonikai  $k_{p1} = k_p$  ir tuvs 1 un tinuma sadalījums maz ietekmē EDS pamatharmoniku.

Analizējot izteiksmes (4.25. un 4.26.), var secināt, ka virknei augstāko harmoniku sadalītā tinumā  $k_{p\nu} = \pm k_{p1}$ , t. i., šīs EDS augstākās harmonikas netiek vājinātas. Minētās harmonikas sauc par zobu harmonikām un to kārtas numuru var aprēķināt no formulas:

$$\nu_z = 2mqk \pm 1 = k \frac{Z}{p} \pm 1, \quad (4.32.)$$

kur  $k = 1, 2, 3 \dots$

Trīsfāžu tinumam

$$\nu_z = 6qk \pm 1. \quad (4.33.)$$

Piemēram, ja  $q = 2$ , trīsfāžu tinumā  $\nu_z = 11, 13, 23, 25 \dots$

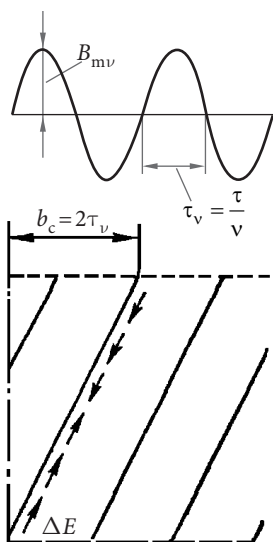
Sinhronās mašīnas ierosmes lauks satur visas harmonikas ar kārtas skaitli  $\nu_z$ . Vadi blakus rievās nobīdīti attiecībā pret pamatharmoniku par leņķi  $\gamma$  (sk. (4.12.)). Zobu harmonikām šis leņķis  $\gamma_z$  ir  $\nu_z$  reizes lielāks:

$$\gamma_{\nu_z} = \nu_z \gamma = \left( k \frac{Z}{p} \pm 1 \right) \frac{360^\circ p}{Z} = 360^\circ k \pm \frac{360^\circ p}{Z} = 360^\circ k \pm \gamma, \quad (4.34.)$$

kas ir ekvivalents leņķim  $\pm \gamma$ . Tādējādi EDS harmonikas ar kārtas skaitli  $\nu_z$  atsevišķās rievās nobīdītas savā starpā par tādu pašu leņķi kā EDS pamatharmonika. Tāpēc šo EDS vektori vijuma kontūrā un spoļu grupā summējas ar vienādu leņķa nobīdi.

Šajā sakarā ne tikai tinuma sadalījuma koeficienti, bet arī tinuma soļa saīsināšanas koeficienti harmonikām  $\nu = 1$  un  $\nu = \nu_z$  ir vienādi. Tas nozīmē, ka, izmantojot soļa saīsināšanu un izvēloties sadalītu tinumu ar  $q > 1$  (vesels skaitlis), nevar likvidēt vai vājināt EDS harmonikas ar kārtas skaitli  $\nu_z$ . Tomēr, palielinot  $q$ , palielinās arī zobu harmoniku kārtas numuri  $\nu_z$ . Tā kā harmonikām ar lielāku kārtas numuru amplitūda ir mazāka,





4.18. att. EDS augstāko harmoniku samazināšana mašīnā ar slīpām rievām.

var apgalvot, ka skaitļa  $q$  palielināšana veicina EDS formas uzlabošanos.

EDS augstākās harmonikas, tanī skaitā arī no zobu harmonikām, var samazināt, izveidojot tinumu ar slīpām rievām (4.18. att.).

Tā, piemēram, izvēloties slīpas rievas ar  $b_c = 2\tau\nu = 2\tau/\nu$ , panāk  $E_\nu = 0$ . Tas izskaidrojams tā, ka atsevišķos vada posmos inducējas vienādi, bet pretēji vērsti EDS (4.18. att.). Visvairāk izteiktas ir zobu harmonikas, kurām  $k=1$ . Lai novērstu kādu no zobu harmonikām, jāizvēlas

$$b_c = \frac{2\tau}{\nu_z} = \frac{2p\tau}{Z \pm p}. \quad (4.35.)$$

Parasti izmanto slīpas rievas, kurām  $b_c$  ir vienāds ar zobu iedaļu:

$$b_c = \frac{2\pi\tau}{Z}. \quad (4.36.)$$

Šajā gadījumā visas zobu augstākās harmonikas būs ievērojami vājinātas.

Jāatzīmē, ka, izveidojot slīpas rievas, samazinās arī EDS pamatharmonika. Šo samazināšanos ievēro, reizinot EDS pamatharmoniku  $E$  (sk. (4.22)) ar attiecīgo koeficientu  $k_c$ . Koeficientu  $k_c$  pamatharmonikai un augstākajām harmonikām nosaka no attiecīgajām formulām:

$$k_c = \frac{\sin\left(\frac{b_c \pi}{\tau 2}\right)}{\frac{b_c \pi}{\tau 2}}; \quad (4.37.)$$

$$k_{c\nu} = \frac{\sin\left(\frac{\nu b_c \pi}{\tau 2}\right)}{\frac{\nu b_c \pi}{\tau 2}}. \quad (4.38.)$$

Parasti pamatharmonikai koeficients  $k_c$  ir tuvs vienam. Piemēram, ja izvēlas  $b_c/\tau = 1/6$ , tad

$$k_c = \frac{\sin\frac{\pi}{2 \cdot 6}}{\frac{\pi}{2 \cdot 6}} = \frac{12}{\pi} \sin 15^\circ = \frac{12}{\pi} \cdot 0,259 = 0,989$$

un EDS pamatharmonika samazinās par 1,1 %.

## 4.4. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU TINUMI

### 4.4.1. Maiņstrāvas tinumu pamattipi

Maiņstrāvas mašīnu statora tinuma pamatelements ir spole, kas sastāv no viena vai vairākiem elementiem. Spole sastāv no aktīvām daļām, kas atrodas rievās, un frontāliem savienojumiem. Attālumu starp spoles aktīvām daļām sauc par tinuma soli  $y$  (sk. 4.12. att.). Soli sauc par pilnu vai diametrālu, ja tas vienāds ar pola iedaļu  $\tau$ , t. i.,

$$y = \tau = \frac{Z}{2p}, \quad (4.39.)$$

un saīsinātu, ja  $y < \tau$ . Turklāt  $y = \beta\tau$ .

Mūsdienās izmantojamās statora tinumus iedala:

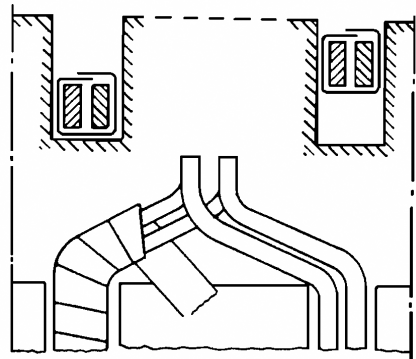
- pēc fāžu skaita – vienfāzes un daudzfāžu (parasti trīsfāžu);
- atkarībā no spoļu novietojuma rievās – vienslāņa, kad spoles mala aizņem visu rievu, un divslāņu, kad vienā rievā atrodas divu spoļu malas (4.19. att.);
- atkarībā no spoļu platuma – tinumi ar pilnu un saīsinātu soli;
- atkarībā no rievu skaita  $q$  uz vienu polu un fāzi – vesela skaitļa tinumi un daļskaitļa tinumi.

Savukārt divslāņu tinumus iedala cilpas un viļņa tinumos – atkarībā no kārtības, kādā spoles izvietotas rievās un savienotas savā starpā. Plašāku lietojumu ieguvuši cilpas tinumi. Statoru viļņa tinumus izmanto reti, galvenokārt lielas jaudas hidroģeneratoriem. Biežāk tos lieto asinhrono dzinēju fāžu rotoriem. Divslāņu tinumu popularitāte izskaidrojama ar to priekšrocībām. Galvenās no tām ir: iespēja izgatavot tinumu no vienāda izmēra un vienādas formas spolēm un iespēja saīsināt soli par jebkuru rievu iedaļu skaitu.

Maiņstrāvas mašīnu statora tinumiem izvirza vairākas prasības. Bez tām, kas ir kopīgas visām elektriskajām mašīnām – tehnoloģiskums, minimāls vadu un izolācijas materiālu patēriņš un ekspluatācijas drošums, izvirza arī specifiskas prasības: fāžu spriegumiem jābūt vienādiem un simetriski nobīdītiem fāzē vienam pret otru; fāžu tinuma aktīvajām un induktīvajām pretestībām jābūt vienādām; līnijas EDS spriegumu formai praktiski jābūt sinusoidālai.

Trīsfāžu tinumos parasti izvēlas fāžu zonu  $\alpha = 60^\circ$ . Tāpēc turpmāk tiek apskatīti tieši tinumi ar  $\alpha = 60^\circ$ . Tiekot skaidrībā ar šādiem tinumiem, viegli var sastādīt izvērsto shēmu arī tinumam ar fāžu zonu  $\alpha = 120^\circ$ .

Maiņstrāvas mašīnu tinumu pamatparametri ir rievu skaits  $Z$ , polu pāru skaits  $p$ , fāžu skaits  $m$ , tinuma solis  $y$  un rievu skaits  $q$  uz polu un fāzi.



4.19. att. Divslāņu tinumu spoļu novietojums rievās.

### 4.4.2. Trīsfāžu vesela skaitļa tinumi

Apskatisim trīsfāžu divslāņu cilpas vesela skaitļa tinumu. Noskaidrosim tinuma izveidošanas principu, aplūkojot konkrētu piemēru. Pieņemsim, ka  $2p = 4$  un  $Z = 24$ . Tad rievu skaits uz polu un fāzi ir:

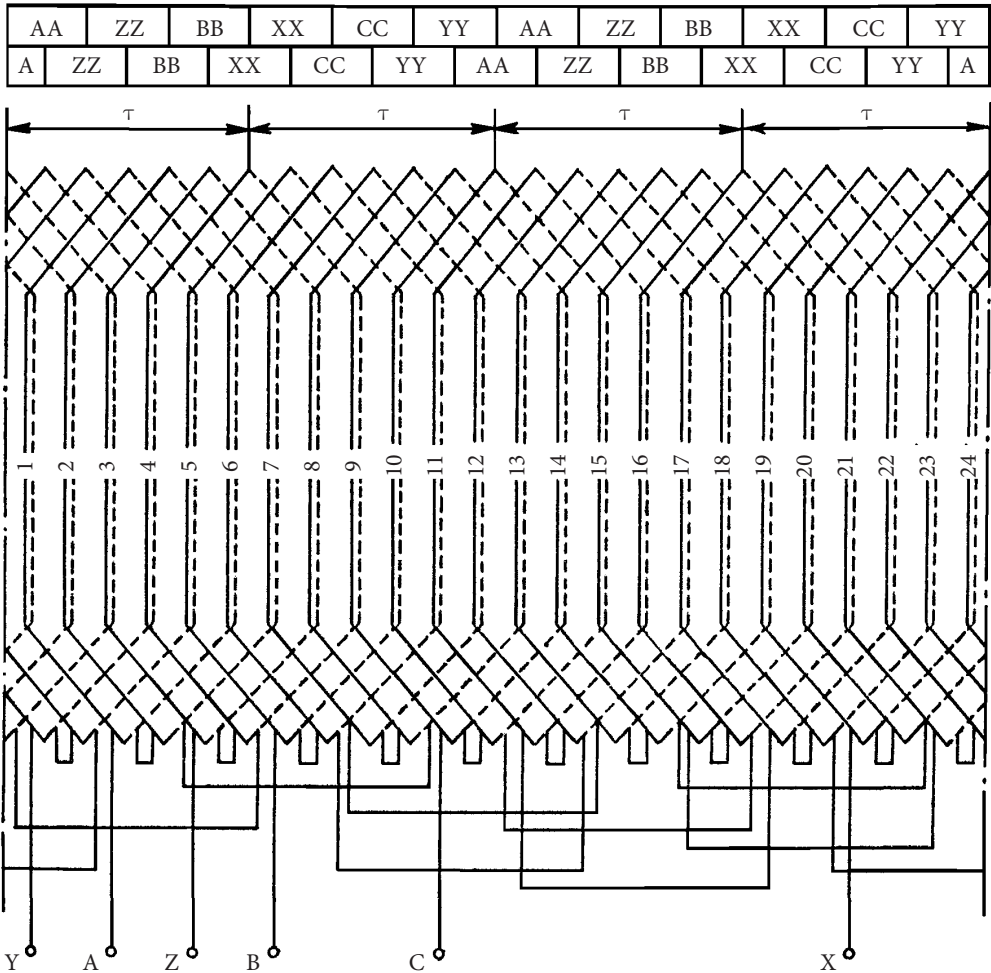
$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

un pola iedaļa izteikta zobu iedaļās:

$$\tau = mq = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{6} = 6.$$

Izvēlamies saīsinātu tinuma soli  $y = 5$  zobu iedaļās. Tad relatīvais solis

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0,833.$$



4.20. att. Trīsfāžu divslāņu cilpas tinuma izvērstā shēma ( $2p = 4, Z = 24, m = 3, q = 2, y = 5$ ).

Tinuma izvērstā shēma parādīta 4.20. attēlā. Šajā tinumā visas spoļu grupas saslēgtas virknē.

Tinuma izvērstās shēmas veidošanu var paskaidrot šādi. Vispirms sadala rievu virsējo slāni pa  $q=2$  spoļu malām katrā fāžu zonā. Ja 1. un 2. rievu atvēl A fāzes zonai, tad B fāzei jāpiešķir 5. un 6. rievu, lai nodrošinātu nobīdi starp fāzēm  $120^\circ$ , t. i., divas fāžu zonas pa  $60^\circ$ . C fāzes zona attiecībā pret B fāzes zonu arī nobīdīta par  $120^\circ$  un aizņem 9. un 10. rievu. Nākamajās divās polu iedaļās (13.–24. rievu) A, B, C fāžu zonu secība ir analoģiska: A fāzes zonai pieder 13. un 14. rievu, B fāzes zonai pieder 17. un 18. rievu, C fāzes zonai pieder 21. un 22. rievu. Tādā veidā augšējā slānī ir sadalīta puse fāžu zonu rievu. Atlikušās fāžu zonas augšējā slānī arī jāsadala pa fāzēm A, B, C, tās apzīmējot attiecīgi X, Y, Z. Turklāt X fāžu zonai atvēlam rievu, kas nobīdīta attiecībā pret A fāzes zonu par  $t=6$  rievām, t. i., 7., 8. un 19., 20. rievu. Analoģiski Y fāžu zonai atvēlam 11., 12. un 23., 24. rievu, bet Z fāžu zonai atvēlam 3., 4. un 15., 16. rievu. Atšķirība starp fāžu zonām A, B, C un X, Y, Z ir tāda, ka EDS attiecīgajās spoļu malās, piemēram, A un X, nobīdīti fāzē par  $180^\circ$ , tā kā tās magnētiskajā laukā nobīdītas par vienu vai nepāra skaitļa pola iedaļām. Rezultātā iegūstam rievu sadalījumu spoļu augšējām malām pa fāžu zonām. Šis sadalījums parādīts 4.20. att. augšējā daļā.

Sakarā ar to, ka apskatāmajā piemērā tinuma solis ir saīsināts par vienu zobu iedaļu, tad spoļu malas rievu apakšējā slānī ir nobīdītas pa kreisi par vienu zobu iedaļu, kā tas ir parādīts 4.20. att. Var atzīmēt, ka spoļu apakšējo malu sadalījumu apakšējā slānī var arī neveikt, jo tas automātiski veidojas tinuma izvērstajā shēmā.

Svarīgi uzsvērt, ka 4.20. attēlā parādītā fāžu zonu secība A, Z, B, X, C, Y ar  $q$  rievām katrā zonā, kas atkārtojas ik pēc katrām divām pola iedaļām, raksturīga katram trīsfāžu tinumam ar fāžu zonu  $\alpha=60^\circ$ . Tāpēc nav nepieciešams katreiz veikt iepriekš izklāstītos aprēķinus.

Tinumā rievu sadalīšanu pa fāzēm vēl var veikt, izmantojot rievu EDS vektoru zvaigzni (4.21. a att.). EDS vektori blakus rievās, kā izriet no formulas (4.12.), apskatāmajā piemērā nobīdīti fāzē par

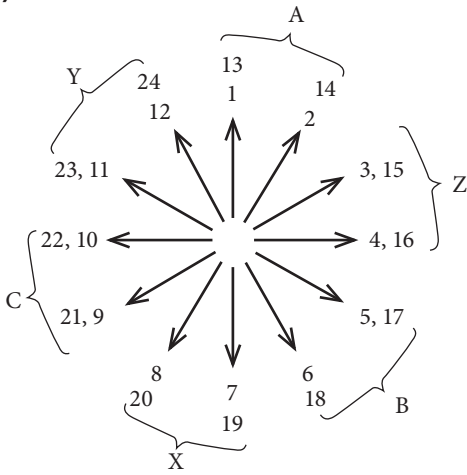
$$\gamma = \frac{360^\circ \cdot p}{Z} = \frac{360^\circ \cdot 2}{24} = 30^\circ.$$

Apejot rievu EDS vektorus uz divām polu iedaļām (mūsu piemērā vektori 1–12), ja  $q$  ir vesels skaitlis, vektoru zvaigzne atkārtosies, jo attiecīgo rievu EDS vektori, piemēram, vektori 1 un 13, 2 un 14 utt., sakrītis. Zonu X, Y, Z vektori nobīdīti attiecībā pret zonu A, B, C vektoriem par  $180^\circ$ . Tādējādi pa fāžu zonām iegūstam tādu pašu sadalījumu, kā parādīts 4.20. attēlā.

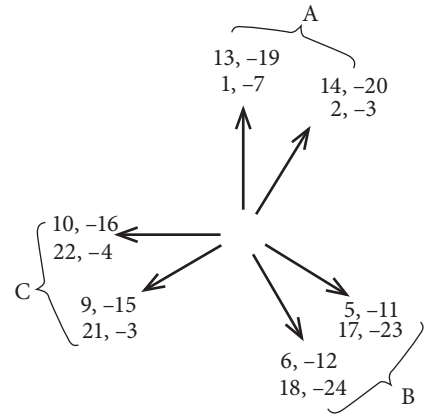
4.20. attēlā parādītajā shēmā katrā rievā atrodas divas spoļu malas. Pieņemsim, ka kreisajā pusē ar nepārtrauktu līniju attēlotā spoles mala atrodas virsējā slānī, bet labajā pusē ar pārtrauktu līniju attēlotā spoles mala atrodas apakšējā slānī. Spoļu numerāciju veiksīm pēc tās malas, kas atrodas rievās virsējā slānī. Tā kā EDS blakus spolēm arī nobīdīti par leņķi  $\gamma=30^\circ$ , tad rievu EDS zvaigzni var uzskatīt arī par spoļu EDS zvaigzni.

Katrā spoļu grupā ( $q=2$ ) spoles savā starpā tiek savienotas virknē. Tādējādi A fāzē ir

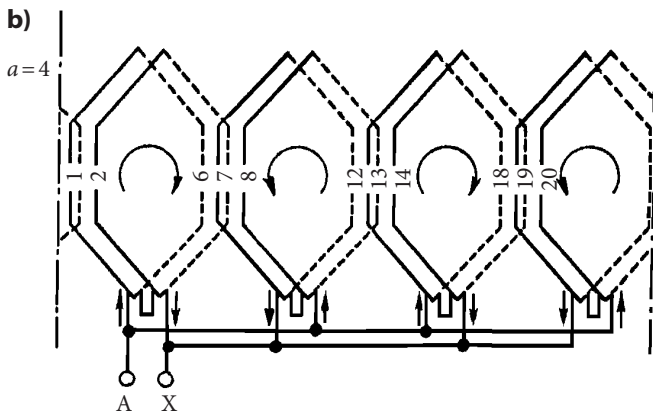
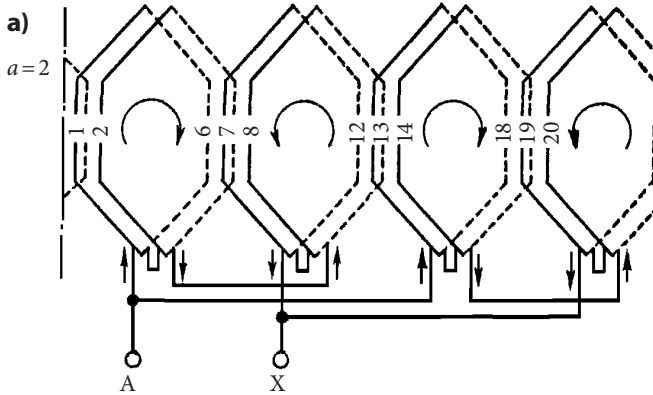
a)



b)



4.21. att. Rievu EDS vektoru zvaigzne (a) un spoju EDS vektoru zvaigzne (b).



4.22. att. Spoju grupu savienojumu shēmas A fāzē, ja  $a=2$  (a) un  $a=4$  (b).

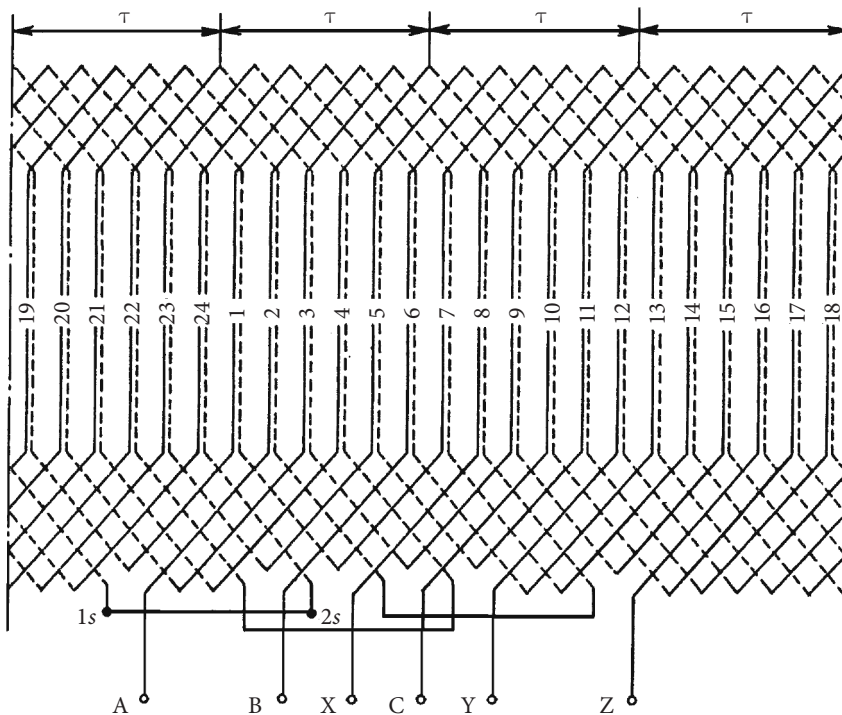
četrus spoļu grupas 1–2, 7–8, 13–14 un 19–20. 4.20. attēlā visas šīs spoļu grupas savienotas virknē. Turklāt spoļu grupas 7–8 un 19–20 pievienotas pretslēgumā attiecībā pret spoļu grupām 1–2 un 13–14, lai visu spoļu grupu EDS summētos. Analogiski savieno spoļu grupas arī citās fāzēs.

Spoļu grupu pievienošana pretslēgumā zonās X, Y, Z ir ekvivalenta EDS vektoru fāzes izmaiņai par  $180^\circ$ . Tādējādi iegūstam spoļu EDS vektoru zvaigzni, kurā ir trīs sektori un katrā no tiem astoņi vektori (4.21. att. b). Katras fāzes EDS veidojas kā spoļu EDS vektoru summa attiecīgajā sektorā. Acīmredzami visu fāžu EDS šajā gadījumā ir vienādi un nobīdīti fāzē par  $120^\circ$ .

Spoļu grupu skaits katrā fāzē divslāņu tinumā ar fāžu zonu  $\alpha = 60^\circ$  vienāds ar polu skaitu  $2p$ . Tāpēc divslāņu tinumā, ja  $q$  ir vesels skaitlis, var izveidot līdz  $a = 2p$  paralēlos zarus, kuros ir vienādi EDS. Piemēram, iepriekš aprakstītajā piemērā ( $2p = 4$ ) var izveidot  $a = 1, 2$  vai  $4$  paralēlos zarus (4.22. att.).

Ar bultiņām šajā attēlā parādīti strāvu virzieni tinuma paralēlajos zaros.

Lieljaudas maiņstrāvas mašīnās, piemēram, hidroģeneratoros, turboģeneratoros un asinhronajās mašīnās, ar fāžu rotoru bieži izmanto viļņa tinumus. Šādos gadījumos nepieciešamo statora spriegumu var nodrošināt, ja vijumu skaits spolē ir  $W_s = 1$ . Tad divslāņu tinumā katrā rievā atrodas tikai divi vadi vai stieņi. Šādā gadījumā rievās telpa



4.23. att. Trīsfāžu divslāņu viļņa tinuma izvērsta shēma ( $2p = 4, Z = 24, m = 3, q = 2, y = 5$ ).

tiek efektīvāk izmantota, samazinot izolācijas materiālu tilpumu. Tinumu ar  $W_s = 1$  var izveidot gan kā cilpas, gan kā viļņa tinumu. Tomēr daudzpolu mašīnās priekšroka tiek dota viļņa tinumam, jo samazinās savienojumi starp spoļu grupām, tādējādi tiek ietaupīts varš, un samazinās tinuma izgatavošanas darbietilpība.

Trīsfāžu divslāņu viļņa tinuma izvērstā shēma, parametri tādi paši kā iepriekš aplūkotajā piemērā, parādīta 4.23. attēlā. Rievu sadalījums pa fāžu zonām un rievu EDS vektoru zvaigzne šajā gadījumā ir analogiska kā cilpas tinumam iepriekšējā piemērā (4.21. un 4.22. att.).

Fāzes A izvads 4.23. attēlā paņemts no 2. rievas augšējā slāņa. Apejot šo fāzi no tās sākuma A, vispirms ir vijums (spole) 2, kura viena mala atrodas 2. rievas augšējā slānī, bet otra mala 7. rievas apakšējā slānī. Tālāk pārejam uz vijumu 14, kura viena mala atrodas 14. rievas augšējā slānī, bet otra – 19. rievas apakšējā slānī. Tādējādi veikts pilns aplis apkārt enkuram. Vispārējā gadījumā tiek apieti  $p$  vijumi. Otrajā aplī ap enkuru tiek apieti vijumi 1 un 13. Tādā veidā ir apieti  $2pq$  – puse no visiem fāzes A vijumiem.

Pēc tam apejam vijumus 20, 8, 19 un 7, kuri savienoti virknē ar vijumiem 2, 14, 1 un 13 (sk. savienojumu  $1s-2s$  4.23. attēlā). Jāatzīmē, ka vijumi 20, 8, 19 un 7 tiek apieti pretējā virzienā un beidzas ar izvadu X. Analogiski savienoti vijumi arī fāzēs B un C. Neatkarīgi no polu skaita tinumā ir trīs tādi savienojumi kā  $1s-2s$ .

No iepriekš izklāstītā var secināt, ka viļņa tinumā katrā fāzē visi vijumi (spoles) dalās divās vienlīdzīgās daļās. Šīs spoļu grupas var savienot arī paralēli un izveidot divus  $a = 2$  paralēlos zarus.

Tinuma soļa saīsināšana viļņa tinumā dod tādu pašu elektromagnētisko efektu kā cilpas tinumā. Arī EDS un tinuma koeficientus aprēķina pēc vienām un tām pašām formulām (sk. 4.3. apakšnodaļu).

#### 4.4.3. Trīsfāžu daļskaitļa tinumi

Asinhrono dzinēju ražošanā ar dažādu polu pāru skaitu  $p$  (dažādu rotācijas frekvenci), lai ietaupītu uz štancēšanas iekārtām, bieži izmanto statora vai rotora seržu skārdus ar vienādu rievu skaitu. Tādā gadījumā vieniem dzinējiem rievu skaits  $q$  uz polu un fāzi ir vesels skaitlis, bet citiem dzinējiem atkarībā no polu pāru skaita  $p$  – daļskaitlis. Pēdējā gadījumā izmanto daļskaitļa tinumus. Tos izmanto arī daudzpolu ģeneratoros.

Daļskaitļa tinumi labvēlīgi iespaido EDS formu, jo salīdzinājumā ar vesela skaitļa tinumiem efektīvāk samazina zobu harmonikas. To var paskaidrot šādi. Kā tika noskaidrots 4.3.3. apakšnodaļā, EDS augstākajām harmonikām, kuru kārtas numuri ir

$$\nu_z = 2mqk \pm 1 = k \frac{Z}{p} \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots$$

tinuma soļa saīsināšanas  $k_{yn}$  un tinuma sadalījuma  $k_{pn}$  koeficienti ir tādi paši kā pamatharmonikai  $k_{y1}$  un  $k_{p1}$ . Tāpēc vesela skaitļa tinumā EDS harmonikas, kuras inducē minētās ierosmes lauka harmonikas, netiek samazinātas.

Ja  $q$  ir vesels skaitlis,  $\nu_z$  veido veselu nepāra skaitļu rindu. Tādas pašas harmonikas

satur arī ierosmes lauks. Daļskaitļa tinumam  $\nu_z$  vērtības, ja  $k=1$  vai  $k=2$ , parasti nav veseli nepāra skaitļi. Piemēram, trīsfāžu tinumam ar

$$q = 2\frac{1}{5}, \nu_z = 12\frac{1}{5}, 14\frac{1}{5}, 25\frac{2}{5}, 27\frac{2}{5} \text{ utt.}$$

Parametra  $\nu_z$  vērtības ir veseli nepāra skaitļi tikai tad, ja  $k$  sasniedz lielākas vērtības. Piemēram, ja  $k=5$ ,  $\nu_z = 2 \cdot 3 \cdot 2^{1/5} \cdot 5 \pm 1 = 66 \pm 1$ . Harmonikām ar tik lieliem kārtas numuriem amplitūdas ir niecīgas un to ietekme nav jūtama.

Apskatīsim daļskaitļa tinumu īpatnības. Daļskaitli  $q$  var uzrakstīt kā

$$q = b + \frac{c}{d}, \quad (4.40.)$$

kur  $b$ ,  $c$  un  $d$  – veseli skaitļi;  $c < d$ .

Viena daļa spoļu grupu šādā tinumā satur  $b$  spoles, bet otra daļa –  $b+1$  spoles. Turklāt no katrām  $d$  spoļu grupām  $d-c$  grupas satur  $b$  spoles katrā grupā, bet  $c$  grupas satur  $b+1$  spoles. Tad  $d$  grupās ir

$$(d-c)b + c(b+1) = bd + c$$

spoles. Vidēji vienā spoļu grupā ir

$$\frac{bd+c}{d} = b + \frac{c}{d}$$

spoles, kas atbilst izteiksmei (4.40.).

Katrā divslāņu tinuma fāzē ir  $2p$  spoļu grupas. Katrā fāzē, no simetrijas viedokļa, jābūt vienādām mazajām spoļu grupām ar  $b$  spolēm katrā un lielajām spoļu grupām ar  $b+1$  spolēm katrā, t. i., katrā fāzē jābūt  $(d-c)(2p/d)$  mazajām un  $c(2p/d)$  lielajām spoļu grupām. Tādējādi šiem skaitļiem jābūt veseliem skaitļiem,

$$\frac{2p}{d} = \text{vesels skaitlis.} \quad (4.41.)$$

Lai izveidotu simetrisku trīsfāžu tinumu, bez nosacījuma (4.41.) jāizpilda vēl šāds noteikums:

$$\frac{d}{3} \neq \text{vesels skaitlis.} \quad (4.42.)$$

Minimālais rievu skaits simetriskā tinumā

$$Z' = 3 \cdot 2pq = 3 \frac{2p}{d} (bd + c). \quad (4.43.)$$

Minimālais polu skaits  $2p'$  simetriskā tinumā

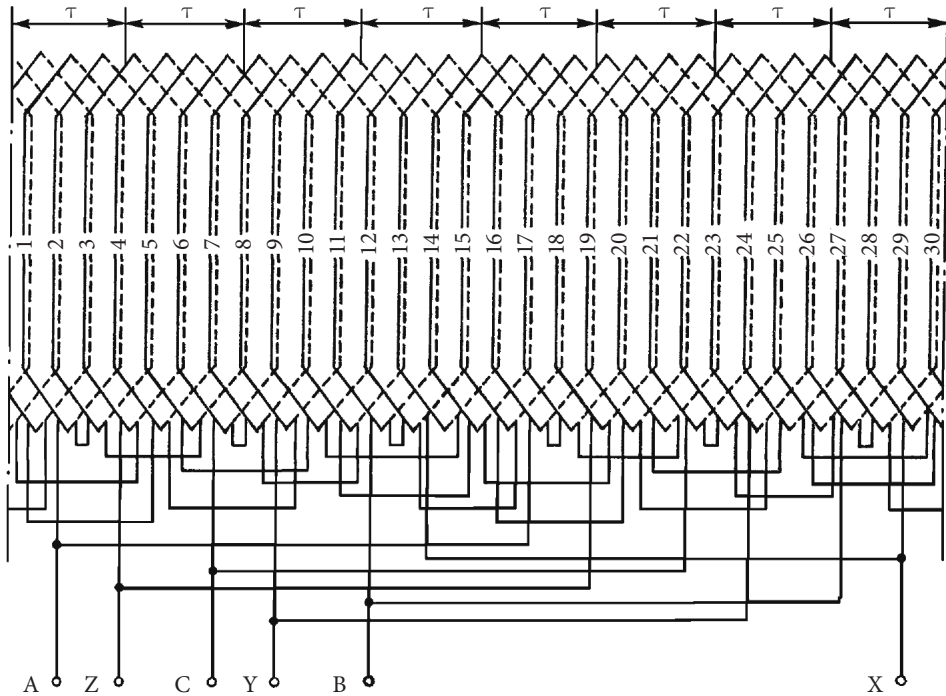
$$2p' = 2d \text{ (ja } d \text{ – nepāra skaitlis)} \quad (4.44.)$$

un

$$2p' = d \text{ (ja } d \text{ – pāra skaitlis).} \quad (4.45.)$$

Simetriska trīsfāžu daļskaitļa tinuma shēmai var būt vairāki varianti. Parasti izmanto tādu, kurā iegūst maksimālo EDS. Šim nolūkam lielās un mazās spoļu grupas izviet





4.24. att. Trīsfāžu divslāņu daļskaitļa cilpas tinums ( $2p=8, Z=30, m=3, q=1\frac{1}{4}, y=3$ ).

simetriski pa aploci (4.24. att.).

Rievu EDS zvaigzņi daļskaitļa tinumam var apskatīt arī kā spoļu EDS zvaigzņi. Spoles fāžu zonās X, Y, Z pievieno attiecībā pret spolēm fāžu zonās A, B, C pretslēgumā, lai visu spoļu grupu EDS summētos. Tad iegūstam trīs vienādus vektoru sektorus. Katrs no šiem sektoriem aizņem  $60^\circ$  ar

$$q_e = bd + c \quad (4.46.)$$

stariem. EDS katrā fāzē veidojas kā visu vektoru summa attiecīgajā sektorā. Šis apstāklis liecina par to, ka daļskaitļa tinums ar rievu skaitu  $q$  uz fāzi un polu ir ekvivalents vesela skaitļa tinumam ar  $q = q_e$ . Tāpēc  $q_e$  sauc par ekvivalento rievu skaitu uz fāzi un polu.

No teiktā var secināt, ka tinuma sadalījuma koeficientu  $k_p$  EDS pamatharmonikai daļskaitļa tinumam, tāpat kā vesela skaitļa tinumam, var aprēķināt no izteiksmes (4.18.), ievietojot tajā parametra  $q$  vietā  $q_e$ . Tas attiecas arī uz augstākajām harmonikām, ja  $\nu$  ir vesels skaitlis ( $\nu = 1, 3, 5, 7, \dots$ ).

Augstākās harmonikas, kurām attiecība

$$\nu = \frac{T}{\tau_\nu} \quad (4.47.)$$

nav vesels skaitlis, var nosaukt par daļskaitļa harmonikām. Jāatzīmē, ka daļskaitļa tinumam zobu harmoniku kārtu  $\nu_z$  arī nosaka no izteiksmes (4.33.). Ja  $d > 2$ ,  $\nu_z$  šinī gadījumā ir daļskaitļi.

Daļskaitļa tinumam, ja  $\nu$  ir daļskaitlis, koeficientus  $k_{p\nu}$  aprēķina pēc sarežģītākām formulām, tomēr arī daļskaitļa tinumā zobu harmonikām  $k_{p\nu} = \pm k_{p1}$ .

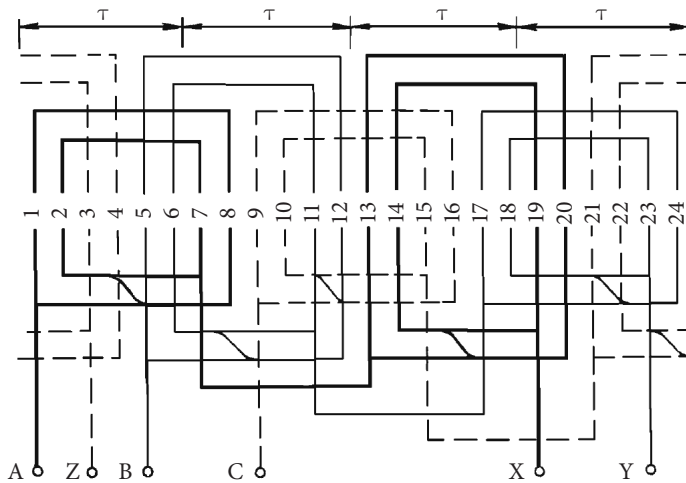
Tinuma soļa saīsināšanas koeficientu  $k_y$  daļskaitļa tinumam aprēķina pēc tām pašām formulām, kā vesela skaitļa tinumam.

#### 4.4.4. Trīsfāžu vienslāņa tinumi

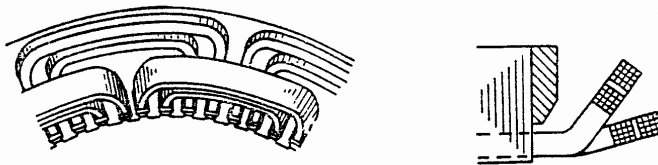
Vienslāņa tinumā katras spoles viena mala aizņem veselu rievu. Tāpēc spoļu grupu skaits katrā fāzē ir vienāds ar polu pāru skaitu. Izšķir vienslāņa koncentriskos tinumus un šablontinumus.

Koncentriskā tinumā spoļu grupas sastāv no koncentriskām spolēm. Rievu sadalījums tinumā tāds pats kā divslāņu tinumā. Vienslāņu tinumam, kura izvērstā shēma parādīta 4.25. attēlā, ir spēkā attiecīgā divslāņu tinuma rievu EDS vektoru zvaigzne (4.21. att.).

Spoļu frontālie savienojumi koncentriskajam tinumam radiālajā virzienā jānovieto divās plaknēs. Tāpēc šādu tinumu sauc par divplakņu koncentrisko tinumu. Spolēm šādā gadījumā arī ir divējādas formas (īsās un garās spoles) (4.25. att.). Ja polu pāru skaits  $p$  ir pāra skaitlis, tad kopējais spoļu grupu skaits  $3p$  arī ir pāra skaitlis, un tinumā ir vienāds īso un garo spoļu skaits. Turpretī, ja  $p$  ir nepāra skaitlis, spoļu grupu skaits  $3p$  arī ir nepāra



4.25. att. Trīsfāžu vienslāņa koncentriskā tinuma izvērstā shēma ( $Z = 24, 2p = 4, q = 2$ ).



4.26. att. Trīsfāžu vienslāņa koncentriskā tinuma frontālo savienojumu konstruktīvais izvietojums ( $Z = 24, 2p = 4, q = 2$ ).

skaitlis, un vienā spoļu grupā jāveido spolēm sarežģītāka forma – no vienas puses, tāda kā īsai, bet, no otras puses, tāda kā garai spolei.

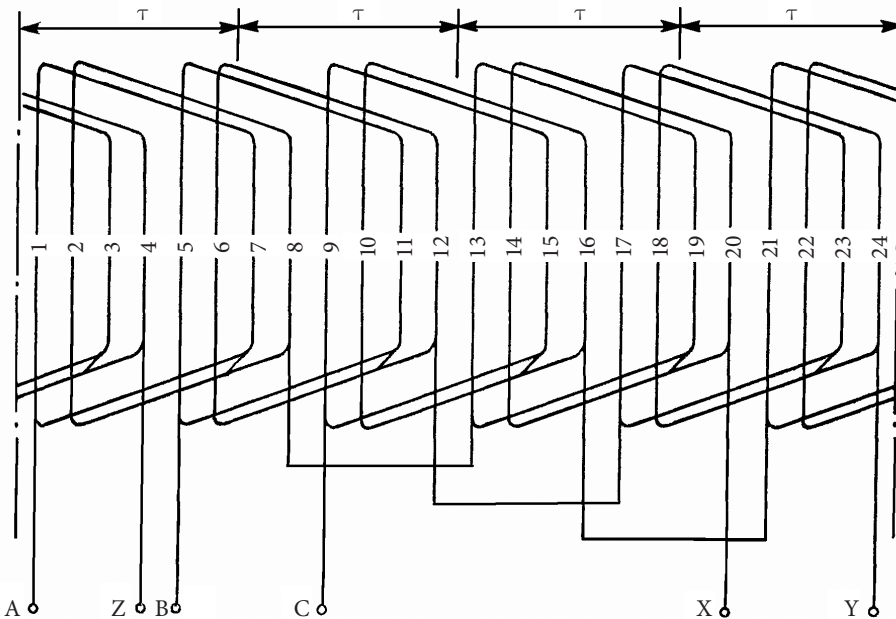
Koncentriskajos tinumos var izveidot  $a=p$  paralēlos zarus. Tomēr zaru aktīvās un induktīvās pretestības nedaudz atšķiras, jo spoļu garumi ir atšķirīgi un frontālie savienojumi dažādi novietoti telpā. Tāpēc paralēlie zari var būt nevienmērīgi noslogoti.

Tinuma solis spoļu grupas katrai spolei koncentriskajā tinumā ir dažāds, bet tā vidējā vērtība ir  $y_{vid} = Z/2p$ . Elektromagnētiskā ziņā šis tinums ir ekvivalents tinumam ar pilnu soli  $y = t$ ,  $b = 1$ . Tāpēc tinuma soļa saīsināšanas koeficients šajā gadījumā visām harmonikām  $k_{yn} = \pm 1$  un EDS augstākās harmonikas samazinātas netiek. Tas ir viens no koncentrisko tinumu trūkumiem. Jāatzīmē, ka elektromagnētiskā ziņā jebkurš vienslāņa tinums ir ekvivalents tinumam ar pilnu soli, ja fāžu zonas katrā fāzē ir nobīdītas par pola iedaļu  $\tau$  un tās ir nepārtrauktas, t. i., vienas fāzes  $q$  spoļu malas atrodas  $q$  blakus rievās.

Tā kā atsevišķo spoļu izmēri un forma koncentriskajā tinumā ir dažādi, šāda tinuma izgatavošana ir sarežģītāka nekā divslāņu tinuma izgatavošana. Turklāt koncentriskā tinuma frontālie savienojumi ir samērā gari, tāpēc palielinās vara patēriņš un elektriskie zudumi tinumā. Tomēr vienslāņa tinumā ir divas reizes mazāk spoļu nekā divslāņu tinumā. Šis apstāklis ļauj sasniegt zināmu ekonomiju, izgatavojot mazas jaudas mašīnu tinumus.

Koncentriskos tinumus var izveidot arī kā daļskaitļa tinumus.

Šablontinumā spolēm ir vienādi izmēri un forma. Tās uztin uz viena un tā paša šablona, kas arī noteicis šo tinumu nosaukumus. Lai atvieglotu spoļu novietošanu rievās, tās izveido trapeces formā.



4.27. att. Vienkāršā šablontinuma izvērsta shēma ( $Z = 24$ ,  $2p = 4$ ,  $q = 2$ ).

Pazīstami vairāki šablontinumu tipi:

- 1) vienkāršais šablontinums;
- 2) izvērstu grupu šablontinums;
- 3) ķēdes šablontinums.

Vienkāršā šablontinuma izvērstā shēma parādīta 4.27. attēlā.

Šajā tinumā visu spoļu frontālie savienojumi tiek noliekti uz vienu pusi. Tinuma solis netiek saīsināts.

Izvērstu grupu šablontinumā spoļu grupa, izejot no rievām, tiek dalīta divās daļās, un frontālie savienojumi tiek noliekti uz dažādām pusēm. Šajā gadījumā rievu skaitam  $q$  uz polu un fāzi jābūt veselam skaitlim. Elektromagnētiskā ziņā šis tinums atbilst tinumam ar pilnu soli.

Ķēdes šablontinums atšķiras no izvērstu grupu šablontinuma ar to, ka ķēdes tinumā frontālie savienojumi uz dažādām pusēm tiek noliekti katram blakus esošo spoļu pārim. Izveidojot ķēdes šablontinumu,  $q$  var būt gan pāra, gan nepāra skaitlis, bet tinuma solim  $y$  jābūt nepāra skaitlim. Tinuma solis ir vienāds ar pola iedaļu tikai tad, ja  $q$  ir nepāra skaitlis. Vispārīgā gadījumā ķēdes tinumu var izpildīt ar dažādiem soļiem, tomēr spriest pēc spoļu platuma par to, vai tinums ir ekvivalents tinumam ar pilnu soli, nevar. Lai šajā ziņā nerastos pārpratumi, nosakot tinumu koeficientus, var rīkoties šādi.

Ja tinumā izveidotas nepārtrauktas fāžu zonas, solis nav saīsināts ( $\beta = 1$ ) un tinuma soļa saīsināšanas koeficienti:  $k_y = 1$ ;  $k_{yn} = \pm 1$ . Tinuma sadalījuma koeficientu  $k_{pv}$  var aprēķināt no izteiksmēm (4.16.) vai (4.18.), bet  $q$  – no (4.11.).

Gadījumā, ja vienas fāzes  $q$  spoļu malas neatrodas  $q$  blakus rievās, tinuma soli  $y$  var pieņemt vienādu ar patieso spoles soli. Izejot no šīs  $y$  vērtības, vispirms aprēķina relatīvo soli  $\beta = y/\tau$  un tad no formulām (4.6.) un (4.24.) nosaka tinuma saīsinājuma koeficientus  $k_{yv}$ , bet no (4.16.) vai (4.18.) – tinuma sadalījuma koeficientus  $k_{pv}$ . Jāatzīmē, ka aprēķinot  $k_{pv}$ , ja  $q$  ir nepāra skaitlis, formulās (4.16.) un (4.18.) ievieto  $q$  patieso vērtību, bet ja  $q$  ir pāra skaitlis, šajās formulās  $q$  vietā ievieto  $q/2$ . Šo piebildi var paskaidrot šādi. Ķēdes šablontinumu var stādīt priekšā kā iegūtu no divslāņu tinuma, iznesot tajā spoļu malas no apakšējā slāņa papildrievās, kuras izveidotas starp īstajām rievām. Tāpēc ķēdes tinums ar saīsinātu soli ir analogs divslāņu tinumam ar divas reizes mazāku skaitli  $q$ . Tādējādi ķēdes tinumam, ja parametrs  $q$  ir nepāra skaitlis, piemīt daļskaitļa tinuma īpašības ar parametru  $d = 2$ . Tanī pat laikā, ja  $d = 2$ , ekvivalents rievu  $q_e$  skaits uz polu un fāzi  $q_e = 2q$ . Tāpēc ķēdes šablontinumam ar saīsinātu soli un nepāra skaitli  $q$ , nosakot tinuma sadalījuma koeficientus, formulās (4.16.) un (4.18.) jālieto patiesā  $q$  vērtība.

Visus šablontinumus var izveidot ar paralēlo zaru skaitu  $a = q$ , bet ķēdes šablontinumu, ja  $q$  ir pāra skaitlis, ar  $a = 2p$ .

Šablontinumi ir populāri nelielas jaudas asinhronajās mašīnās, kad spoles uztin no apaļiem vadiem. Šādas spoles ir viegli deformējamas, tāpēc, ievietojot tinumu rievās, ir viegli izveidot nepieciešamo frontālo savienojumu formu.

#### 4.4.5. Daži tinumi ar fāžu skaitu $m \neq 3$

Kā jau tika atzīmēts 4.4.2. apakšnodaļā, vienfāzes tinumu izveido ar zonu  $\alpha = 120^\circ$ , t. i., aizpildot  $2/3$  rievu. Tādu tinumu var iegūt, ja trīsfāžu tinumā ar zonu  $\alpha = 60^\circ$  likvidē vienu fāzi, bet atlikušo divu fāžu beigas saslēdz kopā. Piemēram, 4.20. attēlā parādītajā shēmā galus X un Z savieno savā starpā, bet fāzi B likvidē. Tādā pašā veidā vienfāzes tinumu var iegūt no trīsfāžu vienslāņa tinuma.

Vienfāzes tinumam ar zonu  $\alpha = 120^\circ$  ir tā priekšrocība, ka augstākajām harmonikām ar kārtas numuru  $\nu = 3, 9, 15 \dots$  tinuma sadalījuma koeficients  $k_{p\nu} = 0$ .

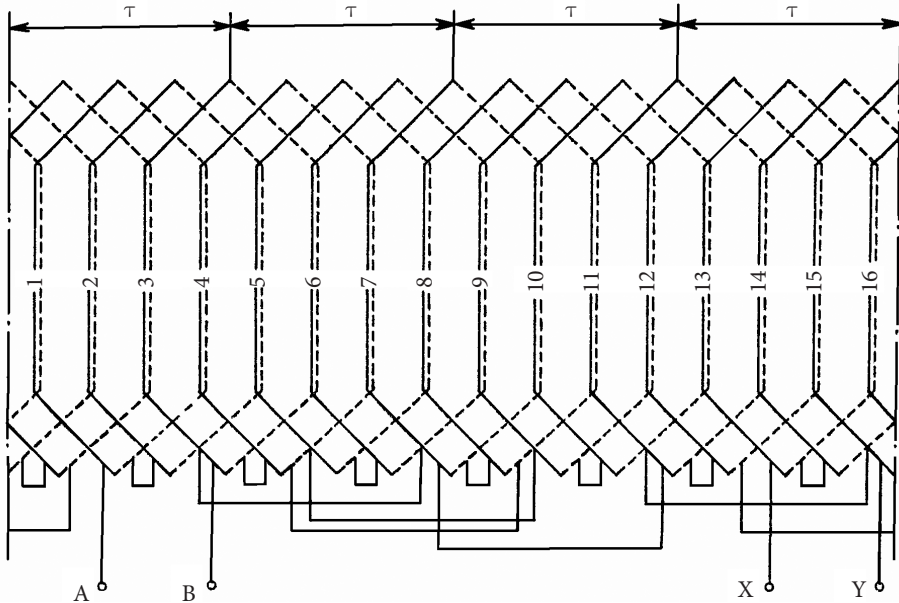
Veidojot vienfāzes divslāņu tinumu ar saīsinātu soli, atsevišķās rievās būs tikai viena spoles mala. Šīs rievas jāaizpilda ar ķīļiem.

Divfāžu tinumus ar EDS nobīdi fāzēs par  $90^\circ$  izmanto dažādās elektriskajās mikromašīnās. Divslāņu tinuma shēma ar fāžu zonu  $\alpha = 90^\circ$  parādīta 4.28. attēlā. Mikromašīnās plaši izmanto arī divfāžu vienslāņa tinumus.

Divfāžu tinumā, atšķirībā no vienfāzes tinuma ar zonu  $\alpha = 120^\circ$ , jāreķinās ar EDS, ko inducē lauka trešā harmonika. Šo harmoniku var likvidēt, ja tinuma soli saīsina par  $1/3\tau$ , bet tādā gadījumā EDS harmonikas ar kārtas skaitli  $\nu = 5, 7, 11, 13 \dots$  netiek vājinātas, jo tām tinuma soļa saīsināšanas koeficienta vērtība iznāk tāda pati kā pamatharmonikai. Tāpēc šādiem tinumiem relatīvo soli izvēlas savādāk.

Vāveres rata tipa īsslēgtajā tinumā EDS un strāvas, ko blakus esošajos stieņos inducē magnētiskā lauka pamatharmonika, nobīdītas fāzē par leņķi

$$\gamma = \frac{360^\circ \cdot p}{Z}. \quad (4.48.)$$



4.28. att. Divfāžu tinuma izvērsta shēma ( $Z = 16, 2p = 4, m = 2, q = 2, y = 3$ ).

EDS un strāvu vektoru zvaigznē īsslēgtam tinumam ir  $Z/t$  stari, kur  $t$  – lielākais kopējais dalītājs skaitļiem  $Z$  un  $p$ . Tāpēc, no fizikālā viedokļa, var uzskatīt, ka šādā tinumā ir  $m = Z/t$  fāzes ar  $t$  paralēliem stieņiem katrā fāzē. Tomēr praktiskajos aprēķinos ērtāk ir pieņemt, ka katrs stienis veido atsevišķu fāzi un  $m = Z$ . Šajā gadījumā kļūdas neradīsies, ja fāžu nobīdes leņķi  $g$  aprēķina saskaņā ar (4.48.).

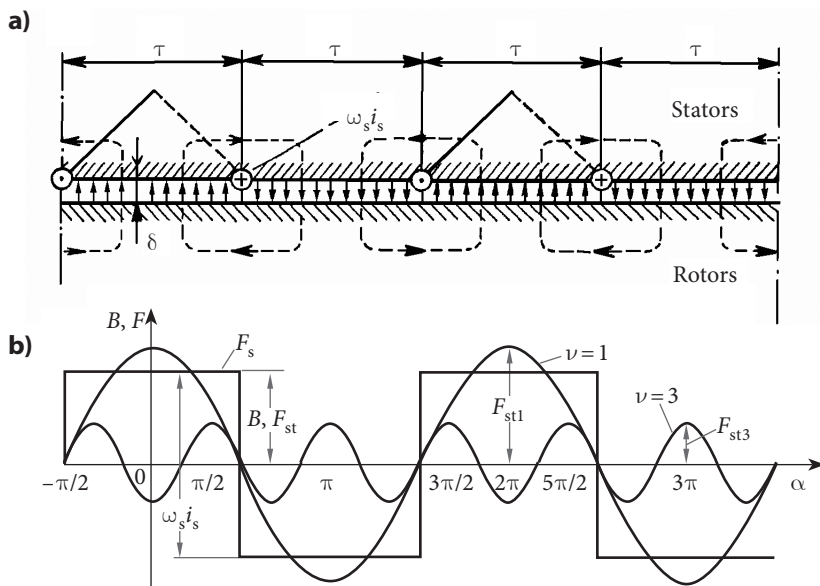
Īsslēgta vāveres rata tipa tinuma EDS aprēķināšanai var izmantot formulu (4.22.), ievietojot tajā  $W = 1/2$  (fāzē viens vads jeb pusvijums) un pieņemot  $k_w = 1$ .

## 4.5. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU TINUMU MAGNETIZĒJOŠIE SPĒKI

### 4.5.1. Spoles, spoļu grupas un fāzes MS

Magnētiskais lauks, ko rada maiņstrāvas mašīnas tinuma strāvas, ir atkarīgs no tinuma izveidojuma un tā parametriem, kā arī no magnētiskās ķēdes konfigurācijas un atsevišķu šīs ķēdes posmu magnētiskajām īpašībām. Magnētiskā lauka aprēķina pamatuzdevums ir noteikt indukcijas sadalījumu gaisa spraugā, jo no šī sadalījuma ir atkarīgs tinumā inducētais EDS un mašīnas elektromagnētiskais moments. Tāpēc vispirms noskaidrosim tinuma magnetizējošā spēka (MS) lielumu un sadalījumu, pēc tam noteiksim indukciju gaisa spraugā, kas atkarīga no gaisa spraugas platuma un mašīnas magnētiskās sistēmas piesātinājuma.

Vispirms aplūkosim vienkāršāko gadījumu. Pieņemsim, ka mašīnas gaisa sprauga ir vienmērīga un tās platums  $\delta$  ir mazs salīdzinājumā ar statora rādiusu un pola iedaļu. Tinums sastāv no spolēm ar pilnu soli ( $\gamma = \tau$ ). Tā kā statora un rotora serdes tērauda



4.29. att. Spoļu magnētiskais lauks (a) un MS (b).

magnētiskā caurlaidība  $m$  ir daudzkārt lielāka par gaisa spraugas magnētisko caurlaidību  $\mu_0$ , var uzskatīt, ka  $\mu = \infty$ . Magnētiskā lauka aina šādam gadījumam parādīta 4.29. attēlā a. Tinuma spoles nobīdītas savā starpā par  $2\tau$  un tajās plūst strāva  $i_s$ .

Pilnās strāvas likums jebkurai magnētiskajai spēka līnijai 4.29. attēlā a

$$\oint H dl = W_s i_s, \quad (4.49.)$$

kur  $W_s$  – spoles vijumu skaits.

Saskaņā ar pieņemto  $\mu = \infty$ , pilnai strāvai, kā magnētiskā lauka cēlonim, jāpārvar tikai magnētiskā pretestība gaisa spraugā, tāpēc vienādojumu (4.49.) var vienkāršot:

$$2H\delta = i_s W_s, \quad (4.50.)$$

kur  $H$  – magnētiskā lauka intensitāte gaisa spraugā.

No izteiksmes (4.50.) var iegūt magnētisko indukciju gaisa spraugā

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{W_s i_s}{2} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{st}, \quad (4.51.)$$

kur  $F_{st}$  – spoles magnetizējošais spēks

$$F_{st} = \frac{W_s i_s}{2}. \quad (4.52.)$$

Jebkura spēka līnija ir saķēdēta ar vienu un to pašu pilno strāvu  $i_s W_s$ , tāpēc spoļu radīto indukcijas sadalījumu gaisa spraugā var attēlot ar taisnstūra vilni (4.29. att. b). Saskaņā ar izteiksmi (4.51.) šis vilnis citā mērogā attēlo spoļu rindas MS sadalījumu gaisa spraugā. Tā kā saskaņā ar (4.51.) lielums  $B$  ir proporcionāls  $F_{st}$ , tad turpmāk var aplūkot magnetizējošos spēkus.

Taisnstūra vilni  $F_s$  (4.29. att. b) var sadalīt Furjē rindā. Tā kā funkcija  $F_s = f(\alpha)$  ir simetriska attiecībā pret abscisu asi, tā satur tikai nepāra harmonikas ( $\nu = 1, 3, 5 \dots$ ). Izvēlēsimies koordinātu sākumu pa spoles asi, tad likme  $F_s = f(x)$  ir simetriska attiecībā pret ordinātu asi un satur tikai kosinusa locekļus:

$$F_s = F_{st1} \cos \alpha + F_{st3} \cos 3\alpha + \dots + F_{st\nu} \cos \nu\alpha + \dots \quad (4.53.)$$

Saskaņā ar Furjē rindas teoriju  $\nu$ -tās harmonikas amplitūdu simetriskai līknei var aprēķināt šādi:

$$F_{st\nu} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_{st} \cos \nu\alpha d\alpha = \frac{4}{\nu\pi} F_{st} \sin \frac{\nu\pi}{2}. \quad (4.54.)$$

Ja spolē plūst sinusoidāla maiņstrāva

$$i_s = \sqrt{2} I_s \cos \omega t, \quad (4.55.)$$

tad saskaņā ar izteiksmēm (4.53.) un (4.54.):

$$F_{st\nu} = F_{st\nu} \cos \omega t, \quad (4.56.)$$

kur

$$F_{sv} = \frac{2\sqrt{2}}{\nu\pi} W_s I_s \sin \frac{\nu\pi}{2}. \quad (4.57.)$$

Vienādību (4.53.) tādā gadījumā var pārrakstīt šādi:

$$F_s = \sum_{\nu=1,3,5,\dots} F_{sv} \cos \omega t \cos \nu\alpha. \quad (4.58.)$$

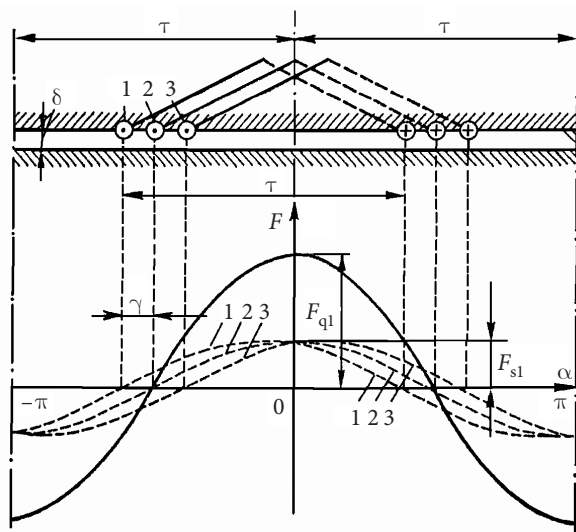
No iegūtajiem rezultātiem var secināt, ka spoļu MS sastāv no bezgalīgas rindas harmoniku, kuras sinusoidāli mainās telpā ( $\cos \nu\alpha$ ) un laikā ( $\cos \omega t$ ). Citiem vārdiem sakot, MS katra harmonika ir telpā nekustīgs sinusoidāls stāvvilnis, kura amplitūda sinusoidāli pulsē laikā, mainoties no  $+F_{sv}$  līdz  $-F_{sv}$ . 4.29. attēlā b parādītas MS harmonikas ar kārtas numuriem  $\nu = 1$  un  $\nu = 3$ . Katra MS harmonika saskaņā ar izteiksmi (4.51.) rada attiecīgo magnētiskā lauka harmoniku. Taisnstūrveida MS un magnētiskā lauka viļņi tāpat pulsē laikā no vērtības  $+F_{sm}$  līdz  $-F_{sm}$  saskaņā ar izteiksmēm (4.52.) un (4.55.)

$$F_{sm} = \frac{\sqrt{2}}{2} W_s I_s. \quad (4.59.)$$

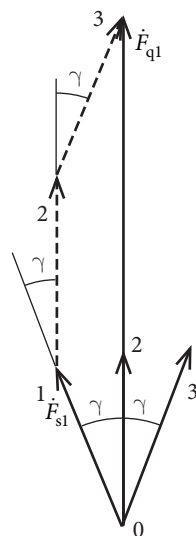
Apskatīsim spoļu grupas MS. 4.30. attēlā parādīta spoļu grupa, kas sastāv no  $q=3$  spolēm ar pilnu soli. Spoles nobīdītas savā starpā par leņķi

$$\gamma = \frac{360^\circ \cdot p}{Z} = \frac{180^\circ}{mq}. \quad (4.60.)$$

Šajā attēlā parādītas arī spoļu MS pamatharmonikas (liknes 1, 2, 3) laika momentam, kad  $\cos \omega t = 1$ . Tā kā liknes 1, 2, 3 ir sinusoidālas, tās var attēlot ar  $q$  vektoriem, kuri telpā nobīdīti par leņķi  $\gamma$  (4.30. att.). Sinusoidālo līkņu 1, 2, 3 summa, kas 4.30. attēlā parādīta ar nepārtrauktu līniju, arī ir sinusoida, kas attēlo spoļu grupas MS pamatharmoniku. Tās amplitūdas vērtība ir vienāda ar vektoru 1, 2, 3 summu.



4.30. att. Spoļu grupas MS.



4.31. att. Spoļu grupas MS noteikšana.



Vektoru summēšana 4.31. attēlā notiek tieši tāpat kā EDS vektoru summēšana spoļu grupā (sk. 4.15. att.). Arī leņķi  $\gamma$  abos gadījumos ir vienādi. Tāpēc

$$F_{q1} = q F_{s1} k_{p1}, \quad (4.61.)$$

kur  $k_{p1}$  – tinuma sadalījuma koeficients pamatharmonikai. To nosaka no formulām (4.16.) un (4.18.).

Spoļu MS augstākās harmonikas atsevišķām spolēm un arī spoļu grupai nobīdītas par leņķi, kas  $n$  reizes lielāks nekā pamatharmonikai, t. i.,  $n\gamma$ . Summējot augstāko harmoniku MS, līdzīgi kā 4.30. un 4.31. attēlā, iegūstam spoļu grupas  $n$ -tās harmonikas amplitūdu

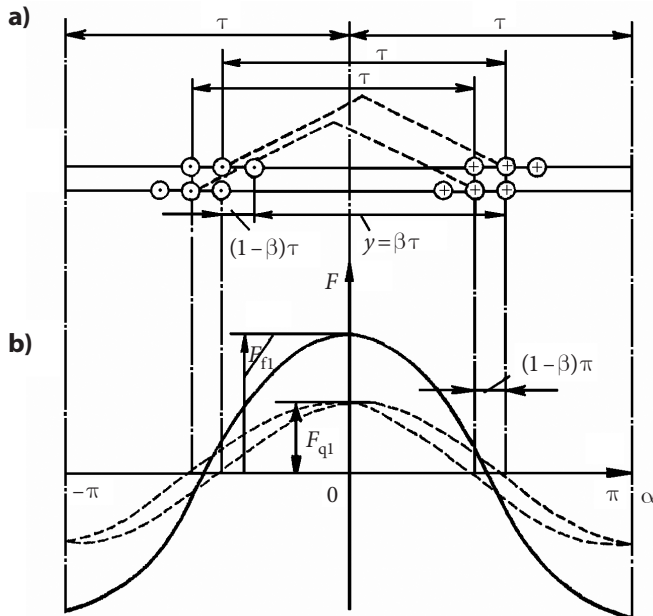
$$F_{gv} = q F_{sv} k_{pv}, \quad (4.62.)$$

kur  $k_{pv}$  – tinuma sadalījuma koeficientu nosaka formulas (4.25.) un (4.26.).

Spoļu grupai arī ir spēkā izteiksme (4.58.), ja koordinātu sākums sakrīt ar spoļu grupas asi, kā tas ir 4.30. attēlā. Šajā gadījumā lielums  $F_{sv}$  izteiksmē (4.58.) jānomaina ar  $F_{qv}$ .

Jebkuru divslāņu tinumu ar saīsinātu soli  $y = \beta\tau$  var stādīt priekšā kā sastāvošu no diviem tinumiem ar pilnu soli, kuri nobīdīti savā starpā par leņķi  $(1 - \beta)\tau$  (4.32. att.). Tiešām, 4.32. attēlā a parādītās spoļu grupas ar pilnu soli  $y = \tau$  var savienot savā starpā tā, lai izveidotos divslāņu tinums ar saīsinātu soli  $y = \beta\tau$  un strāvu virzieni spoļu malās nemainītos. Acīmredzot arī tinuma EDS un MS šādā gadījumā nemainīsies.

Ar pārtrauktām līnijām 4.32. attēlā b parādītas MS pamatharmonikas tinuma augšējam un apakšējam slānim. Šajā pašā attēlā parādīta arī abu slāņu rezultējošā MS pamatharmonika.



4.32. att. MS noteikšana tinumam ar saīsinātu soli: a – spoļu grupas; b – MS pamatharmonikas.

MS augstāko harmoniku vektori būs nobīdīti savā starpā nevis par leņķi  $(1-\beta)\pi$ , kā pamatharmonikai, bet par leņķi  $\nu(1-\beta)\pi$ . Tāpēc fāzes MS  $\nu$ -tās harmonikas amplitūdu var aprēķināt pēc formulas:

$$F_{f\nu} = 2F_{q\nu} \cos \nu(1-\beta)\frac{\pi}{2}.$$

Ievietojot šajā formulā  $F_{q\nu}$  no izteiksmēm (4.62.) un (4.57.), pēc pārveidojumiem iegūstam:

$$F_{f\nu} = \frac{2\sqrt{2}}{\nu\pi} 2qW_s k_{y\nu} k_{p\nu} I_s, \quad (4.63.)$$

kur  $k_{y\nu}$  – tinuma soļa saīsinājuma koeficients  $\nu$ -tai harmonikai. To nosaka tāpat kā iepriekš, no formulas (4.24.).

Divslāņu tinumā vienā fāzē virknē savienoto vijumu skaits

$$W = \frac{2pqW_s}{a} \quad (4.64.)$$

un strāva spolē

$$I_s = \frac{I}{a}, \quad (4.65.)$$

kur  $a$  – paralēlo zaru skaits tinumā;

$I$  – strāva fāzes tinumā.

Ievietojot izteiksmē (4.63.)  $W_s$  un  $I_s$  vērtības no (4.64.) un (4.65.), iegūstam praktiskos aprēķinos izmantojamo formulu MS  $\nu$ -tās harmonikas amplitūdas noteikšanai tinuma fāzē:

$$F_{f\nu} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_{w\nu}}{\nu p} I = 0,9 \frac{W k_{w\nu}}{\nu p} I, \quad (4.66.)$$

kur  $k_{w\nu} = k_{p\nu} k_{y\nu}$  – tinuma koeficients  $\nu$ -tai harmonikai.

Izteiksme (4.66.) ir spēkā arī vienslāņa tinumam, ja attiecīgi ir aprēķināta tinuma koeficienta  $k_{w\nu}$  vērtība (sk. 4.4.4. apakšnodaļu).

Fāzes tinumam kopumā ir spēkā izteiksme:

$$F_{ft} = \sum_{\nu=1,3,5,\dots} F_{f\nu} \cos \omega t \cos \nu\alpha. \quad (4.67.)$$

Saskaņā ar vienādību (4.67.) arī fāzes MS sastāv no bezgalīgas rindas harmoniku, kuras sinusoidāli mainās telpā un laikā.

Kā tiks parādīts nākamajās nodaļās, MS augstākās harmonikas maiņstrāvas mašīnās izraisa virkni nevēlamu parādību (papildu momenti un zudumi, tinumu induktīvo pretestību palielināšanās u. c.). Tāpēc lietderīgi samazināt augstākās harmonikas.

No formulas (4.66.) redzams, ka MS amplitūda ir apgriezti proporcionāla harmonikas kārtas numuram un ir atkarīga no tinuma koeficienta  $k_{w\nu}$ . Tā kā koeficientus  $k_{y\nu}$  un  $k_{p\nu}$  aprēķina no tām pašām formulām, kā nosakot tinuma EDS, tad pasākumi, ko lieto EDS augstāko harmoniku samazināšanai (tinuma soļa saīsināšana, tinuma izveidošana ar  $q > 1$ ), vienlaikus kalpo arī MS augstāko harmoniku samazināšanai.

Jāatzīmē, ka, lietojot slīpas rievās, MS harmoniku amplitūdas nemainās, jo MS vienmēr orientēti rievu virzienā.

MS zobu harmonikām, kuru kārtas numurus nosaka izteiksme

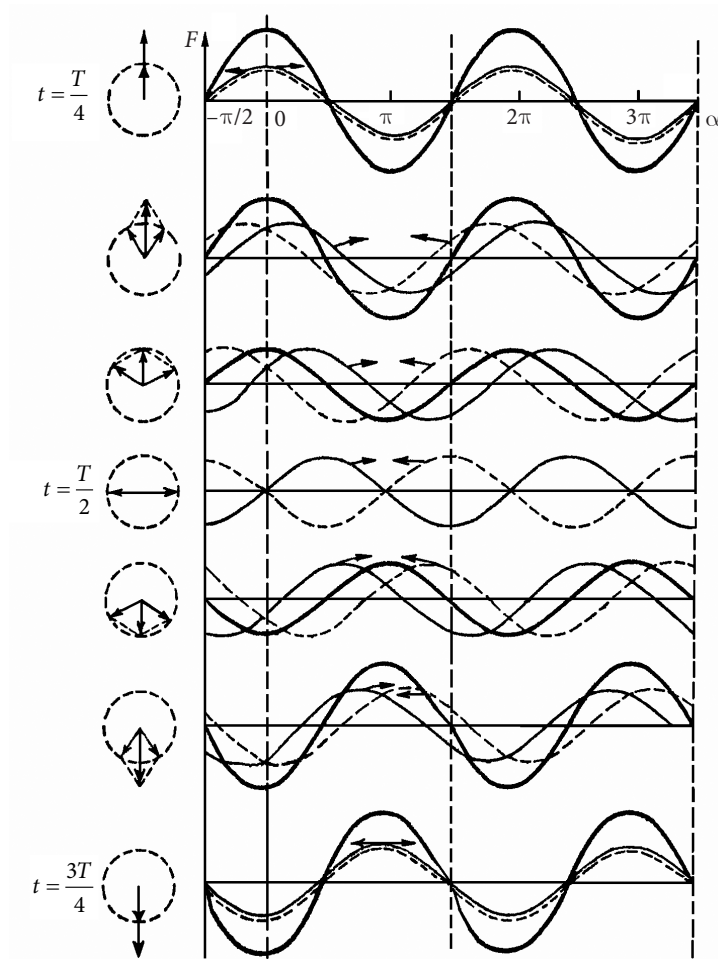
$$\nu_z = mqk \pm 1, \quad (4.68.)$$

tinuma koeficients  $k_{y\nu} \cdot k_{p\nu} = \pm k_{y1} \cdot k_{p1}$ . Tāpēc no visām augstākajām harmonikām šis izpaužas visvairāk. Piemēram, ja  $q=2$ , tādas harmonikas ir ar kārtas numuriem  $\nu = \nu_z = 11, 13, 23, 25$ . Ja  $q=1$ , visām augstākajām harmonikām piemīt zobu harmoniku īpašības. Šo harmoniku samazināšanu var panākt, palielinot parametru  $q$ . Tādā gadījumā zobu harmoniku kārtā  $\nu_z$  palielinās, bet amplitūda samazinās.

Izmantojot zināmo trigonometrisko formulu, izteiksmi (4.67.) var pārveidot:

$$F_{fv} \cos \omega t \cos \nu \alpha = \frac{1}{2} F_{fv} \cos(\omega t - \nu \alpha) + \frac{1}{2} F_{fv} \cos(\omega t + \nu \alpha). \quad (4.69.)$$

No iegūtās izteiksmes izriet, ka pulsējošu sinusoidālu stāvvilni var sadalīt divos savstarpēji pretējos virzienos rotējošos sinusoidālos viļņos, kuru amplitūdas ir vienādas ar pusi



4.33. att. Pulsējošā MS sadalīšana divos rotējošos.

no pulsējošā viļņa amplitūdas. Iedomāsimies, ka novērojam uz abiem viļņiem kādus punktus, kuriem MS vērtības ir nemainīgas. Tad šiem punktiem:

$$\cos(\omega t - \nu\alpha) = \text{const} \quad \text{un} \quad \cos(\omega t + \nu\alpha) = \text{const}.$$

Tādējādi

$$\omega t - \nu\alpha = \text{const} \quad \text{un} \quad \omega t + \nu\alpha = \text{const}.$$

Diferencējot šos vienādojumus pēc  $t$  un ievērojot, ka  $\omega = 2\pi f$ , iegūstam:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\omega}{\nu} \quad \text{un} \quad \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\omega}{\nu}. \quad (4.70.)$$

Iegūtie atvasinājumi izteiksmēs (4.70.) ir šo viļņu leņķiskos ātrumus, kas izteikti elektriskajos radiānos sekundē. Saskaņā ar izteiksmēm (4.70.) pirmais loceklis vienādojumā (4.69.) ir tiešais vilnis ( $d\alpha/dt > 0$ ), bet otrs – pretējais vilnis ( $d\alpha/dt < 0$ ). Harmoniku rotācijas leņķiskie ātrumi ir apgriezti proporcionāli to kārtas skaitlim  $n$ . Pamatharmonika rotē ar elektrisko leņķisko ātrumu

$$\Omega_1 = \omega = 2\pi f_1, \quad (4.71.)$$

kas saskaņā ar formulu (4.1.) atbilst rotācijas frekvencei  $n_1$ . Tiešām, lauka rotācijas ātrums, ja leņķi mēra mehāniskajās vienībās, ir:

$$\Omega_{\text{meh}} = 2\pi n_1 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad (4.72.)$$

bet elektriskajās leņķa vienībās:

$$\Omega_1 = p\Omega_{\text{meh}} = 2\pi f_1. \quad (4.73.)$$

Telpā nekustīga pulsējoša viļņa sadalīšanu divos rotējošos var ilustrēt ar 4.33. attēlu, kurā ar vektoriem un funkcionāli parādīti divi viļņi, kas rotē pretējos virzienos ar vienādiem ātrumiem, kā arī to summa (nepārtraukta, trekna līnija). Kā redzams no šī attēla, divi pretējos virzienos rotējoši viļņi veido vienu pulsējošu vilni ar divkārtu amplitūdu, un otrādi – vienu pulsējošu vilni var sadalīt divos rotējošos viļņos ar divreiz mazāku amplitūdu.

Acīmredzot visus šajā apakšnodaļā iegūtos rezultātus un secinājumus var attiecināt uz vienfāzes tinumu.

#### 4.5.2. Daudzfāžu tinumums

Aplūkosim vispirms trīsfāžu vesela skaitļa tinumu, kura fāzēs plūst simetriskas sinusoidālas strāvas:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2}I \cos \omega t; \\ i_b &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - 2\frac{\pi}{3}); \\ i_c &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - 4\frac{\pi}{3}). \end{aligned} \right\} \quad (4.74.)$$

MS harmoniku noteikšanai atsevišķās fāzēs ir spēkā vienādojums (4.69.), ja fāzēm B un C šajā vienādojumā attiecīgi  $\omega t$  aizvieto ar  $\omega t - 2\pi/3$  un  $\omega t - 4\pi/3$ .

Pieņemsim, ka koordinātu sākuma punkts  $\alpha = 0$  sakrīt ar fāzes A asi. Tad fāzēm B un C izteiksmē (4.69.)  $\alpha$  vietā attiecīgi jāievieto  $\alpha - 2\pi/3$  un  $\alpha - 4\pi/3$ . Tad rotējošo viļņu  $\nu$ -tās harmonikas atsevišķās fāzēs nosaka izteiksmes:

$$\left. \begin{aligned} F_{av} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos(\omega t - \nu\alpha) + \frac{1}{2} F_{fv} \cos(\omega t + \nu\alpha); \\ F_{bv} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \nu\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right] + \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \nu\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right]; \\ F_{cv} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - \nu\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)\right] + \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \nu\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right]. \end{aligned} \right\} \quad (4.75.)$$

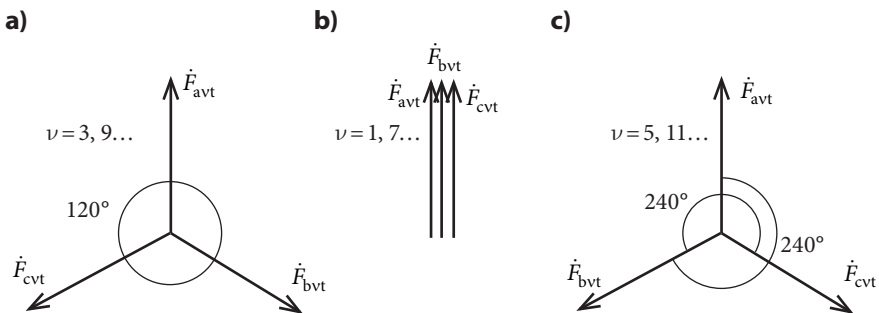
Vispirms saskaitīsim MS tiešo viļņu harmonikas visās fāzēs. Izteiksmi (4.75.) tiešo viļņu aprēķināšanai var pārveidot:

$$\left. \begin{aligned} F_{avt} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \nu\alpha\right) + 0\left(\nu - 1\right)\frac{2\pi}{3}\right]; \\ F_{bvt} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \nu\alpha\right) + 1\left(\nu - 1\right)\frac{2\pi}{3}\right]; \\ F_{cvt} &= \frac{1}{2} F_{fv} \cos\left[\left(\omega t - \nu\alpha\right) + 2\left(\nu - 1\right)\frac{2\pi}{3}\right]. \end{aligned} \right\} \quad (4.76.)$$

No vienādojumiem (4.76.) var secināt, ka MS tiešo viļņu harmonikas atsevišķās fāzēs nobīdītas par leņķi  $(\nu - 1)2\pi/3$ . Noteiksim to summu.

Visas nepāra harmonikas  $\nu = 1, 3, 5, \dots$  var sadalīt trīs grupās:

$$\left. \begin{aligned} 1) \nu &= mk = 3k \quad (k = 1, 3, 5, \dots; \nu = 3, 9, 15, \dots); \\ 2) \nu &= 2mk + 1 = 6k + 1 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots; \nu = 1, 7, 13, 19, \dots); \\ 3) \nu &= 2mk - 1 = 6k - 1 \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots; \nu = 5, 11, 17, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (4.77.)$$



4.34. att. MS tiešo viļņu saskaitīšana: pirmās grupas (a), otrās grupas (b) un trešās grupas (c) harmonikām saskaņā ar izteiksmi (4.77.).

Nobīdes leņķis MS harmonikām starp fāzēm pirmajā grupā sastāda:

$$(\nu - 1) \frac{2\pi}{3} = (3k - 1) \frac{2\pi}{3} = 2\pi k - \frac{2\pi}{3} \quad (4.78.)$$

vai  $120^\circ$  (4.34. att. a). Sinusoidāli viļņi vai MS vektori trijās fāzēs nobīdīti savā starpā par  $120^\circ$ , tāpēc to summa ir vienāda ar nulli. Tādējādi trīsfāžu tinumā MS tiešo viļņu harmonikas, kuru kārtas numuri  $n$  dalās ar trīs, nepastāv.

Otrās grupas harmonikām saskaņā ar (4.77.) nobīdes leņķis ir:

$$(\nu - 1) \frac{2\pi}{3} = (6k + 1 - 1) \frac{2\pi}{3} = 4\pi k = 0^\circ.$$

Tāpēc šīs harmonikas summējas aritmētiski, t. i., trīskāršojas (4.34. att. b).

Trešās grupas harmonikām nobīdes leņķis sastāda:

$$(\nu - 1) \frac{2\pi}{3} = (6k - 1) \frac{2\pi}{3} = 4\pi k - \frac{4\pi}{3} = 240^\circ$$

un to summa arī vienāda ar nulli.

Līdzīgi var pārlicināties, ka no MS pretējiem viļņiem, kurus izsaka otrie locekļi vienādojumos (4.75.), pirmo divu grupu vektori saskaņā ar (4.77.) summējoties vienādi ar nulli, bet sakrīt fāzē, un aritmētiski summējas trešās grupas vektori. Tādējādi trīsfāžu tinuma MS simetriskas slodzes gadījumā nesatur harmonikas, kuru kārtas numuri dalās ar trīs, bet satur harmoniku tiešos viļņus ar kārtas numuriem  $\nu = 6k + 1 = 1, 7, 13, 19, \dots$  un pretējos viļņus ar kārtas numuriem  $\nu = 6k - 1 = 5, 11, 17, \dots$ . Pamatharmonika ( $\nu = 1$ ) veido tiešo vilni.

MS harmoniku rotācijas ātrums ir apgriezti proporcionāls skaitlim  $n$ , bet to amplitūdas trīsfāžu tinumam saskaņā ar izteiksmēm (4.66.) un (4.76.)

$$F_\nu = \frac{3}{2} F_{\nu f} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_{w\nu}}{\nu p} I = 1,35 \frac{Wk_{w\nu}}{\nu p} I. \quad (4.79.)$$

Vispārīgā gadījumā  $m$ -fāžu simetrisks tinums simetriskas slodzes gadījumā rada MS rotējošas harmonikas, kuru amplitūda uz vienu polu ir:

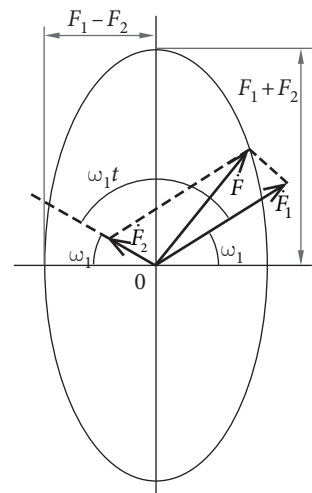
$$F_\nu = \frac{m}{2} F_{\nu f} = \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_{w\nu}}{\nu p} I. \quad (4.80.)$$

Tādējādi simetriskas slodzes gadījumā trīsfāžu tinuma MS

$$F_t = \sum_{\nu=6k\pm 1} F_\nu \cos(\omega t \mp \nu\alpha), \quad (4.81.)$$

kur augšējās zīmes attiecas uz tiešajām harmonikām, bet apakšējās – uz pretējām harmonikām. Vienādojums (4.81.) ir spēkā arī citiem daudzfāžu tinumiem, tomēr harmoniku sastāvs ir cits.

Trīsfāžu tinuma MS nesimetriskas slodzes gadījumā analizē, izmantojot simetrisko komponentu metodi, saskaņā ar kuru nesimetrisku fāžu strāvu sistēmu aizstāj ar



4.35. att. Eliptisks rotējošais lauks.

trīs simetriskām: tiešās, pretējās secības un nullsecības sistēmu. Acīm redzams, ka viss iepriekš teiktais ir spēkā attiecībā pret tiešās secības strāvām  $I_1$ .

Pretējās secības strāvas  $I_2$  arī nobīdītas par leņķi  $120^\circ$ , bet to fāžu secība ir pretēja. Šīs strāvas rada tādas pašas MS kā tiešās secības strāvas, tikai, atšķirībā no pirmajiem, to rotācijas virziens ir pretējs.

Vienlaicīgas strāvu  $I_1$  un  $I_2$  darbības laikā rodas tiešās ( $F_1$ ) un pretējās ( $F_2$ ) secības MS, kuru pamatharmoniku vektori telpā rotē pretējos virzienos (4.35. att.). Rezultējošā MS  $F$  vektora galapunkts šajā gadījumā apraksta elipsi. Tāpēc šāda MS radīto lauku sauc par eliptisku lauku. Tas nozīmē, ka trīsfāžu tinums ar nesimetrisku slodzi arī rada rotējošu MS, tikai šī MS amplitūda periodiski mainās no vērtības  $F_1 + F_2$  līdz vērtībai  $F_1 - F_2$ .

Gadījumā, ja tinumā eksistē tikai vienas secības strāvas, rodas riņķveida rotējošais lauks.

Apskatot MS, ko trīsfāžu tinumā rada nullsecības strāvas, var secināt, ka harmonikas, kuru kārtas numuri dalās ar 3, summējas aritmētiski. Harmonikām ar kārtas numuriem  $\nu = 6k \pm 1$  nobīdes leņķis sastāda  $\pm 120^\circ$ , tāpēc to summa vienāda ar nulli.

Jāatzīmē, ka maiņstrāvas mašīnās nesimetriskas slodzes gadījumā nullsecības strāvas spēlē nelielu lomu. Tas izskaidrojams ar to, ka asinhronajās mašīnās tinumi slēgti zvaigznē ar izolētu nullpunktu vai trīsstūrī. Sinhronajos ģeneratoros tinumi parasti slēgti zvaigznē, turklāt mazjaudas mašīnās nullpunkts ir izolēts, bet lieljaudas mašīnās iezemēts caur lielu pretestību.

Aplūkosim divfāžu tinuma MS, ko rada simetriska slodze:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I \cos \omega t; \\ i_b &= \sqrt{2} I \cos(\omega t - 90^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (4.82.)$$

Divfāžu tinuma MS var analizēt līdzīgi kā trīsfāžu tinumam, ņemot vērā, ka tinumi šajā gadījumā nobīdīti telpā par  $90^\circ$ .

Analīzes rezultātā var izdarīt šādus secinājumus:

1. Divfāžu tinuma MS liknē ir visas nepāra harmonikas, no kurām harmonikas ar kārtas numuriem  $\nu = 1, 5, 9, 13, \dots$  veido tiešos viļņus, bet harmonikas ar kārtas numuriem  $\nu = 3, 7, 11, \dots$  veido pretējos viļņus.
2. MS harmoniku amplitūdas var aprēķināt no formulas (4.66.) vai no izteiksmes (4.80.), ja  $m = 2$ .

Tādējādi rotējoša MS amplitūda divfāžu tinumam ir vienāda ar pulsējoša MS amplitūdu vienai fāzei. Šis rezultāts atspoguļo faktu, ka divi vektori  $\vec{F}_a$  un  $\vec{F}_b$ , kas nobīdīti telpā par  $90^\circ$ , pulsē laikā ar fāžu nobīdi  $90^\circ$  un summā veido rotējošu vektoru  $\vec{F}_m$  ar tādu pašu amplitūdu (4.36. att.).

Ja strāvas divfāžu tinuma fāzēs ir dažādas ( $I_a \neq I_b$ ) vai arī ja fāžu nobīde starp tām nav vienāda ar  $90^\circ$ , tad rodas eliptisks lauks, tāpat kā trīsfāžu nesimetriskas slodzes gadījumā.

Atsevišķos gadījumos, kad, piemēram, ģeneratori darbojas kopā ar taisngriežiem vai dzinēji tiek baroti no pusvadītāju pārveidotājiem, strāvas tinumos nav sinusoidālas. Tādos gadījumos strāvu var sadalīt pamatharmonikā un augstākajās harmonikās un

analizēt katras harmonikas darbību atsevišķi. Katra  $k$ -tā strāvas harmonika ar frekvenci  $f_k = kf_1$  rada virkni MS telpisko harmoniku, kas rotē  $k$  reizes ātrāk nekā pamatharmonika. Vislielākā no tām ir pamatharmonika ar polu skaitu  $2p$ . Šīs harmonikas radītais magnētiskais lauks maiņstrāvas mašīnas rotora tinumos un masīvos elementos inducē strāvas, kas izraisa papildzudumus un silšanu.

Apskatīsim īsslēgta vāveres rata tipa tinuma MS. Rotējošais magnētiskais lauks vāveres rata  $Z$  stieņos inducē strāvas, kas blakus stieņos nobīdītas fāzē par leņķi  $\gamma$  (sk. izteiksmi 4.48.). Šīs strāvas rada MS tiešos viļņus ar kārtas numuriem

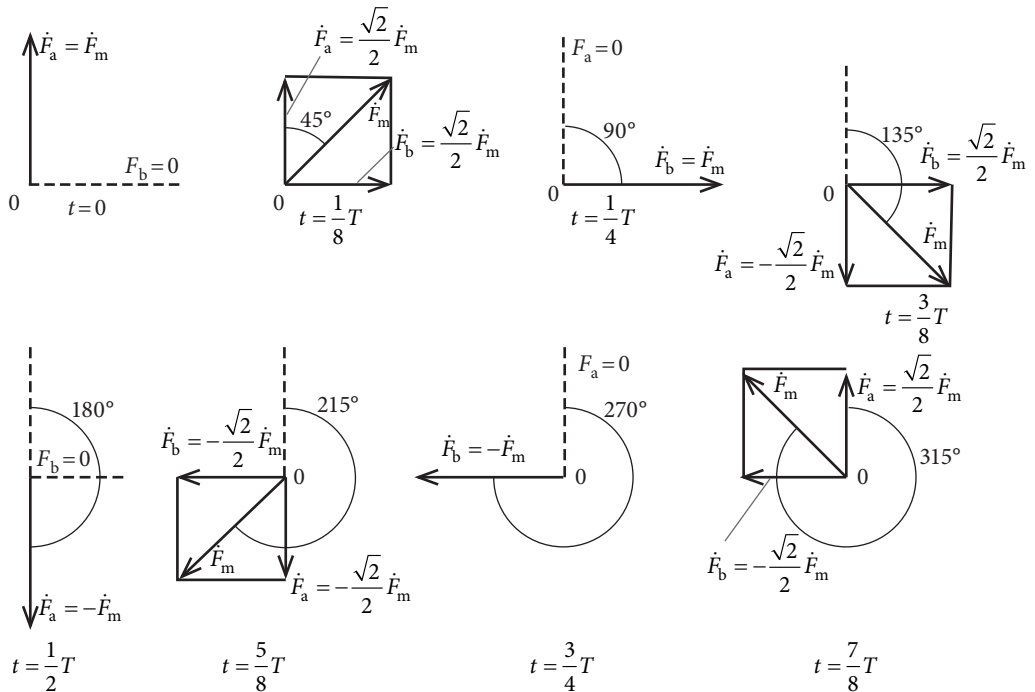
$$v = k \frac{Z}{p} + 1 \quad (k=0, 1, 2, 3 \dots) \quad (4.83.)$$

un pretējos viļņus ar kārtas numuriem

$$v = k \frac{Z}{p} - 1 \quad (k=1, 2, 3 \dots). \quad (4.84.)$$

Izteiksme (4.83.), ja  $k=0$ , nosaka MS pamatharmoniku. Piemēram, ja  $Z=18$  un  $p=2$ , iegūstam tiešos viļņus ar kārtas skaitļiem  $\nu=1, 10, 19, 28 \dots$  un pretējos viļņus ar kārtas skaitļiem  $\nu=8, 17, 26 \dots$

Izteiksmes (4.83.) un (4.84.) var paskaidrot šādi. Formulās (4.77.) skaitlis 6 pirms parametra  $k$  sakrīt ar fāžu zonu skaitu tinumā uz polu pāri. Lielums  $Z/p$  izteiksmēs (4.83.) un (4.84.) nosaka stieņu skaitu uz polu pāri. Strāvas blakus stieņos šajā gadījumā nobīdītas



4.36. att. Divfāžu tinuma riņķveida rotējošais lauks.



fāzē par tādu pašu leņķi, kā fāžu zonu strāvas daudzfāžu tinumā. Tāpēc formulās (4.83.) un (4.84.)  $2m$  vietā figurē  $Z/p$ . Jo lielāks skaitlis  $Z/p$ , jo vairāk fāžu išslēgtajā tinumā, jo mazāk zemas kārtas harmoniku, un MS likne tuvojas sinusoīdai.

Visas MS harmonikas išslēgtajā tinumā ir zobu harmonikas, jo katrs stienis veido atsevišķu fāzi, tāpēc  $q=1$ .

Ja  $Z/p$  nav vesels skaitlis, tad išslēgtā tinuma MS satur harmonikas, kuru kārtas skaitļi, arī parametrs  $\tau/\tau_\nu$ , nav vesels skaitlis.

Išslēgtā tinuma MS harmoniku amplitūdas var aprēķināt no izteiksmes (4.80.), ja tajā ievieto  $m=Z$ ,  $W=1/2$ ,  $k_w=1$  un ar strāvu  $I$  saprot strāvu vienā stienī. Šādam tinumam ir spēkā arī vienādojums (4.81.), ja koordinātes  $\alpha$  sākumu izvēlas zoba vidū. Lai iegūtu attiecīgās zīmes, tinuma koeficienti  $k_{w\nu}$  jāaprēķina šādi:

$$k_{w\nu} = \pm(-1)^k, \quad (4.85.)$$

kur augšējā zīme attiecas uz tiešajiem viļņiem, bet apakšējā zīme uz pretējiem viļņiem un  $k$  vērtības dažādiem  $\nu$  atbilst izteiksmēm (4.83.) un (4.84.).

Var atzīmēt, ka izteiksmi (4.81.) MS rotējošai pamatharmonikai var pārveidot šādā veidā:

$$F_1 \cos(\omega t \pm \alpha) = F_1 \cos \omega t \cdot \cos \alpha \pm F_1 \sin \omega t \cdot \sin \alpha. \quad (4.86.)$$

Divi locekļi vienādojuma (4.86.) labajā pusē veido nekustīgus pulsējošus laukus, kas nobīdīti telpā par  $90^\circ(\cos \alpha$  un  $\sin \alpha)$  un pulsē laikā ar fāžu nobīdi laikā par  $90^\circ(\cos \omega t$  un  $\sin \omega t)$ . Tas nozīmē, ka rotējošu lauku var aizvietot ar diviem pulsējošiem. Šādu pieeju bieži izmanto, analizējot mašīnas ar magnētisko asimetriju pa divām savstarpēji perpendikulārām asīm, piemēram, izteiktu polu sinhronajās mašīnās.

Viss iepriekš teiktais šajā apakšnodaļā attiecas uz vesela skaitļa tinumiem ( $q$  – vesels skaitlis). Daļskaitļa tinumiem ( $q$  – daļskaitlis) MS analīze ir sarežģītāka. Parasti to veic, izmantojot grafiskās metodes.

Daļskaitļa tinuma MS galvenās atšķirīgās īpatnības ir šādas. MS liknes forma zem ziemeļu un dienvidu pola nav vienāda, un tāpēc šajā liknē bez nepāra harmonikām eksistē arī pāra harmonikas. Vispārīgā gadījumā, ja  $d > 2$ , rodas harmonikas ar pola iedaļu  $\tau_\nu > \tau$ . Šo harmoniku kārtā  $\nu = \tau/\tau_\nu < 1$  un to rotācijas ātrums ir lielāks nekā pamatharmonikai (sk. izteiksmi (4.70.)). Tāpat rodas augstākās harmonikas ( $\nu > 1$ ), kuru kārtas numuri nav veseli skaitļi.

Var pierādīt, ka trīsfāžu daļskaitļa tinuma MS ar fāžu zonu  $60^\circ$  satur harmonikas ar kārtas numuriem

$$\nu = \frac{6k}{d} \pm 1, \quad (4.87.)$$

kur  $k$  – jebkurš pozitīvs vai negatīvs skaitlis (ieskaitot nulli), kas dod  $\nu > 0$ .

Plus zīme izteiksmē (4.87.) attiecas uz tiešiem, bet mīnus zīme uz pretējiem viļņiem. Pamatharmonika  $\nu = 1$ , ja  $k = 0$ , veido tiešo vilni.

Ja  $d = 1$  ( $q$  – vesels skaitlis), izteiksme (4.87.) nosaka harmoniku kārtas numurus vesela

skaitļa tinumam un sakrīt ar otro un trešo izteiksmi formulā (4.77).

Gadījumā, ja

$$k = k'q_e = k'd_q = k'd \frac{Z}{6p} \quad (k' = 1, 2, 3 \dots),$$

izteiksme (2.87.) nosaka zobu harmoniku kārtas numurus:

$$\nu_z = k' \frac{Z}{6p} \pm 1 \quad (k' = 1, 2, 3 \dots). \quad (4.88.)$$

Šī izteiksme sakrīt ar 4.4.3. apakšnodaļā iegūtajiem rezultātiem, tomēr, ja  $q$  ir daļskaitlis, arī  $\nu_z$  ir daļskaitlis. Piemēram, 4.24. attēlā parādītais tinums, saskaņā ar (4.88.), satur tiešās harmonikas  $\nu = 1, 2 + 1/2, 4, 5 + 1/5, 7, 8 + 1/2 \dots$  un pretējās harmonikas  $\nu = 1/2, 2, 3 + 1/2, 5, 6 + 1/2$ . Turklāt harmonikas ar kārtas numuriem  $\nu = 6 + 1/2, 8 + 1/2 \dots$  ir zobu harmonikas.

## 4.6. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU INDUKTĪVĀS PRETESTĪBAS

Maiņstrāvas mašīnu magnētisko lauku, ko rada tinumu MS, nosacīti var sadalīt trīs telpiskās zonās:

- 1) gaisa sprauga;
- 2) rievās;
- 3) frontālie savienojumi.

Magnētisko spēka līniju lielākā daļa, šķērsojot gaisa spraugu, noslēdzas pa statora un rotora serdēm un vienlaikus ir saķēdēta ar statora un rotora tinumiem. Neliela magnētiskās plūsmas daļa – izkliedes plūsma – noslēdzas tikai ap statora tinuma vadiem rievās un frontālo savienojumu zonā. Turklāt statora tinuma MS augstākās harmonikas rada magnētiskās plūsmas, kas noslēdzas galvenokārt gaisa spraugā un ir vāji saķēdētas ar rotora tinumu.

Īstenībā eksistē kopējais magnētiskais lauks, ko rada tinuma MS. Tomēr, izmantojot superpozīcijas metodi, minētos laukus gaisa spraugā, rievās un frontālo savienojumu zonā var apskatīt atsevišķi.

Izkliedes plūsmas un augstākās harmonikas mašīnas normālos darba režīmos ir mazas salīdzinājumā ar lauka pamatharmoniku gaisa spraugā, un mašīnas magnētiskās ķēdes piesātinājumu praktiski nosaka lauka pamatharmonika.

Maiņstrāvas mašīnu lietderīgā darbība, ar retiem izņēmumiem, balstīta uz gaisa spraugas magnētiskā lauka pamatharmoniku. Šo lauku uzskata par galveno, bet rievu un frontālo savienojumu lauku par izkliedes lauku. Pie pēdējā pieskaita arī magnētiskā lauka augstākās harmonikas gaisa spraugā. Šo lauku pieņemts saukt par gaisa spraugas izkliedes lauku jeb diferenciālās izkliedes lauku.

Tādējādi izkliedes plūsmu var sadalīt trīs daļās: rievu izkliedes plūsma, frontālo savienojumu izkliedes plūsma un diferenciālās izkliedes plūsma.

Vispirms apskatīsim magnētisko lauku gaisa spraugā maiņstrāvas mašīnai ar nepiesātinātu magnētisko ķēdi un vienmērīgu gaisa spraugu.

Ņemot vērā izteiksmes (4.51.) un (4.80.), gaisa spraugas magnētiskā lauka indukcijas  $\nu$ -tās harmonikas amplitūdu var aprēķināt:

$$B_{m\nu} = \frac{\mu_0}{\delta} F_\nu = \lambda_\delta F_\nu = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_w}{\nu p} I, \quad (4.89.)$$

kur  $\lambda_\delta$  – gaisa spraugas magnētiskās vadītspējas koeficients.

Nosakot magnētisko indukciju piesātinātai mašīnai ar nevienmērīgu gaisa spraugu (rotora un statora virsmā ir rievas), jāievēro piesātinājuma koeficients  $k_\mu$  un gaisa spraugas koeficients  $k_\delta$ . Tad izteiksmes (4.89.) vietā var rakstīt:

$$B_{m\nu} = \frac{\mu_0}{\delta k_\mu k_\delta} \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_w}{\nu p} I. \quad (4.90.)$$

Piesātinājuma koeficientu  $k_\mu$  var noteikt no mašīnas magnetizēšanas liknes, bet koeficientu  $k_\delta$  nosaka no empīriskas izteiksmes:

$$k_\delta = \frac{10\delta + t_z}{10\delta + b_r}, \quad (4.91.)$$

kur  $t_z = \pi \frac{D}{Z}$  – enkura zobu iedaļa;

$b_r$  – rievas atvēruma platums.

Lauka  $\nu$ -tās harmonikas magnētiskā plūsma  $\Phi_\nu$ , saskaņā ar izteiksmi (4.30.) ir:

$$\Phi_\nu = B_{\nu d} \tau_\nu l_\delta = \frac{2}{\pi} B_{m\nu} \frac{\tau}{\nu} l_\delta. \quad (4.92.)$$

Ievietojot indukcijas  $B_{m\nu}$  vērtību no (4.90.) formulā (4.92.), iegūstam:

$$\Phi_\nu = \frac{2\mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\mu k_\delta \delta} \frac{F_\nu}{\nu} = \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{k_\mu k_\delta \delta} \frac{m\sqrt{2}}{\pi} \frac{Wk_w}{\nu^2 p} I. \quad (4.93.)$$

Statora tinuma magnētiskā lauka rotējošās harmonikas inducē šajā tinumā pašindukcijas EDS. Tā frekvence šajā gadījumā ir vienāda ar strāvas frekvenci tinumā. Šo apstākli var izskaidrot ar to, ka  $\nu$ -tai harmonikai rotācijas ātrums ir  $\nu$  reizes mazāks, bet tai ir  $\nu$  reizes vairāk polu. Teiktais attiecas arī uz pašindukcijas EDS, ko rotora tinuma harmonikas inducē pašā rotora tinumā.

Mainstrāvas mašīnu teorijā, tāpat kā elektrotehnikā, vispār pieņemts EDS skaitlisko vērtību raksturot ar induktīvo pretestību

$$X = \frac{E}{I}. \quad (4.94.)$$

Mainstrāvas mašīnu darbību pamatā nosaka magnētisko lauku pamatharmonikas. Šīm harmonikām atbilstošās induktīvās pretestības sauc par galvenajām.

Noteiksim statora un rotora galvenās induktīvās pretestības. Statora un rotora lielumiem lietojam attiecīgi indeksus 1 un 2.

Pašindukcijas EDS  $E_1$ , ko statora tinumā inducē magnētiskās plūsmas pamatharmonika (pirmā harmonika)  $\Phi_1$ , var iegūt, ja izteiksmē (4.22.) ievieto  $\Phi$  no formulas (4.92.), pieņemot  $\nu = 1$ ,

$$E_1 = \frac{4m_1 f_1 \mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\mu k_\delta \delta} \frac{W_1^2 k_{w1}^2}{p} I_1. \quad (4.95.)$$

Tādējādi saskaņā ar izteiksmēm (4.94.) un (4.95.) statora tinuma galvenā induktīvā pretestība ir:

$$X_{1g} = \frac{4m_1 f_1 \mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\mu k_\delta \delta} \frac{W_1^2 k_w^2}{p} \quad (4.96.)$$

vai saīsinātā pierakstā:

$$X_{1g} = m_1 W_1^2 k_w^2 X_1, \quad (4.97.)$$

kur

$$X_1 = \frac{4f_1 \mu_0 \tau l_\delta}{\pi p k_\mu k_\delta \delta}. \quad (4.98.)$$

Analoģiski var iegūt izteiksmes rotora galvenās induktīvās pretestības noteikšanai:

$$X_{2g} = \frac{4m_2 f_1 \mu_0 \tau l_\delta}{\pi k_\mu k_\delta \delta} \frac{W_2^2 k_{w2}^2}{p} \quad (4.99.)$$

vai

$$X_{2g} = m_2 W_2^2 k_{w2}^2 X_1. \quad (4.100.)$$

Izteiksmes (4.99.) un (4.100.) atbilst gadījumam, kad  $f_2 = f_1$  (nobremzēts rotors). Pretējā gadījumā šajās izteiksmēs frekvences  $f_1$  vietā jālieto  $f_2$ .

Galvenās induktīvās pretestības, kas atbilst statora lauka inducētajam EDS rotora tinumā un otrādi, var noteikt no formulām:

$$X_{12g} = m_1 W_1 k_{w1} W_2 k_{w2} X_1; \quad (4.101.)$$

$$X_{21g} = m_2 W_1 k_{w1} W_2 k_{w2} X_1. \quad (4.102.)$$

Kā jebkuras induktīvās pretestības,  $X_{1g}$ ,  $X_{2g}$ ,  $X_{12g}$  un  $X_{21g}$  ir proporcionālas frekvencei un vijumu skaita kvadrātam vai vijumu reizinājumam, kā arī apgriezti proporcionālas ekvivalentās gaisa spraugas  $k_\delta \delta$  lielumam.

EDS, ko statora tinumā inducē izkliedes magnētiskā plūsma, līdzīgā veidā var raksturot ar izkliedes induktīvo pretestību  $X_\sigma$ . Izkliedes induktīvo pretestību var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$X_\sigma = 4\pi \mu_0 f_1 \frac{W_1^2}{pq} l'_\delta (\lambda_r + \lambda_{fr} + \lambda_d), \quad (4.103.)$$

kur  $\lambda_r$ ,  $\lambda_{fr}$ ,  $\lambda_d$  – rievu izkliedes, frontālo savienojumu izkliedes un diferenciālās izkliedes magnētiskās vadītspējas koeficienti;

$l'_\delta = l_{st} - 0,5 n_k b_k$  – izkliedes lauka aprēķinu garums;

$l_{st}$  – serdes pilnais garums kopā ar ventilācijas kanāliem;

$n_k, b_k$  – attiecīgi ventilācijas kanālu skaits un platums.

Tā, piemēram, tinumam, kuram rievā atrodas tikai viena spoles mala,  $\lambda_r$  nosaka šādi:

$$\lambda_r = \frac{h_1}{3b_r} + \frac{h_2}{b_r}, \quad (4.104.)$$

kur  $h_1$  – rievas augstums daļā, ko aizņem spole;

$h_2$  – rievas augstums augšējā daļā, ko neaizņem spole;

$b_r$  – rievas platumš.

Divslāņu tinumam ar saīsinātu soli koeficientu  $\lambda_r$  var noteikt pēc formulas:

$$\lambda_r = \left( \frac{h_1}{3b_r} + \frac{h_2}{b_r} \right) \frac{3\beta + 1}{4}, \quad (4.105.)$$

kur  $\beta$  – tinuma relatīvais solis.

Frontālo savienojumu izkliedes magnētiskās vadītspējas koeficientu  $\lambda_{fr}$  divslāņu tinumam var aprēķināt:

$$\lambda_{fr} = 0,34 \frac{q}{l_s} (l_{fr} - 0,64\beta\tau) k_y^2, \quad (4.106.)$$

kur  $\lambda_{fr}$  – frontālā savienojuma pusvijuma vidējais garums.

Diferenciālās izkliedes magnētiskās vadītspējas koeficientu  $\lambda_d$  parasti aprēķina no empīriskām formulām.

Asinhronajās mašīnās rievās, frontālo savienojumu un diferenciālajai izkliedei ir aptuveni vienāds īpatnējais svars kopējā izkliedes pretestībā. Gadījumā, ja mašīnā izveidotas slīpas rievās, aprēķinot izkliedes induktīvo pretestību, formulā (4.103.) ar attiecīgā koeficienta palīdzību jāņem vērā arī šī parādība. Sakarā ar to, ka sinhronajās mašīnās ir relatīvi lielāka gaisa sprauga, diferenciālā izkliede šajās mašīnās ir mazāka nekā frontālo savienojumu izkliede. Rievu un frontālo savienojumu izkliede praktiski nav atkarīga no rievu skaita  $q$  uz polu un fāzi.

Ja strāva tinumos nepārsniedz nominālo vērtību vairāk nekā 1,5 reizes, pretestība  $X_\sigma$  praktiski paliek nemainīga. Tas izskaidrojams ar to, ka izkliedes plūsmas noslēdzas pa gaisu, tāpēc nav atkarīgas no magnētiskās ķēdes piesātinājuma. Tomēr lielāku strāvu gadījumā, kā tas ir, piemēram, palaižot asinhronos dzinējus vai sinhrono ģeneratoru īsslēguma laikā, pretestība  $X_\sigma$  var samazināties par 15–30 %.

## 5. ASINHRONĀS MAŠĪNAS

### 5.1. ASINHRONĀS MAŠĪNAS DARBĪBAS PRINCIPS UN DARBA REŽĪMI

Pieslēdzot asinhronās mašīnas statora tinumu trīsfāžu tīklam, tajā plūst maiņstrāva un rada rotējošu magnētisko lauku (sk.4. nodaļu). Šis rotējošais lauks šķeļ rotora tinumu un inducē tajā EDS. Tā kā rotora tinums ir noslēgts, tajā plūst strāvas. Šo strāvu un statora lauka iedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskie spēki  $F_{em}$ , kuru virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma 5.1. att.).

Spēki  $F_{em}$  cenšas pagriezt rotoru statora radītā rotējošā lauka virzienā. Spēku  $F$  kopums, kas darbojas uz rotoru, rada elektromagnētisko griezes momentu  $M$  un liek griezties rotoram ar rotācijas frekvenci  $n$ . Tādā veidā elektriskā enerģija no tīkla tiek pārveidota asinhronā dzinēja mehāniskajā enerģijā.

Magnētiskā lauka un arī dzinēja rotora rotācijas virziens ir atkarīgs no tīkla spriegumu fāžu secības. Rotora rotācijas frekvence  $n$  asinhronajam dzinējam vienmēr ir mazāka par frekvenci  $n_1$ , jo tikai tādā gadījumā rotējošais magnētiskais lauks šķeļ rotora tinumu un inducē tajā EDS. Šis apstāklis atspoguļots arī asinhronās mašīnas nosaukumā. Sinhronās mašīnas rotors savukārt rotē ar sinhronās rotācijas frekvenci  $n_1$ .

Rotācijas frekvenču  $n_1$  un  $n$  starpību raksturo slīde  $s$ :

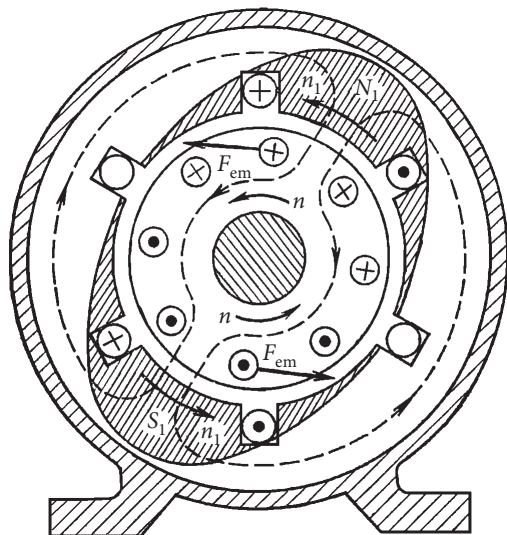
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (5.1.)$$

Slīdi bieži izsaka procentos. Tādā gadījumā izteiksmei (5.1.) reizina ar 100. Asinhronā dzinēja slīde var mainīties robežās no 0 līdz 1. Turklāt  $s=0$  atbilst ideālam tukšgaitas režīmam, bet  $s=1$  – īsslēguma režīmam, kad, pieslēdzot tīklam, bremzējošais moments vienāds ar dzinēja palaišanas momentu un rotors ir nekustīgs ( $n=0$ ). Nominālajā darba režīmā asinhrono dzinēju slīde ir neliela  $s=0,02-0,06$ .

No izteiksmes (5.1.) rotora rotācijas frekvence ir:

$$n = n_1(1 - s). \quad (5.2.)$$

Uz dzinēja plāksnītes tiek uzrādīta rotora nominālā rotācijas frekvence  $n_N$ . Šis lielums



5.1. att. Asinhronā dzinēja darbības princips.

ļauj viegli noteikt sinhrono rotācijas frekvenci  $n_1$ , polu skaitu  $2p$ , kā arī nominālās slīdes  $s_N$  vērtību. Piemēram, asinhronajam dzinējam ar barošanas sprieguma frekvenci  $f_1 = 50$  Hz uz plāksnītes uzrādīta nominālā rotora rotācijas frekvence  $n = 1440$  min<sup>-1</sup>. Šai frekvencei atbilst sinhronā rotācijas frekvence  $n_1 = 1500$  min<sup>-1</sup> un polu pāru skaits  $p = f_1 60 / n_1 = 2$ , bet polu skaits  $2p = 4$  (sk. 4.2. apakšnodaļu). Slīdes vērtība nominālajā darba režīmā saskaņā ar (5.1.) ir:

$$s_N = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04 \text{ vai } 4 \%$$

Rotora tinumā inducētā EDS un strāvas frekvence  $f_2$  ir proporcionāla rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvencei attiecībā pret paša rotora rotācijas frekvenci:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}$$

vai

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s. \quad (5.3.)$$

No izteiksmes (5.3.) var izdarīt svarīgu secinājumu par to, ka frekvence  $f_2$  ir proporcionāla slīdei. Vispārīgās lietošanas asinhronajiem dzinējiem frekvence  $f_2$  nominālajos darba režīmos, ja  $f_1 = 50$  Hz, ir maza.

Piemēram, ja  $s_N = 0,04$ ,  $f_2 = 2$  Hz, bet palaišanas brīdī, kad  $s = 1$ ,  $f_2 = 50$  Hz.

Rotora tinuma strāva rada rotējošu MS, kas attiecībā pret pašu rotoru rotē ar rotācijas frekvenci

$$n_s = \frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f_1 s}{p} = n_1 s. \quad (5.4.)$$

Lai iegūtu rotora MS rotācijas frekvenci attiecībā pret statoru, pie  $n_s$  vēl jāpieskaita  $n$ :

$$n_s + n = n_1 s + n_1 (1 - s) = n_1. \quad (5.5.)$$

No (5.5.) redzams, ka rotora MS attiecībā pret statoru vienmēr rotē ar sinhrono rotācijas frekvenci  $n_1$ .

Tādā veidā asinhronajā dzinējā darbojas divi MS – statora un rotora, kuri rotē sinhroni un veido rezultējošo mašīnas magnētisko lauku.

Ja asinhronās mašīnās rotoru ar ārēju mehānisku spēku griež magnētiskā lauka virzienā ar rotācijas frekvenci, kas lielāka par sinhrono rotācijas frekvenci, tad rotora relatīvais ātrums maina virzienu uz pretējo salīdzinājumā ar darbību dzinēja režīmā. Rezultātā arī rotora EDS un strāva, kā arī mašīnas elektromagnētiskais moments maina virzienu. Asinhronā mašīna šajā gadījumā darbojas ģenerators režīmā un tās statora tinums aktīvo jaudu atdod tīklā. Saskaņā ar (5.1.) asinhronā ģenerators slīde teorētiski var būt robežās no 0 līdz  $-\infty$ , bet praktiski izmantojamajos gadījumos tā pēc absolūtās vērtības aptuveni atbilst līdzīgām vērtībām dzinēja režīmā.

Ja asinhronās mašīnas rotoru griež virzienā, kas pretējs magnētiskā lauka rotācijas virzienam, tad rotora EDS un strāvas virziens saglabājas tāds pats kā dzinēja režīmā. Arī elektromagnētiskais moments, tāpat kā dzinēja režīmā, darbojas lauka griešanās virzienā,

bet uz rotoru tas darbojas bremzējoši. Šādā gadījumā asinhronā mašīna darbojas elektromagnētiskās bremzes režīmā. Slīde bremzes režīmā teorētiski var mainīties no 1 līdz  $+\infty$ . Elektromagnētiskās bremzes režīmu plaši izmanto elektropiedziņā, lai nodrošinātu mehānismu ātru apturēšanu un reversu vai celtņu kravas nolaišanu.

Slīde ir viens no svarīgākajiem asinhronās mašīnas teorijā izmantojamiem lielumiem, jo tās vērtība un zīme raksturo darba režīmu.

## 5.2. SPIEGUMU UN STRĀVU VIENĀDOJUMI

Kā izriet no asinhronās mašīnas uzbūves un darbības principa, statora un rotora tinumi savā starpā elektriski nav saistīti, to starpā pastāv tikai magnētiskā saite. Šajā ziņā asinhronā mašīna ir analoga transformatoram, jo statora tinumu var uzskatīt par primāro, bet rotora – par sekundāro.

Asinhronās mašīnas magnētisko plūsmu, tāpat kā transformatorā, var sadalīt galvenajā plūsmā  $\Phi$ , kas saķēdēta ar abiem tinumiem, un ar statora un rotora fāzi saķēdētās nelielās izkliedes plūsmās  $\Phi_{\sigma 1}$  un  $\Phi_{\sigma 2}$ .

Galvenā plūsma  $\Phi$ , kas rotē ar frekvenci  $n_1$ , inducē statora tinumā EDS. Tā lielumu nosaka izteiksme (4.22.). Savukārt izkliedes plūsma  $\Phi_{\sigma 1}$  statora tinumā inducē pašindukcijas EDS

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1, \quad (5.6)$$

kur  $X_1$  – statora fāzes izkliedes inductīvā pretestība.

Bez izkliedes inductīvās pretestības statora tinumam piemīt arī aktīvā pretestība  $R_1$ .

Statora sprieguma vienādojumu iegūstam, izmantojot otro Kirhofa likumu un ievērojot iepriekš aplūkotos EDS:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1. \quad (5.7)$$

Sprieguma kritums statora tinumā normāli slogotai asinhronai mašīnai nepārsniedz dažus procentus, tāpēc var pieņemt, ka  $U_1 = 4,44f_1 W_1 \Phi k_{w1}$ . Tas nozīmē, ka asinhronajā mašīnā, tāpat kā transformatorā, magnētiskā plūsma praktiski nav atkarīga no slodzes, bet ir proporcionāla pievadītajam spriegumam  $U_1$ .

Asinhronās mašīnas rotors rotē ar rotācijas frekvenci  $n$ . Galvenā magnētiskā plūsma rotora tinumā inducē EDS  $E_{2s}$  ar frekvenci  $f_2$

$$E_{2s} = 4,44f_2 \Phi W_2 k_{w2}, \quad (5.8)$$

kur  $W_2$  – rotora fāzes vijumu skaits;

$k_{w2}$  – rotora tinuma koeficients.

Tā kā saskaņā ar (5.3.)  $f_2 = sf_1$ , tad iegūstam:

$$E_{2s} = 4,44f_1 s \Phi w_2 k_{w2} = E_2 s, \quad (5.9)$$

kur  $E_2$  – nekustīgā rotora tinumā inducētais EDS, t. i., ja  $s = 1$ .



Rotora izkļiedes plūsma  $\Phi_{\sigma_2}$  inducē tā tinumā pašindukcijas EDS:

$$\dot{E}_{\sigma_2} = -j\dot{I}_2 s X_2, \quad (5.10.)$$

kur  $X_2$  – rotora fāzes izkļiedes induktīvā pretestība.

Tā kā asinhronās mašīnas rotora tinums ir noslēgts, tad EDS summai tajā jābūt vienādai ar nulli:

$$s\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 s X_2 - \dot{I}_2 R_2 = 0, \quad (5.11.)$$

kur  $R_2$  – rotora tinuma aktīvā pretestība.

Izdalot vienādojuma (5.11.) visus locekļus ar  $s$ , iegūstam rotora EDS vienādojumu:

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_2 - \dot{I}_2 \frac{R_2}{s} = 0. \quad (5.12.)$$

Asinhronās mašīnas galvenā magnētiskā plūsma  $F$  rodas statora un rotora MS  $F_1$  un  $F_2$  kopīgas darbības rezultātā:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{F}_1 + \dot{F}_2}{Z_m} = \frac{\dot{F}_0}{Z_m},$$

kur  $Z_m$  – mašīnas magnētīvada magnētiskā pretestība. Pretestības  $Z_m$  aktīvā komponente  $R_m$  raksturo magnētiskos zudumus, bet tās reaktīvā komponente  $X_m$  – reaktīvo jaudu, kas patērēta galvenās magnētiskās plūsmas radīšanai;

$F_0$  – rezultējošais MS, kas skaitliski vienāds ar tukšgaitas magnetizējošo spēku

$$F_0 = 0,45m_1 \frac{I_0 W_1}{p} \cdot k_{w1}; \quad (5.13.)$$

$I_0$  – tukšgaitas strāva.

Statora un rotora MS slodzes režīmā nosaka izteiksmes:

$$F_1 = \frac{0,45m_1 I_1 W_1 k_{w1}}{p}, \quad (5.14.)$$

$$F_2 = \frac{0,45m_2 I_2 W_2 k_{w2}}{p}, \quad (5.15.)$$

kur  $m_1$  un  $m_2$  – statora un rotora tinuma fāžu skaits.

Mainoties dzinēja slodzei, mainās arī strāvas  $I_1$  un  $I_2$ , kā arī MS  $F_1$  un  $F_2$ , bet galvenā magnētiskā plūsma  $\Phi$ , kā jau iepriekš atzīmēts, paliek praktiski nemainīga, ja  $U_1 = const$ . Tāpēc arī

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \cong const.$$

Ievietojot  $\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2$  vietā to izteiksmes no (5.14.), (5.15.) un izdalot vienādojuma abas puses ar  $m_1 W_1 k_{w1}$ , iegūstam izteiksmi:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{m_2 W_2 k_{w2}}{m_1 W_1 k_{w1}} \dot{I}_2$$

vai

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2, \quad (5.16.)$$

$$\text{kur } I'_2 = \frac{m_2 W_2 k_{w2}}{m_1 W_1 k_{w1}} I_2 = \frac{1}{k_i} I_2 - \text{rotora tinuma reducētā strāva.}$$

No (5.16.) redzams, ka asinhronā dzinēja strāva  $I_1$  sastāv no divām sastāvdaļām:  $I_0$  – magnetizēšanas strāva galvenās plūsmas radīšanai un  $I'_2$  – komponente, kas kompensē rotora atmagnetizējošo darbību.

Jebkura dzinēja slodzes maiņa rada attiecīgu slīdes izmaiņu. Tāpēc mainās arī rotora tinuma EDS un strāva  $I_2$ . Bet, tā kā šī strāva rada atmagnetizējošu darbību, mainās arī statora tinuma strāva  $I_1$ . Tukšgaitas režīmā, kad slīde ir ļoti maza un  $I_2 \approx 0$ , statora tinuma strāva  $I_1 = I_0$ . Ja dzinēja rotors tiek nobremzēts ( $s = 1$ ), EDS rotora tinumā sasniedz maksimālo vērtību. Tāpēc maksimālā būs rotora strāva  $I_2$  un attiecīgi arī statora tinuma strāva  $I_1$ .

### 5.3. EKVIVALENTĀS SHĒMAS

Asinhrono mašīnu izpētei un analīzei plaši izmanto ekvivalentās shēmas, kurās magnētisko saiti starp statora un rotora tinumu aizstāj ar elektrisko saiti. Tomēr statora un rotora ķēdi var saistīt kopā elektriski tikai tad, ja to tinumos inducējas vienādi EDS. Tas nozīmē, ka rotora tinums ar fāžu skaitu  $m_2$ , tinuma koeficientu  $k_{w2}$  un vijumu skaitu  $W_2$  jāaizvieto ar ekvivalentu tinumu ar parametriem  $m_1$ ,  $k_{w1}$  un  $W_1$ . Šādā maiņā rotora jauda un fāžu nobīdes leņķi starp vektoriem nedrīkst mainīties. No matemātikas viedokļa rotora parametru reducēšana nozīmē pāreju vienādojumos (5.12.) un (5.16) uz citiem mainīgajiem, kā tas tika izdarīts ar rotora reducēto strāvu  $I'_2$ .

Pāreja no rotora reālajiem parametriem uz reducētajiem notiek saskaņā ar izteiksmēm:

$$E'_2 = E_2 k_e; \quad I'_2 = \frac{I_2}{k_i};$$

$$R'_2 = R_2 k_e k_i; \quad X'_2 = X_2 k_e k_i,$$

kur  $k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1 k_{w1}}{W_2 k_{w2}}$  – asinhronās mašīnas spriegumu transformācijas koeficients, ja rotors ir nekustīgs.

Jānorāda uz zināmu specifiku, nosakot parametrus  $m_2$ ,  $W_2$  un  $k_{w2}$  asinhronajām mašīnām ar išslēgtu rotoru. Katru išslēgta tinuma stieni var uzskatīt par atsevišķu fāzi. Tāpēc šādos tinumos  $W_2 = 0,5$ ;  $k_{w2} = 1$  un fāžu skaits  $m_2$  vienāds ar stieņu skaitu.

Izmantojot rotora lielumus, kas reducēti uz statora tinumu, asinhronās mašīnas spriegumu un strāvu vienādojumus var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 X_1 + \dot{I}_1 R_1; \quad (5.17.)$$

$$0 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 X'_2 - \frac{\dot{I}'_2 R'_2}{s}; \quad (5.18.)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2. \quad (5.19.)$$

Šiem vienādojumiem atbilst asinhronās mašīnas  $T$  veida ekvivalentā shēma, kas parādīta 5.2. attēlā a. Šajā shēmā EDS  $E_1$  aizvietots ar sprieguma kritumu  $\dot{I}_0 (R_m + jX_m)$ . Turklāt pretestība  $R_m$  raksturo magnētiskos zudumus, bet  $X_m$  – reaktīvo jaudu, ko patērē galvenās magnētiskās plūsmas radīšanai. Pretestība  $R'_2/s$  (sk. (5.18)) ekvivalentajā shēmā ir sadalīta divās daļās:

$$\frac{R'_2}{s} = R'_2 + \frac{1-s}{s} R'_2.$$

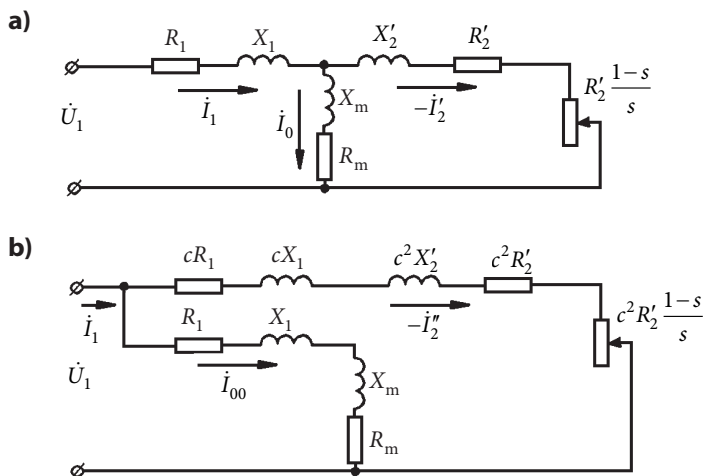
Pretestība  $[(1-s)/s] R'_2$  ir vienīgais mainīgais ekvivalentās shēmas parametrs, kas ir atkarīgs no dzinēja mehāniskās slodzes. Piemēram, ja slodzes moments uz vārpstas  $M_2=0$ ,  $s \approx 0$  un  $[(1-s)/s] R'_2 = \infty$ , tas atbilst dzinēja tukšgaitai. Ja slodze uz dzinēja vārpstas pieaug tiktāl, ka tas apstājas ( $s=1$ ) un  $[(1-s)/s] R'_2 = 0$ , iestājas isslēguma režīms.

Asinhrono mašīnu  $T$  veida ekvivalentai shēmai piemīt zināms trūkums: strāva tās magnetizēšanas zarā  $I_0$  ir atkarīga no slodzes, respektīvi, no slīdes. Tāpēc lieto arī  $\Gamma$  veida ekvivalento shēmu (5.2. att. b). Šajā shēmā  $I_{00}$  ir no slodzes neatkarīga ideālas tukšgaitas strāva, bet jauna reducētā rotora strāva  $I'_2$  saistīta ar  $I'_2$  šādi:

$$I'_2 = \frac{I'_2}{c}, \quad (5.20.)$$

kur  $c \approx 1 + X_1/X_m$ .

Parasti  $c = 1,02 \dots 1,08$ .



5.2. att. Asinhronās mašīnas ekvivalentās shēmas: a –  $T$  veida; b –  $\Gamma$  veida.

## 5.4. ASINHRONĀS MAŠĪNAS ENERĢĒTISKĀS SAKARĪBAS, ZUDUMI UN LIETDERĪBAS KOEFICIENTS

Enerģijas pārveidošana asinhronajā dzinējā, tāpat kā citās mašīnās, saistīta ar zudumiem. Zudumus iedala elektriskajos, magnētiskajos, mehāniskajos un papildu zudumos.

No tīkla dzinējam tiek pievadīta aktīvā jauda

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi. \quad (5.21.)$$

Daļa šīs jaudas tiek patērēta, lai segtu elektriskos zudumus statora tinumā ( $\Delta P_{el}$ ) un magnētiskos zudumus statora serdē ( $\Delta P_{mg}$ ):

$$\Delta P_{el} = m_1 I_1^2 R_1; \quad (5.22.)$$

$$\Delta P_{mg} = m_1 I_0^2 R_m. \quad (5.23.)$$

Pārējā jauda tiek pārnesta uz rotoru, to sauc par elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$ . Ekvivalentajā shēmā šai jaudai atbilst jauda, kas izdalās rotora ķēdes ekvivalentajā aktīvajā pretestībā  $R'_2/s$ :

$$P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s}. \quad (5.24.)$$

Daļa elektromagnētiskās jaudas tiek patērēta elektrisko zudumu segšanai rotora ķēdē:

$$\Delta P_{e2} = m_1 I_2'^2 R'_2. \quad (5.25.)$$

Pārējā elektromagnētiskās jaudas daļa ir rotora mehāniskā jauda

$$P_m = P_{em} - \Delta P_{e2} \quad (5.26.)$$

vai saskaņā ar izteiksmēm (5.24.) un (5.25.):

$$P_m = m_1 I_2'^2 R'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (5.27.)$$

Tātad asinhronā dzinēja mehāniskā slodze tiek aizstāta ar ekvivalentu elektrisko slodzi pretestības  $R'_2(1-s)/s$  veidā.

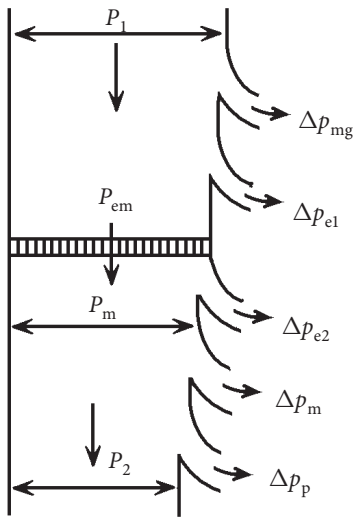
Dzinēja lietderīgo jaudu uz rotora vārpstas  $P_2$  iegūst, ja no  $P_{em}$  vēl atskaita mehāniskos zudumus  $\Delta P_m$  un papildu zudumus  $\Delta P_p$ , kurus parasti pieņem kā 0,5 % no nominālās jaudas. Jāatzīmē, ka magnētiskos zudumus rotora serdē var neievērot, tāpēc ka tās pār-magnetizēšanas frekvence  $f_2$  normālos darba režīmos ir neliela.

Asinhronā dzinēja kopējie zudumi ir

$$\Delta P = \Delta P_{el} + \Delta P_{mg} + \Delta P_{e2} + \Delta P_m + \Delta P_p \quad (5.28.)$$

un lietderības koeficients –

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (5.29.)$$



5.3.att. Asinhronā dzinēja enerģētiskā diagramma.

Enerģijas pārveidošanas procesu uzskatāmi atspoguļo asinhronā dzinēja enerģētiskā diagramma (5.3. att.).

Asinhronās mašīnas ekvivalentās shēmas (5.2. att.) un izteiksmes (5.21.–5.29.) ir spēkā arī ģeneratora un elektromagnētiskās bremzes režīmam, ja ievēro, ka šajos režīmos attiecīgi  $s < 0$  un  $s > 1$ .

## 5.5. ASINHRONĀS MAŠĪNAS ELEKTROMAGNĒTISKAIS MOMENTS UN RAKSTURLĪKNES

### 5.5.1. Elektromagnētiskais moments un dzinēja darbības stabilitāte

Asinhronā dzinēja elektromagnētiskais moments rodas, savstarpēji iedarbojoties rotora strāvai ar rotējošo magnētisko lauku. Tas ir proporcionāls elektromagnētiskajai jaudai:

$$M = \frac{pP_{em}}{\omega_1}, \quad (5.30.)$$

kur  $\omega_1 = 2pf_1$  – maiņstrāvas leņķiskā frekvence.

No  $\Gamma$  veida ekvivalentās shēmas (sk. 5.2. att. b) un izteiksmes (5.20.) redzams, ka

$$I'_2 = cI''_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}}. \quad (5.31.)$$

Ievietojot šo  $I'_2$  vērtību izteiksmē (5.24.), iegūstam formulu:

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left[ \left(R_1 + c\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2 \right]}. \quad (5.32.)$$

Konstruējot sakarību  $M=f(s)$ , (5.4. att.), parasti ņem vērā to, ka visi lielumi formulā (5.32.), izņemot slīdi  $s$ , ir nemainīgi. Tiešām parametrus  $R_1, R'_2, X_1$  un  $X'_2$  nosaka dzinēja konstrukcija, bet  $U_1$  un  $w_1$  – barošanas tīkls.

Palaišanas brīdī  $n=0$  un  $s=1$ . Tāpēc palaišanas momentu  $M_p$  var noteikt no (5.32.), ievietojot tajā  $s=1$ :

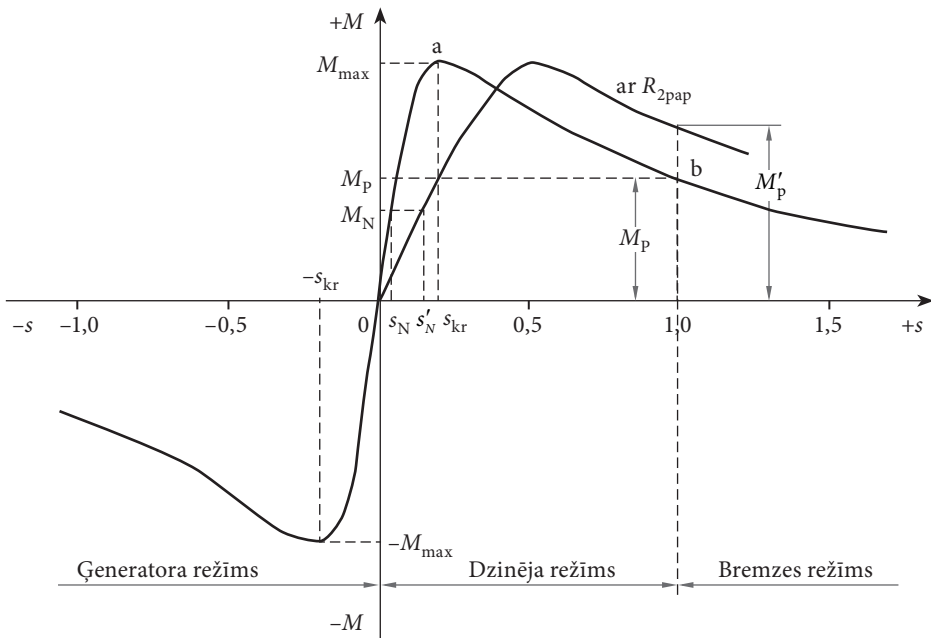
$$M_p = \frac{pm_1 U_1^2 R'_2}{\omega_1 \left[ (R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_2)^2 \right]}. \quad (5.33.)$$

Šī momenta ietekmē dzinējs sāk griezties, momenta vērtība pieaug, bet slīde samazinās. Sasniedzot kritisko slīdi  $s_{kr}$ , elektromagnētiskajam momentam ir maksimālā vērtība. Kritisko slīdi var noteikt, atvasinot izteiksmi (5.32.) pēc  $s$  un atvasinājumu pielīdzinot nullei:

$$s_{kr} = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX'_2)^2}}. \quad (5.34.)$$

Ievietojot (5.34.) izteiksmē (5.32.), iegūstam elektromagnētiskā momenta maksimālo vērtību:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c \left[ \pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX'_2)^2} \right]}. \quad (5.35.)$$



5.4. att. Asinhronās mašīnas elektromagnētiskā momenta atkarība no slīdes.

Ja neņem vērā aktīvo pretestību  $R_1$ , kas parasti nepārsniedz 10–12 % no  $(X_1 + cX'_2)$ , kritiskās slīdes un maksimālā momenta aprēķina formulas var vienkāršot. Tad, ievietojot izteiksmēs (5.34.) un (5.35.)  $R_1 = 0$ , iegūstam:

$$s_{kr} \approx \pm \frac{cR'_2}{X_1 + cX'_2}; \quad (5.36.)$$

$$M_{max} \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c (X_1 + cX'_2)}. \quad (5.37.)$$

Formulās (5.34.–5.37.) plus zīme atbilst dzinēja, bet mīnus zīme – ģenerators režīmam. No šīm formulām redzams, ka kritiskā slīde ir proporcionāla rotora ķēdes aktīvajai pretestībai, maksimālais moments ir proporcionāls sprieguma kvadrātam un nav atkarīgs no rotora tinuma aktīvās pretestības.

Maksimālā momenta attiecība pret nominālo momentu raksturo asinhronā dzinēja pārslodzes spēju, ko uzrāda dzinēja pasē. Vispārīgā lietojuma asinhronajiem dzinējiem pārslodzes spēja  $M_{max}/M_N = 1,7-3$  un kritiskā slīde  $s_{kr} = 0,06-0,15$ . Dzinējiem ar išslēgtu rotoru  $M_p = (0,7-1,8)M_N$ .

Raksturliknes  $M=f(s)$  analīze parāda, ka dzinēja stabils darbs iespējams, ja  $s < s_{kr}$ . Šajā posmā statiskā slodzes momenta  $M_{st}$  izmaiņas uz vārpstas izraisa attiecīgu elektromagnētiskā momenta izmaiņu. Piemēram, ja dzinējs darbojas nominālā režīmā un slodzes moments pieaug, tad rotācijas frekvence  $n$  samazinās un slīde pieaug. Tas savukārt izraisa elektromagnētiskā momenta palielināšanos līdz slodzes momenta vērtībai un nodrošina turpmāku stabilu stacionāro režīmu. Ja slodze samazinās, tad  $n$  pieaug, slīde samazinās un attiecīgi samazinās arī dzinēja radītais elektromagnētiskais moments.

Asinhronā dzinēja darbība kļūst nestabila, ja  $s \geq s_{kr}$ . Šajā posmā slodzes momenta palielināšanās izraisa  $s$  pieaugumu un elektromagnētiskā momenta samazināšanos, kas savukārt vēl vairāk palielina slīdi  $s$  līdz brīdim, kad  $s = 1$  un dzinējs apstājas.

Vispārīgā gadījumā asinhronā dzinēja stabila darbība ir iespējama, ja tiek ievērots nosacījums:

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{st}}{dn}. \quad (5.38.)$$

### 5.5.2. Dzinēja raksturliknes

Par asinhronā dzinēja mehānisko raksturliktu sauc sakarību starp tā rotācijas frekvenci  $n$  un lietderīgo momentu  $M_2$  uz vārpstas, t.i.,  $n=f(M_2)$ . Lietderīgais moments  $M_2$  atšķiras no elektromagnētiskā momenta  $M$  par nelielu daļu, ko nosaka mehāniskie un papildu zudumi. Tāpēc praktiskos aprēķinos parasti pieņem  $M_2 = M$ .

Tā kā starp lielumiem  $n$  un  $s$  pastāv lineāra sakarība (sk. izteiksmi (5.2.)), tad dzinēja mehāniskā raksturlikne  $n=f(M)$  ir citā koordinātu sistēmā attēlota momenta atkarība no slīdes  $M=f(s)$ .

Raksturliktu  $M=f(s)$  un tāpat arī  $n=f(M)$  var aprēķināt pēc izteiksmes (5.32.), ja zi-

nāmi dzinēja parametri. Tomēr šie parametri ne vienmēr ir pieejami, tāpēc praktiskām vajadzībām mehānisko raksturlielni var noteikt, izmantojot aptuvenu formulu (Klosa formulu):

$$M \approx \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{\text{kr}}} + \frac{s_{\text{kr}}}{s}}, \quad (5.39.)$$

kas iegūta no izteiksmēm (5.32.) un (5.37.), pieņemot, ka  $R_1 = 0$ . Šo izteiksmi var ērti izmantot, ja zināmi dzinēja pases dati: nominālā jauda  $P_N$ , nominālā rotācijas frekvence  $n_N$  un pārslodzes spēja  $M_{\max}/M_N$ . Tad, zinot nominālo slīdi  $s_n = (n_1 - n_N)/n_1$ , vispirms aprēķina kritisko slīdi:

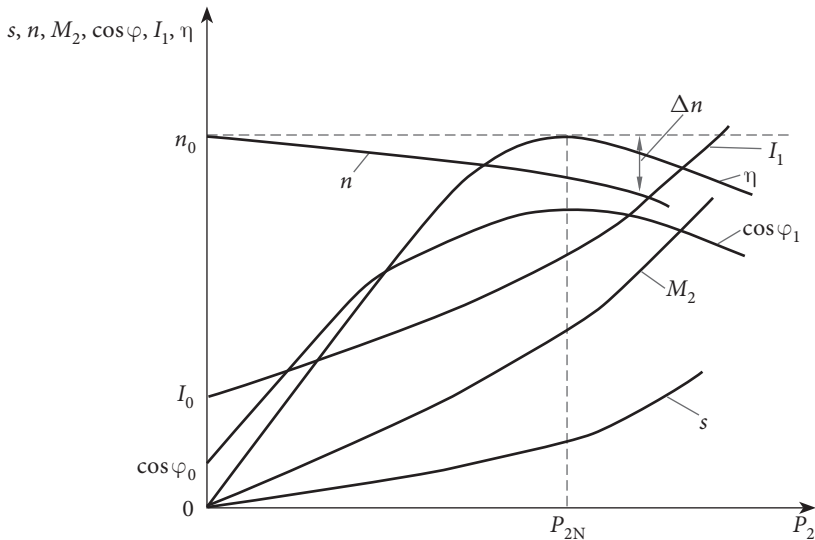
$$s_{\text{kr}} = s_N \left( \frac{M_{\max}}{M_N} + \sqrt{\left( \frac{M_{\max}}{M_N} \right)^2 - 1} \right). \quad (5.40.)$$

Dzinēja nominālo momentu nosaka pēc formulas:

$$M_N = \frac{9550P_N}{n_N} (N \cdot m). \quad (5.41.)$$

Jauda  $P_N$  izteiksmē (5.41.) izteikta kilovatos (kW), bet rotācijas frekvence  $n_N$  – apgriezienos minūtē ( $\text{min}^{-1}$ ). Zinot nominālo momentu  $M_N$  un pārslodzes spēju, nosaka dzinēja maksimālo momentu  $M_{\max}$ . Tādējādi visi lielumi izteiksmē (5.39.) ir zināmi un var aprēķināt momentu  $M$  jebkurai slīdei  $s$  vai jebkurai rotācijas frekvencei  $n = n_1(1 - s)$ .

Visplašāko priekšstatu par asinhronā dzinēja īpašībām sniedz tā darba raksturlieknes, t. i., rotācijas frekvences  $n$ , slīdes  $s$ , lietderības koeficienta  $\eta$ , momenta  $M_2$ , jaudas koeficienta  $\cos \varphi_1$  un statora strāvas  $I_1$  atkarība no lietderīgās jaudas  $P_2$ , ja  $U_1 = \text{const}$  un  $f_1 = \text{const}$  (5.5. att.).



5.5. att. Asinhronā dzinēja darba raksturlieknes.



Dzinēja zudumi tukšgaitā ir nelieli, tāpēc aptuveni var pieņemt, ka  $s \approx 0$  un  $n \approx n_1$ . Slodzei pieaugot, pieaug arī slīde un nominālajā darba režīmā sasniedz  $s = 0,02 - 0,06$ . Atbilstoši tam lēni krītas dzinēja rotācijas frekvence  $n$ , un raksturliktne  $n = f(P_2)$  iznāk cieta. Palielinot rotora aktīvo pretestību  $R_2$ , līknes slīpums attiecībā pret abscisu asi pieaug un, mainoties slodzei  $P_2$ , plašākā diapazonā mainās arī  $n$ .

Lietderīgo momentu  $M_2$  var noteikt pēc formulas:

$$M_2 = \frac{60P_2}{2\pi n}. \quad (5.42.)$$

No šīs izteiksmes redzams, ka, ja rotācijas frekvence būtu nemainīga, sakarība  $M_2 = f(P_2)$  būtu taisne. Tā kā asinhronā dzinējā, pieaugot slodzei  $P_2$ ,  $n$  krītas, moments  $M_2$  pieaug nedaudz straujāk nekā  $P_2$ .

Asinhronā dzinēja statora strāvai  $I_1$  vienmēr ir reaktīvā komponente, kas nepieciešama magnētiskā lauka radīšanai. Tāpēc tā jaudas koeficients vienmēr ir mazāks par 1, t. i.,  $\cos\varphi_1 < 1$ . Tā mazākā vērtība atbilst tukšgaitas režīmam un parasti nepārsniedz 0,2. Šis apstāklis izskaidrojams ar to, ka tukšgaitas strāva pēc rakstura ir gandrīz tikai induktīva.

Palielinot slodzi, aug strāvas  $I_1$  aktīvā komponente un nominālajā režīmā  $\cos\varphi_1$  sasniedz 0,8...0,9 vērtību. Tālāka slodzes palielināšana samazina  $\cos\varphi_1$ , jo pieaug rotora tinuma induktīvā pretestība, kas ir proporcionāla frekvencei  $f_2$  un tātad arī slīdei  $s$  (sk. (5.3)).

Lai paaugstinātu  $\cos\varphi_1$ , jā rūpējas, lai asinhronais dzinējs darbotos tuvu nominālajam režīmam. Tas jāņem vērā, izvēloties dzinēja nominālo jaudu.

## 5.6. TRĪSFĀŽU ASINHRONO DZINĒJU PALAIŠANA

### 5.6.1. Vispārīgi norādījumi

Asinhronā dzinēja palaišanu raksturo šādi rādītāji: palaišanas strāva  $I_p$  vai tās attiecība pret nominālo, palaišanas moments  $M_p$  vai tā attiecība pret nominālo, palaišanas ilgums, palaišanas vienkāršība, enerģijas zudumi palaišanas laikā un palaišanas iekārtas izmaksas.

Palaišanas brīdī slīde  $s = 1$ . Ja neņem vērā tukšgaitas strāvu, palaišanas strāvu var noteikt no ekvivalentās shēmas, kas parādīta 5.2. attēlā b:

$$I_p = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}}. \quad (5.43.)$$

Palaišanas momentu  $M_p$  nosaka izteiksme (5.33.). Vispārīgā lietojuma asinhroniem dzinējiem ar išslēgtu rotoru  $I_p/I_N = 4-7$  un  $M_p/M_N = 0,7-1,8$ .

No formulām (5.33.) un (5.34.) redzams, ka dzinēja palaišanu var uzlabot, palielinot aktīvo pretestību  $R'_2$ , jo tādā gadījumā samazinās strāva  $I_p$  un palielinās  $M_p$ . Tajā pat laikā, samazinot spriegumu  $U_1$ , palaišanas strāva samazinās, kas labvēlīgi ietekmē palaišanas

procesu, bet vienlaikus samazinās arī palaišanas moments. Izšķir tiešo palaišanu un palaišanu ar samazinātu spriegumu.

Palaišanas veidu izvēlas konkrētos apstākļos atkarībā no barošanas tīkla jaudas, slodzes rakstura, dzinēja tipa un citiem faktoriem.

### 5.6.2. Asinhrono dzinēju ar fāžu rotoru palaišana

Asinhronam dzinējam ar fāžu rotoru pastāv iespēja caur sukām un gredzeniem pieslēgt palaišanas reostatu un palielināt pretestību  $R'_2$ . Tādējādi palaišanas apstākļi tiek būtiski uzlaboti. Tomēr jāatzīmē, ka dzinēji ar fāžu rotoru ir dārgāki nekā išslēgtie, to eksploatacija sarežģītāka. Tāpēc dzinējus ar fāžu rotoru lieto tikai smagiem palaišanas apstākļiem, kad nepieciešams liels palaišanas moments un nav pieļaujamas lielas palaišanas strāvas vai arī dzinēji jāpalaiž biežāk, nekā tas pieļaujams išslēgtiem dzinējiem.

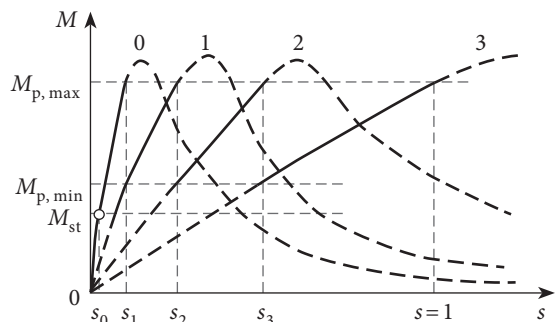
Ieslēdzot rotora ķēdē reostatu, dzinēja palaišanas strāva samazinās un palaišanas moments pieaug, jo palielinās kritiskā slīde  $s_{kr}$ . Raksturliknē momenta maksimums pārvietojas pa labi, lielākās slīdes virzienā. Papildpretestību  $R_p$ , ko ieslēdz rotora tinuma fāzē un kas nodrošina maksimālo palaišanas momentu, aprēķina pēc formulas:

$$R_p = \frac{X_1 + cX'_2}{c} - R'_2. \quad (5.44.)$$

Palaišanas reostata katras fāzes pretestība ir sadalīta vairākās pakāpēs. Tas paredzēts išlaicīgam darba režīmam. Reostata pakāpes aprēķina tā, lai palaišanas momenta vislielākā vērtība  $M_{p,max}$  būtu vienāda vai nedaudz mazāka par dzinēja maksimālo momentu, bet lielāka par statisko slodzes momentu  $M_{st}$  (5.6. att.). Minimālajam palaišanas momentam  $M_{p,min}$  arī jābūt lielākam par slodzes momentu.

Pirms dzinēja palaišanas iestata maksimālo reostata pretestību, kas nodrošina palaišanas momentu  $M_{p,max}$ . Statora tinumam pievienojot tīkla spriegumu, dzinējs sāk darboties mākslīgās raksturliķnes 3 režīmā, un tā slīde samazinās (rotācijas frekvence  $n$  palielinās). Brīdī, kad moments  $M = M_{p1,min}$  ( $s = s_3$ ), izslēdz palaišanas reostata pirmo pakāpi. Tad dzinēja darbība pāriet mākslīgās raksturliķnes 2 režīmā, un tā slīde turpina samazināties. Izslēdzot pēc kārtas palaišanas reostata pārējās pakāpes, dzinēja darbība pakāpeniski pāriet dabiskās raksturliķnes 0 režīmā ( $R_p = 0$ ), un rezultātā rotors sasniedz slodzei atbilstošo slīdi  $s_0$ . Kad palaišanas process ir beidzies un reostati atslēgti, dzinējs darbojas ar iši saslēgtu rotora tinumu.

Strāvas izmaiņu palaišanas procesa laikā var aprēķināt pēc izteiksmes (5.43.), aizvietojot tajā  $R'_2$  ar  $R'_2 + R'_p$ , kur  $R'_p$  – palaišanas reostata reducētā pretestība, kas atbilst dažādām



5.6. att. Asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru palaišana ar rotora ķēdē išslēgtu reostatu.

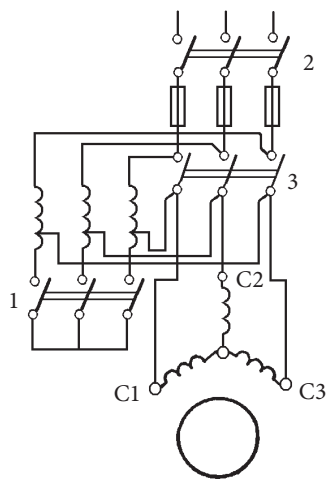
palaišanas reostata pakāpēm. Pakāpju skaitu un atsevišķo pretestību vērtību nosaka, ņemot par pamatu minimāli pieļaujamo palaišanas momentu vai arī maksimāli pieļaujamo palaišanas strāvu.

### 5.6.3. Īsslēgtu asinhrono dzinēju palaišana

Dzinēju palaišana, tieši pieslēdzot tos pilnam tīkla spriegumam, ir vienkārša. Tomēr tai piemīt trūkums: palaišanas brīdī statora tinumā rodas liela strāva. Ja palaišana notiek ātri, strāva strauji krītas un nespēj nodarīt ļaunumu dzinēja tinumiem, no silšanas viedokļa. Tomēr palaišanas strāva tīklā, ja tam nav pietiekama jauda, rada sprieguma kritumu un var izraisīt jūtamas svārstības. Tādējādi nominālā jauda īsslēgtam dzinējam, kuru var tieši pieslēgt tīklam, ir atkarīga no tīkla jaudas. Gadījumos, kad tīkla spriegums palaišanas brīdī krītas vairāk par 10–15 %, tiešo palaišanu nav ieteicams lietot un strāva  $I_p$  jāsamazina.

Saskaņā ar izteiksmi (5.43.) palaišanas strāva ir proporcionāla dzinējam pievadītajam spriegumam  $U_1$ . Tāpēc, samazinot  $U_1$ , samazinās arī strāva  $I_p$ . Sprieguma  $U_1$  samazināšanai izmanto dažādas metodes.

Asinhronajiem dzinējiem, kas normāli darbojas ar trīsstūrī slēgtu statora tinumu, var izmantot zvaigznes-trīsstūra pārslēgu. Pirms palaišanas ar šo pārslēgu statora tinumus saslēdz zvaigznē. Tad statora fāzes spriegums samazinās  $\sqrt{3}$  reizes. Tikpat reizi samazinās arī fāzes strāva statora tinumā. Bet, tā kā līnijas strāva trīsstūra slēgumā ir  $\sqrt{3}$  reizes lielāka par fāzes strāvu, palaišanas strāva, ko dzinējs patērē no tīkla, samazinās 3 reizes. Jāatzīmē, ka, palaižot dzinēju ar zvaigznē slēgtu statora tinumu, palaišanas moments arī samazinās 3 reizes. Kad dzinēja rotors ir iegriezies, ar pārslēgu statora tinumus atkal savieno trīsstūrī.



5.7. att. Asinhronā dzinēja palaišana ar autotransformatoru.

Dzinēja palaišanai var izmantot reaktorus (reaktīvās spoles), ko ieslēdz statora ķēdē. Tad statora tinums saņem samazinātu spriegumu  $U_1$ . Kad rotors iegriezies, reaktoru ar slēdzi šuntē, un statora tinums tiek pievienots nominālajam spriegumam  $U_N$ . Šī paņēmiena trūkums ir tāds, ka, samazinot spriegumu  $U_1/U_N$  reizes, palaišanas moments samazinās  $(U_1/U_N)^2$  reizes.

Lielākas iespējas var panākt, palaišanai izmantojot autotransformatoru (5.7. att.). Šajā gadījumā vispirms noslēdz slēdzi 1, saslēdzot transformatoru zvaigznē, un tad slēdzi 2. Tad dzinēja palaišanas strāva, kas izmērīta transformatora izejā, samazinās  $k$  reizes, kur  $k$  – transformācijas koeficients. Strāva, kas izmērīta transformatora ieejā, samazinās  $k^2$  reizes salīdzinājumā ar dzinēja tiešo palaišanu.

Kad dzinējs iegriezies, slēdzi 1 atslēdz, un autotrans-

formators darbojas kā reaktīvā spole. Beidzot, ieslēdzot slēdzi 3, uz dzinēju tiek padots nominālais tikla spriegums.

No palaišanas strāvas un momenta viedokļa, autotransformatora izmantošana ir izdevīgāka nekā reaktora, jo pie vienāda sprieguma samazinājuma palaišanas strāva pirmajā gadījumā samazinās  $(U_1/U_N)^2$  reizes, bet otrajā – tikai  $U_1/U_N$  reizes. Tomēr autotransformatora izmantošana sadārdzina palaišanas procesa izmaksas.

Asinhroniem dzinējiem, lai sasniegtu augstu lietderības koeficientu, jādarbojas ar mazu aktīvo pretestību  $R'_2$  rotora ķēdē. Tāpēc šiem dzinējiem ir relatīvi mazs palaišanas moments (sk. 5.5.1. un 5.5.2. apakšnodaļu). Lai daļēji novērstu šo trūkumu, ir izveidoti īsslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturlīknēm, kuriem rotora aktīvā pretestība palaišanas procesa sākumā ir liela, bet nominālā darba režīmā – maza. Šādas īpašības piemīt dziļrievu un dubultrienvu rotoriem, kuros izmanto apstākli, ka frekvence  $f_2$  palaišanas sākumā ir daudzkārt lielāka nekā nominālajā režīmā un darbojas virsmas efekts (strāvas izspiešanas efekts).

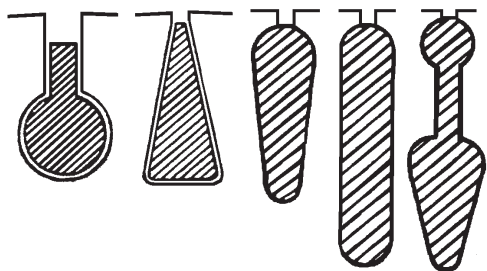
#### 5.6.4. Īsslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturlīknēm

Lai nodrošinātu asinhrono dzinēju augstu lietderības koeficientu, tiem jādarbojas ar mazu slīdi, citiem vārdiem sakot, rotora aktīvai pretestībai  $R_2$  jābūt mazai. Savukārt dzinējiem ar mazu rotora aktīvo pretestību palaišanas moments būs ievērojami mazāks par nominālo vērtību. Tāpēc, lai iegūtu nepieciešamo palaišanas momentu, nākas palielināt pretestību  $R_2$ . Šim nolūkam nepieciešams izveidot tādus īsslēgtos asinhronos dzinējus, kuriem rotora aktīvā pretestība palaišanas sākumā būtu liela, bet nominālajā režīmā – maza. Šādas īpašības ir dziļrievu un dubultrienvu rotoriem, kuros izmanto virsmas efektu (strāvas “izspiešanas” efektu).

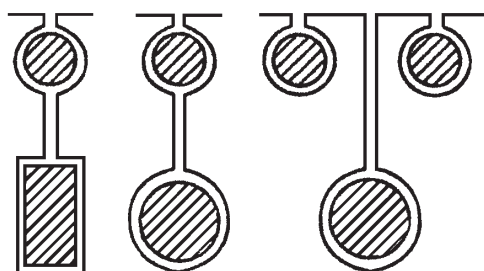
Dziļrievu dzinējam īsslēgtā rotorā vara vai alumīnija stieņi novietoti rievās, kuru dziļums ir 8–10 reizes lielāks par to platumu.

Dzinēja ieslēgšanas brīdī, kad rotora strāvas frekvencei ir maksimālā vērtība  $f_2 = f_1$ , rotora stieņa apakšējās daļas induktīvā pretestība ir ievērojami lielāka par augšējās daļas induktīvo pretestību. Šis apstāklis izskaidrojams ar to, ka stieņa apakšējā daļa saķēdējas ar lielāku izkliedes lauka magnētisko spēka līniju skaitu. Tāpēc šajā daļā inducējas lielāks pretektrodzinējspēks, kas “izspiež” strāvu stieņa augšējos slāņos. Tas ir līdzvērtīgs rotora aktīvās pretestības palielināšanai, palaišanas momenta palielināšanai un zināmai palaišanas strāvas ierobežošanai. Dzinēja rotācijas frekvencei palielinoties, strāvas frekvence rotorā samazinās ( $f_2 = sf_1$ ), tāpēc samazinās arī rotora induktīvā pretestība, kas ir proporcionāla frekvencei  $f_2$ . Strāvas blīvuma sadalījums stieņa augstumā kļūst vienmērīgāks, un rotora aktīvā pretestība samazinās. Nominālajā darba režīmā  $f_2 \ll f_1$ , strāvas “izspiešanas” efekts rotorā praktiski izzūd, un dzinējs darbojas kā parasts īsslēgts asinhronais dzinējs.

Dažas rotoru rievu formas, ko izmanto dzinējos ar strāvas “izspiešanas” efektu, parādītas 5.8. attēlā.



5.8. att. Dziļrievu rotora rievu formas.



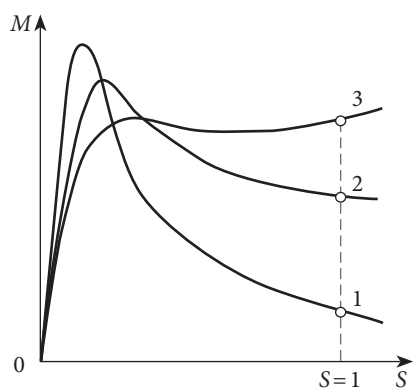
5.9. att. Dubultriēvu rotora rievu formas.

Vēl labākus palaišanas parametrus salīdzinājumā ar dziļrievu dzinējiem uzrāda išslēgtie asinhronie dzinēji ar dubultriēvu rotoru (5.9. att.). Darba tinuma stieņi novietoti rievās apakšējā slānī, bet palaišanas tinuma stieņi – virsējā slānī, tuvāk gaisa spraugai.

Palaišanas tinuma stieņus parasti izgatavo no materiāla ar samērā lielu īpatnējo pretestību (misiņš vai bronza). Palaišanas tinuma induktīvā pretestība nav liela, jo tā stieņi atrodas tuvu gaisa spraugai, turklāt tos no abām pusēm aptver papildu gaisa spraugas.

Darba tinuma stieņi, kas atrodas rievās apakšdaļā, ir izgatavoti no vara un tiem ir lielāks šķērsriezuma laukums nekā augšējiem stieņiem. Savukārt darba tinuma induktīvā pretestība ir lielāka nekā palaišanas tinumam, īpaši palaišanas procesa sākumā, kad rotora strāvas frekvencei ir maksimālā vērtība.

Palaišanas brīdī rotora strāva noslēdzas galvenokārt pa palaišanas tinumu, jo tam ir maza induktīvā pretestība. Strāvas blīvums palaišanas tinumā ir daudzkārt lielāks nekā darba tinumā. Pēdējam ir palielināta aktīvā pretestība, kas arī nodrošina dzinējam lielāku palaišanas momentu un samazina palaišanas strāvu. Rotoram iegriežoties, strāvas frekvence tajā samazinās un vienlaikus ar to samazinās darba tinuma induktīvā pretes-



5.10. att. Asinhrono dzinēju palaišanas moments atkarībā no slīdes: 1 – ar parasta tipa išslēgtu rotoru; 2 – ar dziļrievu rotoru; 3 – ar dubultriēvu rotoru.

tība. Rezultātā notiek radītā griezes momenta pārdale starp rotora tinumiem. Ja palaišanas procesa sākumā momentu rada galvenokārt palaišanas tinuma strāvas, tad palaišanas procesa beigās griezes momentu galvenokārt rada darba tinuma strāvas.

Asinhronajiem dzinējiem ar dubultriēvu rotoru parasti  $M_p/M_N = 1,2-2$  un  $I_p/I_N = 4-6$ , bet dziļrievu dzinējiem  $M_p/M_N = 1-1,4$  un  $I_p/I_N = 4,5-6$ .

5.10. attēlā salīdzinājumam parādītas dažādu asinhrono dzinēju palaišanas momenta raksturlīknes.

## 5.7. ASINHRONO DZINĒJU ROTĀCIJAS FREKVENCES REGULĒŠANA

### 5.7.1. Vispārīgi norādījumi

Iepriekš tika norādīts (sk. 3.1. apakšnodaļu), ka asinhronā dzinēja rotācijas frekvence

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s). \quad (5.45.)$$

No šīs izteiksmes izriet, ka dzinēja rotācijas frekvenci  $n$  var regulēt, mainot kādu no trim lielumiem: statora strāvas frekvenci  $f_1$ , polu pāru skaitu  $p$  un slīdi  $s$ , ja  $n_1 = const$ . Pēdējo no trim minētiem variantiem īsteno, attiecīgi mainot statora tinumam pievadīto spriegumu vai rotora tinuma aktīvo pretestību, vai ievadot rotora ķēdē papildu EDS.

### 5.7.2. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot statora tinumam pievadītā sprieguma frekvenci

Lai īstenotu frekvences  $f_1$  regulēšanu, nepieciešamas speciālas ierīces – frekvences pārveidotāji. Pēdējos gados plaši tiek lietoti pusvadītāju pārveidotāji, jo tiem ir augsts lietderības koeficients, mazi izmēri un ar tiem iespējams rotācijas frekvenci regulēt laideni un plašā diapazonā.

No izteiksmes (5.22.) redzams, ka, mainot frekvenci  $f_1$ , vienlaikus mainās arī dzinēja magnētiskā plūsma  $\Phi$ , ja  $E_1 \approx U_1 = const$ .

Magnētiskās plūsmas palielināšana nav vēlama, jo, magnētiskai sistēmai piesātinoties, strauji pieaug magnetizēšanas strāva. Arī plūsmas samazināšanās nav pieļaujama, jo tad samazinās dzinēja pārslodzes spēja. Tāpēc ir lietderīgi regulēt rotācijas frekvenci tā, lai magnētiskā plūsma paliktu nemainīga  $\Phi = const$ . To panāk, ja, mainot frekvenci  $f_1$ , vienlaikus regulē arī spriegumu  $U_1$  tā, lai saglabātos  $(U_1/f_1) = const$ .

Iepriekš tika pierādīts (sk. 5.5.1. apakšnodaļu), ka asinhronā dzinēja maksimālo momentu nosaka šāda izteiksme:

$$M_{\max} = \frac{p m_1 U_1^2}{2\pi f_1 c (X_1 + cX_2')}. \quad (5.46.)$$

Tā kā induktīvā izkliedes pretestība arī ir proporcionāla frekvencei  $f_1$ , maksimālais moments ir proporcionāls  $U_1^2/f_1^2$ . Tāpēc, ja frekvenci regulē, ievērojot nosacījumu  $(U_1/f_1) = const$ , dzinēja maksimālais moments un pārslodzes spēja nemainās.

Praksē rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni ar frekvenču pārveidotāju parasti izmanto asinhroniem īsslēgtiem dzinējiem.

### 5.7.3. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot polu pāru skaitu

Mainot polu pāru skaitu  $p$ , dzinēja rotācijas frekvences regulēšana ir lēcienveida, jo, piemēram, ja  $f_1 = 50$  Hz, dažādām  $p$  vērtībām var iegūt šādas sinhronās rotācijas frekvences: 3000, 1500, 1000, 750, 600  $\text{min}^{-1}$  utt. Polu pāru skaita maiņa iespējama, ja statora rievās novietoti vairāki tinumi vai viens tinums, kurā iespējams pārslēgt spoļu grupas. Šo divu variantu kombinācijas ļauj izgatavot dzinējus ar vairākām rotācijas frekvencēm (daudzātrumu dzinējus). Vienkāršākā gadījumā polu pāru skaitu pārslēdz attiecībā 2:1.

Daudzātrumu dzinējus izgatavo tikai ar īsslēgtu rotoru, jo dzinējiem ar fāžu rotoru būtu jāmaina arī polu skaits rotorā, kas sarežģītu pārslēgšanas aparatūru un dzinēja konstrukciju.

Divātrumu dzinēja statora tinumā katrā fāzē spoļu grupas sadalītas divās vienādās daļās. Saslēdzot tās virknē, veidojas maksimālais polu pāru skaits, bet saslēdzot paralēli – divreiz mazāks polu pāru skaits.

Visas tinumu shēmas ar pārslēdzamu polu pāru skaitu nosacīti var iedalīt divās grupās: shēmas ar konstantu momentu un shēmas ar konstantu jaudu. Pirmajā gadījumā, pārslēdzot dzinēju no vienas rotācijas frekvences uz otru, moments  $M_2$  uz vārpstas paliek nemainīgs, bet jauda  $P_2$  mainās proporcionāli rotācijas frekvencei  $n$ :

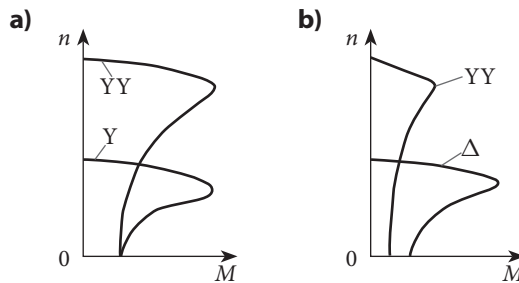
$$P_2 = \frac{2\pi n}{60} M_2. \quad (5.47)$$

Otrajā gadījumā, pārslēdzot dzinēju no vienas rotācijas frekvences uz otru, jauda  $P_2$  paliek aptuveni nemainīga, bet attiecīgi mainās moments  $M_2$ :

$$M_2 = \frac{60}{2\pi n} P_2. \quad (5.48)$$

Raksturlieknes dažām tinumu savienojumu shēmām polu pāru pārslēgšanai attiecībā 2:1 parādītas 5.11. attēlā a – režīmam ar konstantu momentu un 5.11. attēlā b – režīmam ar konstantu jaudu. Šajos attēlos parādītas atbilstošās dzinēja mehāniskās raksturlieknes.

Rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni, mainot polu pāru skaitu, ir ļoti vienkārši un ekonomiski. Tomēr daudzātrumu dzinēji ir dārgāki, tiem ir lielāki izmēri nekā parastiem īsslēgtiem dzinējiem. Turklāt rotācijas frekvenci var regulēt tikai lēcienveidā.



5.11. att. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlieknes dažādām pārslēgšanas shēmām: a – ar konstantu momentu; b – ar konstantu jaudu.

### 5.7.4. Rotācijas frekvences regulēšana, mainot slīdi

Rotācijas frekvences regulēšanu, mainot slīdi  $s$ , praktiski realizē, mainot dzinējam pievadīto spriegumu  $U_1$ , rotora tinuma aktīvo pretestību  $R'_2$  vai ievadot papildu EDS rotora ķēdē. Pēdējos divus paņēmienus var izmantot tikai dzinējiem ar fāžu rotoru.

Asinhronā dzinēja moments ir proporcionāls sprieguma  $U_1$  kvadrātam (sk. (5.32.)). Tāpēc, mainot  $U_1$ , mainīsies arī dzinēja rotācijas frekvence. 5.12. attēlā parādītas raksturliiknes  $M=f(s)$  dažādām sprieguma  $U_1$  vērtībām. Ja slodzes moments  $M_{st}$  ir nemainīgs, tad dažādiem spriegumiem atbilst dažādas slīdes vērtības un tāpat arī dzinēja rotācijas frekvences dažādas vērtības.

No 5.12. attēla redzams, ka slīdi iespējams regulēt šaurā diapazonā  $s_1 < s < s_{kr}$ . Regulēšanas diapazona palielināšanai nepieciešams, lai rotora tinumam būtu lielāka aktīvā pretestība. Bet tad palielinās rotora elektriskie zudumi un kritas lietderības koeficients. Tāpēc šo rotācijas regulēšanas paņēmienu lieto tikai mazjaudas dzinējiem.

Asinhronajiem dzinējiem ar fāžu rotoru rotācijas frekvenci var regulēt ar rotora ķēdē ieslēgtu papildpretestību  $R_p$ . Regulēšanas princips paskaidrots 5.13. attēlā.

Palielinot papildpretestību  $R_p$ , momenta maksimums pārvietojas pa labi (sk. 5.6.2. apakšnodaļu), slīde palielinās un dzinēja rotācijas frekvence  $n$  samazinās.

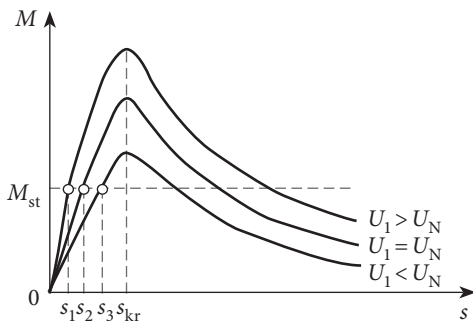
No formulām (5.24.) un (5.30.) var secināt, ka

$$s = \frac{pm_1 I_2'^2}{\omega_1 M} R'_2. \quad (5.49.)$$

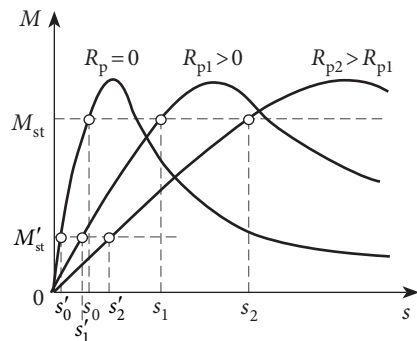
Ja slodzes moments  $M_{st} = const$ , tad ar pietiekamu precizitāti var uzskatīt, ka slīde  $s$  ir proporcionāla  $s_{kr}$  un tāpat arī rotora aktīvai pretestībai (sk. (5.34.)). Tāpēc slīdes vērtības  $s_0$  un  $s_2$ , kas atbilst attiecīgi gadījumiem  $R_p = 0$  un  $R_{p2} \neq 0$ , atrodas šādā sakarībā:

$$\frac{s_2}{s_0} = \frac{R'_{p2} + R'_2}{R'_2} = \frac{R_{p2} + R_2}{R_2}. \quad (5.50.)$$

No izteiksmes (5.50.) var secināt, ka rotora ķēdē ieslēdzamās pretestības vērtība  $R_{p2}$ , kura nodrošina slīdi  $s_2$  ir:



5.12. att. Raksturliiknes  $M=f(s)$  dažādām sprieguma  $U_1$  vērtībām.



5.13. att. Asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru rotācijas frekvences regulēšana ar rotora ķēdē ieslēgtu papildpretestību.



$$R_{p2} = \left( \frac{s_2}{s_0} - 1 \right) R_2. \quad (5.51.)$$

Aplūkotais rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni ir samērā vienkāršs un dod iespēju laideni regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā. Tomēr tas ir neekonomisks, jo, pieaugot slīdei, pieaug arī zudumi rotora ķēdē. Turklāt rotācijas frekvences regulēšanas diapazons ir atkarīgs no dzinēja slodzes: jo mazāks slodzes moments, jo šaurāks regulēšanas diapazons. Neskatoties uz šiem trūkumiem, minēto paņēmieni plaši izmanto celtņu un transporta mehānismu piedziņā, jo vienlaikus tas uzlabo palaišanas apstākļus.

Asinhrono dzinēju ar fāžu rotoru rotācijas frekvenci vēl var regulēt, ievadot rotora ķēdē papildu EDS.

No vienādojuma (5.11.) rotora strāvu var izteikt:

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}. \quad (5.52.)$$

Dzinēja normālā darba režīmā slīde ir neliela, tāpēc var pieņemt  $(sX_2)^2 \approx 0$ . Tad izteiksmes (5.52.) vietā iegūstam:

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2}.$$

Ievadot rotora ķēdē papildu EDS  $\pm \Delta E$ , rotora strāva

$$I_2 = \frac{s'E_2 \pm \Delta E}{R_2}, \quad (5.53.)$$

kur  $s'$  – rotora slīde pēc  $\Delta E$  ievadišanas.

Ja  $U_1 = \text{const}$ , tad asinhronā dzinēja magnētiskā plūsma ir praktiski nemainīga un nav atkarīga no slodzes (sk.(4.22.)). Tāpēc, ja regulēšanas laikā slodzes moments uz vārpstas nemainās, tad arī rotora strāva praktiski ir nemainīga un:

$$sE_2 = s'E_2 \pm \Delta E,$$

no kurienes

$$s' = s \pm \frac{\Delta E}{E_2}. \quad (5.54.)$$

Tas nozīmē, ka, ievadot rotora ķēdē papildu EDS  $+\Delta E$ , kas fāzē sakrīt ar  $E_2$ , slīde samazinās un rotācijas frekvence palielinās, bet ievadot  $-\Delta E$ , kas ir pretējā fāzē attiecībā pret  $E_2$ , slīde palielinās un rotācijas frekvence samazinās. Ar šādu paņēmieni var regulēt dzinēja rotācijas frekvenci gan virs, gan zem sinhronās frekvences. Turklāt jaudas zudumi un lietderības koeficients praktiski nemainās. Tā ir viena no šāda regulēšanas paņēmiena priekšrocībām.

Tomēr aplūkotā regulēšanas paņēmiena praktiskā realizēšana ir sarežģīta, jo papildu EDS  $\Delta E$  frekvencei ir jābūt tādai pašai kā  $E_2$  frekvencei. Bet, tā kā rotora frekvence ir atkarīga no slodzes, tad nepieciešamas iekārtas, kas automātiski nodrošina jebkurai slodzei, respektīvi, slīdei atbilstošu papildu EDS frekvenci  $f_2$  (sk. (5.3.)). Šim nolūkam izmanto trīsfāžu maiņstrāvas kolektormašīnas, kā arī dažādas elektrisko mašīnu kaskādes.

## 5.8. ASINHRONO DZINĒJU BREMZĒŠANAS REŽĪMI

Asinhrono dzinēju elektriskai bremsēšanai izmanto trīs paņēmienus: pretslēguma, rekuperatīvo un dinamisko bremsēšanu.

Pretslēguma bremsēšana. Pretslēguma režīmā, kā jau tas tika noskaidrots 5.1. apakšnodaļā, dzinēja rotors uzkrātās kinētiskās enerģijas vai ārējā spēka ietekmē griežas virzienā, kas pretējs magnētiskā lauka rotācijas virzienam. Šo režīmu izmanto dzinējos ar fāžu rotoru celtnos un citās transportmašīnās.

Mašīnas darbība pretslēguma režīmā paskaidrota 5.14. attēlā. Piemēram, ja dzinējs paceļ svaru ar rotācijas frekvenci  $n$  un rotora ķēdē ieslēdz papildu pretestību  $R_p$ , tad līdzsvars starp dzinēja radīto momentu  $M$  un svara radīto slodzes momentu  $M_{st}$  iestāsies pie rotācijas frekvences  $n_1 < 0$ , kad  $M = M_{st}$  (sk. 5.14. att.). Kā izriet no (5.1.), šajā režīmā slide

$$s = \frac{n_1 + n}{n_1} > 1. \quad (5.55.)$$

Ieslēdzot rotora ķēdē dažādas papildpretestības  $R_p$ , svaru var nolaist gan ar mazāku, gan ar lielāku ātrumu. Tomēr dzinēja mehāniskās raksturlīknes pretslēguma režīmā ir mikstas un svara nolaišanas ātrums lielā mērā atkarīgs no slodzes lieluma. Piemēram, ja slodzes moments  $M_{st} < M_1$  (sk. 5.14. att.), svara nolaišanas vietā notiek svara pacelšana. Vēl jāpiebilst, ka dzinēja darbība pretslēguma režīmā saistīta ar lieliem enerģijas zudumiem rotora papildpretestībā.

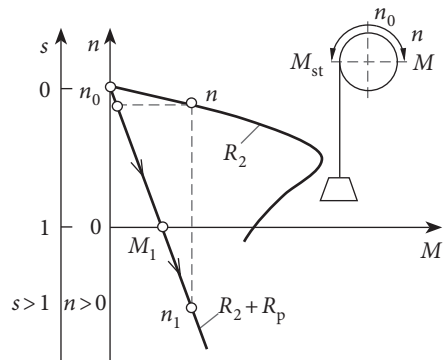
Asinhronā dzinēja pretslēguma režīmam ir spēkā visi iepriekš apskatītie vienādojumi, tāpēc tā mehāniskās raksturlīknes turpina attiecīgās dzinēja režīma raksturlīknes koordinātu sistēmas IV kvadrantā, kur  $n < 0$ ,  $s > 1$  un  $M > 0$ .

Pretslēguma režīmu izmanto arī īsslēgtu asinhrono dzinēju ātrai nobremzēšanai. Tādā gadījumā, apmainot vietām divus statora tinuma izvadus, rotējošais lauks griežas pretējā virzienā, bet rotors inerces dēļ turpina griezties sākotnējā virzienā. Dzinēja rotors tiek strauji nobremzēts. Ja šis režīms tiek izmantots dzinēja ātrai nobremzēšanai, sasniedzot  $n = 0$ , tā statora tinums šajā mirklī jāatslēdz no tīkla. Citādi dzinēja rotors sāks rotēt pretējā virzienā.

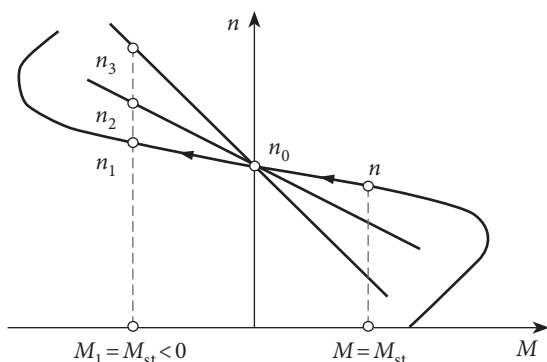
**Rekuperatīvā bremsēšana.** Rekuperatīvo bremsēšanu īsteno, ja asinhronā mašīna darbojas kā ģenerators un atdod enerģiju tīklā, t. i., tās rotors ārējā momenta vai uzkrātās kinētiskās enerģijas iespaidā griežas rotējošā lauka virzienā ar rotācijas frekvenci, kas lielāka par sinhrono rotācijas frekvenci ( $n > n_1$ ). Slide šajā gadījumā ir negatīva:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} < 0. \quad (5.56.)$$

Apskatot dzinēja mehāniskās raksturlīknes rekuperatīvās bremsēšanas režīmā, tāpat



5.14. att. Asinhronā dzinēja bremsēšana pretslēguma režīmā.



5.15. att. Asinhronā dzinēja rekuperatīvās bremsēšanas režīms.

kā pretslēguma režīmā, spēkā ir visi asinhronās mašīnas vienādojumi. Šim režīmam atbilstošās raksturlīknes atrodas II kvadrantā, kur  $n > n_1, s < 0$  un  $M < 0$  (5.15. att.).

Rekuperatīvās bremsēšanas režīms var rasties, piemēram, ja stipra vēja ietekmē celtnu pārvietošanas mehānismi sāk griezties ar rotācijas frekvenci  $n > n_1$ . Ieslēdzot rotora ķēdē dažādas papildpretestības, var mainīt rotācijas frekvences, kurām atbilst rekuperatīvā

bremsēšana, piemēram, frekvences  $n_1, n_2$  un  $n_3$  5.15. attēlā.

Jāatzīmē, ka rekuperatīvās bremsēšanas gadījumā nav iespējams panākt mazāku dzinēja rotācijas frekvenci par dabiskai raksturlīknei atbilstošo, kad  $R_p = 0$ .

Daudzāttrumu asinhronie dzinēji rekuperatīvās bremsēšanas režīmos bieži darbojas brīdī, kad tie pārslēgti uz zemāku rotācijas frekvenci.

**Dinamiskā bremsēšana.** Asinhronā dzinēja dinamiskās bremsēšanas režīmu realizē, atslēdzot statora trīsfāžu tinumu no tīkla un pievienojot to līdzstrāvas avotam. Tā rezultātā rodas nekustīgs magnētiskais lauks, kas inducē EDS rotējošā rotora tinumā. Šis EDS rotora tinumā izraisa strāvu, kas mijiedarbībā ar magnētisko lauku rada bremsējošu momentu. Ja  $n = 0$ , EDS, rotora tinuma strāva un moments ir vienādi ar nulli.

Kā zināms, EDS, rotora strāvas frekvence un induktīvā pretestība dzinēja režīmā ir lielumi, kas proporcionāli slīdei. Dinamiskās bremsēšanas režīmā slīdi  $s$  var aprēķināt pēc formulas:

$$s = \frac{n}{n_1}.$$

Dinamiskās bremsēšanas režīma atšķirība no dzinēja režīma ir tāda, ka mašīnas magnētiskā plūsma ir atkarīga no strāvas rotora tinumā. Neskatoties uz šo atšķirību, mehāniskās raksturlīknes dinamiskās bremsēšanas un dzinēja režīmā ir līdzīgas.

Asinhronās mašīnas moments (arī maksimālais moments) dinamiskās bremsēšanas režīmā ir jo lielāks, jo lielāka līdzstrāva plūst statora tinumā.

Ieslēdzot rotora tinumā dažādas aktīvās pretestības, var iegūt arī dažādas dzinēja mehāniskās raksturlīknes. Ja statora tinumā plūstošā līdzstrāva ir nemainīga, tad, palielinot rotora ķēdes pretestību, tāpat kā asinhronā dzinēja režīmā, arī dinamiskās bremsēšanas režīmā pieaug kritiskā slīde, bet maksimālais moments nemainās. Dinamiskās bremsēšanas režīmu bieži izmanto dzinēju ātrai apturēšanai.

## 5.9. VIENFĀZES ASINHROŅI DZINĒJI

### 5.9.1. Vienfāzes asinhrono dzinēju teorijas pamatjautājumi

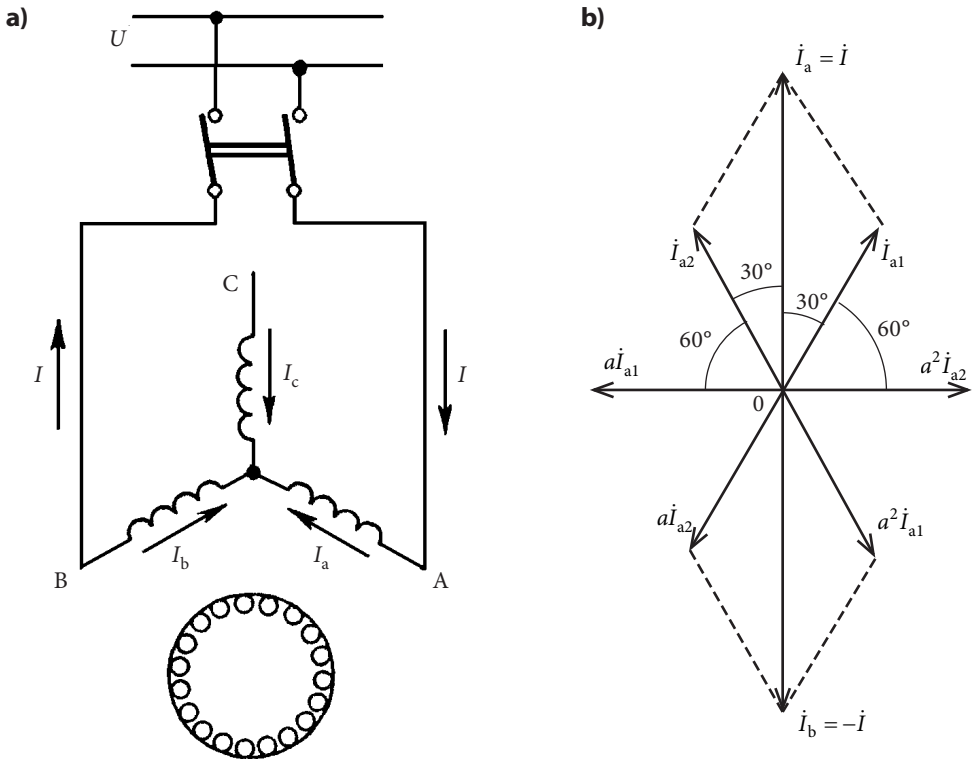
Vienfāzes asinhronos dzinējus plaši izmanto mazjaudas mehānismu piedziņai māj-saimniecībā, medicīnā, automātikas sistēmās u.tml. Vienfāzes dzinēju būtiska priekš-rocība ir iespēja tos barot no vienfāzes maiņstrāvas tīkla.

Vienfāzes asinhronā dzinēja statorā var būt vienfāzes tinums, bet rotorā išslēgts tinums – tāds pats kā trīsfāžu dzinējam. Vienfāzes asinhrono dzinēju var iedomāties kā trīsfāžu dzinēju, kuram viena fāze pārtraukta (5.16. att. a).

Tādā gadījumā palikušās divas statora tinuma fāzes ar fāžu zonu  $60^\circ$  kopā veido vie-nu fāzes tinumu ar fāžu zonu  $120^\circ$ . Šādam vienfāzes tinumam ir priekšrocība, tas gaisa spraugā neveido lauka trešo harmoniku un nodrošina pietiekami lielu tinuma koeficientu (sk. 4.4.5. apakšnodaļu).

Kā zināms, vienfāzes strāva  $I_1$  statora tinumā rada pulsējošu magnētisko lauku, kuru var sadalīt divos rotējošos ar vienādām amplitūdām un vienādiem, savstarpēji pretējiem rotācijas virzieniem. Šo lauku rotācijas frekvences ir:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}; \quad (5.57.)$$



5.16. att. No trīsfāžu asinhronā dzinēja izveidota vienfāzes dzinēja shēma (a) un strāvu vektoru diagramma (b).

$$n_2 = -\frac{60f_1}{p}. \quad (5.58.)$$

Ja rotors ir nekustīgs ( $n=0$ ,  $s=1$ ), minētie lauki rada vienādus un pretēji vērstus griezes momentus  $M_1$  un  $M_2$  (5.17. att.). Tāpēc rezultējošais moments  $M$  palaišanas brīdī vienāds ar nulli. Tādam dzinējam bez speciālām palaišanas ierīcēm rotors pats nevar sākt griezties. Griežot rotoru vienā vai otrā virzienā, rezultējošais griezes moments  $M \neq 0$  un dzinēju var slogot. Abi rotācijas virzieni ir ekvivalenti, bet elektromagnētiskās bremzes režīms neeksistē.

Pēc savām īpašībām vienfāzes asinhronais dzinējs ir tuvs trīsfāžu dzinējam, kas strādā ar lielu spriegumu nesimetriju (sk. 5.10. apakšnodaļu). Tāpēc vienfāzes dzinēja enerģētiskie rādītāji ir sliktāki nekā trīsfāžu dzinējam. Arī materiālu izmantošana vienfāzes dzinējam ir sliktāka. Vienfāzes dzinējiem ar tādiem pašiem izmēriem kā trīsfāžu dzinējiem jauda nepārsniedz 50–60% no trīsfāžu dzinēju jaudas. Šis apstāklis izskaidrojams ar to, ka vienfāzes dzinējā statora tinums neaizņem visas rievas un eksistē pretējais lauks, kas samazina griezes momentu un palielina zudumus.

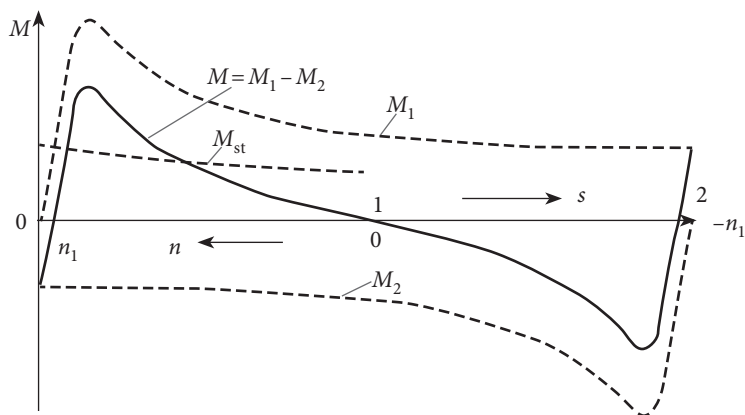
Trīsfāžu dzinējs darbojas vienfāzes režīmā, ja viens no statora tinuma pievadiem tiek pārtraukts, piemēram, nostrādājot drošinātājam vienā fāzē. Šādā gadījumā iestājas dzinējam bīstams režīms. Tiešām, dzinēja lietderīgā jauda trīsfāžu režīmā ir:

$$P_3 = \sqrt{3}UI_3\eta_3 \cos \varphi_3,$$

bet vienfāzes režīmā

$$P_1 = UI_1\eta_1 \cos \varphi_1.$$

Pārejot no trīsfāžu režīma vienfāzes režīmā, dzinēja griešanās ātrums praktiski nemainās, tāpēc  $P_1 \approx P_3$ . Ja lietderības koeficients  $\eta$  un jaudas koeficients  $\cos \varphi$  nemainās, tad strāva  $I_1$  vienfāzes režīmā ir  $\sqrt{3}$  reizes lielāka nekā strāva  $I_3$  trīsfāžu režīmā. Īstenībā lielumi  $\eta$  un  $\cos \varphi$  samazinās, un tāpēc strāva pieaug vēl vairāk. Tādējādi, ja dzinējs dar-



5.17. att. Vienfāzes asinhronā dzinēja griezes moments atkarībā no slīdes.

bojas ar nominālo slodzi, pārejot vienfāzes režīmā, tas tiks būtiski pārslogots. Ja dzinējs netiks atslēgts no tīkla, tas var iziet no ierindas.

Vienfāzes asinhronā dzinēja darbības analīzi lietderīgi veikt, apskatot to kā trīsfāžu dzinēju, kas darbojas nesimetriskā darba režīmā.

Saskaņā ar 5.16. att. a shēmu:

$$\dot{I}_a = -\dot{I}_b = \dot{I}; \quad \dot{I}_c = 0. \quad (5.59.)$$

Fāzes strāvas  $I_a$  simetriskās komponentes ir:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c = \frac{1}{3}(1-a)\dot{I} \right); \\ \dot{I}_{a2} &= \frac{1}{3} \left( \dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c = \frac{1}{3}(1-a^2)\dot{I} \right); \\ \dot{I}_{a0} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5.60.)$$

$$\text{kur } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = \cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Tādējādi:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{1}{3} \left( \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dot{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I} e^{-j\frac{\pi}{6}}; \\ \dot{I}_{a2} &= \frac{1}{3} \left( \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \dot{I} = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I} e^{j\frac{\pi}{6}}. \end{aligned} \right\} \quad (5.61.)$$

Strāvu vektoru diagramma, kas atbilst izteiksmēm (5.59.–5.61.), parādīta 5.16. attēlā b. Spriegums, kas pievadīts dzinēja statora tinumam,

$$\dot{U} = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b = (\dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2}) - (\dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2}) = Z_{c1}\dot{I}_{a1} + Z_{c2}\dot{I}_{a2} - (Z_{c1}\dot{I}_{b1} + Z_{c2}\dot{I}_{b2}),$$

kur  $Z_{c1}$  un  $Z_{c2}$  – trīsfāžu dzinēja fāžu tinumu pretestības tiešās un pretējās secības strāvām, kas izmērītas no primārā tinuma puses.

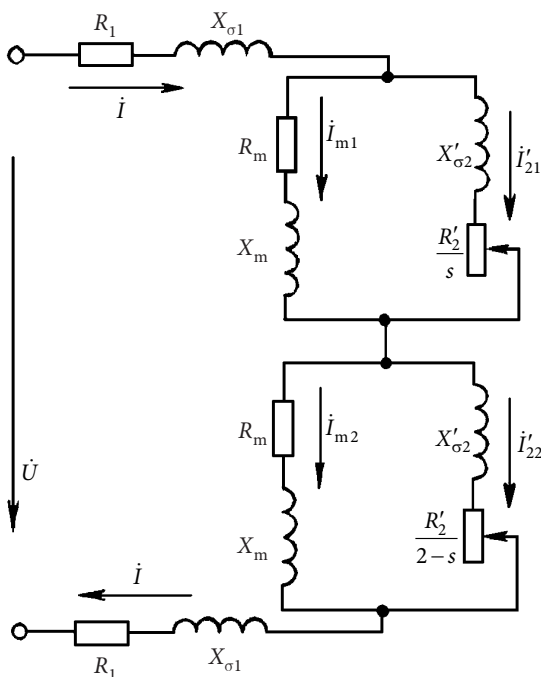
Ievietojot pēdējā izteiksmē  $\dot{I}_{b1} = a^2\dot{I}_{a1}$ ;  $\dot{I}_{b2} = a^2\dot{I}_{a2}$ ; bet  $\dot{I}_{a1}$  un  $\dot{I}_{a2}$  vērtības no izteiksmēm (5.60.), iegūsim:

$$\dot{U} = \frac{1}{3}(1-a^2)(1-a)Z_{c1}\dot{I} + \frac{1}{3}(1-a)(1-a^2)Z_{c2}\dot{I},$$

$$\text{kur } \frac{1}{3}(1-a^2)(1-a) = \frac{1}{3}(1-a^2-a+a^3) = 1,$$

tāpēc

$$\dot{U} = (Z_{c1} + Z_{c2})\dot{I}. \quad (5.62.)$$



5.18. att. Vienfāzes asinhronā dzinēja ekvivalentā shēma.

Pretestības  $Z_{c1}$  un  $Z_{c2}$  ir 5.18. att. shēmu ekvivalentās pretestības. Saskaņā ar izteiksmi (5.62.) šīs pretestības savā starpā savienotas virknē, kā tas parādīts vienfāzes dzinēja ekvivalentajā shēmā (5.18. att.). Shēmas augšējā daļa atbilst tiešās secības strāvām  $I_{21}$ , bet apakšējā daļa – pretējās secības strāvām  $I_{22}$ .

Tā kā saskaņā ar (5.61.)

$$I = I_a = \sqrt{3}I_{a1} = \sqrt{3}I_{a2},$$

tad visas strāvas un spriegumi 5.18. att. shēmā ir  $\sqrt{3}$  reizes lielāki nekā to simetriskās komponentes. Jāatzīmē, ka 5.18. att. shēmas pretestības ir trīsfāžu dzinēja vienas fāzes pretestības. Pretestības  $R'_2$  un  $X'_{\sigma 2}$ , ja ņem vērā strāvas izspiešanas efektu shēmas augšējā un apakšējā daļā, vispārīgā gadījumā, ir atšķirīgas, jo tiešās un pretējās secības strāvu frekvences ir atšķirīgas.

Vienfāzes dzinēja griezes moments

$$\begin{aligned} M &= M_1 + M_2 = \frac{p}{\omega_1} \left[ 3 \left( \frac{I'_{21}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{R'_2}{s} - 3 \left( \frac{I'_{22}}{\sqrt{3}} \right)^2 \frac{R'_2}{2-s} \right] = \\ &= \frac{p}{\omega_1} \left( I_{21}^2 \frac{R'_2}{s} - I_{22}^2 \frac{R'_2}{2-s} \right). \end{aligned} \quad (5.63.)$$

## 5.9.2. Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi

Kā tika noskaidrots iepriekš, vienfāzes dzinējam ar vienu statora tinumu palaišanas moments vienāds ar nulli un tas nevar uzsākt griešanos. Tāpēc jāveic papildu pasākumi, lai dzinējā radītu palaišanas momentu. Šie pasākumi vērsti uz to, lai pastiprinātu tiešo un vājinātu pretējo lauku tā, lai palaišanas brīdī būtu:

$$M = M_1 + M_2 > 0.$$

Vislabākie palaišanas apstākļi veidojas tad, kad pretējais lauks ir pilnībā noslāpēts un  $M_2 = 0$ . Dažādie vienfāzes dzinēju tipi atšķiras viens no otra ar to, kā tiek nodrošināts vajadzīgais palaišanas moments.

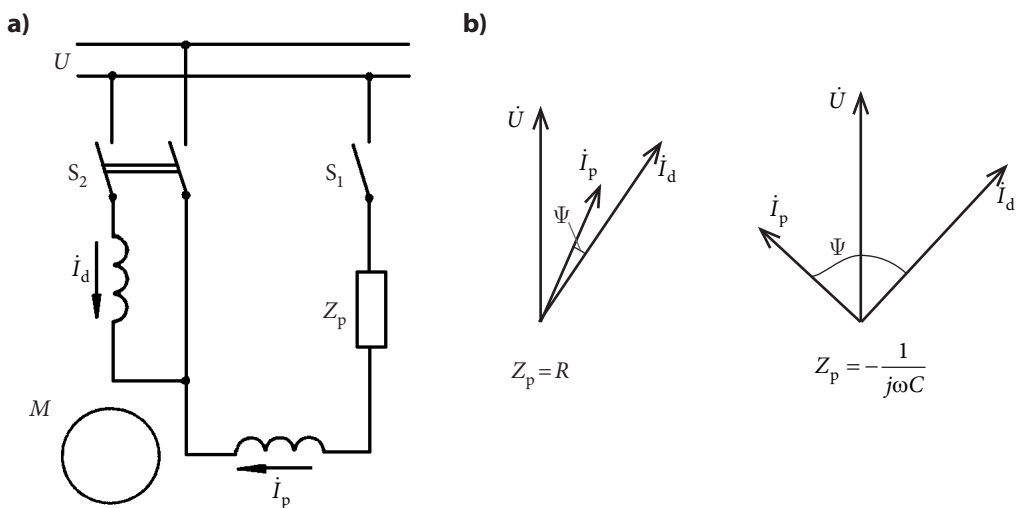
Visplašāko pielietojumu ir raduši vienfāzes dzinēji ar palaišanas tinumu. Tādos dzinējos statorā bez darba tinuma ar fāžu zonu  $120^\circ$  ievieto vēl palaišanas tinumu, kas aizņem fāžu zonu  $60^\circ$  un nobīdīts telpā attiecībā pret darba tinumu par  $90^\circ$  elektriskajiem grādiem. Lai pulsējošā lauka vietā dzinējā radītu rotējošu lauku, strāva palaišanas tinumā  $I_p$  jānobīda fāzē pret strāvu darba tinumā  $I_d$ . To panāk, palaišanas tinumam virknē ieslēdzot elementu  $Z_p$ , kas rada fāžu nobīdi (5.19. att.)

Darba un palaišanas tinumi veido riņķveida rotējošu lauku, ja šo tinumu MS ir vienādi un nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ . Tā kā paši tinumi arī telpā nobīdīti par  $90^\circ$  elektriskajiem grādiem, šādā gadījumā rodas tikai tiešās secības lauks – tāpat kā trīsfāžu asinhronajā dzinējā ar simetrisku strāvu sistēmu statora tinumā.

Visbiežāk palaišanas tinuma ķēdē tiek ieslēgti rezistori ( $Z_p = R$ ) vai kondensatori ( $Z_p = -j(1/\omega C)$ ). Palaišanas apstākļi būs labāki, ieslēdzot kondensatoru, jo tikai šajā gadījumā iespējams panākt fāžu nobīdi  $\Psi = 90^\circ$ . Tomēr vajadzīgā kondensatora izmēri parasti ir relatīvi lieli. Vislētākā un visvienkāršākā ir palaišana, izmantojot rezistoru. Bieži vien pats palaišanas tinums tiek veidots ar mazāku vada šķērsgriezumu (lielāku aktīvo pretestību).

Kad rotora rotācijas frekvence sasniedz zināmu lielumu, palaišanas tinumu ar slēdzi  $S_1$  atslēdz no tīkla (parasti automātiski), jo šis tinums paredzēts tikai īslaicīgai darbībai. Dzinējs turpina strādāt ar darba tinumu, kā iepriekš aplūkotais vienfāzes asinhronais dzinējs.

Asinhronā kondensatoru dzinēja statorā ievietoti divi darba tinumi, kuri telpā nobīdīti par  $90^\circ$  elektriskajiem grādiem. Katrs no šiem tinumiem aizņem pusi rievu ar  $90^\circ$  elektrisko grādu fāžu zonām, turklāt viena tinuma ķēdē ieslēgts kondensators (5.20. att.). Kapacitāti  $C_p$  izvēlas tā, lai dzinēja nominālajā darba režīmā būtu tikai tiešās secības lauks. Citām slodzēm abu tinumu MS nav vienādi un veidojas arī pretējās secības lauks.



5.19. att. Vienfāzes asinhronā dzinēja ar palaišanas tinumu slēguma shēma (a) un vektoru diagrammas (b).



Kondensatora  $C_p$  kapacitāte, kas izraudzīta tā, lai nominālajā režīmā nodrošinātu riņķveida rotējošo lauku, parasti nav pietiekama vajadzīgā palaišanas momenta radīšanai. Tāpēc nepieciešamības gadījumā paralēli kondensatoram  $C_p$  ieslēdz vēl vienu kondensatoru, kas darbojas tikai palaišanas laikā.

Kondensatoru dzinējiem ir augstāks lietderības koeficients un jaudas koeficients nekā vienfāzes dzinējiem.

Kondensatoru dzinēja darba kapacitāti nosaka, izejot no šādiem nosacījumiem.

Gadījumā, kad dzinējam ir riņķveida rotējošais lauks:

$$U_b = \frac{W_b}{W_a} U_a \quad (5.64.)$$

vai

$$U_b = K U_a, \quad (5.65.)$$

kur  $K = \frac{W_b}{W_a}$  – transformācijas koeficients, kas vienāds ar tinumu vijumu attiecību.

Strāvas  $I_a$  un  $I_b$  nobīdītas fāzē par  $90^\circ$  un to radītie MS

$$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_b W_b k_w = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_a W_a k_w. \quad (5.66.)$$

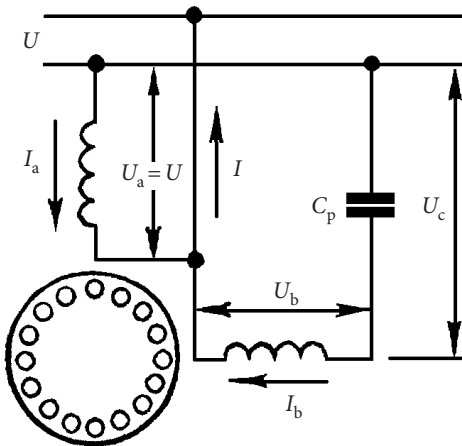
Sareizinot vienādojumu (5.64.) un (5.66.) kreisās un labās puses, iegūstam:

$$U_b I_b = U_a I_a. \quad (5.67.)$$

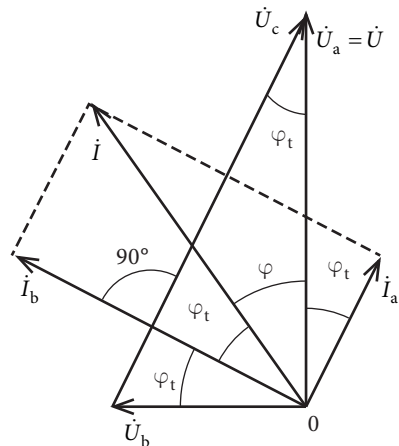
Tas nozīmē, ka dzinējā ar riņķveida lauku pilnās jaudas ir vienādas un

$$\frac{U_b}{U_a} = \frac{I_a}{I_b} = K. \quad (5.68.)$$

a)



b)



5.20. att. Asinhronā kondensatoru dzinēja slēguma shēma (a) un vektoru diagramma (b).

Tā kā fāžu spriegumi, tāpat kā strāvas, savā starpā nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ , fāžu nobīdes leņķis starp spriegumu un strāvu katrā tinumā ir vienāds ar  $\varphi_t$ . Rezultātā vienādas ir arī fāžu aktīvās jaudas.

5.20. att. b vektoru diagrammā strāvu un spriegumu trīsstūri ir līdzīgi un tajos ir vienādi leņķi  $\varphi_t$ . No diagrammas redzams, ka spriegums uz kondensatora ir:

$$U_c = \frac{U_b}{\sin \varphi_t}.$$

Riņķveida lauka iegūšanai nepieciešamo kapacitāti var atrast no vienādības:

$$U_c = \frac{U_b}{\sin \varphi_t},$$

no kuras

$$C = \frac{I_b \sin \varphi_t}{\omega U_b}. \quad (5.69.)$$

Kondensatora jaudu var aprēķināt šādi:

$$Q_c = U_c I_b = \frac{U_b I_b}{\sin \varphi_t}. \quad (5.70.)$$

Savukārt dzinēja pilnā jauda, ko tas patērē no tīkla, ir:

$$S = U_a I = U_c I \cos \varphi_t = U_c I_b = \frac{U_b I_b}{\sin \varphi_t}. \quad (5.71.)$$

Salīdzinot izteiksmes (5.70.) un (5.71.), redzams, ka kondensatora jauda ir vienāda ar dzinēja pilno jaudu riņķveida lauka gadījumā. Tādējādi nepieciešamā kondensatora jauda ir pietiekami liela.

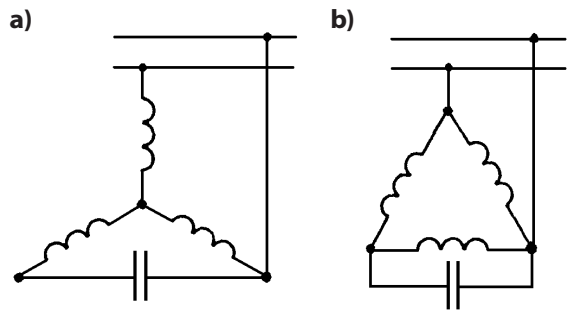
Trīsfāžu asinhronos dzinējus var pieslēgt arī vienfāzes tīklam un darbināt kā kondensatoru dzinējus, ja nav pieejams trīsfāžu tīkls. Praksē biežāk izmantojamās šādu dzinēju slēguma shēmas parādītas 5.21. attēlā.

Kondensatora  $C$  kapacitāti, kas nodrošina vislabākos darba apstākļus, var aprēķināt, ja zināmi dzinēja parametri (aktīvās un induktīvās pretestības). Šī kondensatora kapacitāti var noteikt arī eksperimentāli tā, lai dotajai slodzei atbilstošā strāva būtu minimāla. Aptuveniem aprēķiniem praksē var izmantot empīriskas formulas. Ja frekvence ir 50 Hz, tad 5.21. att. a shēmai:

$$C = 2800 \frac{I_{fN}}{\sqrt{3} U_{fN}} \quad (5.72.)$$

un 5.21. att. b shēmai:

$$C = 4800 \frac{I_{fN}}{U_{fN}}. \quad (5.73.)$$



5.21. att. Trīsfāžu asinhronā dzinēja pieslēgšana vienfāzes tīklam, ja statora tinums slēgts zvaigznē (a) un trīsstūri (b).

Ja formulās (5.72.) un (5.73.) strāvas vērtību ievieto ampēros un sprieguma vērtību voltos, tad kapacitātes vērtību iegūst mikrofarados. Ja dzinēju nav iespējams palaist tukšgaitā vai nedaudz slogotu, tad 5.21. att. shēmās paralēli kondensatoram  $C$  palaišanas laikā jāpieslēdz vēl viens kondensators, kura kapacitāte ir 2,5–3 reizes lielāka nekā aprēķinātā  $C$  vērtība.

## 5.10. ASINHRONO DZINĒJU NESIMETRISKIE REŽĪMI

### 5.10.1. Vispārīgi norādījumi

Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi rodas, ja barošanas tīkla spriegumi ir nesimetriski, ja statora un rotora ķēdes ir nesimetriskas un ja dzinēju tinumu shēmas ir nesimetriskas.

Apskatot nesimetriskos režīmus, izmantosim simetrisko komponentu metodi un uzskatīsim, ka asinhronās mašīnas uzbūve kopumā un tinumu fāzes ir simetriskas. Nulles secības strāvas asinhrono dzinēju tinumos nerodas, jo šie tinumi parasti slēgti zvaigznē ar izolētu nullpunktu. Tāpēc jāaplūko dzinēja uzvedība attiecībā pret tiešās un pretējās secības strāvām un spriegumiem.

### 5.10.2. Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriskiem spriegumiem

Pieņemsim, ka trīsfāžu spriegums, kas pievienots trīsfāžu asinhronā dzinēja statora tinumam, ir nesimetrisks un satur tiešās ( $U_{11}$ ) un pretējās ( $U_{12}$ ) secības komponentes. Viss šajā nodaļā iepriekš izklāstītais attiecas uz tiešās secības strāvām un spriegumiem. Atkārtosim šeit galvenos rezultātus, izmantojot indeksu 1 tiešās secības lielumiem. Attiecināsim šos rezultātus uz pretējās secības strāvām un spriegumiem ar indeksu 2.

Tiešās secības spriegumi  $U_{11}$  izraisa mašīnas primārajā tinumā tiešās secības strāvas  $I_{11}$ . Šīs strāvas rada tiešās secības magnētisko lauku, kas rotē ar rotācijas frekvenci

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (5.74.)$$

un inducē sekundārajā tinumā tiešās secības strāvas  $I'_{21}$ . Strāvas  $I_{11}$  un  $I'_{21}$  rada rezultējošo tiešo lauku. Rotora slīde attiecībā pret šo lauku ir tiešās secības slīde:

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (5.75.)$$

kur  $n$  – rotora rotācijas frekvence, kuru pieņem par pozitīvu, ja rotors griežas tiešā lauka rotācijas virzienā.

Tiešās secības strāvām un spriegumiem spēkā ir 5.2. attēlā parādītā ekvivalentā shēma. Šī shēma ļauj noteikt strāvas  $I_{11}$  un  $I'_{21}$ , ja zināms spriegums  $U_{11}$  un mašīnas parametri.

Tiešās secības strāvas un magnētiskais lauks rada tiešās secības griezes momentu:

$$M_1 = m_1 I_{21}'^2 \frac{R_2'}{s} \cdot \frac{p}{\omega_1}. \quad (5.76.)$$

Pretējās secības spriegums  $U_{12}$  uztur statora tinumā pretējās secības strāvas  $I_{12}$ . Šīs strāvas rada pretējās secības magnētisko lauku, kas rotē ar tādu pašu frekvenci kā tiešais lauks, tikai pretējā virzienā. Tādējādi:

$$n_2 = -n_1 = -\frac{60f_1}{p}. \quad (5.77.)$$

Minētais lauks rotora tinumā inducē pretējās secības strāvas  $I'_{22}$ . Statora un rotora pretējās secības strāvas  $I_{12}$  un  $I'_{22}$  rada rezultējošo pretējo magnētisko lauku. Rotora slīde attiecībā pret šo lauku:

$$s_2 = \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1}. \quad (5.78.)$$

Ievietojot izteiksmē (5.78.) rotora rotācijas frekvenci, kas izteikta ar tiešās secības slīdi

$$n = (1 - s)n_1,$$

iegūstam:

$$s_2 = 2 - s. \quad (5.79.)$$

Pretējās secības strāvām un spriegumiem spēkā ir 5.22. attēlā parādītā ekvivalentā shēma. Šī shēma no tiešās secības strāvu ekvivalentās shēmas (sk. 5.2. att.) atšķiras ar to, ka slīdes  $s_1 = s$  vietā ir slīde  $s_2 = s - 2$ .

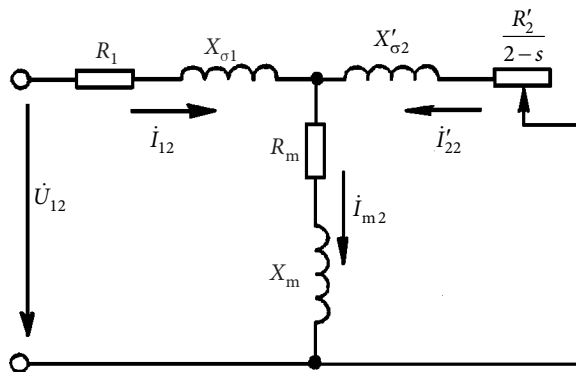
Pretējās secības strāvas un magnētiskais lauks rada pretējās secības griezes momentu:

$$M_2 = -\frac{p}{\omega_1} m_1 I_{22}'^2 \frac{R_2'}{s_2} = -m_1 I_{22}'^2 \frac{R_2'}{2-s} \cdot \frac{p}{\omega_1}. \quad (5.80.)$$

Mīnusa zīme šajā izteiksmē norāda, ka slīdes vērtībām  $s_2 > 0$  moments  $M_2$  darbojas pretējā lauka virzienā, tāpēc attiecībā pret momentu  $M_1$  tas ir negatīvs.

Uz mašīnas rotoru darbojas rezultējošais griezes moments

$$M = M_1 + M_2 = \left( m_1 I_{21}'^2 \frac{R_2'}{s} - m_1 I_{22}'^2 \frac{R_2'}{2-s} \right) \frac{p}{\omega_1}. \quad (5.81)$$



5.22. att. Asinhronā dzinēja ekvivalentā shēma pretējās secības strāvām un spriegumiem.

Jāatzīmē, ka bez griezes momentiem  $M_1$  un  $M_2$  pretējās secības strāvu un tiešā lauka, kā arī tiešās secības strāvu un pretējā lauka mijiedarbības rezultātā rodas griezes momentu papildu komponentes. Tās pulsē ar divkārtu frekvenci un, lai arī praktiski neietekmē rotora kustību, tomēr izraisa mašīnas vibrāciju.

Rotora ķēdes parametri  $R'_2$  un  $X'_2$  tiešās un pretējās secības strāvām vispārējā gadījumā nav vienādi, jo šo strāvu frekvences  $f_{21} = sf_1$  un  $f_{22} = (2-s)f_1$  ir dažādas un dažādi ietekmē strāvu virsmas efektu. Šis apstāklis jāņem vērā praktiskajos aprēķinos.

5.23. attēlā parādīta griezes momentu  $M_1$ ,  $M_2$  un  $M$  atkarība no slīdes gadījumā, kad  $U_{12} = 0,5U_{11}$ .

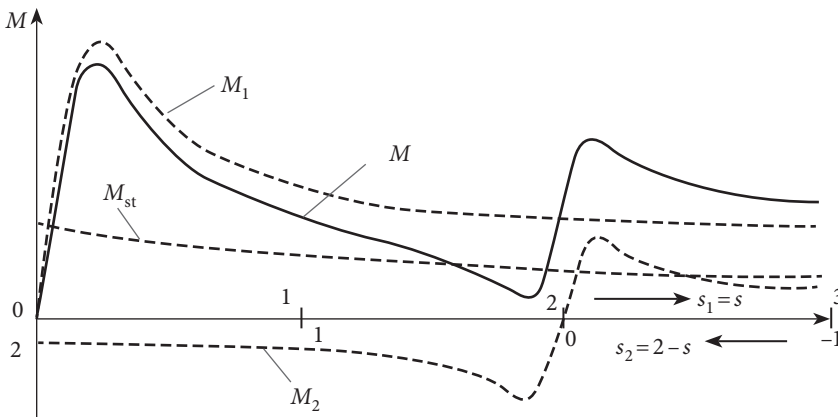
Tā kā dominē tiešās secības moments  $M_1$ , tas arī nosaka mašīnas darba režīmu kopumā. No 5.23. att. redzams, ka pretējās secības strāvu ietekmē rezultējošais griezes moments (arī palaišanas moments) samazinās, slide un zudumi nemainīgam slodzes momentam  $M_{st}$  palielinās. Minētās parādības izskaidrojamas ar to, ka attiecībā pret pretējās secības strāvām un laukiem, ja  $0 < s < 1$ , mašīna darbojas elektromagnētiskās bremzes režīmā ( $1 < s_2 < 2$ ).

No izklāstītā var izdarīt secinājumu, ka pretējās secības strāvas pasliktina asinhrono dzinēju darbības apstākļus. Tāpēc to barošanas sprieguma ilgstoša nesimetrija nav vēlama.

### 5.10.3. Asinhrono dzinēju darbība ar nesimetriju rotora ķēdē

Rotora ķēdes nesimetrija asinhronajos dzinējos var rasties dažādu bojājumu rezultātā, piemēram, slikts kontakts ar fāžu rotora slīdgredzeniem, defekti īsslēgtā rotora stieņos. Dažreiz, lai samazinātu reostatu kontaktu vai kontrolleru skaitu un saglabātu pietiekami lielu dzinēja palaišanas pakāpju skaitu, izmanto nesimetriskus palaišanas reostatus, kuriem pakāpju pārslēgšana dažādās fāzēs nenotiek vienlaikus.

Apskatisim, kā rotora ķēdes nesimetrija ietekmē trīsfāžu asinhronā dzinēja darbību, ja tā statora tinumam pieslēgts simetrisks spriegums  $U_1$ .



5.23. att. Asinhronās mašīnas tiešās secības ( $M_1$ ), pretējās secības ( $M_2$ ) un rezultējošā griezes momenta ( $M$ ) atkarība no slīdes.

Spriegums  $U_1$  uztur statora tinumā tiešās secības strāvu  $I_1 = I_{11}$  ar frekvenci  $f_1$ . Tiešās secības lauks, ko rada šīs strāvas, inducē rotora tinumā EDS  $E_2$  ar frekvenci  $f_2 = sf_1$ . Tā kā rotora tinuma fāžu pretestības ir dažādas, dažādas ir arī tajās plūstošās strāvas. Tās var sadalīt tiešās ( $I_{21}$ ) un pretējās ( $I_{22}$ ) secības strāvās.

Tiešās secības strāvas  $I_{21}$  ar frekvenci  $sf_1$  rada tiešās secības magnētisko lauku, kas rotē sinhroni ar strāvu  $I_{11}$  radīto lauku. Tā rodas rezultējošais tiešās secības lauks. Šī lauka un strāvu  $I_{21}$  mijiedarbības rezultātā rodas tiešās secības griezes moments  $M_1$ , kas ir analogisks momentam simetriskā darba režīmā.

Rotora pretējās secības strāvu  $I_{22}$  frekvence  $f_2$  arī ir vienāda ar  $sf_1$ . Tāpēc šo strāvu radītais lauks attiecībā pret rotoru griežas ar rotācijas frekvenci  $n_{2r} = sn_1$  pretēji rotora tiešajam laukam. Tā kā pats rotors telpā griežas ar rotācijas frekvenci  $n = (1 - s)n_1$ , tad rotora pretējā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret statoru ir:

$$n_2 = n - n_{2r} = (1 - s)n_1 - sn_1 = (1 - 2s)n_1. \quad (5.82.)$$

Šis lauks statora tinumā inducē pretējās secības strāvas  $I_{12}$  ar frekvenci

$$f_{21} = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(1 - 2s)n_1}{60} = (1 - 2s)f_1, \quad (5.83.)$$

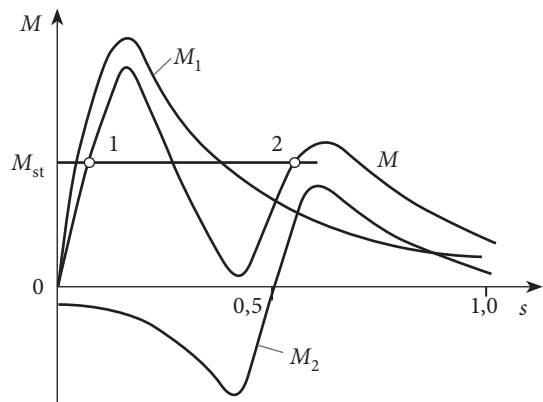
kuras noslēdzas pa statora tinumu caur barošanas tīklu. Tā kā barošanas tīklā nav spriegumu un EDS ar frekvenci  $f_{21}$  un tīkla pretestība salīdzinājumā ar tinuma pretestību ir maza, tad var uzskatīt, ka statora tinums attiecībā pret strāvām  $I_{12}$  ir isslēgts.

Rotora strāvas  $I_{22}$  un statora strāvas  $I_{12}$  rada rezultējošo pretējās secības lauku, kas, savukārt, mijiedarbībā ar rotora strāvām  $I_{22}$  rada pretējās secības griezes momentu  $M_2$ . Rezultējošais moments, kas darbojas uz dzinēja rotoru, veidojas kā momentu  $M_1$  un  $M_2$  summa:

$$M = M_1 + M_2. \quad (5.84.)$$

Ja  $0,5 < s < 1$ , tad saskaņā ar izteiksmi (5.82.)  $n_2 < 0$ , t. i., rezultējošais pretējais magnētiskais lauks attiecībā pret statoru rotē pretēji tiešās secības laukam. Tas nozīmē, ka moments  $M_2$  šajā gadījumā darbojas tiešā virzienā ( $M_2 > 0$ ). Šī parādība ir analogiska gadījumam, kad asinhrono dzinēju baro no rotora puses. Arī tad rotors griežas pretēji lauka rotācijas virzienam. Ja  $0 < s < 0,5$ , tad saskaņā ar izteiksmi (5.82.)  $n_2 > 0$ , t. i., pretējais lauks griežas tiešā virzienā, tāpēc  $M_2 < 0$ . Ja  $s = 0,5$ , tad  $n_2 = 0$  un pretējais lauks attiecībā pret statoru ir nekustīgs. Tāpēc strāvas  $I_{12}$  statora tinumā neinducējas un  $M_2 = 0$ .

5.24. attēlā parādīts momentu  $M_1$ ,



5.24. att. Asinhronā dzinēja momenta atkarība no slīdes, ja rotora ķēdē ir nesimetrija.

$M_2$  un  $M$  izmaiņas raksturs atkarībā no slīdes. Apgabalā, kur  $s \approx 0,5$ , rezultējošais moments strauji samazinās.

Šī iemesla dēļ atkarībā no slodzes momenta  $M_{st}$  dzinēja rotors palaišanas laikā var “iestrēgt” ar rotācijas frekvenci  $n \approx 0,5n_1$  un turpināt strādāt stabilas darbības punktā 2, nesasniedzot normālo rotācijas frekvenci punktā 1. Šajā gadījumā rotora strāvas var sasniegt nepieļaujami lielas vērtības. Ja kāda no rotora fāzēm ir pārtraukta, tad rezultējošais moments  $M$  apgabalā, kur  $s \approx 0,5$ , var kļūt negatīvs, un dzinējs nesasniedz normālo rotācijas frekvenci pat tad, ja to palaiž tukšgaitā.

## 5.11. SPECIĀLAS NOZĪMES ASINHRONĀS MAŠĪNAS

### 5.11.1. Indukcijas regulators un fāzes regulators

**Indukcijas regulators.** Trīsfažu asinhrono mašīnu ar nobremzētu fāžu rotoru var izmantot sprieguma regulēšanai, t. i. to var izmantot kā autotransformatoru, kura sekundāro spriegumu  $U_2$  var nepārtraukti mainīt plašās robežās. Šajā nolūkā trīsfažu mašīnas statora tinumu sākumus un nobremzētā fāžu rotora tinuma galus pievieno tīklam (5.25. att.).

Asinhronā mašīna šajā režīmā būtībā darbojas kā griežtransformators (pagriežamais autotransformators), kurā rotora tinums ir primārais tinums, bet statora un rotora tinums veido sekundāro ķēdi, kurai pievieno patērētājus.

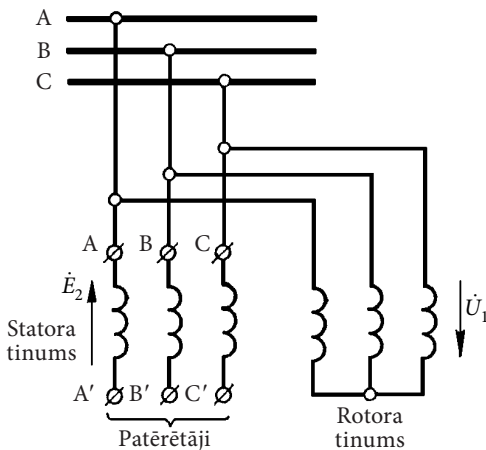
Regulatora primārajā tinumā plūstošās trīsfažu strāvas rada rotējošo magnētisko lauku, kas statora un rotora tinumos inducē EDS  $E_2$  un  $E_1$ , kuru lielums nav atkarīgs no rotora stāvokļa pret statoru, ja tīkla spriegums  $U_1 = const$  un frekvence  $f_1 = const$ .

Tā kā statora tinums ir ieslēgts starp tīklu un patērētājiem, tad, neņemot vērā nelielos sprieguma kritumus statora un rotora tinumos,  $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$  un sekundārais spriegums  $\dot{U}_2$  ir tīkla sprieguma  $\dot{U}_1$  un statora tinumā inducētā EDS  $\dot{E}_2$  ģeometriskā summa:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2. \quad (5.85.)$$

Indukcijas regulatora rotoru pagriežot vienā vai otrā virzienā, mainās fāžu nobīde starp rotora fāzes spriegumu  $\dot{U}_1$  un statora fāzē inducēto EDS  $\dot{E}_2$ . Tādējādi izmainās arī sekundārās puses fāzes spriegums  $\dot{U}_2$  un tā fāze pret  $\dot{U}_1$  (5.26. att.).

No attēla redzams, ka, pagriežot rotoru par leņķi  $\alpha = 360^\circ$  elektriskajiem grādiem, atbilstoši pagriežas vektora  $\dot{E}_2$  galapunksts, aprakstot aploci ar rādiusu  $E_2$ . Tādējādi,



5.25. att. Indukcijas regulatora shēma.

pagriežot rotoru, sekundārās puses fāzes spriegumu  $U_2$  var mainīt no maksimālas vērtības  $U_{2\max} = U_1 + E_2 = 0A_2$  līdz minimālai vērtībai  $U_{2\min} = U_1 - E_2 = 0A_1$ .

Indukcijas regulatora pagriešanai izmanto gliemežpār vadu, kas vienlaicīgi arī nobremzē rotoru.

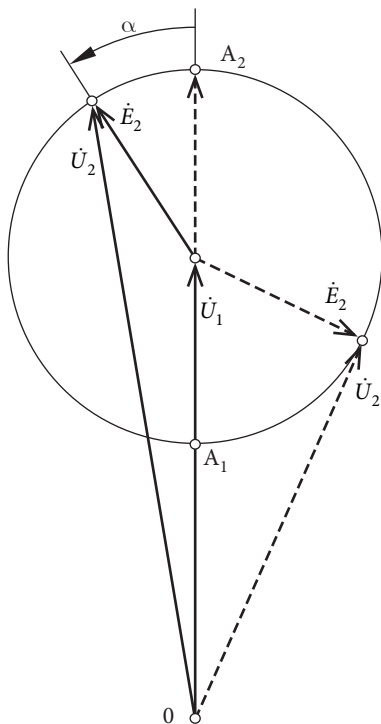
Indukcijas regulatorā, kas izveidots saskaņā ar 5.25. attēlā doto shēmu, mainās ne tikai sekundārā sprieguma skaitliskā vērtība, bet arī tā fāze. Turklāt uz rotora bremsēšanas ierīci darbojas samērā liels griezes moments. Minētos trūkumus var novērst, ja lieto regulatoru, kas sastāv no divām vienādām mašīnām, kas atrodas uz vienas vārpstas un kuru tinumi ir attiecīgi saslēgti. Šādā gadījumā panāk, ka mainās tikai sprieguma  $U_2$  skaitliskā vērtība, bet nemainās tā fāze.

Indukcijas regulatorus plaši lieto laboratorijās, kā arī elektriskajos tīklos.

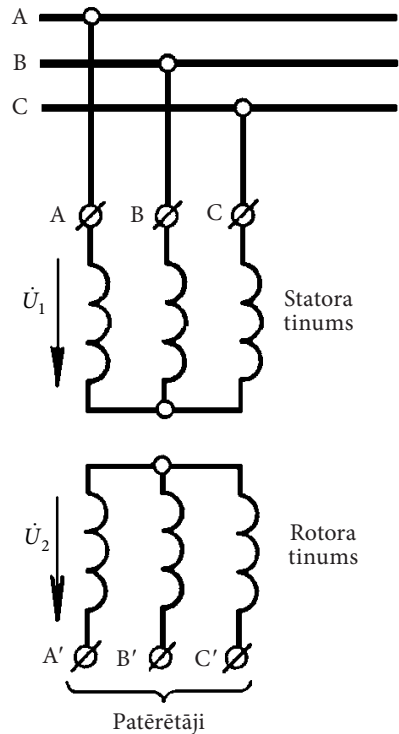
**Fāzes regulators.** Trīsfāžu asinhrono mašīnu ar nobremzētu rotoru var izmantot arī, lai izmainītu sekundārā sprieguma fāzi pret primāro spriegumu, neizmainot sekundārā sprieguma skaitlisko vērtību.

Fāzes regulatora statora tinumu pieslēdz maiņstrāvas tīklam, bet nobremzētā rotora tinumi baro patērētājus (5.27. att.).

Statora tinuma strāvas rada rotējošo magnētisko lauku, kurš statora un rotora fāzēs inducē EDS  $E_1$  un  $E_2$ . Rotoru pagriežot par kādu leņķi, EDS  $E_2$  skaitliskā vērtība neizmainās,



5.26. att. Indukcijas regulatora spriegumu vektoru diagramma.



5.27. att. Fāzes regulatora shēma.



bet mainās tā fāze pret primāro (statora) fāzes spriegumu  $U_1$ . Rotoru pagriežot, fāzes leņķi var mainīt robežās no  $0^\circ$  līdz  $360^\circ$ .

Fāzes regulatora rotora pagriešanas ierīce ir tāda pati kā indukcijas regulatoram.

Fāzes regulatorus galvenokārt izmanto laboratorijās.

### 5.11.2. Asinhronais frekvences pārveidotājs

Asinhronais frekvences pārveidotājs (5.28. att.) sastāv no trīsfāžu asinhronās mašīnas AM ar fāžu rotoru un dzinēja D, kurš mehāniski savienots ar AM vārpstu. Viens no asinhronās mašīnas tinumiem, piemēram, statora tinums pieslēgts tīklam ar frekvenci  $f_1$ , bet sekundārais tinums baro tīklu ar frekvenci  $f_2$ .

Asinhronā mašīna AM darbojas elektromagnētiskās bremzes režīmā, kad  $s > 1$  un  $f_2 > f_1$  vai dzinēja režīmā, kad  $s < 1$  un  $f_2 < f_1$ . Dzinēja režīmā AM rotors griežas lauka virzienā, bet bremzes režīmā – pret lauku. Ģenerators režīmu frekvences pārveidotājā parasti neizmanto.

Ja neņem vērā zudumus, asinhronās mašīnas primārā jauda  $P_1$ , ko tā uzņem no tīkla, ir vienāda ar elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$

$$P_1 = P_{em}, \quad (5.86.)$$

bet rotora ķēdē izdalītā jauda

$$P_2 = sP_{em} = sP_1. \quad (5.87.)$$

Mehāniskā jauda, ko attīsta dzinējs D

$$P_{meh} = P_2 - P_1 = (s-1)P_1. \quad (5.88.)$$

Ja  $s > 1$  un  $f_2 > f_1$ , dzinējs D darbojas dzinēja režīmā un  $P_{meh} > 0$ , bet ja  $s < 0$  dzinējs D īstenībā darbojas ģenerators režīmā un  $P_{meh} < 0$ .

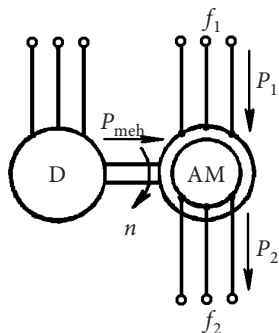
Parasti par dzinēju D izmanto īsslēgtu asinhrono dzinēju. Ja frekvenci  $f_2$  nepieciešams regulēt, tad īsslēgta asinhronā dzinēja vietā var izmantot līdzstrāvas dzinēju ar regulējamu rotācijas frekvenci. Ja  $f_2 < f_1$ , tad  $P_2 > P_1$  un kontaktgredzenu un suku darbības atvieglošanai par primāro tinumu ar frekvenci  $f_1$  var izvēlēties rotora tinumu.

Vienkāršākajā gadījumā, kad frekvenci  $f_2$  neregulē, asinhrono vai sinhrono dzinēju D un AM primāro tinumu baro no kopēja tīkla ar frekvenci  $f_1$ .

Ja neievēro dzinēja D slīdi ( $s_D = 0$ ), tad tā un visa agregāta rotācijas frekvence

$$n = \pm \frac{f_1}{p_D}, \quad (5.89.)$$

kur  $p_D$  – dzinēja polu pāru skaits, turklāt plusa zīme atbilst AM dzinēja un ģenerators režīmam, bet mīnusa zīme – elektromagnētiskās bremzes režīmam.



5.28. att. Asinhronā frekvences pārveidotāja shēma.

Ja asinhronās mašīnas polu pāru skaits ir  $p_{AM}$ , tad tās magnētiskā lauka rotācijas frekvence

$$n = \frac{f_1}{p_{AM}}, \quad (5.90.)$$

rotora slīde

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{p_D \mp p_{AM}}{p_D}, \quad (5.91.)$$

un sekundārā sprieguma frekvence

$$f_2 = sf_1 = \frac{(p_D \mp p_{AM})f_1}{p_D}. \quad (5.92.)$$

Ja  $s < 0$ , tad  $P_1 < 0$ ,  $P_D > 0$ . tas nozīmē, ka asinhronā mašīna AM darbojas ģenerators režīmā, bet dzinējs D – dzinēja režīmā. Šāds režīms iespējams, ja  $p_D < p_{AM}$ . Turklāt atkarībā no  $p_D$  un  $p_{AM}$  attiecības frekvenci var paaugstināt ( $f_2 > f_1$ ) vai pazemināt ( $f_2 < f_1$ ).

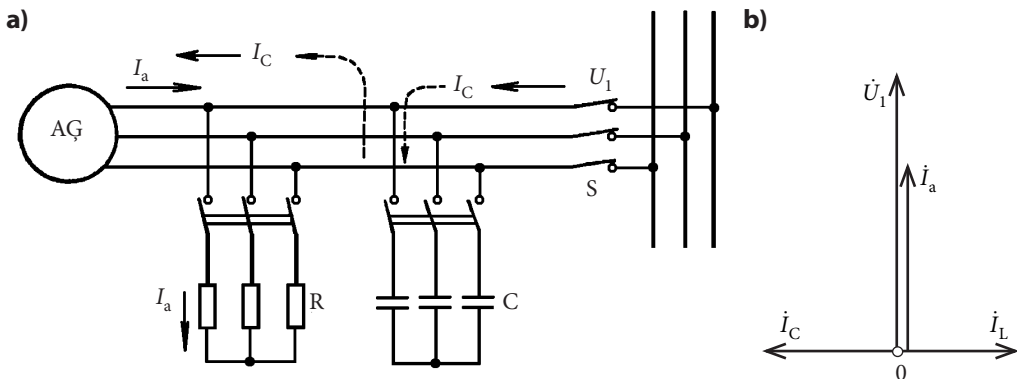
Asinhronos frekvences pārveidotājus parasti izmanto rūpnieciskas frekvences paaugstināšanai līdz dažiem simtiem Hz.

### 5.11.3. Asinhronais ģenerators ar pašierosmi

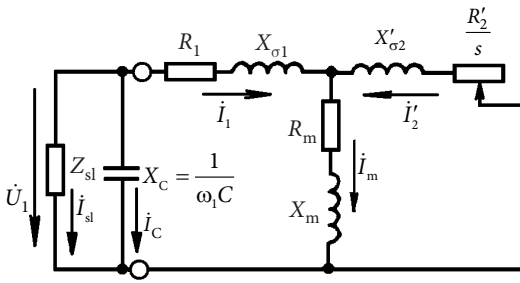
Asinhronās mašīnas darbības iespējas ģenerators režīmā tika aplūkotas 5.1. apakšnodaļā. Asinhronais ģenerators patērē reaktīvu strāvu magnētiskā lauka radišanai. Tāpēc tas var darboties tikai paralēli ar maiņstrāvas tīklu, kurā ir reaktīvās jaudas avoti, piemēram, sinhronie ģeneratori. Tanī pat laikā asinhronais ģenerators var darboties autonomi, ja tā spailēm pieslēdz kondensatoru bateriju (5.29. att.)

Ja 5.29. att. parādītajā shēmā asinhronais ģenerators AĢ darbojas paralēli ar tīklu, tas patērē induktīvu strāvu  $I_L$  magnētiskā lauka radišanai. Tanī pat laikā aktīvo strāvu  $I_a$  patērē slodze R. Pieslēgsim ģenerators spailēm kondensatorus ar tādu kopējo kapacitāti C lai to patērētā kapacitīvā strāva  $I_C$  būtu vienāda ar strāvu  $I_L$ . Acīmredzot ka patērētā no tīkla reaktīvā strāva būs vienāda ar nulli

$$I_C + I_L = 0. \quad (5.93.)$$



5.29. att. Asinhronā ģenerators shēma (a) un vektoru diagramma (b).



5.30. att. Pašierosmes asinhronā ģenerators ekvivalentā shēma.

atdod asinhronajam ģeneratoram induktīvu strāvu” ir identiski.

No teiktā izriet, ka aktīvas slodzes gadījumā kondensatoru baterijas jaudai jābūt vienādai ar ģenerators reaktīvo (magnetizēšanas) jaudu. Ja slodzei būs jaukts raksturs, piemēram, aktīvi induktīvs, kondensatoru baterijas jauda attiecīgi jāpalielina, lai nosegtu arī slodzes reaktīvo jaudu. Ja slodzei ir aktīvi kapacitīvs raksturs, nepieciešama mazākas jaudas kondensatoru baterija, bet noteiktos apstākļos tā nav nepieciešama.

Pašierosmes asinhronā ģenerators ekvivalentā shēma parādīta 5.30. attēlā. Ģenerators darbojas uz slodzi  $Z_{sl}$ .

Izmantojot ekvivalento shēmu, var aprēķināt visus ģenerators režīmus raksturojošos lielumus. No reaktīvās jaudas balansa, ņemot vērā induktīvās pretestības  $X_{\sigma 1}$ ,  $X_{\sigma 2}$  un  $X_m$ , var noteikt kondensatoru baterijas jaudu un kapacitāti.

#### 5.11.4. Vadāms asinhronais dzinējs

Vadāmus asinhronos dzinējus plaši izmanto automātiskās vadības sistēmās elektrisko signālu pārveidošanai atbilstošā mehāniskā kustībā. Tie ir nelielas jaudas (0,1–300 W) dzinēji ar divfāžu statora tinumu un īsslēgtu rotoru. Viens statora tinums, ko sauc par ierosmes tinumu, pastāvīgi tiek pieslēgts maiņstrāvas barošanas avotam. Uz otru (vadības tinumu) tiek padots vadības spriegums  $U_v$ , kura skaitliskā vērtība vai fāze ir atkarīga no vadības signāla. Attiecīgi izšķir amplitūdas un fāzes vadību. Abos gadījumos ierosmes un vadības spriegumi nobīdīti fāzē, tāpēc dzinējs var attīstīt griezes momentu.

Vadāmu asinhrono dzinēju darbības princips ir tāds pats kā parastajiem asinhronajiem dzinējiem ar īsslēgtu rotoru (sk. 5.9. apakšnodaļu).

Vadāmu dzinēju specifika saistīta ar daudzām īpašām prasībām: vadāmam dzinējam nav pieļaujama paātrums (rotora rotācija pēc vadības signāla pārtraukšanas), tā darbībai jābūt stabilai visā griešanās ātruma diapazonā, palaišanas momentam jābūt lielam un vadības jaudai – mazai, mehāniskajām  $M=f(n)$  un regulēšanas  $n=f(U_v)$  raksturlielņiem jābūt lineārām, jānodrošina vajadzīgā ātrdarbība utt.

Vadāmus dzinējus izveido tā, lai riņķveida rotējošo lauku iegūtu palaišanas brīdī. Tas nodrošina lielus palaišanas momentus. Stabils darbs un lineāras raksturlielnes, vienlaikus novēršot paātrumu, tiek nodrošinātas, izvēloties tik lielu rotora aktīvo pretestību, ka

un slēdzi S var atslēgt. Ģenerators darbojas autonomi uz slodzi R un kondensatoru bateriju. Tā kā ģenerators turpina darboties un no vienas puses patērē strāvu  $I_L$ , bet no otras puses kondensatoru baterija patērē strāvu  $I_C$ , var secināt, ka reaktīvās magnetizēšanas strāvas avots tagad ir kondensatoru baterija un iepriekš lietotie jēdzieni “kondensatoru baterija patērē kapacitīvu strāvu” un

kritiskā slīde sasniedz  $s_{kr} = 3-4$ . Tādam gadījumam atbilstošās tiešās secības momenta  $M_1$  un pretējās secības momenta  $M_2$  liknes parādītas 5.31. attēlā. No attēla redzams, ka, noņemot vadības signālu, kad tiešās un pretējās secības strāvas ir vienādas, rezultējošais moments  $M = M_1 + M_2$  slīdes diapazonā  $0 < s < 1$  kļūst negatīvs un tāpēc vadāms dzinējs, ja  $U_v = 0$ , atšķirībā no parastā asinhronā dzinēja vienfāzes režīmā (sk. 5.9. apakšnodaļu) apstājas. Jāatzīmē, ka vadāma dzinēja pretestības palielināšana noved pie tā nominālās jaudas samazināšanās 2–3 reizes.

Vadāmi asinhronie dzinēji atkarībā no rotora konstruktīvā izveidojuma ir:

- ar dobu nemagnētisku rotoru;
- ar dobu feromagnētisku rotoru;
- ar parasto īsslēgtu rotoru.

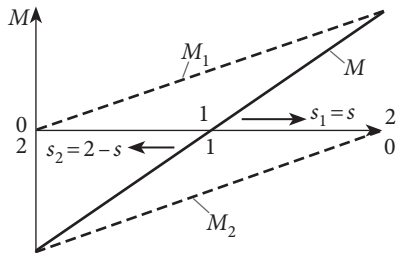
Dzinējā ar dobu nemagnētisku rotoru (5.32. att.) ir šīhtēts ārējais un iekšējais stators, starp kuriem rotē plānsienu rotors, kas izgatavots no alumīnija sakausējuma. Divfāžu tinumu parasti izvieto uz ārējā statora. Dzinējā ar feromagnētisku rotoru nav iekšējā statora, jo magnētvasda lomu izpilda pats rotors.

Dzinējiem ar dobu nemagnētisku rotoru ir augsta ātrdarbība. Tomēr relatīvi lielā nemagnētiskā sprauga starp ārējo un iekšējo statoru būtiski samazina tā jaudas un lietderības koeficientu.

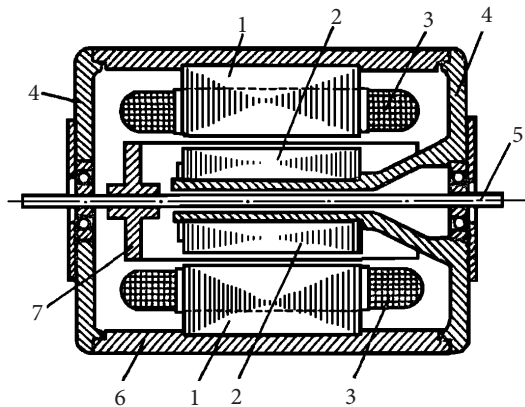
Sakarā ar palielināto rotora aktīvo pretestību dzinējiem ar dobu feromagnētisku rotoru to lietderības koeficients ir vēl zemāks nekā iepriekš minētajiem vadāmiem dzinējiem.

Visbiežāk izmanto vadāmus dzinējus ar īsslēgtu un dobu nemagnētisku rotoru.

Automātiskās vadības sistēmās izmanto arī tādus vadāmus dzinējus, kuru uzdevums ir radīt griezes momentu nobremzētā stāvoklī, pagriežoties par zināmu leņķi vai lēni griežoties. Šādus dzinējus sauc par momentdzinējiem. To attīstītais moments arī ir atkarīgs no vadības signāla.



5.31. att. Vadāma asinhronā dzinēja momentu liknes, ja  $U_v = 0$ .



5.32. att. Vadāma asinhronā dzinēja ar dobu nemagnētisku rotoru konstruktīvais izveidojums: 1 – ārējais stators; 2 – iekšējais stators; 3 – tinums; 4 – gultņu vairogis; 5 – vārpsta; 6 – korpusis; 7 – dobs rotors.

### 5.11.5. Asinhronie dzinēji ar masīvu rotoru

Asinhrono mašīnu var izgatavot arī ar masīvu tērauda rotoru. Šādā gadījumā rotora tinuma lomu pilda pats masīvais rotors, kurā griežlauks inducē strāvas.

Masīvajam rotoram ir lielas priekšrocības no stiprības viedokļa. Tāpēc asinhronos dzinējus, kas paredzēti augtām rotācijas frekvencēm ( $10\,000\text{--}100\,000\text{ min}^{-1}$ ), izgatavo ar masīvu rotoru. Parasti to barošanai izmanto maiņstrāvu ar  $400\text{--}1000\text{ Hz}$  frekvenci.

Masīvā rotora aktīvā un induktīvā izkliedes pretestība sakarā ar stipri izteikto virsmas efektu ir atkarīga no slīdes. Tā palaišanas brīdī ( $s = 1$ ), ja tīkla frekvence  $f_1 = 50\text{ Hz}$ , strāva plūst tikai aptuveni  $3\text{ mm}$  dziļumā, bet, ja  $s = 0,02$  – aptuveni  $20\text{ mm}$  dziļumā. Tāpēc palaišanas brīdī rotora aktīvā pretestība ir liela, bet induktīvā maza. Šis apstākļi nodrošina dzinējiem ar masīvu rotoru samērā lielus palaišanas momentus. Tomēr mazas un vidējas jaudas dzinējiem ar masīvu rotoru, ja  $f_1 = 50\text{ Hz}$ , ir zems lietderības un jaudas koeficients. Palielinoties ģeometriskajiem izmēriem un nominālajai rotācijas frekvencei dzinēja raksturlienes uzlabojas.

Nelielas jaudas dzinējos ar augstu rotācijas frekvenci, lai uzlabotu darba raksturlienes, dažreiz rotora virsmu pārklāj ar varu. Tādos pašos nolūkos masīvā rotora galos piestiprina vara gredzenus, kas pilda tādas pašas funkcijas kā gredzeni išslēgtajā rotorā. Dažreiz uz cilindriskā rotora virsmas izveido rievās (bez tinumu ievietošanas). Tas palielina darba virsmu, pa kuru plūst strāva. Iepriekš minētie pasākumi vērsti uz rotora aktīvās pretestības samazināšanu.

### 5.11.6. Griežtransformatori

Griežtransformatorus izmanto automātikas sistēmās un skaitļošanas tehnikā, lai iegūtu izejas spriegumu, kura skaitliskā vērtība mainās proporcionāli rotora pagriešanās leņķim  $\alpha$ , vai proporcionāli šī leņķa sinusam vai kosinusam.

Griežtransformators konstruktīvi izveidots tāpat kā asinhronais dzinējs ar fāžu rotoru. Statorā un rotorā izvietoti divfāžu simetriski tinumi, kas nobīdīti telpā par  $90^\circ$  elektriskajiem grādiem (5.33. att.). Rotorā tinumu gali ir pievienoti uz vārpstas nostiprinātiem kontaktgredzeniem, kuriem piespiestās metāla suku savienotas ar griežtransformatora nekustīgajām spailēm. Ja griežtransformatora rotora pagriešanas leņķis ir ierobežots, tad kontaktgredzenu un suku vietā rotora tinumus pievieno nekustīgajām spailēm ar elastīgiem vadiem.

Tā kā tinumi nobīdīti telpā par  $90^\circ$ , savstarpējā induktivitāte starp statora tinumu un rotora tinumu fāzēm ir vienāda ar nulli. Tanī pat laikā savstarpējai induktivitātei starp statora un rotora tinumu fāzēm jāmainās atkarībā no leņķa  $\alpha$  pēc sinusa likuma. Tāpēc griežtransformatoros cenšas magnētiskā lauka sadalījumu tuvināt sinusoidālam un samazināt EDS augstākās harmonikas. Šajā ziņā precizitātes prasības ir visai augstas un bieži vien pieļaujamā kļūda, īstenojot  $\sin\alpha$  un  $\cos\alpha$  funkcijas, nepārsniedz  $0,02\text{--}0,03\%$ .

Statora vienu tinumu, kuru pievieno vienfāzes maiņstrāvas tīklam (5.33. att.), sauc par ierosmes tinumu ( $I_e$ ). Šī tinuma radītā plūsma inducē abos rotora tinumos EDS:

S tinumā inducētais EDS ir proporcionāls  $\sin \alpha$ , bet C tinumā proporcionāls  $\cos \alpha$ .

Pieslēdzot vienam vai abiem rotora tinumiem slodzi, tajos plūdis strāva, radot sekundāro magnētisko lauku. Šī lauka inducētie EDS var izkropļot sekundāro spriegumu sinusoidālās funkcijas. Lai to novērstu, sekundārajās ķēdēs jāieslēdz vienādas slodzes pretestības  $Z_{slS}$  un  $Z_{slC}$  vai arī jāpieslēdz statora tinumam K tādu pretestību  $Z_K$ , kura ir vienāda ar ierosmes tinuma barošanas avota iekšējo pretestību. Tādā gadījumā tinumā K inducētā strāva kompensē sekundāro magnētisko plūsmu. Iepriekš minētos pasākumus sauc attiecīgi par sekundāro un primāro simetrēšanu.

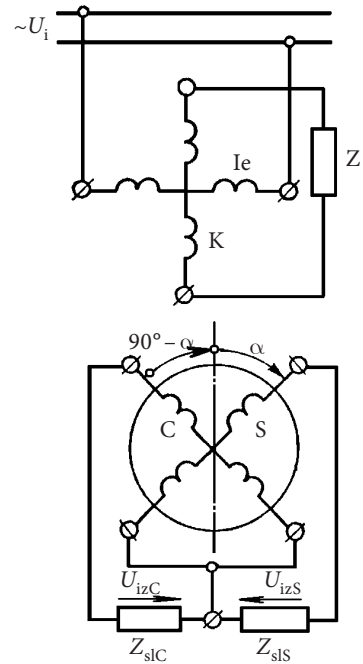
Lineārā griežtransformatora izejas spriegums mainās proporcionāli tā vārpstas pagriešanās leņķim  $\alpha$ . To panāk, saslēdzot virknē statora ierosmes (vai kompensācijas tinumu) ar vienu rotora tinumu. Viena no iespējamām lineārā transformatora slēguma shēmām parādīta 5.34. attēlā. Griežtransformatoros iespējams nodrošināt lineāru sakarību  $U_{iz} = f(\alpha)$  ar precizitāti līdz 0,1 % no maksimālās vērtības leņķa  $\alpha$  diapazonā no  $-60^\circ$  līdz  $+60^\circ$ .

Griežtransformatorus izmanto arī ģeometrisku un trigonometrisku uzdevumu atrisināšanai; piemēram, lai noteiktu taisleņķa trīsstūra hipotenūzu un leņķi starp to un vienu no katetēm, ja dotas to skaitliskās vērtības. Analogiski var atrast vektoru, ja dotas tā komponentes un otrādi. Griežtransformatora izejas spriegumi tiek padoti uz automātiskās regulēšanas sistēmu ieejas elementiem.

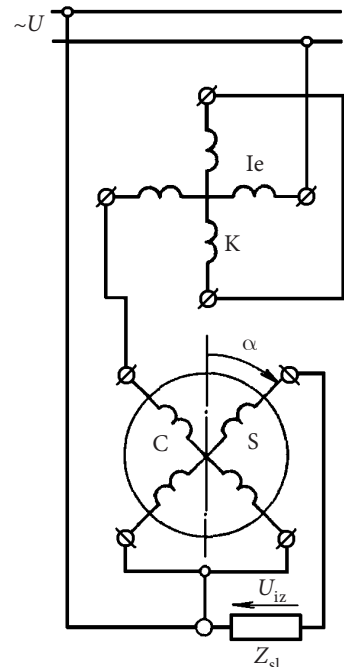
### 5.11.7. Selsini

Selsinus lieto sinhrono sakaru sistēmās, lai nodrošinātu mehāniski nesaistītu mehānismu vai aparātu vārpstu vienlaicīgu pagriešanos par vienu un to pašu leņķi vai to sinhronu rotāciju.

Visbiežāk izmanto vienfāzes selsinus, kuru statorā uz izvirzītiem poliem novietots vienfāzes ierosmes tinums, bet uz rotora trīsfāžu sinhronizācijas



5.33. att. Sinusa – kosinusa griežtransformatora shēma.



5.34. att. Lineārā griežtransformatora slēguma shēma.

tinumi, kuru gali pievienoti trim kontaktgredzeniem ar sukām. Izmanto arī bezkontakta selsinus, kuru rotoram nav tinumu. To konstrukcija ir līdzīga kā sinhronajām mašīnām ar ķetnveida poliem.

Kontaktu un bezkontakta selsinu darbības principi ir vienādi.

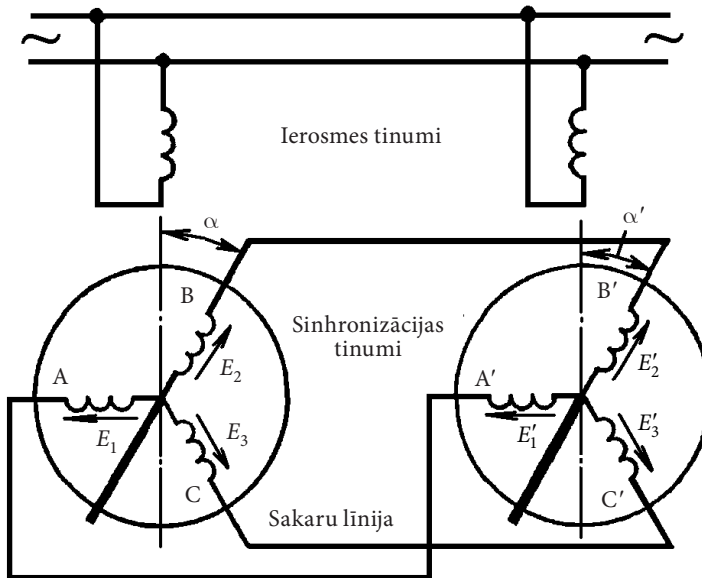
Ja nekustīgo vienfāzes ierosmes tinumu pieslēdz vienfāzes maiņstrāvas tīklam, tad magnētiskajā ķēdē rodas pulsējoša magnētiskā plūsma, kas sinhronizācijas tinuma katrā fāzē inducē EDS  $E_1, E_2$  un  $E_3$ . Šo EDS efektīvās vērtības ir dažādas un atkarīgas no katras fāzes ass stāvokļa pret ierosmes tinuma asi: ja ass sakrīt, EDS ir maksimāla vērtība, bet ja ass ir perpendikulāras, EDS vienāds ar nulli. Griežot rotoru attiecībā pret nekustīgo statora ierosmes tinumu, sinhronizācijas tinuma fāzēs inducētie EDS arī nepārtraukti mainās, citiem vārdiem sakot, katram rotora stāvoklim atbilst noteikta lieluma  $E_1, E_2$  un  $E_3$ .

Mehānisma vārpstas pagriezienu leņķi var pārvadīt attālumā, izmantojot divus vienādus selsinus, kuri savienoti ar sakaru līniju (5.35. att.).

Sinhronizācijas tinumi nobīdīti savā starpā par  $120^\circ$  un ir analogiski asinhronajai mašīnai ar fāžu rotoru.

Ja mehānisms pagriež devēselsina rotoru par pārvadāmo leņķi  $\alpha$ , tad otra selsna uztvērēja rotors pagriežas par leņķi  $\alpha'$ , kas praktiski vienāds ar leņķi  $\alpha$ . Abu rotoru sinhrono pagriešanos nodrošina sinhronizācijas tinumi.

Ja abu selsinu sinhronizācijas tinumu fāzes pret saviem ierosmes tinumiem novietotas vienādi, tad, abus ierosmes tinumus pieslēdzot kopīgam vienfāzes maiņstrāvas tīklam, abu selsinu sinhronizācijas tinumu attiecīgajās fāzēs inducēsies pilnīgi vienādi pretēju virzienu EDS ( $\dot{E}_1 = -\dot{E}'_1; \dot{E}_2 = -\dot{E}'_2; \dot{E}_3 = -\dot{E}'_3$ ). Tādēļ sakaru līnijā strāva neplūdis un selsini atrodas saskaņotā stāvoklī.



5.35. att. Selsinu indikatora režīma shēma.

Ja mehānisms pagriež devēselsina rotoru no saskaņota stāvokļa par kādu leņķi  $\alpha$ , tad izmainās devēja EDS  $E_1, E_2, E_3$  un abu selsinu EDS līdzsvars izjūk. Tāpēc sakaru līnijā parādās strāvas. Sinhronizācijas tinumu fāzēs plūstošo strāvu mijiedarbība ar selsina ierosmes tinuma izsaukto magnētisko plūsmu rada sinhronizējošo momentu, kas uztvērēja rotoru pagriež tā, lai tas nonāktu saskaņotā stāvoklī ar devēja rotoru. Tad EDS līdzsvarojas un strāvas sinhronizācijas tinumu fāzēs neplūst. Sinhronizējošais moments ir proporcionāls nesaskaņotības leņķa  $\theta = \alpha - \alpha'$  sinusam.

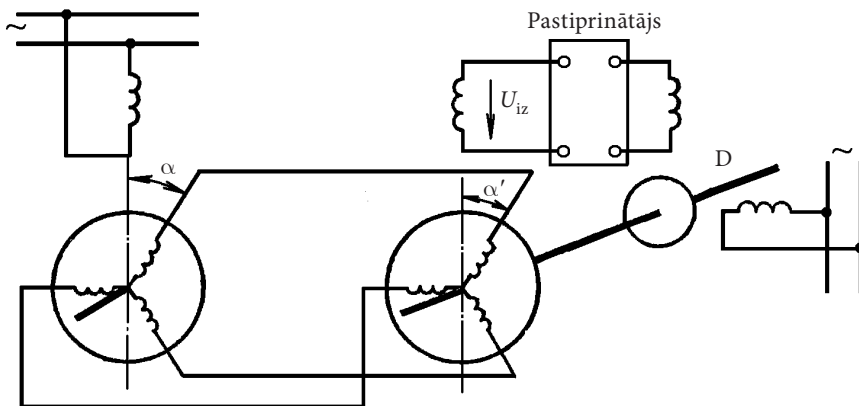
Tā kā uztvērējselsins nav savienots ar izpildmehānismu, bet pagrieziena leņķi  $\alpha'$  var uzrādīt tikai tā rotora vārpstai pierīkots rādītājs, šādu selsina darba režīmu sauc par indikatora režīmu.

Jutīgāko selsinu kļūdas indikatoru režīmā nepārsniedz  $0,25-0,75^\circ$ . Selsinus var izmantot arī mehānisma vārpstas pagrieziena leņķa  $\alpha$  pārveidošanai uztvērējselsina ierosmes inducētajā elektrodzinējspēkā. Šādu selsinu slēguma shēmu sauc par transformatora režīma shēmu (5.36. att.). Uztvērēja rotoru nostiprina noteiktā stāvoklī. Vienfāzes maiņstrāvai pievieno tikai devēja ierosmes tinumu, bet uztvērēja ierosmes tinumam pievieno pastiprinātāju. Ja mehānisms devēja rotoru pagriež par leņķi  $\alpha$ , tad devēja sinhronizācijas tinumu fāzēs inducētie EDS  $E_1, E_2$  un  $E_3$  uztur strāvas uztvērēja sinhronizācijas tinuma fāzēs, radot pulsējošu magnētisko plūsmu. Šī plūsmas inducē uztvērēja ierosmes tinumā sinusoidālu izejas EDS  $E_{iz} = E_{izm} \sin \theta$ , kura skaitliskā vērtība ir viennozīmīgi atkarīga no devēja vārpstas pagriešanās leņķa  $\alpha$ . Saskaņotā selsinu stāvoklī transformatora režīmā  $E_{iz} = 0$  un  $U_{iz} = 0$ .

Transformatora režīmā uztvērēja izejas spriegumu  $U_{iz}$  pievada pastiprinātājam. Pēdējais baro vadības tinumu dzinējā D, kas pagriež par leņķi  $\alpha$  vārpstu, kura nav mehāniski saistīta ar primārā mehānisma vārpstu. Te nepieciešams liels griezes moments.

Selsins uztvērējs transformatora režīmā neattīsta griezes momentu.

Vienfāzes selsinus transformatora režīmā izmanto automātiskās regulēšanas sistēmās (sekošanas sistēmas), kuras nepārtraukti seko kāda fizikālā lieluma izmaiņām un atkarībā no tām izpilda dažādas operācijas.



5.36. att. Selsinu transformatora režīma shēma.



### 5.11.8. Lineārie asinhronie dzinēji

Lineārā asinhronā dzinēja darbības principu var paskaidrot, izejot no parastās asinhronās mašīnas ar rotējošu rotoru (5.37. a att.). Ja šāda dzinēja statoru “pārgriež” ass plaknē un iztaiso tā, lai tas veidotu loku  $\alpha$  (5.37. b att.), tad rotora diametrs palielinās un iegūstam asinhrono dzinēju ar loka statoru. Ģriežlauka rotācijas frekvenci šajā gadījumā var aprēķināt no formulas

$$n'_1 = n_1 \frac{\alpha}{2\pi}, \quad (5.94.)$$

kur  $n_1 = 60f_1/p$  – parastā asinhronā dzinēja griežlauka rotācijas frekvence.

Parastajā asinhronajā dzinējā stators pilnībā aptver rotoru un  $\alpha = 360^\circ$ .

No formulas (5.94.) redzams, ka, samazinot leņķi  $\alpha$ , var iegūt dzinēju ar jebkuru griežlauka rotācijas frekvenci  $n'_1 < n_1$ . Tādējādi var iegūt dzinēju ar nelielu rotācijas frekvenci bez mehāniska reduktora.

Ja “pārgrieztu” statoru pilnībā iztaiso ( $\alpha = 0^\circ$ ) (5.37. c att.), iegūstam lineāro asinhrono dzinēju.

Lineārā asinhronā dzinēja principiālā atšķirība no parastā dzinēja ar rotējošu rotoru ir tāda, ka tā primārais elements (induktors) rada nevis rotējošu magnētisko lauku, bet skrejošu magnētisko lauku. Šāda dzinēja kustīgo daļu (sekundāro elementu) sauc par slīdni. Sekundārais elements var būt ar īsslēgtu tinumu vai bez tā.

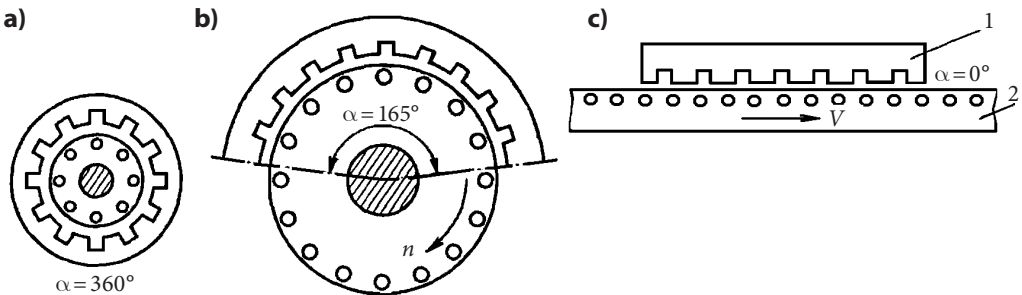
Lineārā dzinēja skrejoša lauka ātrumu  $V_1$  var aprēķināt šādi:

$$V_1 = 2\tau f_1, \quad (5.95)$$

kur  $f_1$  – strāvas frekvence statora tinumā;

$\tau$  – pola iedaļas garums.

Lineārā asinhronā dzinēja darbības princips ir tāds pats kā parastā tipa asinhronajam dzinējam ar īsslēgtu rotoru. Skrejošais magnētiskais lauks, kas pārvietojas telpā ar ātrumu  $V_1$ , inducē slīdņa īsslēgtajā tinumā strāvu. Šīs strāvas un skrejošā magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā uz slīdni darbojas elektromagnētiskie spēki, kuri to pārvieto lauka kustības virzienā ar ātrumu  $V < V_1$ .



5.37. att. Parastais asinhronais dzinējs (a), ar lokveida statoru (b) un lineārais dzinējs (c): 1 – induktors; 2 – sekundārais elements (slīdnis).

Lineārā dzinēja slīdni var izveidot arī kā masīvu tērauda var cita metāla ķermeni bez tinuma. Elektromagnētiskie spēki tādā gadījumā rodas magnētiskā lauka masīvajā slīdnī inducēto virpuļstrāvu mijiedarbības rezultātā.

Elektromagnētiskais spēks, kas rodas lineārajā dzinējā, ir proporcionāls plūsmas spraugā starp statoru un slīdni, strāvai slīdnī un leņķa kosinusam starp minētajiem lielumiem.

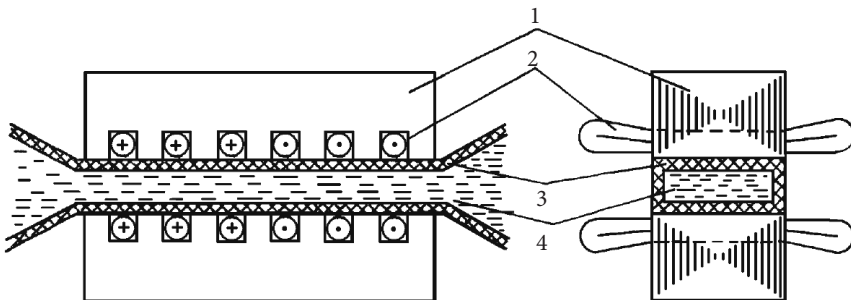
Asinhronajos lineāros dzinējos par kustīgo daļu var kalpot gan induktors, gan sekundārais elements (slīdnis).

Jāatzīmē lineāro dzinēju galvenais trūkums, kuru nosaka tā saucamais gala efekts, kuru savukārt nosaka statora (induktora) nenoslēgtā konstrukcija. Šī parādība jūtami pasliktina dzinēju enerģētiskos rādītājus.

Lineāros asinhronos dzinējus lieto tādu mehānismu elektropiedziņai, kuri darbojas virzes kustībā (aizbīdņi, celtņu mehānismi, lentes konveijeri, virzuļi u.tml.). Lielākas jaudas lineāros dzinējus lieto arī par vilces dzinējiem elektrotransportā. Šajā gadījumā par darba ķermeni izmanto nekustīgu sliedi vai metālisku ceļa klātņi, bet statoru novieto nekustīgajā sastāvā. Nelielas jaudas lineāros dzinējus izmanto aviācijā, kuģos, mehāniskajos robotos u. c.

Pēc sava darbības principa līdzīgs lineārajam asinhronajam dzinējam ir indukcijas tipa elektromagnētiskais sūknis, kas ir viens no magnetohidrodinamisko mašīnu paveidiem. Elektromagnētiskais sūknis no lineārā dzinēja atšķiras ar to, ka darba ķermenis tajā ir šķidrums, kas elektromagnētisko spēku ietekmē pārvietojas pa kanālu starp divpusīga statora divām daļām (5.38. att.)

Elektromagnētiskos sūkņus lieto šķidra metāla transportēšanai, kodolreaktoru dzesēšanai ar šķidru metālu (nātrijs, kālijs un to sakausējumi), metalurģijā, kā arī dažādās tehnoloģiskajās iekārtās (maisītāji, separatori šķidrums plūsmas regulatori u. tml.).



5.38. att. Elektromagnētiskā sūkņa uzbūve: 1 – statora serde; 2 – statora tinums; 3 – kanāls; 4 – šķidrums metāls.

### 5.11.9. Asinhronie taĥogeneratori

Asinhronie taĥogeneratori pēc konstruktīvā izveidojuma ir līdzīgi asinhronajiem vadāmiem dzinējiem ar dobu nemagnētisku rotoru.

Taĥogeneratora ārējā statora rievās novietots ierosmes tinums (5.39. att.), kuru pieslēdz nemainīgas frekvences spriegumam  $U_1 = const$  (5.40. att.).

Iekšējā statora rievās ievietots izejas (ģenerators) tinums, no kura spailēm noņem taĥogeneratora izejas spriegumu  $U_{iz}$ . Par slodzes pretestību  $Z_{sl}$  parasti kalpo mēraparāta iekšējā pretestība. Ierosmes un izejas tinumu asi veido  $90^\circ$  leņķi.

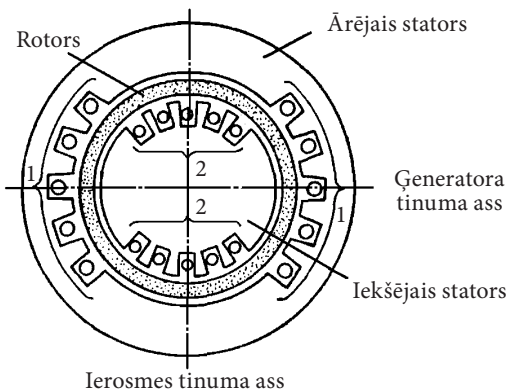
Dobo rotoru, kas izgatavots no materiāla ar lielu īpatnējo pretestību un mazu pretestības temperatūras koeficientu (fosforbronzā vai manganīns) griež tā mehāniskā ierīce, kuras rotācijas frekvenci nepieciešams noteikt.

Pieslēdzot ierosmes tinumu tīkla spriegumam  $U_1$ , tajā plūst maiņstrāva, kas rada pulsējošu ierosmes plūsmu  $\Phi_1$ . Plūsmas amplitūda atkarīga no sprieguma  $U_1$  skaitliskās vērtības.

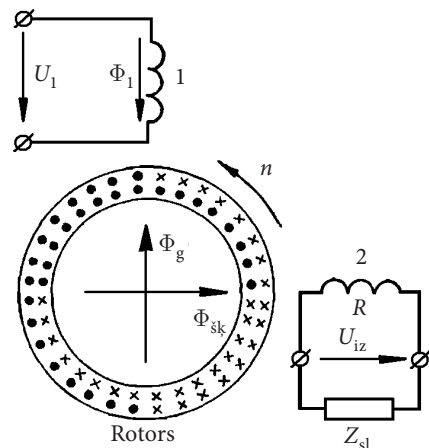
Ja rotors ir nekustīgs, tad plūsma  $\Phi_1$  rotorā inducē transformācijas EDS, kas rotorā uztur indukcijas strāvas. 5.40. attēlā šo strāvu virzieni parādīti rotora ārējā virsmā. Rotorā strāvas rada ierosmes plūsmai  $\Phi_1$  pretēju garenplūsmu  $\Phi_g$ . Tā kā plūsmas  $\Phi_1$  un  $\Phi_g$  ir perpendikulas ģenerators tinuma 2 asij, tad tās tinumā 2 EDS neinducē.

Ja rotoru griež ārējs mehāniskais spēks, tad rotors šķeļ magnētisko plūsmu  $\Phi_1$  un rotorā rodas indukcijas strāvas, kuru virzienu var noteikt pēc labās rokas likuma. Rotorā inducētais EDS ir proporcionāls  $\Phi_1$  un rotora griešanās ātrumam  $n$ , bet EDS frekvence ir vienāda ar ierosmes strāvas, respektīvi, ierosmes sprieguma  $U_1$  frekvenci.

Rotorā strāvas, kuru virzieni 5.40. attēlā parādīti tā iekšējā virsmā, rada šķērplūsmu  $\Phi_{sk}$ . Šī plūsma izejas tinumā 2 inducē EDS, jo tās virziens sakrīt ar tinuma 2 asi. Inducētais EDS ir proporcionāls rotora griešanās ātrumam  $n$ , ja  $U_1 = const$ , un tā frekvence vienāda ar ierosmes strāvas frekvenci un nav atkarīga no  $n$ . Tā ir šo taĥogeneratoru galvenā



5.39.att. Asinhronā taĥogeneratora uzbūve: 1 – ierosmes tinums; 2 – izejas (ģenerators) tinums.



5.40. att. Asinhronā taĥogeneratora darbības princips: 1 – ierosmes tinums; 2 – izejas tinums.

priekšrocība. Bez jau minētās priekšrocības asinhronajiem tahogeneratoriem ir gandrīz lineāras izejas raksturlīknes, mazs inertums, klusa darbība, nav slidošo kontaktu, tie ir droši darbā. Pie trūkumiem jāpieskaita izejas sprieguma amplitūdas un fāzes kļūdu atkarība no griešanās ātruma, temperatūras un ierosmes strāvas frekvences. Ja tehnoloģisku vai citu iemeslu dēļ ierosmes un izejas tinumi nav precīzi nobīdīti savā starpā par  $90^\circ$ , izejas tinumā inducējas paliekošais EDS arī tad, ja  $n = 0$ .

# 6. SINHRONĀS MAŠĪNAS

## 6.1. SINHRONO MAŠĪNU DARBĪBAS PRINCIPS

Sinhrono mašīnu uzbūve un konstruktīvie risinājumi tika aplūkoti 4.1. apakšnodaļā.

Sinhrono mašīnu ierosmei lieto dažādus regulējamus līdzstrāvas avotus. Visvienkāršākais ir barot ierosmes tinumu no līdzstrāvas tīkla. Praksē lieto dažādas sinhrono mašīnu ierosmes sistēmas, kas nodrošina iespēju regulēt ierosmes strāvu nepieciešamā diapazonā. Šīm sistēmām ir jābūt ātrdarbīgām, drošām, lētām un, pēc iespējas, ar automātisku ierosmes regulēšanu.

Visbiežāk izmanto sistēmas ar ierosinātāju, kas nostiprināts uz rotora vārpstas (6.1. att.). Parasti tas ir nelielas jaudas paralēlas ierosmes līdzstrāvas ģenerators. Ierosinātāja jauda ir no 0,2 līdz 5 % no sinhronās mašīnas nominālās jaudas. Mazākas jaudas sinhronajām mašīnām ierosinātāja jauda ir procentuāli lielāka.

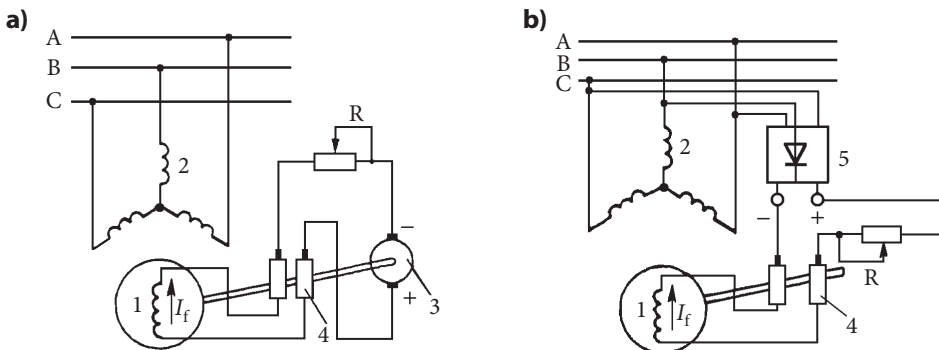
Sinhronās mašīnas pašierosmes principiālā shēma parādīta 6.1. attēlā b.

Ierosmes sistēma, kurā ierosmes tinumu baro no statora tinuma ar transformatora un taisngrieža starpniecību, nodrošina ierosmes strāvas automātisku maiņu, mainoties slodzei. Tā ir pietiekami droša darbā, jo tai nav elementu ar rotējošām daļām.

Ja ierosinātās sinhronās mašīnas rotoru griež ar rotācijas frekvenci  $n$ , tad rotora polu magnētiskā plūsma, šķeļot statora tinumu, inducē tajā EDS ar frekvenci

$$f_1 = \frac{pn}{60}. \quad (6.1.)$$

Pievienojot statora tinumam simetrisku slodzi, tinumā plūst simetriska trīsfāžu strāva, un sinhronā mašīna šajā gadījumā darbojas ģenerators režīmā. Slogota ģenerators statora trīsfāžu strāva rada rotējošu magnētisko lauku, kas pēc sava rakstura ir tāds pats kā asinhronajā mašīnā. Statora (enkura) magnētiskā lauka griešanās virziens sakrīt ar rotora griešanās virzienu, un šī lauka rotācijas frekvence ir:



6.1. att. Sinhronās mašīnas ierosme ar ierosinātāju (a) un pašierosme (b): 1 – ierosmes tinums; 2 – statora tinums; 3 – ierosinātājs; 4 – gredzeni; 5 – taisngriezis.

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \quad (6.2.)$$

Ievietojot šajā izteiksmē frekvenci  $f_1$  saskaņā ar (6.1.), iegūstam:

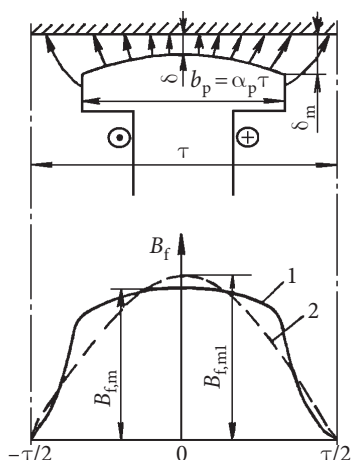
$$n_1 = \frac{60 pn}{p60} = n. \quad (6.3.)$$

Tas nozīmē, ka statora magnētiskais lauks un rotors telpā rotē ar vienādām sinhronām rotācijas frekvencēm.

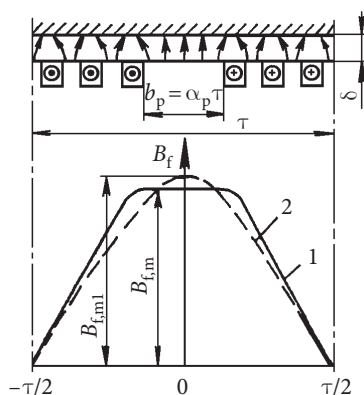
Sinhronā mašina darbojas dzinēja režīmā, ja statora tinumam no tīkla pievada maiņstrāvu un rotora ierosmes tinumu, tāpat kā ģeneratoram, baro ar līdzstrāvu. Šajā gadījumā statora magnētiskais lauks rotējot velk līdz rotora polus. Rotors griežas tajā pašā virzienā un ar tādu pašu rotācijas frekvenci kā statora magnētiskais lauks.

## 6.2. SINHRONĀS MAŠĪNAS MAGNĒTISKAIS LAUKS UN ENKURA REAKCIJA

Tukšgaitā, kad statora tinumā neplūst strāva, magnētisko plūsmu sinhronajā ģeneratorā rada tikai ierosmes tinuma strāva. Lielākā plūsmas daļa noslēdzas caur gaisa spraugu un ir saķēdēta ar enkura tinumu. Tā ir galvenā magnētiskā plūsma. Ierosmes tinuma MS  $F_0$  rada galveno magnētisko plūsmu  $\Phi_0$ , kas inducē tukšgaitas EDS  $E_0$ . Lai inducētais EDS būtu iespējami tuvs sinusoidālam, jāpanāk, lai arī indukcijas sadalījums gaisa spraugā būtu tuvs sinusoidālam. Izvirzīto polu mašīnās tuvu sinusoidālam indukcijas sadalījumu nodrošina polu uzgaļu forma un polu pārklājuma koeficienta vērtība (6.2. att.). Neizvirzīto polu mašīnās tuvu sinusoidālam indukcijas sadalījumu var iegūt, attiecīgi izvēloties polu pārklājuma koeficientu (6.3. att.).



6.2. att. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas ierosmes magnētiskais lauks.



6.3. att. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas ierosmes magnētiskais lauks.

Iepriekš minētajos attēlos parādītas ierosmes lauka sadalījuma līknes. Šīs līknes satur pirmās harmonikas un augstākās harmonikas. Analizējot pamatprocesus sinhronajās mašīnās, var ievērot tikai EDS pirmo harmoniku un par galveno magnētisko plūsmu pieņemt magnētisko plūsmu  $\Phi_0$ , kas ir atkarīga no ierosmes lauka magnētiskās indukcijas pirmās harmonikas.

Pirmās harmonikas amplitūdas vērtību  $B_{f1m}$  raksturo ar ierosmes lauka formas koeficientu

$$k_f = \frac{B_{f1m}}{B_{fm}},$$

kur  $B_{f1m}$  – ierosmes lauka magnētiskās indukcijas pirmās harmonikas amplitūdas vērtība;

$B_{fm}$  – ierosmes lauka magnētiskās indukcijas maksimālā vērtība.

Koeficienta  $k_f$  vērtība ir atkarīga no mašīnas ģeometriskajiem izmēriem  $b_p/\tau$ ,  $\delta_m/\delta$ ,  $\delta/\tau$ .

Galvenais magnētiskais lauks, griežoties kopā ar rotoru, katrā statora fāzē inducē tukšgaitas EDS:

$$E_0 = 4,44W_1f_1\Phi_0k_{w1}. \quad (6.4.)$$

Slodzes režīmā statora strāva rada statora magnetizējošo spēku  $F_a$  un magnētisko plūsmu  $\Phi_a$ . Statora magnētiskais lauks iedarbojas uz galveno magnētisko lauku, un izveidojas rezultējošais magnētiskais lauks, kas no galvenā lauka atšķiras pēc lieluma un formas.

Statora (enkura) magnētiskā lauka iedarbību uz galveno magnētisko lauku sauc par enkura reakciju. Enkura reakciju ietekmē:

- slodzes raksturs (aktīvs, induktīvs, kapacitīvs vai jaukts);
- rotora uzbūve (izvirzīti vai neizvirzīti poli);
- magnētiskās ķēdes piesātinājuma pakāpe.

Apskatīsim slodzes ietekmi uz enkura reakcijas darbību, pieņemot, ka sinhronā ģeneratora rotors ir ar izvirzītiem poli,  $2p = 2$ .

**Aktīva slodze.** Ja rotors atrodas vertikālā stāvoklī (6.4. att. a), tad fāzes AX tinumu šķērso maksimālā polu magnētiskā plūsma, un statora AX fāzes tinumā inducējas EDS maksimālā vērtība  $E_a$ . Atbilstoši arī strāva  $I_1$  AX fāzē ir maksimāla. Tā kā slodze ir aktīva, tad fāžu nobīdes leņķis starp statora tinuma EDS  $E_a$  un strāvas  $I_1$  vektoriem ir  $\Psi = 0^\circ$  (6.4. att. a). Kā redzams 6.4. attēlā a, statora tinuma magnetizējošais spēks  $F_0$  ir virzīts perpendikulāri (tā virzienu nosaka pēc svārpsta likuma) rotora (ierosmes) tinuma magnetizējošajam spēkam  $F_0$  un veido enkura šķērsreakciju. Tā kā fāzē AX strāvai ir maksimālā vērtība, tad statora trīsfāžu tinuma MS vektora virziens sakrīt ar fāzes AX MS vektoru. Šī statora tinuma šķērsreakcijas  $F_a$  zem pola noskrejošās malas pastiprina magnētisko plūsmu ( $F_0$  un  $F_a$  virziens sakrīt), bet zem uzskrejošās – pavājina. Ja magnētiskā ķēde piesātināta, tad rezultējošā magnētiskā plūsma samazinās.

**Induktīva slodze.** Šajā gadījumā statora strāvas  $I_1$  vektors atpaliek no statora EDS  $E_a$  vektora par  $90^\circ$  (6.4. att. b). Kā redzams 6.4. attēlā b, statora MS  $F_a$  rada enkura reakcijas

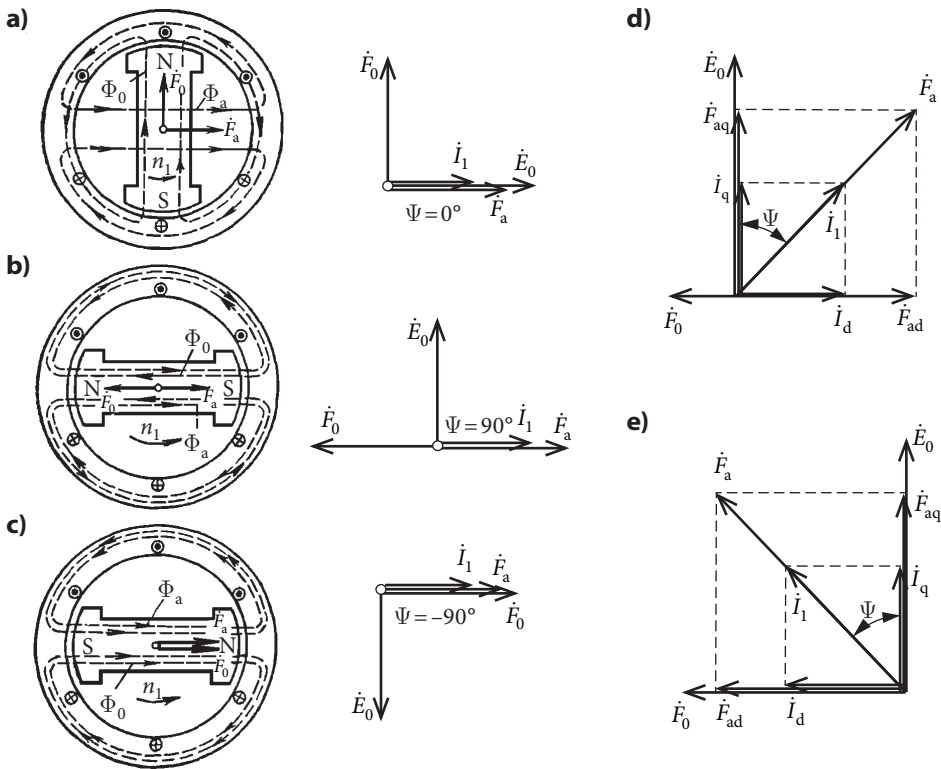
garenplūsmu, kas ir vērsta pretēji ierosmes tinuma magnētiskajai plūsmai un samazina ierosmes magnētisko plūsmu. Tāpēc šāda rakstura enkura reakciju sauc par atmagnetizējošu enkura garenreakciju.

**Kapacitīva slodze** (6.4. att. c). Šajā gadījumā statora strāvas  $I_1$  vektors apsteidz statora EDS  $E_a$  vektoru par  $90^\circ$ . Kā redzams 6.4. attēlā c, statora MS  $F_a$  arī veido enkura reakcijas garenplūsmu, kuras virziens sakrīt ar ierosmes tinuma magnētiskās plūsmas virzienu, tāpēc rezultējošā magnētiskā plūsma palielinās. Šāda rakstura enkura reakciju sauc par magnetizējošu enkura garenreakciju.

**Jaukta slodze.** Jauktas slodzes gadījumā statora strāvas  $I_1$  vektoru un tā MS vektoru  $F_a$  var sadalīt garenkomponentēs  $I_d, F_{ad}$ , kuru virzieni sakrīt ar ierosmes tinuma MS  $F_0$  darbības līniju, un šķērskomponentēs  $I_q$  un  $F_{aq}$ . Vektoru diagramma aktīvi induktīvas slodzes gadījumam parādīta 6.4. attēlā d un aktīvi kapacitīvas – 6.4. attēlā e. Kā redzams 6.4. attēlā d un e, MS  $F_a$  ir divas komponentes:

$F_{aq} = F_a \cos \Psi$  – enkura reakcijas šķērskomponente, kas kropļo rezultējošo magnētisko lauku;

$F_{ad} = F_a \sin \Psi$  – enkura reakcijas garenkomponente, kas atmagnetizē polus, ja slodzei ir induktīvs raksturs, vai magnetizē, ja slodzei ir kapacitīvs raksturs.



6.4. att. Sincronā ģenerators enkura reakcija dažāda rakstura slodzēm.



Enkura reakcijas darbība dzinēja režīmā ir analogiska. To ietekmē arī rotora uzbūve.

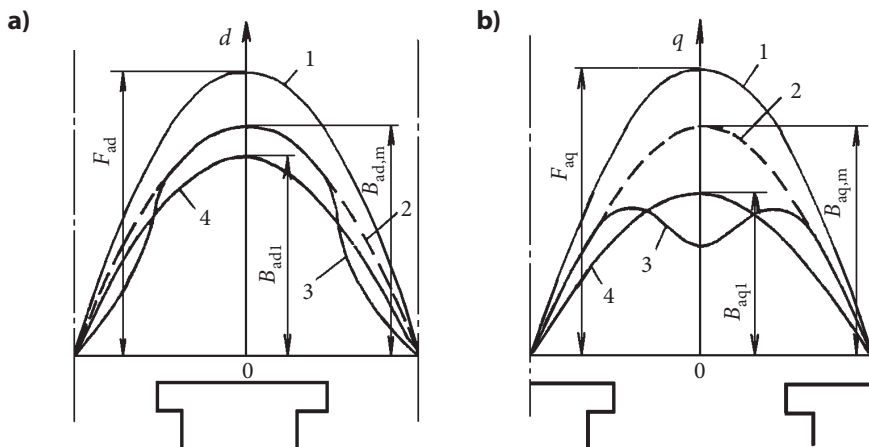
Izvirzīto polu sinhronajā mašīnā rotors ir magnētiski nesimetrisks, jo magnētiskā pretestība plūsmas, kas darbojas šķērsass virzienā, ir lielāka nekā magnētiskā pretestība plūsmas garenass virzienā. Tāpēc vienāda lieluma MS, darbojoties garenass un šķērsass virzienā, rada dažāda lieluma enkura reakcijas magnētiskās plūsmas. Tāpēc sinhronajās mašīnās ar magnētiski nesimetrisku rotoru ir lietderīgi aplūkot atsevišķi enkura reakcijas darbību garenass un šķērsass virzienā. Šādu analīzes paņēmieni sauc par divu reakciju metodi. Tās pamatā ir superpozīcijas princips. Saskaņā ar šo principu pieņem, ka magnētiskā plūsma, kas darbojas pa šķērsasi, neietekmē plūsmas lielumu, kas darbojas pa garenasi, un otrādi. Šāds paņēmieni ir pareizs tikai mašīnās ar nepiesātinātu magnētisko sistēmu. Tomēr, ieviešot papildu korekcijas, divu reakciju metodi izmanto arī mašīnās ar piesātinātu magnētisko sistēmu.

Enkura trīsfāžu tinuma MS pirmās harmonikas amplitūdas vērtība

$$F_a = 1,35 \frac{W_1 k_{w1}}{p} I_p, \quad (6.5.)$$

kurai, izmantojot divu reakciju metodi, var aplūkot divas komponentes:  $F_{ad}$  un  $F_{aq}$  (sk. 4.5. apakšnodaļu).

Garenreakcijas MS līknes maksimums sakrīt ar garenasi, bet šķērsreakcijas MS līknes maksimums – ar šķērsasi (6.5. att. līknes 1). Ja gaisa spraugas pa visu enkura aploci būtu nemainīgas, tad MS  $F_{ad}$  un  $F_{aq}$  gaisa spraugā radītu sinusoidālu indukcijas sadalījumu (līknes 2). Īstenībā indukcijas sadalījums nav sinusoidāls (līknes 3), jo gaisa spraugas platums gar enkura aploci visur nav vienāds. Tāpēc magnētiskās indukcijas līknes satur pirmo un augstākās harmonikas, kuras griežas sinhroni ar rotoru un inducē enkura tinumā EDS. Aplūkojot enkura reakcijas magnētisko lauku, tāpat kā ierosmes lauku, var ņemt vērā tikai magnētiskās indukcijas pirmās harmonikas (līknes 4).



6.5. att. Enkura garenreakcijas (a) un šķērsreakcijas (b) magnētiskā lauka indukcijas līknes izvirzīto polu sinhronajā mašīnā.

Magnētiskās indukcijas pirmās harmonikas samazinājumu, kura cēlonis ir izvirzīto polu rotors ar nevienādu gaisa spraugu gar enkura aploci, var raksturot ar enkura reakcijas lauka formas koeficientiem  $k_{ad}$  un  $k_{aq}$ :

$$k_{ad} = \frac{B_{ad1}}{B_{adm}};$$

$$k_{aq} = \frac{B_{aq1}}{B_{adm}}.$$

Koeficientu  $k_{ad}$  un  $k_{aq}$  vērtības nosaka atkarībā no mašīnas ģeometriskajiem izmēriem  $b_p/\tau$ ,  $\delta_m/\delta$ ,  $\delta/\tau$ , tās atrodamas literatūrā par elektrisko mašīnu projektēšanu.

Lai noteiktu rezultējošo magnētisko plūsmu  $\Phi$  un tās inducēto EDS, jāņem vērā ierosmes tinuma MS  $F_0$  un statora tinuma MS  $F_a$  kopēja darbība. Tā kā tie rada neekvivalentas magnētiskās plūsmas, tad statora tinuma MS  $F_a$  jāreducē uz ierosmes tinumu. Reducēšanas būtība ir tāda, ka enkura tinuma MS aizstāj ar ekvivalentu ierosmes tinuma MS, t. i., tādu ierosmes MS, kas rada tikpat lielu magnētiskās indukcijas pirmo harmoniku kā reālais enkura MS.

Izvirzīto polu sinhronajai mašīnai reducēšanu veic, izmantojot šādas sakarības:

$$F_{ad} k_{ad} = F'_{ad} k_f; \quad (6.6.)$$

$$F_{aq} k_{aq} = F'_{aq} k_f, \quad (6.7.)$$

kur  $F'_{ad}$  un  $F'_{aq}$  – enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas MS, kas reducēti uz ierosmes tinumu;

$k_{ad}$ ,  $k_{aq}$ ,  $k_f$  – enkura reakcijas un ierosmes lauku formas koeficienti.

No izteiksmēm (6.6.) un (6.7.) iegūstam sakarības:

$$F'_{ad} = \frac{k_{ad}}{k_f} F_{ad} = k_d F_{ad}, \quad (6.8.)$$

$$F'_{aq} = \frac{k_{aq}}{k_f} F_{aq} = k_q F_{aq}. \quad (6.9.)$$

Koeficientus  $k_d$  un  $k_q$  sauc par enkura reakcijas koeficientiem attiecīgi pa garenasi un šķērsasi.

Neizvirzīto polu sinhronajām mašīnām  $k_{ad} = k_{aq} = 1$ , un tāpēc  $k_d = k_q = 1/k_f$ . Šī iemesla dēļ, reducējot enkura MS uz ierosmes tinumu, neizvirzīto polu mašīnām nav nepieciešams to sadalīt komponentēs un aprēķinos var izmantot reducēto pilno enkura MS.

### 6.3. SINHRONO ĢENERATORU SPRIEGUMA VIENĀDOJUMI

Sinhronā ģenerators spaiļu spriegumu nosaka šādi lielumi: ierosmes tinuma MS, izkliedes magnētiskā plūsma, statora tinuma MS un sprieguma kritums statora tinuma aktīvajā pretestībā.

Ierosmes tinuma MS  $F_0$  rada galveno magnētisko plūsmu  $\Phi_0$ , kas inducē tukšgaitas EDS  $E_0$ :

$$F_0 \rightarrow \Phi_0 \rightarrow E_0 = 4,44 W_1 f_1 \Phi_0 k_{w1}.$$

Enkura tinuma izkliedes plūsma  $\Phi_{\sigma_1}$ , kuru neietekmē magnētiskā piesātinātība, inducē izkliedes EDS  $\dot{E}_{\sigma_1} = -j\dot{I}_1 X_{\sigma_1}$ , kur  $X_{\sigma_1}$  – statora tinuma izkliedes induktīvā pretestība. Sinhronajam ģeneratoram ar izvirzītiem poliem:

$$F_a \begin{cases} \nearrow F_{ad} \rightarrow \dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_1 X_{ad} \\ \searrow F_{aq} \rightarrow \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_1 X_{aq} \end{cases}$$

kur  $X_{ad}$ ,  $X_{aq}$  – enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas induktīvā pretestība.

Sprieguma kritums statora tinuma aktīvajā pretestībā  $R_1$  ir vienāds ar  $I_1 R_1$ . Ņemot vērā iepriekš minēto, spriegumu vienādojums izvirzītu polu ģeneratoram ir:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{\sigma_1} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.10.)$$

Ievietojot šajā vienādojumā EDS vērtības un pārveidojot to, iegūstam:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d (X_{\sigma_1} + X_{ad}) - j\dot{I}_q (X_{\sigma_1} + X_{aq}) - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.11.)$$

Apzīmējam:

$X_{\sigma_1} + X_{aq} = X_q$  – šķērslauka sinhronā induktīvā pretestība;

$X_{\sigma_1} + X_{ad} = X_d$  – garenlauka sinhronā induktīvā pretestība.

Ņemot vērā šos apzīmējumus, iegūstam:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.12.)$$

Pārveidojot vienādojumu (6.12.), var noteikt EDS vērtību  $E_0$ , kas nodrošina nepieciešamo spaiļu spriegumu  $U_1$ :

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_1 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q + \dot{I}_1 R_1. \quad (6.13.)$$

Sinhronajam ģeneratoram ar neizvirzītiem poliem gaisa sprauga starp rotoru un statoru ir nemainīga, tāpēc induktīvā pretestība  $X_{ad} = X_{aq}$  un  $X_d = X_q$ . Tādējādi arī statora strāvu  $I_1$  nav nepieciešams sadalīt komponentēs  $I_d$  un  $I_q$ .

Vienādojumā (6.12.), aizstājot pretestību  $X_{aq}$  ar  $X_{ad}$  un ievērojot, ka  $\dot{I}_d + \dot{I}_q = \dot{I}_1$ , iegūstam neizvirzīto polu sinhronā ģeneratora sprieguma vienādojumu:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_{ad} - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.14.)$$

Apzīmējot ar  $X_d = X_{ad} + X_{\sigma_1}$  – neizvirzīto polu ģeneratora sinhrono induktīvo pretestību, (6.14.) var pārveidot

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_d - \dot{I}_1 R_1. \quad (6.15.)$$

EDS vērtība, kas nodrošina nepieciešamo spaiļu spriegumu,

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_1 + j\dot{I}_1 X_d + \dot{I}_1 R_1. \quad (6.16.)$$

## 6.4. SINHRONO ĢENERATORU VEKTORU DIAGRAMMAS

Konstruējot vektoru diagrammas, pieņemam, ka fāžu slodze ir simetriska, jo tad vektoru diagrammu var konstruēt tikai vienai fāzei, un ievērojam tikai elektrisko ( $E$ ,  $U$ ,  $I$ ) un magnētisko ( $F$ ,  $B$ ,  $\Phi$ ) lielumu pirmās harmonikas, kas ir noteicošās. Vektoru diagrammas konstruē, ievērojot rotora tipu un slodzes raksturu. Tās var konstruēt kā nepiesātinātai, tā arī piesātinātai magnētiskai ķēdei.

Nepiesātinātai magnētiskajai ķēdei konstruē EDS diagrammas. Katru no lielumiem  $F$ ,  $\Phi$ ,  $E$  aplūko atsevišķi un, ģeometriski saskaitot EDS vektorus, atrod ģeneratora spriegumu.

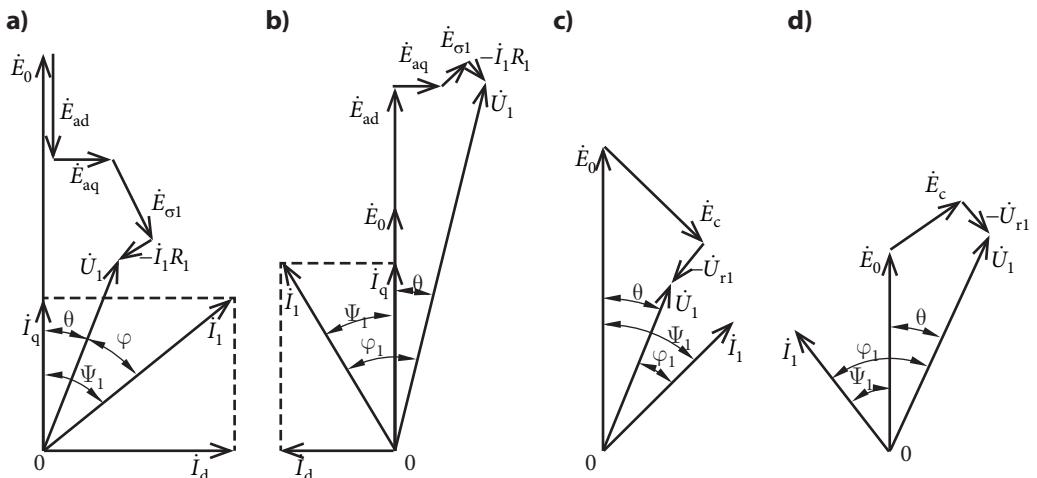
Lai konstruētu EDS diagrammu, jāzina:

- statora strāvas  $I_1$  un sprieguma  $U_1$  (vai  $E_0$ ) vērtība;
- slodzes raksturs, t. i., leņķis  $\varphi$  (vai  $\psi$ );
- parametri  $X_d$ ,  $X_q$  un  $X_{\sigma 1}$ , kurus aprēķina no tukšgaitas un īsslēguma vai induktīvas slodzes raksturlīknēm, kā arī  $R_1$ .

Saskaņā ar vienādojumu (6.10.) 6.6. attēlā a konstruēta izvirzīto polu ģeneratora EDS diagramma aktīvi induktīvai slodzei, bet 6.6. attēlā b – aktīvi kapacitīvai slodzei. 6.6. attēlā c parādīta EDS diagramma ģeneratoram ar neizvirzītiem poliem, ja slodze ir aktīvi induktīva.

Leņķi  $\theta$  starp vektoriem  $E_0$  un  $U_1$  sauc par slodzes leņķi, tas atkarīgs no ģeneratora slodzes

$$P = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (6.17.)$$



6.6. att. Sinhrono ģeneratoru vektoru diagrammas: ģeneratoram ar izvirzītiem poliem aktīvi induktīvai (a), aktīvi kapacitīvai (b) un ģeneratoram ar neizvirzītiem poliem aktīvi induktīvai (c) un aktīvi kapacitīvai (d) slodzei.

Par to var pārliecināties no vektoru diagrammām (6.6. att. a un b). Piemēram, ja  $m_1, U_1, I_1 = \text{const}$ , tad slodze atkarīga tikai no  $\cos \varphi_1$ . Palielinoties  $\cos \varphi_1$ , leņķis  $\varphi_1$  samazinās, un statora strāvas šķērskomponente  $I_q$  palielinās. Atbilstoši tam palielinās sprieguma kritums  $I_q X_q$  un arī leņķis  $\theta$ .

## 6.5. SINHRONO ĢENERATORU RAKSTURLĪKNES

Sinhronā ģenerators raksturlīknes attēlo sakarības starp spriegumu  $U_1$ , enkura strāvu  $I_1$  un ierosmes strāvu  $I_f$ , ja frekvence  $f_1 = \text{const}$  un  $\cos \varphi = \text{const}$ .

Sinhronā ģenerators raksturlīknes var iegūt eksperimentāli, kā arī aprēķinu ceļā, izmantojot vektoru diagrammas. Raksturlīknes izvērzi un neizvērzi polu sinhronajām mašīnām kvalitatīvi neatšķiras. Lai salīdzinātu dažādas jaudas sinhrono mašīnu raksturlīknes, tās bieži attēlo relatīvajās vienībās.

Tukšgaitas raksturlīkne  $E = f(I_f)$ , ja  $I_1 = 0; f_1 = \text{const}$ , līdzīga kā līdzstrāvas ģeneratoram. Dažādu sinhrono mašīnu salīdzināšanai ērti to raksturojošos parametrus izteikt relatīvajās vienībās kā daļu no parametra nominālās vērtības, piemēram, no fāzes sprieguma  $U_{1N}$ , statora strāvas  $I_{1N}$  un ierosmes strāvas  $I_{f0,N}$ , kas tukšgaitā nodrošina nominālo spriegumu

$$E_0^* = \frac{E_0}{U_{1N}}; \quad I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}}; \quad I_f^* = \frac{I_f}{I_{f0N}}$$

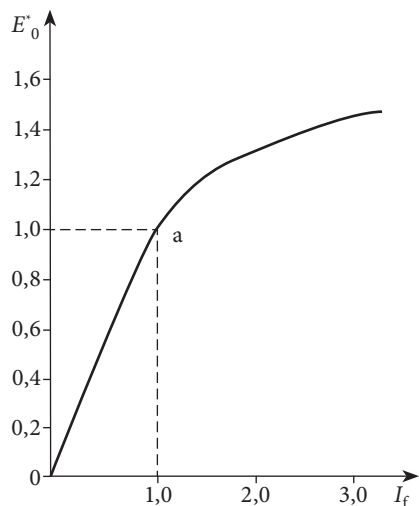
Tukšgaitas raksturlīkne parādīta 6.7. attēlā. Punkts a, kas atbilst nominālajam spriegumam, parasti atrodas raksturlīknes liekuma joslā. Ja tas atrodas zemāk, tad mašīna nav magnētiski noslogota un tai būs palielināti gabarīti. Ja punkts a atrodas virs liekuma joslas, tad mašīnai būs palielināti magnētiskie zudumi un tā ir mazjutīga, regulējot spriegumu.

Īsslēguma raksturlīkne attēlo sakarību  $I_{1k} = f(I_f)$ , ja  $U_1 = 0, f_1 = \text{const}$ . Statora tinums ir īsslēgts ( $U_1 = 0$ ). Enkura tinuma aktīvā pretestība ir neliela. Tad, ja pieņem  $R_1 = 0$ , strāva īsslēguma režīmā ir tīri induktīva, kas atmagnezē mašīnu. Tāpēc mašīnas magnētiskā ķēde ir nepiesātināta un īsslēguma raksturlīkne ir taisne, kas parādīta 6.8. attēlā a.

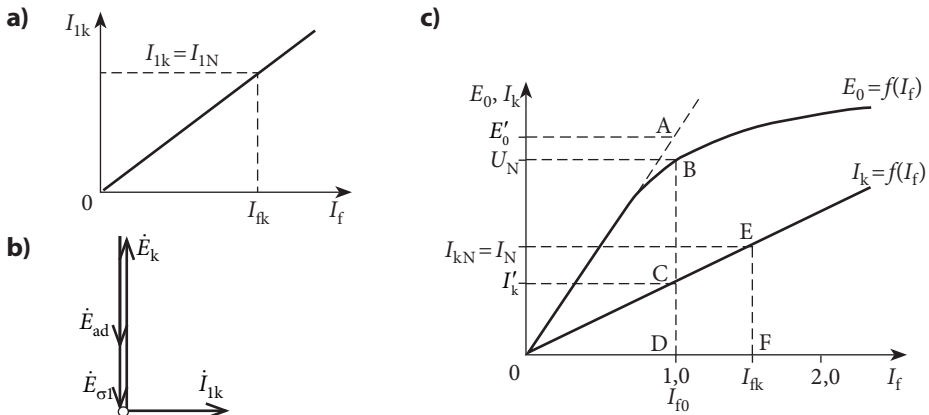
Viens no sinhronās mašīnas svarīgākajiem parametriem ir īsslēguma attiecība  $k_{i,a}$ . Attēlojot tukšgaitas un īsslēguma raksturlīkni vienā koordinātu sistēmā (6.8. att. c), var noteikt īsslēguma attiecību:

$$k_{i,a} = \frac{I'_k}{I_{kN}} = \frac{I_{f0}}{I_{fk}} = \frac{I}{X_d^*}$$

kur  $I'_k$  – īsslēguma strāva, ja ierosmes strāva ir  $I_{f0}$ ;



6.7. att. Sinhronā ģenerators tukšgaitas raksturlīkne.



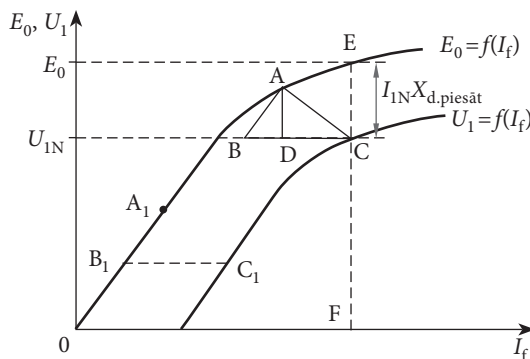
6.8. att. Sinhronā ģenerators īslēguma raksturlikne (a), vektoru diagramma (b) un īslēguma attiecības noteikšana (c).

- $I_{kN} = I_N$  – nominālā statora tinuma strāva;
- $I_{f0}$  – ierosmes strāva tukšgaitā, kas nodrošina nominālo spriegumu ( $E_0 = U_{1N}$ );
- $I_{fk}$  – ierosmes strāva īslēguma režīmā, ja statora strāva vienāda ar nominālo;
- $X_d^*$  – garenreakcijas induktīvā pretestība relatīvajās vienībās.

Īslēguma attiecība mašīnām ar izvīrītiem poliem ir 0,6–1,6, ar neizvīrītiem poliem – 0,4–1,0. Jo mazāka šī attiecība, jo nestabilāka mašīnas paralēlā darbība, slodzes izmaiņa vairāk ietekmē spaiļu spriegumu, bet tās gabarīti ir mazāki, un tā ir lētāka.

Induktīvās slodzes raksturlikne  $U_1 = f(I_f)$ , ja  $I_1 = const$  (parasti  $I_1 = I_{1N}$ ),  $f = const$  un  $\cos \varphi_1 = 0$ . Induktīvās slodzes raksturlikni konstruējot vienā koordinātu sistēmā ar tukšgaitas raksturlikni, var aprēķināt piesātinātas mašīnas garenlauka sinhrono induktīvo pretestību  $X_{dp}$ , (6.9. att.). Tā kā slodzei ir induktīvs raksturs, tad sprieguma vienādojums šādā režīmā ir:

$$\dot{E}_0 = \dot{U}_{1N} + j\dot{I}_{1N}X_d$$



6.9. att. Sinhronā ģenerators induktīvās slodzes raksturlikne un reaktīvais trīsstūris.

un piesātinātas mašīnas garenlauka sinhronā induktīvā pretestība ir:

$$X_{dp} = \frac{E_0 - U_{1N}}{I_{1N}} = \frac{EF - CF}{I_{1N}} = \frac{EC}{I_{1N}}.$$

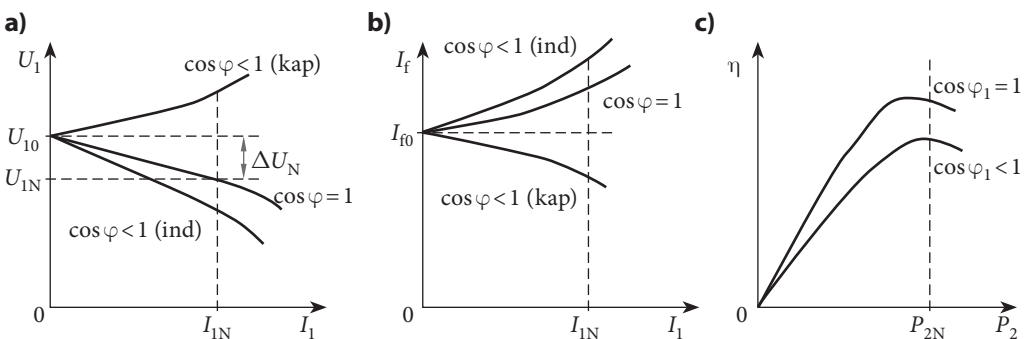
Izkliedes induktīvās pretestības  $X_{s1}$  aprēķināšanai var izmantot reaktīvo trīsstūri ABC, kā tas parādīts 6.9. attēlā. Uz induktīvās slodzes raksturlieknes brīvi izvēlamies punktu  $C_1$ , no kura paralēli abscisu asij velkam taisni  $C_1B_1$ . Taisnes nogriezni  $C_1B_1$  paralēli pārvietojam punktā C, kas atbilst statora nominālajam spriegumam  $U_{1N}$ . No punkta B velkam taisni BA paralēli  $B_1A_1$  līdz tās krustpunktam A ar tukšgaitas raksturliekni. Iegūstam reaktīvo trīsstūri ABC. Perpendikuls AD no trīsstūra virsotnes A attiecīgā mērogā ir izkliedes plūsmas EDS. Izkliedes induktīvā pretestība

$$X_{\sigma 1} = \frac{AD}{I_{1N}}.$$

Izvirzīto polu mašīnās  $X_{aq} < X_{ad}$ , bet neizvirzīto polu mašīnās var pieņemt, ka  $X_q = X_d$ .

Ārējās raksturlieknes  $U_1 = f(I_1)$ , ja  $f, I_p, \cos \varphi = const$ , dažāda rakstura slodzēm parādītas 6.10. attēlā a. Ja slodze ir aktīva ( $\cos \varphi = 1$ ), ģenerators spriegums, slogojot to, samazinās enkura reakcijas un sprieguma krituma dēļ statora tinuma aktīvajā un induktīvajā pretestībā. No ārējās raksturlieknes var aprēķināt sprieguma izmaiņu slogotam ģeneratoram. Ja slodzei ir induktīvs  $\cos \varphi < 1$  (ind) vai kapacitīvs  $\cos \varphi < 1$  (kap) raksturs, tad sprieguma izmaiņu ietekmē arī enkura garenreakcija, kas pirmajā gadījumā atmagnetizē ģeneratoru, bet otrajā – uzmagnetizē.

Regulēšanas raksturlieknes  $I_f = f(I_1)$ , ja  $U_1, f_1, \cos \varphi = const$ , forma (6.10. att. b) ir atkarīga no attiecīgās ārējās raksturlieknes (6.10. att. a). No tām redzams, kā jāregulē ģenerators ierosmes strāva, lai, mainoties slodzei, spriegums uz enkura tinuma spailēm paliktu nemainīgs. Lietderības koeficienta izmaiņa, slogojot ģeneratoru,  $\eta = f(P_2)$  būtībā ir tāda pati kā līdzstrāvas mašīnām. Ja jaudas koeficients  $\cos \varphi$  ir mazāks, nemainoties pārējiem parametriem, tad lietderības koeficients arī samazinās (6.10. att. c).



6.10. att. Sinhronā ģenerators ārējās (a), regulēšanas (b) un lietderības koeficienta (c) raksturlieknes.

## 6.6. PRAKTISKĀ EDS DIAGRAMMA

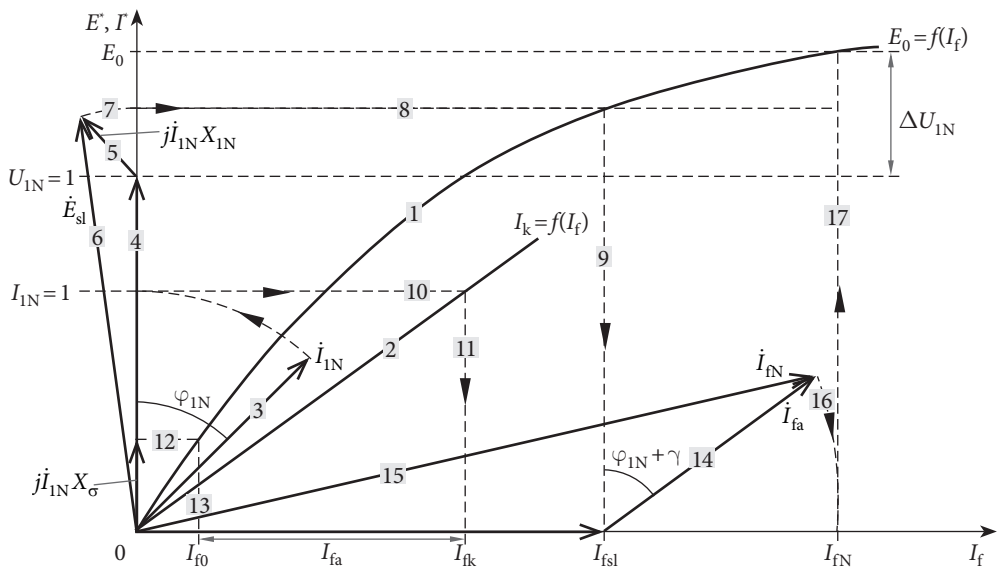
Praktiskās diagrammas konstruēšanai nepieciešams zināt:

- tukšgaitas raksturlīkni;
- īsslēguma raksturlīkni;
- enkura tinuma izkliedes induktīvo pretestību;
- slodzes strāvu un raksturu, t. i., leņķi  $\varphi$ .

Tā kā  $R_1 \ll X_1$ , tad sprieguma kritumu statora aktīvajā pretestībā var neievērot. Parasti parametrus izsaka relatīvās vienībās. Ja enkura reakciju nesadala garenkomponentē un šķērskomponentē, tad praktisko EDS diagrammu var lietot neizvirzītu polu ģeneratoriem, bet ar tuvinājumu to var lietot arī izvirzītu polu ģeneratoriem.

Praktiskās EDS diagrammas konstruēšana parādīta 6.11. attēlā. Lai varētu vieglāk orientēties, konstruēšanas secība 6.11. attēlā apzīmēta ar cipariem.

Ierosmes strāva  $I_{fsl}$  nepieciešama slogota ģeneratora EDS radišanai. No ierosmes strāvas  $I_{fk}$ , kas nepieciešama nominālās statora strāvas  $I_{1N}$  radišanai, izdalām šīs ierosmes strāvas komponenti  $I_{f\sigma}$ , kas nodrošina izkliedes EDS  $E_{\sigma} = I_{1N} X_{\sigma}$ . Ierosmes strāva  $I_{fa}$  kompensē atmagnetizējošo enkura garenreakciju. Ierosmes strāva  $I_{fN}$  atbilst tukšgaitas EDS  $E_0$ . No šīs diagrammas var aprēķināt sprieguma izmaiņu  $\Delta U_{1N}$ , slogojot ģeneratoru.



6.11. att. Sinchronā ģeneratora EDS praktiskā diagramma.



## 6.7. SINHRONO MAŠĪNU PARALĒLA DARBĪBA

### 6.7.1. Sinhronizācijas paņēmieni

Lai palielinātu elektroapgādes drošumu un efektīvāk izmantotu agregātus, sinhronos ģeneratorus parasti slēdz paralēli.

Ir trīs paņēmieni sinhrono ģeneratoru pieslēgšanai paralēlai darbībai:

- precīzā sinhronizācija;
- pašsinhronizācija;
- neprecīzā sinhronizācija.

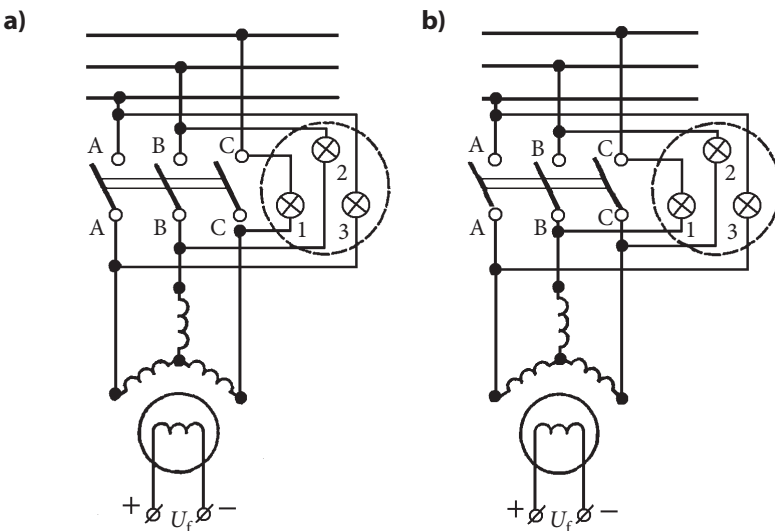
**Precīzās sinhronizācijas noteikumi ģeneratora pieslēgšanai paralēlai darbībai.**

Trīsfāžu sinhronā ģeneratora pieslēgšanas shēma parādīta 6.12. attēlā. Pirms ģeneratora pieslēgšanas paralēlai darbībai tā EDS un tīkla spriegumam ir jābūt vienādiem, to vektoriem jāatrodas pretējās fāzēs, ģeneratora un tīkla frekvencei, kā arī fāžu secībai jābūt vienādām. Apskatīsim, kas notiek, ja kāds no šiem noteikumiem nav ievērots.

Pieslēdzamā ģeneratora EDS  $E_g$  nav vienāds ar tīkla spriegumu  $U_t$ . Ja pārējie noteikumi ievēroti, bet, piemēram,  $E_g > U_t$ , tad ģeneratora un tīkla kopējā ķēdē parādīsies nebalansa EDS  $\Delta E$  (6.13. att. a), kas rada izlīdzinošu strāvu  $I_{izl}$ . Tās vērtība tieši proporcionāla  $\Delta E$  un apgriezti proporcionāla tīkla  $X_t$  un ģeneratora  $X_g$  inductīvajām pretestībām:

$$I_{izl} = \frac{\Delta E}{X_t + X_g} \quad (6.18.)$$

(tīkla un ģeneratora aktīvās pretestības neievērojam, jo  $R_t + R_g \ll X_t + X_g$ ).



6.12. att. Sinhronā ģeneratora pieslēgšanas shēmas paralēlai darbībai, izmantojot spuldžu sinhronskopu "ar gaismas dzišanu" (a) un ar "gaismas rotāciju" (b).

Kā redzams no vektoru diagrammas (6.13. att. a), izlīdzinošā strāva  $I_{izl}$  cenšas atmagnetizēt pieslēdzamo ģeneratoru ( $I_{izl}$  induktīva attiecībā pret ģeneratoru) un uzmagnetizēt tīklā paralēli darbojošos ģeneratorus, ja to jauda samērojama ar pieslēdzamā ģeneratora jaudu. Izlīdzinošā strāva  $I_{izl}$  izlīdzina ģeneratora EDS  $E_g$  un tīkla spriegumu  $U_t$ , neradot elektromagnētisko momentu, kas noslogotu primāro dzinēju.

Pieslēdzamā ģeneratora EDS un tīkla sprieguma vektori ir pretējās fāzēs. Ja šis noteikums netiek ievērots, bet EDS un tīkla spriegums sakrīt fāzē, tad nebalansa EDS  $\Delta E = 2U_t$ , kas atbilst avārijas išslēgumam.

Pieslēdzamā ģeneratora frekvence  $f_g$  un tīkla frekvence  $f_t$  nav vienādas. Pieņemsim, ka  $f_g > f_t$ . Tad ģeneratora EDS  $E_g$  un tīkla sprieguma  $U_t$  vektoru leņķiskā frekvence  $\omega_g = 2\pi f_g > \omega_t = 2\pi f_t$ , un parādās nebalansa EDS no  $\Delta E = 0$  līdz  $\Delta E = 2U_t$  (6.13. att. b). Atbilstoši tam izlīdzinošā strāva  $I_{izl}$  mainās no nulles līdz avārijas išslēguma strāvai. Tā kā strāvas  $I_{izl}$  vektors fāzē gandrīz sakrīt ar vektoru  $E_g$ , tad šajā gadījumā  $I_{izl}$  noslogo ģeneratoru un tā primāro dzinēju.

Pieslēdzamajam ģeneratoram un tīklam nav vienāda fāžu secība. Ja fāžu secība ne-sakrīt, tad parādās nebalansa EDS  $\Delta E$  (6.13. att. d).

**Sinhronā ģeneratora pieslēgšana paralēlai darbībai ar precīzās sinhronizācijas paņēmieni.** Ģeneratora pieslēgšanas momentu var noteikt ar spuldžu vai elektromagnētisko sinhronoskopu palīdzību. Spuldžu sinhronoskopu var pieslēgt pēc divām shēmām: “ar gaismas dzišanu” un “ar gaismas rotāciju”.

Shēma “ar gaismas dzišanu” parādīta 6.12. attēlā a. Ģenerators jāpieslēdz tad, kad visas spuldzes nodzisušas. Ja “gaisma rotē”, t. i., visas spuldzes nekvēlo un nedziest vienā laikā, tad jāmaina ģeneratora fāžu secība. Precīzāk ģeneratora pieslēgšanas momentu var noteikt ar nullvoltmetru, kad tā šautra virzās pāri nulles iedaļai.

Shēma “ar gaismas rotāciju” parādīta 6.12. attēlā b. Ģenerators jāpieslēdz tad, kad paralēli pieslēgtā spuldze nekvēlo un pārējās divas krusteniski pieslēgtās spuldzes kvēlo maksimāli spoži. Ja spuldžu “gaisma nerotē”, bet pulsē, jāmaina fāžu secība.

Lietojot elektromagnētisko sinhronoskopu, ģeneratoru pieslēdz tad, kad mēraparāta šautra ir nekustīga un atrodas vertikāli augšējā stāvoklī.

**Sinhronā ģeneratora pieslēgšana paralēlai darbībai ar pašsinhronizācijas paņēmieni.** Ar primāro dzinēju ģeneratora rotoru iegriež līdz sinhronajai rotācijas frekvencei. Ierosmes tinumu noslēdz ar izlādes pretestību, rotora pārsprieguma novēršanai, un statora tinumu pieslēdz tīklam. Pēc tam ierosmes tinumam pievada strāvu, un rotors ieiet sinhronismā. Šajā gadījumā nebalansa EDS  $\Delta E = U_t$  un statora strāva pārsniedz tās nominālo vērtību. Šis pieslēgšanas paņēmiens ir ērts, vienkāršs, un procesu viegli automatizēt.

**Sinhronā ģeneratora pieslēgšana paralēlai darbībai ar neprecīzās sinhronizācijas paņēmieni.** Šajā gadījumā, pieslēdzamā ģeneratora frekvences novirzei sasniedzot aptuveni 0,5–2 Hz no tīkla frekvences un sprieguma novirzei 2–8 % no  $U_N$ , ģeneratoru paralēlam darbam pieslēdz caur aktīvo vai reaktīvo pretestību. Pārejas procesa beigās, kad mašīnas rotors ievilcies sinhronismā, minētās pretestības šuntē. Piemēram, uz kuģiem

šādos gadījumos strāvas ierobežošanai plaši izmanto reaktorus.

Neprecīzās sinhronizācijas paņēmienam ar strāvu ierobežojošām pretestībām piemīt šādas priekšrocības:

- vienkāršas pieslēgšanas sagatavošanas operācijas;
- iespēja pieslēgt ģeneratoru ar straujām un periodiskām sprieguma svārstībām;
- maza kļūdainu operāciju iespējamība ģeneratora pieslēgšanas laikā.

Starp šī paņēmiena galveniem trūkumiem jāatzīmē:

- sinhronizācijas procesa ievilkšanās un darbība sinhronajā režīmā ar vājām saitēm starp ģeneratoriem un lielu sākuma slīdi;
- komutējošo un aizsardzības aparātu skaita palielināšanās.

### 6.7.2. Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments

Pēc ģeneratora pieslēgšanas paralēlai darbībai, ievērojot visus sinhronizācijas noteikumus, statora strāva ir vienāda ar nulli un tas darbojas tukšgaitā. Ģeneratoru var noslogot ar aktīvo jaudu  $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ , palielinot no primārā dzinēja pievadīto mehānisko jaudu, t. i., slodzes leņķi  $\theta$ . To nevar noslogot ar aktīvo jaudu kā līdzstrāvas ģeneratoru, izmainot ierosmes strāvu (6.13. att. a).

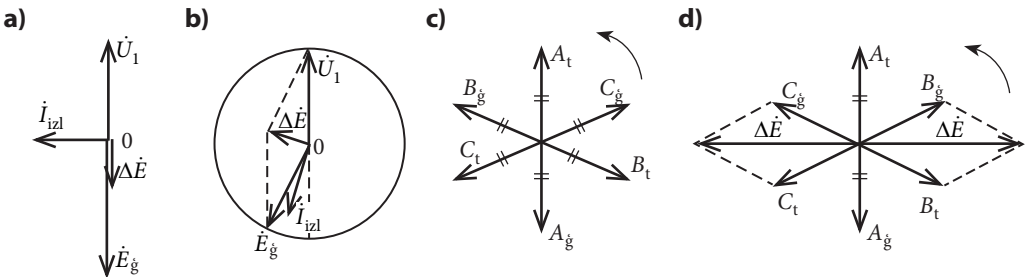
Ģeneratora aktīvā jauda  $P_1$  ir mazāka par elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$ , kas no rotora tiek nodota uz statoru, jaudas zudumu dēļ statora tinumā un serdē. Tā kā šie zudumi ir samērā mazi, tos var neievērot. Tādā gadījumā:

$$P_{em} = P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (6.19.)$$

Izmantojot vienkāršotu EDS vektoru diagrammu (sk. 6.6. att. a) un pārveidojot izteiksmi (6.19.), iegūstam izvīzīto polu sinhronās mašīnas elektromagnētiskās jaudas izteiksmi:

$$P_{em} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta = P_{emI} + P_{emII}, \quad (6.20.)$$

$$\text{kur } P_{emI} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta; P_{emII} = \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta.$$



6.13. att. Sinhrona ģeneratora pieslēgšana paralēlai darbībai, ja  $E_g > U_t$  (a);  $f_g > f_t$  (b); vienāda fāžu secība (c) un nav vienāda fāžu secība (d).

Kā redzams no izteiksmes (6.20.), elektromagnētiskajai jaudai  $P_{em}$  ir divas komponentes:  $P_{emI}$ , kas ir atkarīga no ierosmes strāvas, un  $P_{emII}$ , kas nav atkarīga no ierosmes strāvas. Var secināt, ka izvirsīto polu sinhronā mašīna var darboties paralēli tīklam bez ierosmes strāvas, attīstot jaudu  $P_{emII}$ , kas parasti vienāda ar 10–25 % no  $P_{em}$ .

Neizvirsīto polu sinhronajai mašīnai  $X_q = X_d$ , un tās elektromagnētiskā jauda saskaņā ar izteiksmi (6.20.) ir:

$$P_{em} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta. \quad (6.21.)$$

Tā kā rotora leņķiskais ātrums  $\Omega$  ir konstants, tad elektromagnētiskais moments ir tieši proporcionāls elektromagnētiskajai jaudai  $P_{em}$ :

$$M_{em} = \frac{P_{emI}}{\Omega} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\Omega X_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\Omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta = M_{emI} + M_{emII}. \quad (6.22.)$$

Šis moments ģenerators režīmā bremzē rotoru, bet dzinēja režīmā to griež. Kā redzams no izteiksmes (6.22.), sinhronais dzinējs var darboties bez ierosmes strāvas (reaktīvais dzinējs), attīstot samērā mazu griezes momentu  $M_{emII}$ .

Sinhrono ģenerators paralēlai darbībai var būt divi raksturīgi režīmi: ar mainīgu aktīvo jaudu (mainot mehānisko momentu) un mainīgu reaktīvo jaudu (mainot ierosmes strāvu). Abos režīmos ģenerators var darboties paralēli ar tīklu, kura jauda ir nesamērojami lielāka par ģenerators jaudu (ģenerators neietekmē tīkla spriegumu  $U_t$  un frekvenci  $f_t$ ), vai paralēli ar samērojamas jaudas tīklu.

### 6.7.3. Ģenerators paralēlai darbībai ar mainīgu aktīvo jaudu. Leņķa raksturlieknes

Neizvirsīto polu ģenerators elektromagnētisko jaudu saskaņā ar (6.21.) nosaka izteiksme:

$$P_{em} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta.$$

Ja  $m_1, f_1, U_1, I_f(E_0), X_d = const$ , tad elektromagnētiskā jauda  $P_{em}$  ir atkarīga tikai no slodzes leņķa  $\theta$ . Sakarību  $P_{em} = f(\theta)$  sauc par leņķa raksturliekni.

Aplūkosim leņķa  $\theta$  fizikālo būtību. EDS vektoru diagrammā (sk. 6.6. att.)  $\theta$  ir leņķis starp vektoriem  $E_0$  un  $U_1$ . Bet šim leņķim var dot arī telpisku raksturojumu. EDS  $E_0$  lielums un fāze ir atkarīgi no rotora magnētiskās plūsmas  $\Phi_0$ , bet spriegums ir atkarīgs no rezultējošās magnētiskās plūsmas  $\Phi$ . Tā kā abas magnētiskās plūsmas apsteidz atbilstoši par  $90^\circ$  vektorus  $E_0$  un  $U_1$ , tad  $\theta$  ir telpiskais leņķis starp rezultējošā un rotora magnētiskā lauka asi. Tā kā ģenerators režīmā rotors ir dzenošs, tad rotora magnētiskā lauka asi apsteidz rezultējošā magnētiskā lauka asi par leņķi  $\theta$ .

Tukšgaitā leņķis  $\theta \approx 0$ . Palielinoties slodzei vai primārā dzinēja griezes momentam, leņķis  $\theta$  palielinās. Ja leņķis  $\theta$  kļūst pārāk liels, magnētiskās saites pārtrūkst un ģenerators izkrīt no sinhronisma.

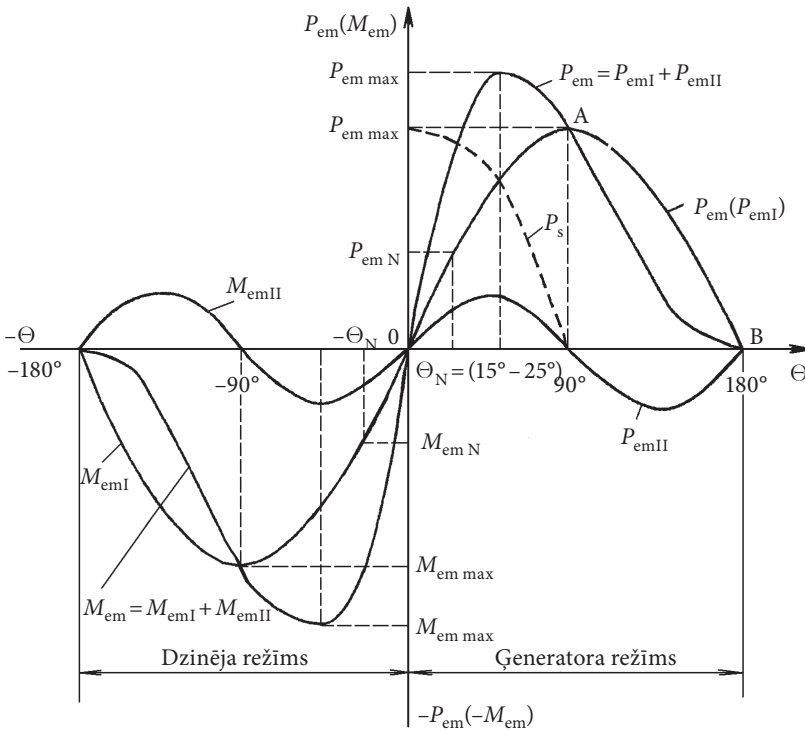
Atbilstoši izteiksmei (6.21.) 6.14. attēlā konstruēta (pieņemot leņķa  $\theta$  vērtību no  $0^\circ$

līdz  $180^\circ$ ) leņķa raksturliktne  $P_{em} = f(\theta)$  neizvirzīto polu sinhronajam ģeneratoram. Posmā OA ģenerators darbojas stabili, jo, palielinoties primārā dzinēja griezes momentam, t. i., leņķim  $\theta$ , atbilstoši palielinās arī bremsējošais elektromagnētiskais moments, un abi momenti līdzsvarojas. Posmā AB ģenerators darbojas nestabili, jo, pieaugot primārā dzinēja griezes momentam, t. i., leņķim  $\theta$ , bremsējošais moments samazinās. Rotora rotācijas frekvence pieaug, un ģenerators izkrīt no sinhronisma. Ģenerators paralēlas darbības stabilitāti raksturo pārslodzes spēja:

$$k_m = \frac{P_{em \max}}{P_{emN}} = \frac{\frac{m_1 U_1 E_0}{X_d}}{\frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \sin \theta_N} = \frac{1}{\sin \theta_N}, \quad (6.23)$$

kas ir jo lielāka, jo mazāks ir leņķis  $\theta_N$ . Parasti nominālajos režīmos  $k_m \geq 2$ . Lai ģenerators neizkrītu no sinhronisma, mainoties griezes momentam (leņķim  $\theta$ ), ir jābūt sinhronizējošajai jaudai  $\Delta P = P_s \Delta \theta$ , kur  $P_s$  – īpatnējā sinhronizējošā jauda. Par īpatnējo sinhronizējošo jaudu sauc elektromagnētiskās jaudas pieauguma  $dP_{em}$  attiecību pret leņķa  $\theta$  pieaugumu  $d\theta$ .

$$P_s = \frac{dP_{em}}{d\theta} = \frac{m_1 U_1 E_0}{X_d} \cos \theta_N. \quad (6.24)$$



6.14. att. Sinhronās mašīnas elektromagnētiskās jaudas (momenta) un īpatnējās sinhronizējošās jaudas raksturliktnes.

Sinhronizējošās jaudas  $P_s$  raksturlikne arī parādīta 6.14. attēlā. Kā redzams attēlā, ja elektromagnētiskajai jaudai ir maksimālā vērtība  $P_{em\max}$ , īpatnējā sinhronizējošā jauda vienāda ar nulli, t. i.,  $P_s = 0$ .

Izvirzīto polu ģeneratoram ir arī otra jaudas komponente (sk. izteiksmi (6.20.))

$$P_{emII} = \frac{m_1 U_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta,$$

kuras raksturlikne parādīta 6.14. attēlā. Saskaitot likņu  $P_{emI}$  un  $P_{emII}$  ordinātas, iegūstam izvirzīto polu ģeneratora elektromagnētiskās jaudas  $P_{em}$  raksturlikni (6.14. att.). Kā redzams šajā attēlā, jaudas komponente  $P_{emII}$ :

- palielina maksimālo elektromagnētisko jaudu  $P_{em\max}$ ;
- nobīda maksimālo jaudu  $P_{em\max}$  mazāku leņķu  $\theta$  joslā.

Ja ģenerators darbojas paralēli ar samērojamas jaudas tīklu, tad, lai uzturētu  $U_t = const$ , izmainot leņķi  $\theta$ , vienlaikus jāmaina arī ierosmes strāva.

### 6.7.4. Ģeneratora paralēla darbība ar mainīgu ierosmes strāvu. U veida raksturliknes

Pieņemsim, ka  $U_t, f_t, P_{em} (M_{em}) = const$ , un apskatīsim ģeneratora paralēlu darbību tukšgaitā trīs režīmos: ar normālu ierosmi, pārierosmi un nepilnu ierosmi.

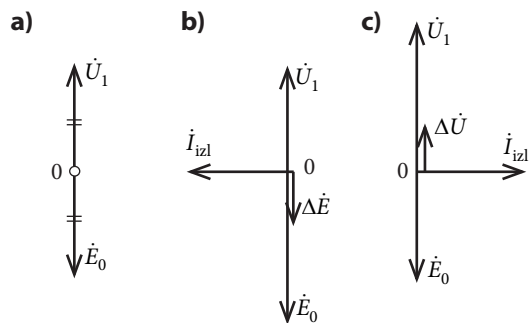
Ģeneratoram darbojoties tukšgaitā ar normālu ierosmi  $I_f = I_{fN}$ , tā EDS  $E_0$  ir vienāds ar tīkla spriegumu  $E_0 = U_t$  (6.15. att. a) un statora strāva  $I_1 = 0$ . Pārierosinātam ģeneratoram (6.15. att. b) ierosmes strāva  $I_f > I_{fN}$  un ģeneratora EDS  $E_0 > U_t$ . Parādās nebalansa EDS  $\Delta E$ , kas izraisa izlīdzinošo strāvu  $I_{izl}$  (6.18.).

Šī strāva tīkla spriegumu  $U_t$  apsteidz fāzē par  $90^\circ$ , un sinhronais ģenerators atdod tīklā reaktīvo jaudu, tāpēc rodas iespēja kompensēt pieprasīto reaktīvo jaudu. Izlīdzinošā strāva atpaliek fāzē par  $90^\circ$  no ģeneratora EDS  $E_0$  un atmagnetizē ģeneratoru, nodrošinot  $E_0 = U_t$ . Nepilnīgi ierosinātam ģeneratoram ierosmes strāva  $I_f < I_{fN}$  un  $E_0 < U_t$  (6.15. att. c). Parādās nebalansa spriegums  $\Delta U$ , un izlīdzinošā strāva  $I_{izl}$ , kas magnetizē ģeneratoru, nodrošinot  $E_0 = U_t$ , uzņem no tīkla reaktīvo jaudu. Jebkurā gadījumā ir izlīdzinošā strāva:

$$I_{izl} = \frac{\Delta E}{X_d} \text{ vai } \frac{\Delta U}{X_d}.$$

Tā kā sinhronā induktīvā pretestība pa garenasi  $X_d \approx const$ , tad statora strāva ir atkarīga no EDS, kas savukārt ir proporcionāls ierosmes strāvai. Lielāka praktiskā nozīme ir sakarībām  $I_1 = f(I_f)$ , kuras parādītas 6.16. attēlā. Šīs sakarības sauc par U veida raksturliknēm.

Ģeneratoram darbojoties slodzes režīmā paralēli ar lielas jaudas tīklu, pieslēgtā ģeneratora spriegums  $U_1 = U_t = const$ . Neievērojot pretestības



6.15. att. Sinhronā ģeneratora darbība tukšgaitā ar normālu ierosmi (a); pārierosmi (b) un nepilnu ierosmi (c).

$X_{s1}$  un  $R_1$ , kuras ir relatīvi mazas, ģenerators rezultējošais EDS  $E_{g\Sigma} = U$ . Rezultējošo EDS

$$\dot{E}_{g\Sigma} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$$

inducē rezultējošā magnētiskā plūsma

$$\dot{\Phi}_\Sigma = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_a.$$

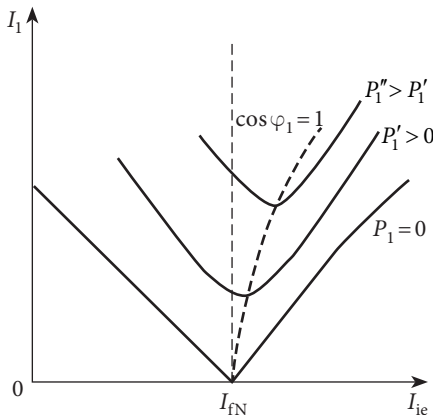
Tā kā saskaņā ar nosacījumu  $U_t = const$ , tad  $\dot{E}_{g\Sigma} = -\dot{U}_t = const$ . Tādējādi arī rezultējošā magnētiskā plūsma  $\dot{\Phi}_\Sigma = const$ .

Ja neievēro jaudas zudumus statorā (sk. 6.7.2. apakšnodaļu), tad ģenerators aktīvā jauda  $P_1 = P_{em} = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ . Tā kā pēc nosacījuma  $P_{em} = const$  un arī  $m_1 U_1 = const$ , tad arī  $I_1 \cos \varphi_1 = I_{1a} = const$ , un statora strāvas aktīvā komponente  $I_{1a}$  nav atkarīga no ierosmes strāvas. Apskatīsim vienkāršotu vektoru diagrammu slodzes režīmā, ja mainās ierosmes strāva (6.17. att.). Ja ierosmes strāva  $I_f = I_{fN}$ , statora strāva ir aktīva  $I_1 = I_{1a}$ .

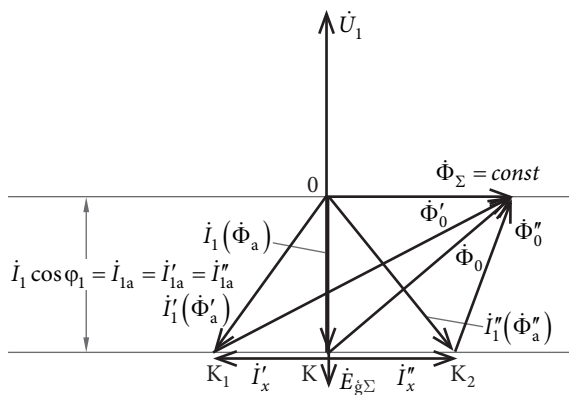
Pārierosinātam ģeneratoram ierosmes strāva  $I_f > I_{fN}$ . Tā kā rezultējošā magnētiskā plūsma  $\dot{\Phi}_\Sigma = const$ , tad palielinās rotora magnētiskā plūsma  $\dot{\Phi}'_0$ , un punkts K pārvietojas pa kreisi uz  $K_1$ . Statora strāvas reaktīvā komponente  $I'_x$  rada statora atmagnetizējošo garenreakciju, kas pilnībā kompensē ierosmes strāvas pieaugumu, lai būtu ievērots noteikums  $\dot{\Phi}_\Sigma = const$ , t. i.,  $\dot{E}_{g\Sigma} = const$ .

Neapilnīgi pārierosinātam ģeneratoram ierosmes strāva  $I_f < I_{fN}$ . Punkts K pārvietojas pa labi uz  $K_2$ . Statora strāvas reaktīvā komponente  $I''_x$  magnetizē ģeneratoru, nodrošinot  $\dot{\Phi}_\Sigma = const$ .

Pieņemot dažādas jaudas  $P_1 = const$ , iegūsim atbilstošas U veida raksturlīknes (sk. 6.16. att.). Punkts, kurā jaudas koeficients  $\cos \varphi_1 = 1$ , pārvietojas pa labi, jo ir jāpalielina ierosmes strāva, lai kompensētu sprieguma kritumu statora tinuma aktīvajā pretestībā. Pretējā gadījumā netiktu ievērots nosacījums  $U_t = const$ .



6.16. att. Sincronā ģenerators U veida raksturlīknes.



6.17. att. Sincronā ģenerators vienkāršota vektoru diagramma slodzes režīmā ar mainīgu ierosmes strāvu.

## 6.8. SINHRONIE DZINĒJI

### 6.8.1. Vispārīgi norādījumi

Tā kā statora magnētiskais lauks dzinēja režīmā ir dzenošs, tad rezultējošā lauka ass apsteidz rotora magnētiskā lauka asi par leņķi  $\theta$  un šis leņķis maina zīmi (sk. 6.7.3. apakšnodaļu).

Praksē lieto galvenokārt izvirzīto polu sinhronos dzinējus. To vektoru diagrammu var konstruēt, izmantojot vienādojumu (6.12.):

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q - \dot{I}_1 R_1.$$

Šajā gadījumā jāievēro, ka sinhronajam dzinējam  $90^\circ < \varphi_1 < 270^\circ$ .

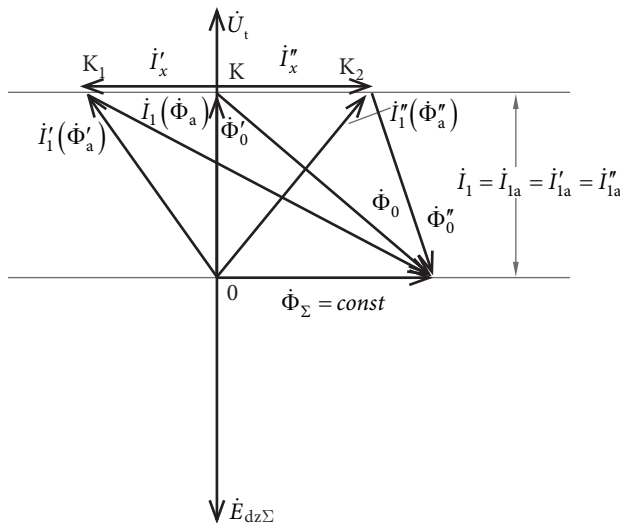
Praksē sinhronā dzinēja spriegumu  $U_1$  šajā vienādojumā parasti aizstāj ar tīkla spriegumu  $U_t$ . Tad statora tinumā inducētais EDS  $E_0$  darbojas kā pretelektrodzinējspēks, un sinhronā dzinēja sprieguma vienādojums ir:

$$\dot{U}_t = -\dot{E}_0 + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q + \dot{I}_1 R_1. \quad (6.25.)$$

Sinhronā dzinēja vienkāršota vektoru diagramma (sk. 6.18. att.), tam darbojoties ar mainīgu ierosmes strāvu, atšķiras no ģenerators vektoru diagrammas (sk. 6.17. att.) ar to, ka statora strāvas aktīvā komponente sakrīt fāzē ar tīkla spriegumu  $U_t$ .

Kā redzams 6.18. attēlā, pārierosinātā sinhronā dzinēja statora strāvas reaktīvā komponente  $I'_x$  fāzē apsteidz tīkla spriegumu  $U_t$  par  $90^\circ$  un palielina tīkla jaudas koeficientu.

Dzinēja U veida raksturlikne tukšgaitas režīmā atšķiras no ģenerators attiecīgās raksturliknes (sk. 6.16. att.) ar to, ka dzinēja tukšgaitā statora tinumā plūst aktīva tukšgaitas strāva, kas nepieciešama tukšgaitas jaudas zudumu kompensēšanai.



6.18. att. Sinhronā dzinēja vienkāršota vektoru diagramma slodzes režīmam ar mainīgu ierosmes strāvu.



### 6.8.2. Sinhrono dzinēju darba raksturliknes

Dzinēja darba raksturliknes: rotora rotācijas frekvences  $n$ , statora strāvas  $I_1$ , pievadītās jaudas  $P_1$ , lietderīgā griezes momenta  $M_2$ , jaudas koeficienta  $\cos\varphi_1$  un lietderības koeficienta  $\eta$  atkarība no dzinēja lietderīgās jaudas  $P_2$ , ja nemainīgs tīkla spriegums  $U_t$ , tīkla frekvence  $f_t$  un ierosmes strāva  $I_f$ , parādītas 6.19. attēlā.

Rotora rotācijas frekvence  $n$  nav atkarīga no slodzes. Rotors griežas ar sinhrono rotācijas frekvenci

$$n = n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

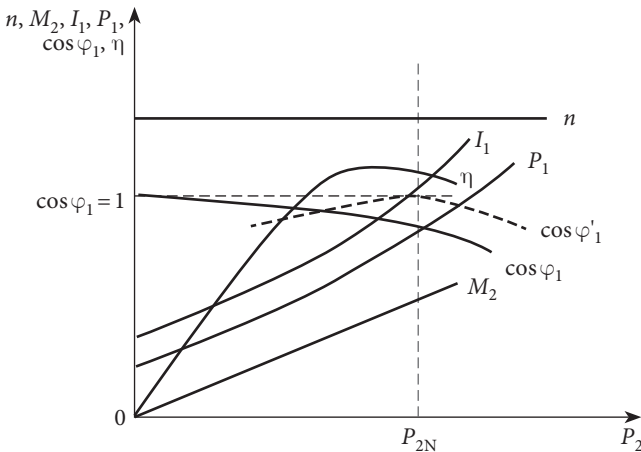
un tās raksturlikne ir paralēla abscisu asij.

Lietderīgais griezes moments  $M_2$  ir proporcionāls lietderīgajai jaudai  $P_2$  ( $M_2 \approx P_2/n$ ). Tā kā  $n = const$ , tad moments  $M_2$ , palielinoties slodzei  $P_2$ , palielinās proporcionāli slodzei  $P_2$ .

Ja tukšgaitā ierosmes strāva  $I_f = I_{fN}$  ( $\cos\varphi_1 = 1$ ), tad, pieaugot slodzei, jaudas koeficients samazinās. Ekonomiski izdevīgi, ja ierosmes strāva  $I_f = I_{fN}$  ( $\cos\varphi_1 = 1$ ) atbilst nominālajai slodzei. Tādā gadījumā, ja dzinējs nav noslogots līdz nominālajai slodzei  $P_2 < P_{2N}$ , tas darbojas ar apsteidzošu strāvu un palielina tīkla jaudas koeficientu.

Pievadītās jaudas raksturlikne  $P_1 = f(P_2)$  ir nelineāra. Tas izskaidrojams ar to, ka pievadītā jauda ietver arī jaudas zudumus statora tinumā, kuri ir proporcionāli statora strāvas kvadrātam. Statora strāva, slogojot dzinēju, pieaug ātrāk nekā pievadītā jauda, jo jaudas koeficients  $\cos\varphi_1$  samazinās.

Raksturlikne  $\eta = f(P_2)$  ir tāda pati kā iepriekš aplūkotajām elektriskajām mašīnām.



6.19. att. Sinhronā dzinēja darba raksturliknes.

### 6.8.3. Sinhrono dzinēju palaišana un rotācijas frekvences regulēšana

Sinhrono dzinēju nevar palaist, vienkārši pieslēdzot tiņklam. Tas izskaidrojams ar to, ka statora magnētiskais lauks sāk griezties ar lielu sinhrono rotācijas frekvenci, bet rotors inerces dēļ nevar uzņemt tādu pašu ātrumu. Lai rotors varētu sekot statora laukam, palaižot jāpanāk, lai rotora un statora magnētisko lauku rotācijas frekvences atšķirtos iespējami maz (ideālā gadījumā – būtu vienādas). Izmanto šādus palaišanas paņēmienus: ar palīgdzinēju, ar mainīgu frekvenci un asinhrono palaišanu.

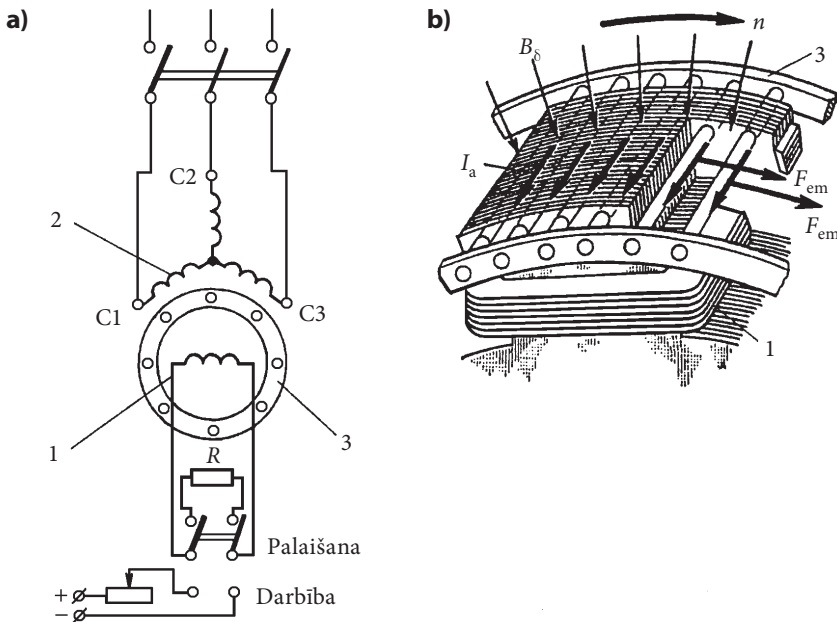
Ar palīgdzinēju rotoru iegriež līdz sinhronajai rotācijas frekvencei. Pēc dzinēja sinhronizācijas un pieslēgšanas tiņklam palīgdzinēju atvieno.

Dzinēja palaišana ar mainīgu frekvenci notiek, pakāpeniski mainot frekvenci no  $f_1 = 0$  līdz  $f_1 = f_{1N}$ . Līdz ar to pakāpeniski mainās arī statora magnētiskā lauka rotācijas frekvence  $n_1 = 60f_1/p$  no  $n = 0$  līdz  $n_1 = n_{1N}$ . Šajā gadījumā statora tinuma barošanai nepieciešams regulējamas frekvences barošanas avots.

Parasti izmanto dzinēja asinhrono palaišanu (6.20. att. a un b).

Rotora polu uzgaļos ievietots īsslēgts palaišanas tinums “vāveres rata” veidā. Statora rotējošais magnētiskais lauks palaišanas tinumā inducē EDS, un rotors sāk griezties. Kad rotora rotācijas frekvence  $n$  ir tuvu sinhronajai rotācijas frekvencei  $n_1$ , ierosmes tinumam pievada ierosmes strāvu, un sinhronizējošais moments ievieļ dzinēja rotoru sinhronismā. Lai novērstu bistamu pārspriegumu ierosmes tinumā, iedarbināšanas laikā to noslēdz ar pretestību  $R$ .

Rotora rotācijas frekvenci  $n = n_1 = 60f_1/p$  var regulēt, mainot frekvenci. Tādā gadījumā nepieciešams maiņsprieguma avots ar regulējamu frekvenci.



6.20. att. Sinhronā dzinēja asinhronā palaišana: a – elektriskā shēma (1 – ierosmes tinums; 2 – enkura tinums; 3 – palaišanas tinums); b – palaišanas tinuma konstruktīvais izveidojums.

## 6.9. SINHRONO MAŠĪNU SVĀRSTĪBAS

Sinhronās mašīnas svārstību laikā rotora rotācijas frekvence nav konstants lielums, bet tā svārstās ap kādu vidējo vērtību.

Praksē lielāko interesi izraisa gadījums, kad sinhronā mašīna darbojas paralēli ar lielas jaudas tīklu, kura frekvenci  $f_1$  var uzskatīt par nemainīgu. Šādā gadījumā leņķiskā ātruma  $\Omega$  svārstības notiek ap sinhrono ātrumu:

$$\Omega_s = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Vienlaikus ar leņķiskā ātruma  $\Omega$  svārstībām notiek arī slodzes leņķa  $\theta$  svārstības.

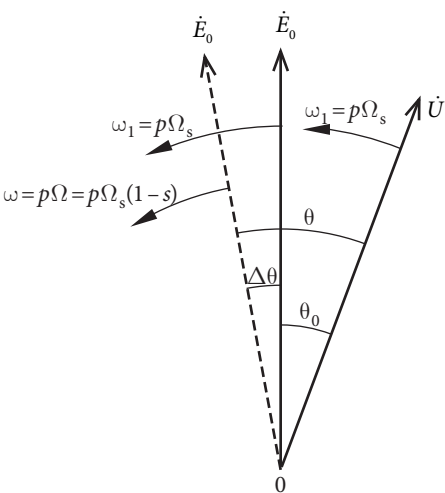
Sinhronajam ģeneratoram darbojoties stacionārā režīmā, tā elektromagnētiskais moments ir līdzsvarots ar vārpstai pievadīto mehānisko momentu, tāpēc rotors griežas ar nemainīgu sinhrono rotācijas frekvenci. Nemainīgam momentam, kas pievadīts mašīnas vārpstai, atbilst nemainīgs slodzes leņķis  $\theta$ .

Šis leņķis  $\theta$  raksturo rotora polu ass nobīdi attiecībā pret rotējošā magnētiskā lauka asi jeb sprieguma  $\dot{U}$  un EDS  $\dot{E}_0$  vektoru fāžu nobīdi (6.21. att.).

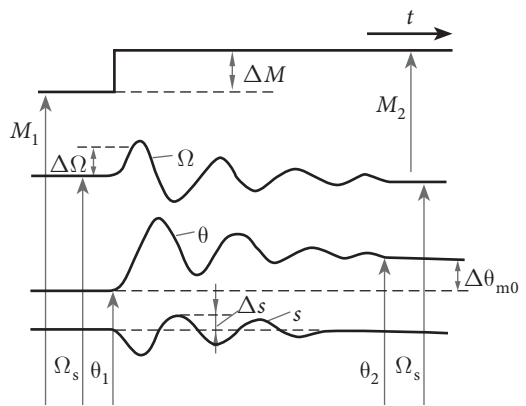
Ja  $\Omega > \Omega_s$ , tad leņķis  $\theta$  pieaug, bet, ja  $\Omega < \Omega_s$ , tad samazinās. Slodzes leņķa  $\theta$  svārstības, kā izriet no vektoru diagrammām un formulām, izraisa atbilstošas jaudas  $P$  un enkura strāvas  $I$  svārstības, kuras var novērot, ja sinhronās mašīnas enkura ķēdē ieslēdz vatmetru un ampērmetru.

Ja  $\Omega \neq \Omega_s$ , rotors griežas ar noteiktu slīdi  $s$  attiecībā pret statora magnētisko lauku. Tāpēc svārstību laikā mainās arī slīde.

6.22. attēlā parādītas leņķiskā ātruma  $\Omega$ , slodzes leņķa  $\theta$  un slīdes  $s$  rimstošas svārstības, ja primārā dzinēja momentu strauji palielina par lielumu  $\Delta M$ . Indeksi 1 attiecas uz izejas režīmu pirms svārstību sākšanās, bet indeksi 2 – uz tam sekojošu režīmu, kad svārstības norimušas.



6.21. att. Sinhronā ģeneratora sprieguma un EDS vektoru svārstību procesā.



6.22. att. Sinhronā ģeneratora leņķiskā ātruma  $\Omega$ , slodzes leņķa  $\theta$  un slīdes  $s$  svārstības.

Atsevišķos gadījumos iespējamas ievērojamas sinhronās mašīnas rotora svārstības, kas nopietni var traucēt mašīnas, kā arī visas elektriskās sistēmas darbību.

Svārstību laikā notiek visai sarežģīti elektromehāniskie pārejas procesi. Šajā apakšnodaļā pamatā tiek aplūkota minēto procesu fizikālā aina.

Izšķir sinhronās mašīnas uzspiestās un brīvās svārstības.

Uzspiestās svārstības rodas, ja sinhronās mašīnas vārpstai pieliktais griezes moments satur pulsējošas komponentes. Uzspiestās svārstības kļūst sevišķi bīstamas, ja to frekvence ir tuva brīvo svārstību frekvencei  $f_0$ . Šajā gadījumā rodas svārstību rezonanse, kuras rezultātā rotora svārstību amplitūda var nepieļaujami pieaugt.

Brīvās svārstības piemīt pašai sinhronajai mašīnai kā svārstību sistēmai, ja tā ieslēgta paralēli tīklam vai citām sinhronajām mašīnām. Šādas svārstības rodas, strauji mainoties sinhronās mašīnas režīmam (slodzes, sprieguma, ierosmes strāvas pēkšņa izmaiņa u. c.). 6.22. attēlā parādītās svārstības, piemēram, rodas, pēkšņi palielinot ar ģeneratoru saistīto primāro dzinēja momentu. Tādā gadījumā slodzes leņķis  $\theta$  pieaug no  $\theta_1$  līdz  $\theta_2$  vērtībai. Šī pāreja notiek svārstību veidā ar sākuma amplitūdu  $\Delta\theta_{m0} = \theta_2 - \theta_1$ .

Brīvās svārstības piemīt daudziem fizikāliem objektiem. Turklāt svārstību daba un raksturs dažādiem objektiem daudzējādā ziņā ir vienādi. Diferenciālie vienādojumi, kas apraksta šādas svārstības, arī ir analogiski.

Sinhronās mašīnas svārstības ir mehāniskas svārstības. Tās rodas mehāniskās sistēmās, kurās darbojas elastības un inerces spēki, kad sistēma dažādu iedarbību rezultātā tiek izvesta no līdzsvara stāvokļa. Elastības spēki, kas cenšas atgriezt sistēmu līdzsvara stāvoklī, ir atkarīgi no sistēmas novirzes lieluma no līdzsvara stāvokļa. Vienkāršākajā gadījumā tie ir proporcionāli šai novirzei. Inerces spēki cenšas uzturēt nemainīgu sistēmas kustības ātrumu, t. i., darbojas pretī sistēmas ātruma izmaiņai. Inerces spēki ir proporcionāli mehānisko masu paātrinājumam. Elastības spēki atgriež sistēmu līdzsvara stāvoklī. Tomēr inerces spēku ietekmē sistēma iziet cauri līdzsvara punktam. Elastības spēki maina savu virzienu uz pretējo un atkal cenšas atgriezt sistēmu līdzsvara stāvoklī. Svārstību laikā elastības un inerces spēki nepārtraukti maina lielumu un zīmi. Rezultātā potenciālā enerģija, kas saistīta ar elastības spēkiem, pārvēršas kinētiskajā enerģijā, kas savukārt saistīta ar inerces spēkiem, un otrādi. Svārstību laikā parasti darbojas arī slāpētājspēki, kas izraisa svārstību rīšanu.

Vienkāršākais mehānisko svārstību piemērs ir atsperes ar tai piestiprinātu atsvaru. Ja līdzsvars tiek izjaukts, piemēram, pēkšņi palielinot vai samazinot atsvaru, sistēmā rodas svārstības. Elastības spēkus šajā gadījumā nosaka atsperes deformācija, inerces spēkus – masas, kas svārstās, bet slāpētājspēkus – atsvara berze pret gaisu. Svārstību frekvence ir jo lielāka, jo lielāks ir atsperes stingrums un mazāka atsvara masa.

Sinhronās mašīnas svārstību gadījumā darbojas analogiski spēki, precīzāk sakot, griezes momenti, jo svārstības notiek rotējošā sistēmā. Elastības spēkiem šajā gadījumā atbilst elektromagnētiskais griezes moments, kas iedarbojas uz rotoru un ir atkarīgs no slodzes leņķa  $\theta$  (sk. 6.7.2. apakšnodaļu). Magnētiskā lauka deformācija, mainoties leņķim  $\theta$ , ir analogiska atsperes deformācijai un izraisa elektromagnētiskā momenta

izmaiņu. Inerces spēkiem atbilst rotora inerces vai dinamiskais moments, kas rodas rotora pozitīva vai negatīva paātrinājuma gadījumā.

Slāpētājmoments, kas rodas sinhronas mašīnas rotoram rotējot (berze pret gaisu un gultņos), ir neliels un to var neņemt vērā. Svārstību rimšana sinhronajā mašīnā galvenokārt notiek, pateicoties tam, ka rotors griežas pārmaiņus gan lēnāk, gan ātrāk nekā statora lauks, un tāpēc ierosmes tinumā un slāpētājtinumā inducējas strāvas, kas rada attiecīgo slāpētājmomentu. Slāpētājmoments cenšas atjaunot rotora sinhrono griešanās ātrumu. Ja  $\Omega > \Omega_s$  un slīde  $s < 0$ , tad slāpētājmoments ir bremzējošs, bet ja  $\Omega < \Omega_s$  un  $s > 0$ , tas cenšas paātrināt rotora kustību.

Ierosmes tinums rada samērā nelielu slāpētājmomentu īpaši tad, ja slodzes leņķis  $\theta$  ir neliels (normālie darba režīmi) vai tuvs nullei (tukšgaitas režīms). Šis fakts izskaidrojams ar to, ka minētajos gadījumos enkura reakcijas plūsma vērsta rotora garenass virzienā un nelielas rotora novirzes attiecībā pret šo plūsmu izraisa nelielas plūsmas saķēdējuma izmaiņas.

Efektīvs paņēmieni sinhrono mašīnu brīvo svārstību samazināšanai ir slāpētājtinuma lietošana.

Apskatīsim gadījumu, kad slodzes leņķa svārstību amplitūda ir maza. Rotora kustības diferenciālvienādojums šādā gadījumā ir lineārs un tam ir vienkāršs atrisinājums, kas ļauj noskaidrot sinhronās mašīnas svārstību īpatnības. Šajā nolūkā sastādīsim sinhronā ģeneratora momenta vienādojumu.

Saskaņā ar izteiksmi (6.22.) elektromagnētiskais moments ir:

$$M = \frac{P}{\Omega_s} = \frac{mE_0U}{\Omega_s X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega_s} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (6.26.)$$

Pieņemsim, ka svārstības notiek ap līdzsvara stāvoklim atbilstošo slodzes leņķa vērtību  $\theta = \theta_0$ , kad elektromagnētisko momentu  $M = M_0$  līdzsvaro rotoram pieliktais ārējais moments. Tad svārstību laikā

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta, \quad (6.27.)$$

kur  $\Delta\theta = f(t)$  – laikā mainīgs lielums, kas raksturo rotora novirzi no momentam  $M_0$  atbilstošā līdzsvara stāvokļa.

Ievietojot  $\theta$  no (6.27.) izteiksmē (6.26.) un ņemot vērā, ka nelielām  $\Delta\theta$  vērtībām  $\cos\Delta\theta \approx 1$ ,  $\sin\Delta\theta \approx 0$ , iegūstam:

$$M = M_0 + \Delta M = M_0 + M_{S.M.} \Delta\theta, \quad (6.28.)$$

kur

$$M_0 = \frac{mE_0U}{\Omega_s X_d} \sin \theta_0 + \frac{mU^2}{2\Omega_s} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta_0; \quad (6.29.)$$

$$M_{S.M.} = \frac{dM}{d\theta} = \frac{mE_0U}{\Omega_s X_d} \cos \theta_0 + \frac{mU^2}{\Omega_s} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\theta_0 \quad (6.30.)$$

sinhronizējošā momenta koeficients.

Tā kā moments  $M_0$  tiek līdzsvarots ar rotoram pielikto ārējo momentu, izteiksmē (6.28.) var ņemt vērā tikai otro locekli. Šis moments svārstību laikā veic elastīgo spēku lomu.

Jāatzīmē, ka izteiksme (6.30.)  $M_{s.m.}$  noteikšanai ir korekta tikai ļoti lēnām leņķa  $\theta$  izmaiņām, kad elektromagnētiskos pārejas procesus mašīnas tinumos var neņemt vērā. Īstenībā svārstību ātrums ir galīgs lielums, tāpēc induktora tinumos inducējas tādas pašas papildu aperiodiskās strāvas kā pēkšņā īsslēgumā (sk. 6.11. apakšnodaļu). Šo strāvu darbība ekvivalenta EDS  $E_0$  palielināšanai un  $X_d$  samazināšanai izteiksmē (6.30.). Tādējādi  $M_{s.m.}$  vērtība svārstību laikā ir lielāka, nekā nosakot to no izteiksmes (6.30.).

Inerces spēku momentu nosaka šāda izteiksme:

$$M_i = -J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}, \quad (6.31.)$$

kur  $J$  – rotējošo daļu inerces moments;

$\alpha$  – rotora kustības leņķiskā koordināte, turklāt

$$\alpha = \Omega_s t + \frac{\theta}{p} = \Omega_s t + \frac{\theta_0}{p} + \frac{\Delta\theta}{p}. \quad (6.32.)$$

Tā kā  $\alpha$  ir leņķis ģeometriskajos grādos, tad izteiksmē (6.32.) leņķi  $\theta_0$  un  $\Delta\theta$ , kas izteikti elektriskajos grādos, ir dalīti ar polu pāru skaitu  $p$ . Tādējādi

$$M_i = -\frac{J}{p} \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2}. \quad (6.33.)$$

Slāpētājmoments  $M_{sl}$  mazām slīdes vērtībām ir proporcionāls slīdei:

$$M_{sl} = M_1 s, \quad (6.34.)$$

kur  $M_1$  – proporcionalitātes koeficients ar momenta dimensiju, kas atkarīgs no rotora tinuma, galvenokārt slāpētājtinuma parametriem.

Saskaņā ar izteiksmi (5.1.) slīdi  $s$  var noteikt šādi:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}. \quad (6.35.)$$

Rotora leņķiskais ātrums

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (6.36.)$$

jeb, ievērojot izteiksmi (6.33.),

$$\Omega = \Omega_s + \frac{1}{p} \frac{d\Delta\theta}{dt}. \quad (6.37.)$$

Ievietojot izteiksmē (6.35.)  $\Omega$  vērtību no izteiksmes (6.37.), iegūstam:

$$s = -\frac{1}{p\Omega_s} \frac{d\Delta\theta}{dt}. \quad (6.38.)$$

Tad slāpētājmoments saskaņā ar izteiksmi (6.34.) ir:

$$M_{sl} = -\frac{M_1}{p\Omega_s} \frac{d\Delta\theta}{dt} = M_{sl.m} \frac{d\Delta\theta}{dt}, \quad (6.39.)$$

kur  $M_{sl.m}$  – slāpētājmomenta koeficients.

Ievērojot izklāstīto, sinhronās mašīnas momentu vienādojums svārstību laikā ir:

$$M_i + M_{sl} + M_s = 0$$

vai, ņemot vērā izteiksmes (6.33.), (6.39.), (6.28.),

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + M_{sl.m} \frac{d\Delta\theta}{dt} + M_{s.m.} \Delta\theta = 0. \quad (6.40.)$$

Vienādojuma (6.40.) atrisinājuma izteiksme ir šāda:

$$\Delta\theta = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (6.41.)$$

kur  $C_1$  un  $C_2$  – integrēšanas konstantes;

$\lambda_1$  un  $\lambda_2$  – raksturīgā vienādojuma

$$\frac{J}{p} \lambda^2 + M_{sl.m} \lambda + M_{s.m.} = 0 \quad (6.42.)$$

saknes.

Atrisinot raksturīgo vienādojumu, iegūstam:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{pM_{sl.m}}{2J} \pm \sqrt{\left(\frac{pM_{sl.m}}{2J}\right)^2 - \frac{pM_{s.m.}}{J}}. \quad (6.43.)$$

Visbiežāk praksē

$$\left(\frac{pM_{sl.m}}{2J}\right)^2 \ll \frac{pM_{s.m.}}{J}$$

un abas saknes ir kompleksas, un leņķa  $\Delta\theta$  izmaiņa notiek rimstošu svārstību veidā. Šajā gadījumā izteiksmes (6.43.) vietā var rakstīt

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{T_k} \pm j\omega_0, \quad (6.44.)$$

kur

$$T_k = \frac{2J}{pM_{sl.m.}} \quad (6.45.)$$

svārstību rimšanas laika konstante;

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{pM_{s.m.}}{J} - \frac{p^2 M_{sl.m}^2}{4J^2}} \approx \sqrt{\frac{pM_{s.m.}}{J}} \quad (6.46.)$$

rotora pašsvārstību frekvence.

Ja raksturīgā vienādojuma (6.42.) saknes ir reālas, tad  $\Delta\theta$  izmaiņas raksturs ir aperioidisks.

Ievietojot  $\lambda_1$  un  $\lambda_2$  vērtības no izteiksmes (6.44.) izteiksmē (6.41.), iegūstam:

$$\Delta\theta = (A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t) e^{\frac{-t}{T_k}}, \quad (6.47.)$$

kur  $A_1 = C_1 + C_2$ ;  $A_2 = j(C_1 - C_2)$  – jaunas integrēšanas konstantes, kuras nosaka no sākuma nosacījumiem.

Piemēram, 6.22. attēlā parādītajā gadījumā:

$$A_1 = -\Delta\theta_{m0}; \quad A_2 = 0,$$

tāpēc

$$\Delta\theta = -\Delta\theta_{m0} \cos \omega_0 t e^{\frac{-t}{T_k}}. \quad (6.48.)$$

No izteiksmes (6.45.) redzams, ka svārstības rimst jo ātrāk, jo lielāks ir slāpētājmomenta koeficients  $M_{sl.m.}$ . Ja  $M_{sl.m.} = 0$ , tad  $T_k = \infty$ , un svārstības nerimst.

Praksē bieži inerces momenta  $J$  vietā izmanto tā saukto inerces konstanti:

$$T_j = \frac{J\Omega_s^2}{S_N} = \frac{J\omega_1^2}{p^2 S_N}, \quad (6.49.)$$

kur  $S_N$  – nominālā pilnā jauda.

Šī konstante ir vienāda ar laiku, kurā agregāts tukšgaitā sasniedz nominālo rotācijas frekvenci, ja uz to iedarbojas nemainīgs griezes moments, kas vienāds ar  $S_N/\Omega_s$ .

Ja izteiksmē (6.46.) ievieto  $J$  vērtību no formulas (6.49.), iegūstam

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{\omega_1 M_{s.m.}}{T_j}}. \quad (6.50.)$$

Ar sinhronās mašīnas dinamisko stabilitāti saprot tās spēju, darbojoties paralēli ar tīklu, saglabāt sinhronismu, ja ārējās iedarbes rezultātā notiek pēkšņa darba režīma izmaiņa (īsslēgums tīklā, strauja slodzes palielināšana u. tml.). Šādos apstākļos leņķa  $\theta$  ievērojama pieauguma dēļ sinhronās mašīnas darbība var kļūt nestabila, un mašīna var izkrist no sinhronisma.

Sinhronās mašīnas dinamiskā stabilitāte ir atkarīga no ārējās iedarbes lieluma un ilguma, mašīnas parametriem, kā arī no slodzes pirms pēkšņas režīma izmaiņas.

## 6.10. PĀREJAS PROCESI SINHRONAJĀS MAŠĪNĀS

### 6.10.1. Vispārīgi norādījumi

Pārejas procesi sinhronajās mašīnās saistīti ar jebkuru strauju darba režīma izmaiņu (pēkšņš īsslēgums, pēkšņa slodzes maiņa u. c.). Intensīvi pārejas procesi būtiski ietekmē atsevišķu mašīnu darbību. Tie var būt par cēloni nopietnām avārijām elektriskajā sistēmā.

Jebkura veida pārejas procesus sinhronajās mašīnās var aprakstīt ar diferenciālvienādojumiem. Sinhronajās mašīnās, kā tika parādīts iepriekš, pastāv magnētiska un elektriska nesimetrija. Turklāt rotora tinumi attiecībā pret enkura tinumiem pārvietojas un tā rezultātā mainās savstarpējā induktivitāte starp šiem tinumiem. Tāpēc diferenciālvienādojumi šajā gadījumā ir visai sarežģīti. Minētā iemesla dēļ, aplūkojot pārejas



procesus, galveno uzmanību veltīsim fizikālo parādību analīzei.

Nākamajā apakšnodaļā apskatīsim trīsfāžu sinhronā ģenerators pēkšņo īsslēgumu.

### 6.10.2. Fizikālie procesi ģeneratorā pēkšņā īsslēguma laikā

Pieņemsim, ka trīsfāžu pēkšņais īsslēgums notiek tukšgaitā, ģenerators rotācijas frekvence  $n$ , magnētiskās ķēdes piesātinājums, kā arī ierosmes tinuma barošanas spriegums īsslēguma laikā paliek nemainīgi.

Enkura tinuma pēkšņā īsslēguma process pamatvilcienos ir analogisks īsslēgumam jebkurā maiņstrāvas ķēdē. Tas nozīmē, ka īsslēguma laikā enkura tinumos rodas uzspiestās periodiskās un brīvās aperiodiskās strāvas, kuras norimst ar noteiktām laika konstantēm un kuru summa katrā tinuma fāzē sākuma brīdī ir vienāda ar nulli. Sakarā ar procesa sarežģītību aplūkosim to divos posmos: vispirms noteiksim īsslēguma strāvu sākuma vērtības un tad šo strāvu izmaiņas īsslēguma procesā.

Sinhrono mašīnu tinumu aktīvās pretestības salīdzinājumā ar induktīvajām pretestībām ir mazas un praktiski neietekmē īsslēguma strāvu sākuma vērtības. Tās ietekmē aperiodisko strāvu rimšanas ātrumu. Tāpēc, nosakot īsslēguma strāvu sākuma vērtības, var pieņemt, ka tinumu aktīvās pretestības ir vienādas ar nulli un visi tinumi ir supravadoši.

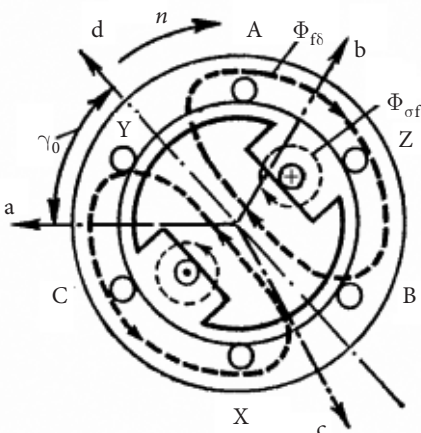
Elektriskam kontūram, kurā nav EDS avotu, ir spēkā vienādojums:

$$-\frac{d\psi}{dt} = Ri, \tag{6.51}$$

kur  $\psi$  – kontūra plūsmas saķēdējums, ko rada paša kontūra strāva, kā arī to kontūru strāvas, kuri induktīvi saistīti ar aplūkojamo kontūru.

Supravadošam kontūram pretestība  $R = 0$ , tāpēc vienādojuma (6.51.) vietā var rakstīt:

$$\frac{d\psi}{dt} = 0, \tag{6.52}$$



6.23. att. Sinhronā ģenerators magnētiskā lauka aina pirms pēkšņā īsslēguma.

no kurienes izriet, ka  $\psi = const$ , t. i., supravadoša kontūra plūsmas saķēdējums ir nemainīgs.

Noskaidrosim, kā, izmantojot nosacījumu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu, var izskaidrot periodisko un aperiodisko strāvu rašanos enkura tinumā īsslēguma procesa sākumā. Pieņemsim patvaļīgu īsslēguma sākuma momentu ( $t = 0$ ), kad rotora polu ass atpaliek par leņķi  $\gamma_0$  no A fāzes ass (6.23. att.).

Polu plūsmas  $\Phi_{f\delta}$  radītais plūsmas saķēdējums ar katru enkura tinuma fāzi  $\psi_A, \psi_B, \psi_C$  īsslēguma sākuma momentā ir dažāds, jo attiecībā pret polu lauku enkura tinuma fāzes atrodas dažādos apstākļos. Ja ar  $\psi_m$  apzīmējam plūsmas saķēdējumu ar tinuma fāzi momentā,

kad šīs fāzes ass sakrīt ar polu asi, tad īsslēguma sākuma momentā

$$\left. \begin{aligned} \Psi_A &= \Psi_m \cos \gamma_0; \\ \Psi_B &= \Psi_m \cos(\gamma_0 - 120^\circ); \\ \Psi_C &= \Psi_m \cos(\gamma_0 - 240^\circ). \end{aligned} \right\} \quad (6.53.)$$

Saskaņā ar nosacījumu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu šādi plūsmas saķēdējumi saglabājas arī tad, ja  $t > 0$ . Tādējādi pēkšņā īsslēguma laikā jārodas strāvām, kas uzturētu šos plūsmas nemainīgos saķēdējumus. Nemainīgus plūsmas saķēdējumus ar statora fāzēm var radīt tikai nemainīgas aperiodiskās strāvas:

$$\left. \begin{aligned} i_{aa} &= I_{am} \cos \gamma_0; \\ i_{ba} &= I_{am} \cos(120^\circ - \gamma_0); \\ i_{ca} &= I_{am} \cos(240^\circ - \gamma_0). \end{aligned} \right\} \quad (6.54.)$$

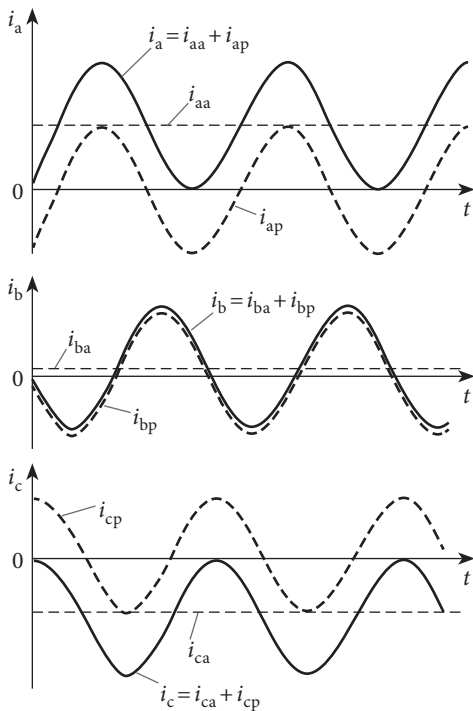
Šīs strāvas var uzskatīt par noteiktas simetriskas sistēmas fāžu strāvu momentānajām vērtībām. Strāva  $I_{am}$  formulās (6.54.) ir aperiodiskās strāvas amplitūda. Strāvu  $i_{aa}$ ,  $i_{ba}$ ,  $i_{ca}$  radītās plūsmas kopā veido enkura aperiodisko plūsmu  $\Phi_a$ . Šī plūsma ir nekustīga telpā un veido nemainīgus plūsmas saķēdējumus ar enkura tinuma fāzēm.

Tādējādi plūsmas saķēdējuma nemainīgumu ar enkura tinuma fāzēm nodrošina enkura tinuma aperiodiskās strāvas. Supravadošos tinumos tās nerimst arī tad, ja  $t > 0$ .

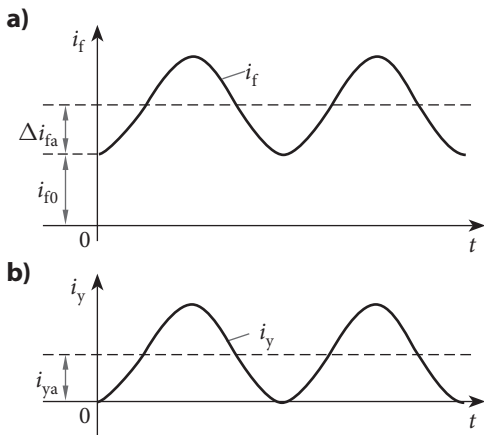
Rotoram griežoties, polu plūsma  $\Phi_{f\delta}$  ar enkura tinuma fāzēm rada periodiski mainīgu plūsmas saķēdējumu ar frekvenci  $f_1 = pn/60$ . Tāpēc, lai saglabātu nemainīgu plūsmas saķēdējumu ar enkura fāzēm, bez aperiodiskām strāvām šajos tinumos jārodas periodiskām strāvām  $i_{ap}$ ,  $i_{bp}$ ,  $i_{cp}$ . Šīs strāvas rada enkura reakcijas plūsmu  $\Phi_p$ , kas rotē sinhroni ar rotoru un ir vērsta pretī ierosmes plūsmai  $\Phi_{f\delta}$ . Plūsmas  $\Phi_{f\delta}$  un  $\Phi_p$  šajā gadījumā kompensē viena otru. Acīm redzams, ka laika momentā  $t = 0$  periodiskās strāvas fāzēs ir vienādas ar aperiodiskām strāvām un pretēji vērstas. Tas atbilst nosacījumam, ka īsslēgums notiek tukšgaitā un summārās strāvas fāzēs ir vienādas ar nulli.

6.24. attēlā parādītas enkura periodisko, aperiodisko un rezultējošo strāvu izmaiņas laikā tinuma fāzēs, neievērojot šo strāvu rimšanu. Leņķa  $\gamma_0$  vērtība šajā gadījumā atbilst 6.23. att. parādītajai vērtībai.

Enkura aperiodiskā plūsma  $\Phi_a$  ir nekustīga telpā un, rotoram griežoties, šķeļ ierosmes tinumu un slāpētājtinumu, ja tāds mašīnā ir izveidots. Rezultātā rotora tinumos inducējas periodiskas strāvas  $i_{fp}$  (ierosmes tinumā) un  $i_{yp}$  (slāpētājtinumā). Šīs strāvas supravadošiem kontūriem ir tīri induktīvas, un saskaņā ar Lenca likumu rodas plūsma, kas darbojas pretī plūsmai  $\Phi_a$  un cenšas to samazināt. Izejot no enkura tinuma plūsmas saķēdējuma nemainīguma, pieaug enkura aperiodiskās strāvas. Tas savukārt izraisa rotora periodisko strāvu  $i_{fp}$  un  $i_{yp}$  palielināšanos. Rezultātā izveidojas visai sarežģīts enkura aperiodisko un rotora periodisko strāvu savstarpējās iedarbības process, kad šīs strāvas cenšas pastiprināt viena otru. Līdzsvars un plūsmas saķēdējuma nemainīguma nodrošinājums tiek panākts uz izkliedes plūsmu rēķina. Jo mazākas tinumu izkliedes induktīvās pretestības, jo lielākas būs arī minētās strāvas. Robežgadījumā, ja izkliedes



6.24. att. Pēkšņā išslēguma strāvas enkura tinumā.



6.25. att. Strāvas izmaiņas ierosmes tinumā (a) un slāpētājinumā (b).

induktīvās pretestības vienādas ar nulli, enkura aperiodiskās un rotora periodiskās strāvas pieaugtu bezgalīgi.

Līdzīgi enkura tinuma periodiskās strāvas  $i_{ap}$ ,  $i_{bp}$ ,  $i_{cp}$  cenšas samazināt rotora tinumu plūsmu saķēdējumu, bet supravadošiem kontūriem tas nav iespējams. Tāpēc ierosmes tinumā un slāpētājinumā parādās tāda virziena un lieluma strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$ , kuru radītā plūsma darbojas preti plūsmai  $\Phi_p$ , bet saskaņoti ar plūsmu  $\Phi_{f\delta}$ .

Strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  ir rotora tinumu aperiodiskās strāvas, kas izraisa attiecīgu enkura periodisko strāvu  $i_{ap}$ ,  $i_{bp}$ ,  $i_{cp}$  palielināšanos. Līdzsvars arī šajā gadījumā tiek sasniegts uz izkliedes plūsmu rēķina.

Tādējādi pēkšņā išslēguma gadījumā visos sinhronā ģenerators tinumos rodas periodiskās un aperiodiskās strāvas. Turklāt induktīvi ir saistītas enkura aperiodiskās strāvas  $i_{aa}$ ,  $i_{ba}$ ,  $i_{ca}$  ar rotora periodiskajām strāvām  $i_{fp}$ ,  $i_{yp}$  un enkura periodiskās strāvas  $i_{ap}$ ,  $i_{bp}$ ,  $i_{cp}$  ar rotora aperiodiskajām strāvām  $\Delta i_{fa}$ ,  $i_{ya}$ .

Pieņemot, ka arī rotora tinumi ir supravadoši, strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  nerimst (6.25. att.). Šajā attēlā parādītas strāvu izmaiņas ierosmes tinumā un slāpētājinumā.

Īstenībā sinhronā ģenerators tinumu aktīvās pretestības nav vienādas ar nulli, tāpēc išslēguma sākumā radušās brīvās aperiodiskās strāvas norimst, un kopā ar tām norimst arī periodiskās strāvas. Rezultātā, ja  $t = \infty$  (teorētiski), iestājas stacionārs išslēguma režīms, kad ierosmes tinumā plūst tikai strāva  $i_{f0}$  un enkura tinumā tai atbilstoša periodiskā strāva.

### 6.10.3. Pēkšņā išslēguma strāvas

Lietosim teorēmu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu sākuma momentam  $t = 0$

un pieņemsim, ka induktora garenass  $d$  sakrīt ar enkura vienas fāzes asi, piemēram,  $a$  fāzes asi. Bez tam pieņemsim, ka rotora tinumi reducēti uz enkura tinumu.

Uzrakstīsim vienādojumus plūsmu saķēdējumiem, ko rada rotora aperiodiskās un enkura periodiskās strāvas īsslēguma sākuma momentā:

$$\left. \begin{aligned} L_{ad}(i_{f0} + \Delta i_{fa}) + L_{ad} i_{ya} - (L_{ad} + L_{\sigma a}) I_{pm} &= 0; \\ (L_{ad} + L_{\sigma f})(i_{f0} + \Delta i_{fa}) + L_{ad} i_{ya} - L_{ad} I_{pm} &= (L_{ad} + L_{\sigma f}) i_{f0}; \\ L_{ad}(i_{f0} + \Delta i_{fa}) + (L_{ad} + L_{\sigma yd}) i_{ya} - L_{ad} I_{pm} &= L_{ad} i_{f0}, \end{aligned} \right\} \quad (6.55.)$$

kur  $I_{pm}$  – enkura tinuma periodiskās strāvas amplitūdas vērtība.

Pirmais no šiem vienādojumiem ataino tās fāzes plūsmas saķēdējumu, kuras ass sakrīt ar  $d$  asi. Pirmais loceklis ir plūsmas saķēdējums no ierosmes tinuma aperiodiskās strāvas. Otrais loceklis atbilst plūsmas saķēdējumam no slāpētājtinuma aperiodiskās strāvas, bet trešais ir plūsmas saķēdējums no strāvas pašā enkura tinumā. Pēdējais loceklis pierakstīts ar mīnus zīmi, tā kā enkura plūsma ir vērsta pretī induktora plūsmai. Saskaņā ar iepriekš izklāstīto enkura plūsmas saķēdējums no minētajām strāvām ir vienāds ar nulli, jo plūsmas saķēdējuma nemainīgumu nodrošina enkura aperiodiskās un induktora periodiskās strāvas.

Otrā vienādojuma (6.55.) kreisā puse nosaka ierosmes tinuma plūsmas saķēdējumu no induktora aperiodiskajām un enkura periodiskajām strāvām, ja  $t=0$ , bet labā puse vienāda ar ierosmes tinuma plūsmas saķēdējumu tieši pirms īsslēguma. Trešais vienādojums (6.55.) analogiskā veidā ataino slāpētājtinuma plūsmas saķēdējuma nemainīgumu no minētajām strāvām. Pirms pēkšņā īsslēguma slāpētājtinuma plūsmas saķēdējums vienāds ar  $L_{ad} i_{f0}$ .

Katrs loceklis vienādojumos (6.55.) nosaka dotā tinuma plūsmas saķēdējumu no strāvas atsevišķā tinumā. Savstarpējās indukcijas plūsmas saķēdējumu nosaka induktivitāte  $L_{ad}$ , bet pašinducijas plūsmas saķēdējumus –  $L_{ad} + L_{sa}$ .

Pareizināsim vienādojumus (6.55.) ar  $\omega = 2\pi f$ . Tad, ņemot vērā, ka

$$\omega L_{ad} i_{f0} = X_{ad} i_{f0} = E_m,$$

pēc pārveidojumiem iegūstam:

$$\left. \begin{aligned} X_{ad}(-\Delta i_{fa} - i_{ya} + I_{pm}) + X_{\sigma a} I_{pm} &= E_m; \\ X_{ad}(\Delta i_{fa} + i_{ya} - I_{pm}) + X_{\sigma f} \Delta i_{fa} &= 0; \\ X_{ad}(\Delta i_{fa} + i_{ya} - I_{pm}) + X_{\sigma yd} i_{ya} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.56.)$$

kur

$$X_{\sigma a} = \omega L_{\sigma a}; X_{\sigma f} = \omega L_{\sigma f}; X_{\sigma yd} = \omega L_{\sigma yd} \quad (6.57.)$$

ir attiecīgi enkura tinuma, ierosmes tinuma un slāpētājtinuma izkliedes induktīvās pretestības.  $E_m$  ir EDS amplitūdas vērtība, ko enkura tinumā tukšgaitā inducē ierosmes strāva  $i_{f0}$ .

Vienādojumiem (6.56.) atbilst 6.26. attēlā parādītās ekvivalentās shēmas. Par to var

viegli pārlicināties, uzrakstot sprieguma vienādojumus strāvu  $I_{pm}$ ,  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  kontūriem.

Saskaņā ar 6.26. att. a, shēmu enkura periodiskās strāvas sākuma vērtību  $I_{pm}$ , kas vienāda ar aperiodiskās strāvas maksimālo vērtību  $I_{am}$ , var aprēķināt pēc formulas:

$$I_{pm} = I_{am} = \frac{E_m}{X_d''}, \quad (6.58.)$$

kur

$$X_d'' = X_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma yd}}} \quad (6.59.)$$

ir sinhronās mašīnas garenlauka virspārejas induktīvā pretestība.

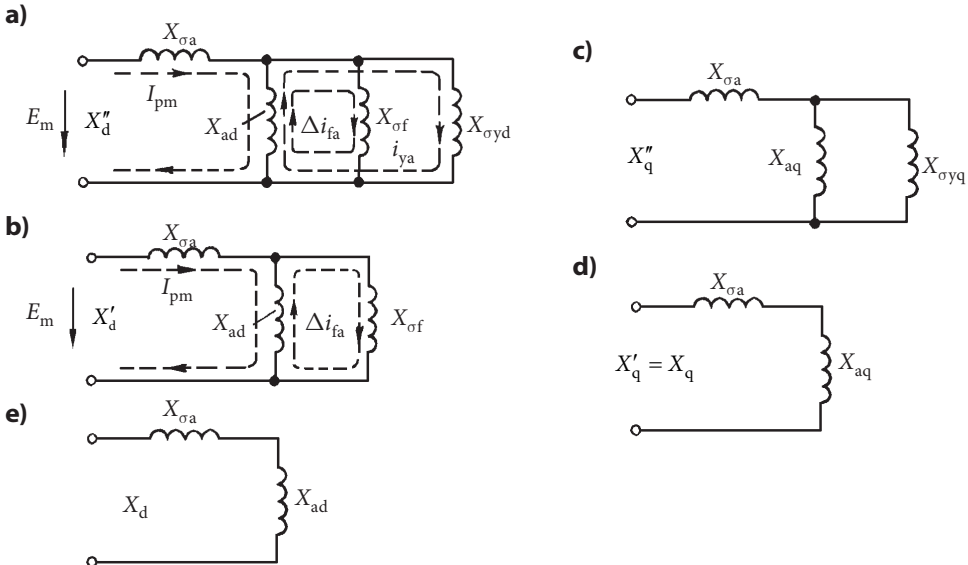
Šķērslaukam atbilstošiem pārejas procesiem ir spēkā 6.26. att. b un d shēmas. Gadījumā, kad sinhronajā mašīnā ir slāpētājtinums, pa šķērsasi, darbojas šķērslauka virspārejas induktīvā pretestība:

$$X_q'' = X_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{\sigma yq}}}, \quad (6.60.)$$

bet gadījumā, kad šāda tinuma nav, šķērslauka pārejas induktīvā pretestība ir:

$$X_q' = X_{\sigma a} + X_{aq} = X_q. \quad (6.61.)$$

Tā kā ģenerators tinumu izkliedes induktīvās pretestības  $X_{\sigma a}$ ,  $X_{\sigma f}$  un  $X_{\sigma yd}$  ir mazas, tad arī pretestība  $X_d''$  ir maza, un tāpēc enkura strāva īsslēguma sākumā sasniedz lielu vērtību. Tas nozīmē, ka pēkšņā īsslēguma strāvu ierobežo tikai tinumu izkliedes pretestības. Virspārejas induktīvās pretestības  $X_d''$  mazo vērtību var izskaidrot ar to, ka īsslēguma



6.26. att. Ekvivalentās shēmas virspārejas (a, c), pārejas (b, d) un sinhronām induktīvajām pretestībām mašīnas garenlaukam (e) un šķērslaukam (d).

sākumā enkura reakcijas plūsmu lielā mērā kompensē rotora aperiodisko strāvu radītā plūsma. Citiem vārdiem sakot, strāvu  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  darbības rezultātā enkura plūsma tiek izspiesta gaisa spraugā (6.27. att. a), kur plūsmai ir relatīvi liela magnētiskā pretestība. Mazai magnētiskajai plūsmai atbilst arī maza elektriskā pretestība  $X_d''$ .

Saskaņā ar 6.27. att. a shēmu periodiskās strāvas amplitūdas sākumvērtību  $I_{pm}$ , kas vienāda ar aperiodiskās strāvas maksimālo vērtību  $I_{am}$ , nosaka šādi:

$$I_{pm} = I_{am} = \frac{E_m}{X_d''}. \quad (6.62.)$$

Aperiodiskā strāva  $i_{ya}$  slāpētājtinumā parasti norimst ātrāk nekā ierosmes tinumā, un enkura magnētiskais lauks iespiežas slāpētājtinuma zonā (6.27. att. b). Šādiem apstākļiem atbilst (6.27. att. b) ekvivalentā shēma, kurā  $X_{\sigma yd} = \infty$ . Šīs shēmas kopējo pretestību

$$X_d' = X_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}} \quad (6.63.)$$

sauc par sinhronās mašīnas garenlauka pārejas inductīvo pretestību. Sinhronajās mašīnās bez slāpētājtinuma  $X_{\sigma yd} = \infty$ , un periodiskās strāvas maksimālā sākuma vērtība atkarīga no pretestības  $X_d'$ . Acīm redzams, ka  $X_d' > X_d''$ . Šis fakts ļauj secināt, ka slāpētājtinuma klātbūtne palielina pēkšņā īsslēguma strāvu enkura tinumā.

Pārejas procesa beigās, kad norimusi arī aperiodiskā strāva ierosmes tinumā  $\Delta i_{fa}$ , enkura lauks pilnībā iespiežas rotorā (6.27. att. c). Šādiem apstākļiem atbilst 6.27. att. c parādītā shēma, kuras kopējā pretestība ir:

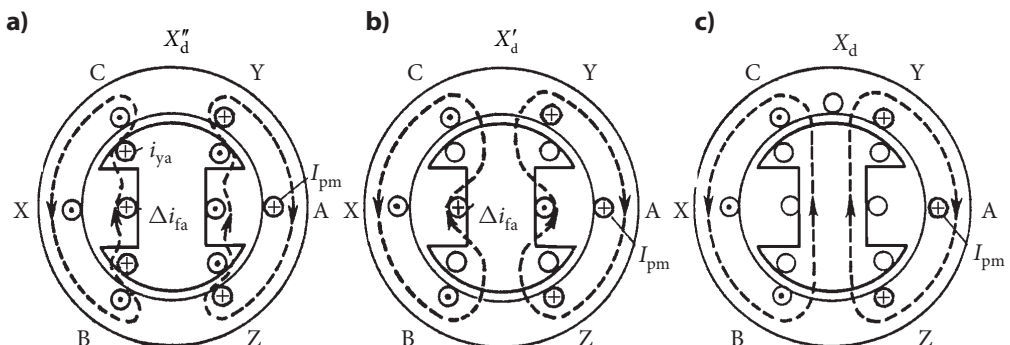
$$X_d = X_{\sigma a} + X_{ad}. \quad (6.64.)$$

Šī pretestība nosaka stacionārā īsslēguma strāvu.

Noteiksim strāvas sinhronā ģeneratora enkura tinumā pēkšņā īsslēguma laikā.

Atrisinot strāvu  $I_{pm}$  no pirmā vienādojuma (6.56.), iegūsim:

$$I_{pm} = \frac{E_m}{X_d} + \frac{X_{ad} \Delta i_{fa}}{X_d} + \frac{X_{ad} i_{ya}}{X_d}. \quad (6.65.)$$



6.27. att. Enkura magnētiskā lauka aina pēkšņā īsslēguma sākumā (a), pēc slāpētājtinuma aperiodiskās strāvas norimšanas (b) un stacionārā īsslēguma režīmā (c).

Saskaņā ar iegūto izteiksmi strāva  $I_{pm}$  sastāv no trijām sastāvdaļām. Pirmais loceklis atbilst strāvai, ko enkura tinumā inducē ierosmes strāva  $i_{f0}$ , bet pārējie divi atbilst enkura strāvas komponentēm, ko inducē strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$ .

Reālā mašīnā strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  rimst ar noteiktām laika konstantēm, rezultātā samazinās arī strāva  $I_{pm}$ . Ja  $t = \infty$ ,  $\Delta i_{f0} = i_{ya} = 0$  un saskaņā ar (6.65.) periodiskās strāvas amplitūda  $I_{pm\infty}$  atbilst stacionāram īsslēgumam:

$$I_{pm\infty} = \frac{E_m}{X_d}. \quad (6.66.)$$

Strāvas  $I_{pm}$  sākumvērtību nosaka izteiksme (6.58.). Starpība starp strāvas  $I_{pm}$  sākuma un beigu vērtībām

$$\frac{E_m}{X_d''} - \frac{E_m}{X_d} = \frac{X_{ad}(\Delta i_{fa} + i_{ya})}{X_d} \quad (6.67.)$$

rimst atbilstoši strāvu  $\Delta i_{f0}$  un  $i_{ya}$  rimšanai.

Strāvas  $\Delta i_{fa}$  un  $i_{ya}$  rimst ar laika konstantēm attiecīgi  $T_d'$  un  $T_d''$ . Ar tādām pašām laika konstantēm rimst arī attiecīgās enkura periodiskās strāvas komponentes:

pārejas komponente  $I_{pm}' e^{-\frac{t}{T_d'}}$  un virspārejas komponente  $I_{pm}'' e^{-\frac{t}{T_d''}}$ .

Pirmā no šīm divām komponentēm norimst relatīvi lēni, bet otrā – dažu periodu laikā.

Strāvu  $I_{pm}'$  un  $I_{pm}''$  vērtību nosaka šādas izteiksmes:

$$I_{pm}' = \frac{E_m}{X_d'} - \frac{E_m}{X_d}; \quad I_{pm}'' = \frac{E_m}{X_d''} - \frac{E_m}{X_d'}.$$

Nemot vērā iepriekš izklāstīto, periodiskās strāvas momentāno vērtību enkura tinuma fāzē var noteikt šādi:

$$\begin{aligned} i_p &= \left( I_{pm}'' e^{-\frac{t}{T_d''}} + I_{pm}' e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_{pm\infty} \right) \cos(\omega t + \gamma_0) = \\ &= - \left[ \left( \frac{E_m}{X_d''} - \frac{E_m}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left( \frac{E_m}{X_d'} - \frac{E_m}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_m}{X_d} \right] \cos(\omega t + \gamma_0), \end{aligned} \quad (6.68.)$$

kur  $\gamma_0$  – īsslēguma strāvas sākuma fāze (sk. att. 6.23.).

Enkura tinuma aperiodisko strāvu  $i_a$  var noteikt, izmantojot nosacījumu, ka īsslēgums notiek tukšgaitā, t. i., enkura tinuma īsslēguma strāva  $i_{k0}$  laika momentā  $t=0$  arī ir vienāda ar nulli. Tad

$$i_{p0} + i_{a0} = 0 \quad (6.69.)$$

jeb

$$i_{a0} = -i_{p0}, \quad (6.70.)$$

kur  $i_{p0}$  un  $i_{a0}$  – enkura periodiskās un aperiodiskās strāvas sākuma vērtība.

Ievietojot izteiksmē (6.68.)  $t=0$  un ievērojot (6.70.), iegūstam, ka

$$i_{a0} = \frac{E_m}{X_d''} \cos \gamma_0. \quad (6.71.)$$

Enkura tinuma aperiodiskā strāva jebkurā laika momentā ir:

$$i_a = \frac{E_m}{X_d''} \cos \gamma_0 e^{-\frac{t}{T_a}}, \quad (6.72.)$$

kur  $T_a$  – enkura aperiodiskās strāvas rimšanas konstante, kas atkarīga no enkura tinuma aktīvās pretestības un induktivitātes.

Tādējādi sinhronā ģenerators kopējā išlīguma strāva, ņemot vērā (6.68.) un (6.72.),

$$i_k = i_p + i_a = - \left[ \left( \frac{E_m}{X_d''} - \frac{E_m}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left( \frac{E_m}{X_d'} - \frac{E_m}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{E_m}{X_d} \right] \cos(\omega t + \gamma_0) + \frac{E_m}{X_d''} \cos \gamma_0 e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (6.73.)$$

Išlīguma strāvas un tās atsevišķo komponentu izmaiņa laikā vienā fāzē ģeneratoram ar slāpētājtinumu 6.28. attēlā parādīta gadījumam, kad  $\gamma_0 = 0$ , t. i., kad plūsmas saķēdējums ar aplūkoto fāzi ir maksimāls.

Gadījumā, kad ģeneratorā nav slāpētājtinuma, periodiskās strāvas virspārejas komponente ir vienāda ar nulli. Nosakot strāvu  $i_a$ , formulā (6.72.)  $X_d''$  vietā jāievieto  $X_d'$ .

Lielāko iespējamo vērtību  $i_{kmax}$ , ko sasniedz pēkšņā išlīguma strāva, sauc par išlīguma triecienstrāvu. Šādu vērtību strāva sasniedz aptuveni pēc pusperioda no išlīguma sākuma ( $\omega t = \pi$ ). Pieņemot, ka pusperioda laikā enkura strāvas periodiskās komponentes nerimst ( $T_d = T_d' = \infty$ ) un  $\gamma_0 = 0$ , no izteiksmes (6.73) iegūstam, ka

$$i_{max} = \frac{\sqrt{2}E}{X_d''} \left( 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \right) = \frac{\sqrt{2}E}{X_d''} k_m, \quad (6.74.)$$

kur lielumu

$$k_m = 1 + e^{-\frac{\pi}{\omega T_a}} \quad (6.75.)$$

sauc par triecienkoeficientu.

Tā kā  $T_a$  sinhronajos ģeneratoros parasti atrodas robežās no 0,03 līdz 0,4 s, tad no izteiksmes (6.75.) izriet, ka  $k_m = 1,7 \dots 1,98$ . Ja ievēro, ka pieļaujama sinhrono ģeneratoru darbība ar spriegumu, kas pārsniedz nominālo, t. i.,  $U = 1,05 U_N$ , tad, ievietojot izteiksmē (6.74.)  $E = 1,05 U_N$  un maksimālo triecienkoeficienta vērtību  $k_m = 1,98$ , iegūstam:

$$i_{max} = \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 1,98 \frac{U_N}{X_d''} \approx 3 \frac{U_N}{X_d''}$$

jeb relatīvajās vienībās

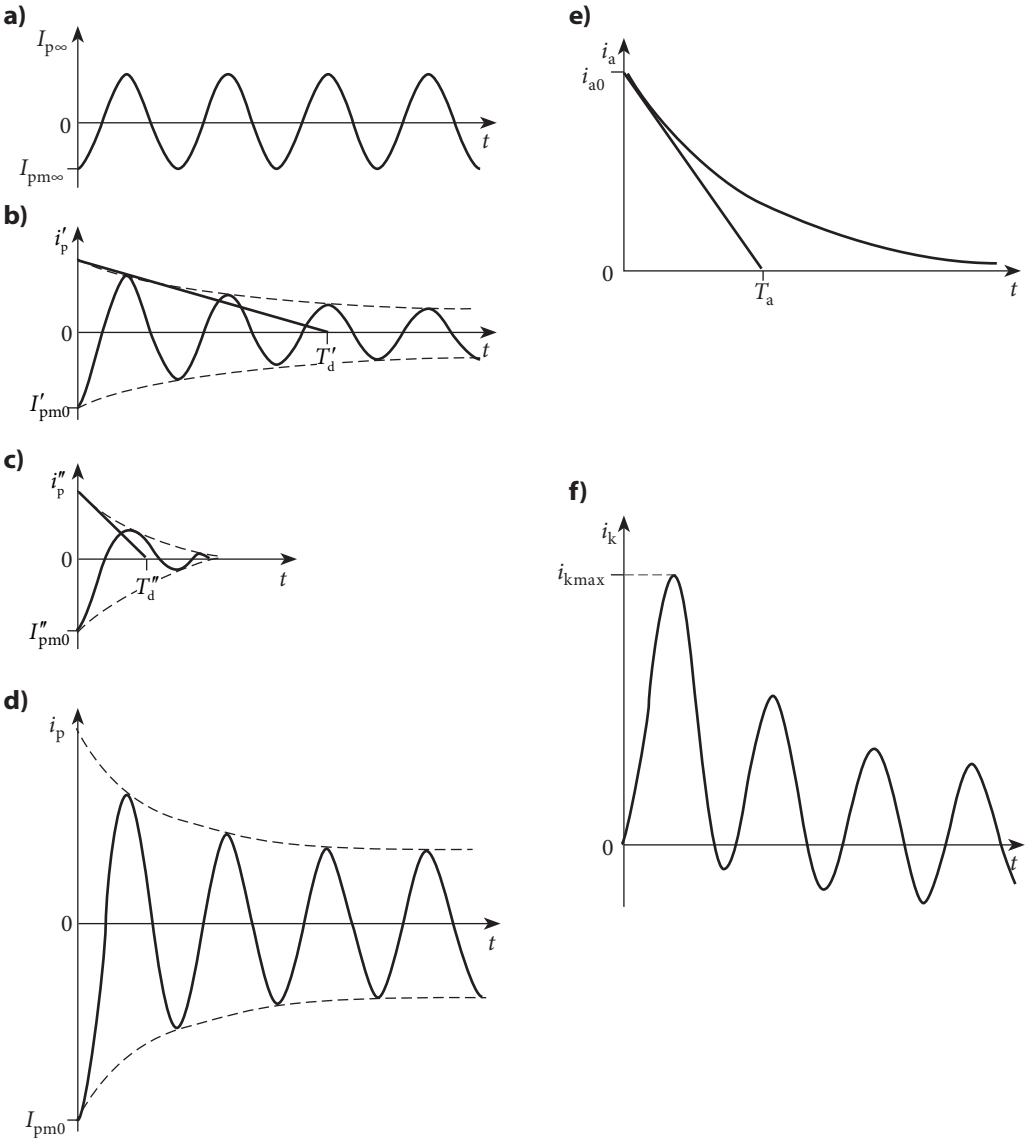
$$i_{kmax}^* = \frac{i_{kmax}}{I_N} \approx \frac{3}{X_d''^*}, \quad (6.76.)$$

kur  $I_N$  – enkura tinuma nominālā strāva.

Tā kā sinhronajās mašinās virspārejas induktīvā pretestība  $X_d''^*$  relatīvajās vienībās atrodas robežās no 0,12 līdz 0,35, tad  $i_{kmax}^*$  var pārsniegt nominālās strāvas vērtību 8 ... 25 reizes.



Īsslēguma strāvu termiskā darbība sinhronajos ģeneratoros parasti nav bīstama, jo šīs strāvas ātri norimst, turklāt elektriskajās sistēmās ātrdarbīgas aizsardzības iekārtas atslēdz tīkla posmu, kurā noticis īsslēgums. Bīstami ir elektromagnētiskie spēki, kas darbojas uz tinumu un ir proporcionāli strāvas kvadrātam. Šie spēki ir sevišķi bīstami frontālo savienojumu zonā. Tie var radīt plaisas un lūzumus izolācijā. Tāpēc tinumu nostiprināšanai un mašīnas mehāniskajai stiprībai kopumā jāpievērš pienācīga uzmanība.



6.28. att. Pēkšņā īsslēguma strāva un tās komponentes ģeneratorā ar slāpētājtinumu: a – stacionārā īsslēguma strāva; b – periodiskās strāvas pārejas komponente; c – periodiskās strāvas virspārejas komponente; d – kopējā periodiskā strāva; e – aperiodiskā strāva; f – kopējā īsslēguma strāva.

## 6.11. SINHRONO ĢENERATORU NESIMETRISKA SLODZE

### 6.11.1. Vispārīgi norādījumi

Sinhrono ģeneratoru nesimetrisko slodzi rada vienfāzes patērētāji, kā arī nesimetriskie īsslēgumi elektriskajā tīklā: vienfāzes īsslēgumi (starp līnijas vadu un nullvadu), divfāžu īsslēgumi (starp diviem līnijas vadiem) un divfāžu īsslēgumi uz neitrāli (starp diviem līnijas vadiem un neitrāli).

Lai arī nesimetriskie īsslēgumi parasti darbojas īslaicīgi, jo mūsdienu elektriskajās sistēmās ir uzstādītas ātrdarbīgas aizsardzības iekārtas, kas atslēdz tīkla posmu, kurā noticis īsslēgums, tie būtiski ietekmē ģeneratoru un tīkla darbību. Pēkšņo nesimetrisko īsslēgumu laikā notiek pārejas procesi. Tomēr, lai noskaidrotu parādību galvenās īpatnības, vispirms aplūkosim stacionāros nesimetriskos īsslēgumus.

Nesimetrisko režīmu analīzei var izmantot vispārpieņemto simetrisko komponentu metodi, saskaņā ar kuru nesimetrisku trīsfāžu strāvu vai spriegumu sistēmu sadala trijās simetriskās sistēmās: tiešā, pretējā un nullsecības sistēmā. Katru no šīm sistēmām raksturo savi parametri: aktīvās ( $R_1, R_2, R_0$ ), induktīvās ( $X_1, X_2, X_0$ ) un pilnās ( $Z_1, Z_2, Z_0$ ) pretestības.

### 6.11.2. Tiešās, pretējās un nullsecības strāvas un pretestības

Simetriskas slodzes gadījumā sinhronā ģeneratora enkura tinumos pastāv tikai tiešās secības strāvas. Tāpēc viss šajā nodaļā iepriekš izklāstītais attiecas uz šo gadījumu un pretestības  $X_d$  un  $X_q$  ir sinhronās mašīnas pretestības tiešās secības strāvām.

Svarīgākā sinhrono mašīnu īpatnība normālos darba režīmos ar tiešās secības strāvām ir tā, ka rotors griežas sinhroni ar tiešās secības strāvu radīto lauku (enkura reakcijas lauku). Tāpēc šis lauks neinducē strāvas induktora tinumos un pretestības  $X_d$  un  $X_q$  ir lielas. Lietojot asinhrono mašīnu terminoloģiju, var teikt, ka sinhronās mašīnas rotora slīde attiecībā pret tiešās secības strāvu radīto lauku ir vienāda ar nulli  $s = s_1 = 0$ .

Pretējās secības strāvas  $I_2$  rada rotējošu magnētisko lauku, kas griežas ar tādu pašu rotācijas frekvenci kā tiešais lauks, tikai pretējā virzienā. Tā kā rotors griežas tiešajā virzienā ar sinhrono ātrumu, tad attiecībā pret enkura pretējo lauku rotora slīde  $s_2 = 2$  un ierosmes tinumā, slāpētājtinumā un rotora masīvajos elementos inducējas divkāršas frekvences strāvas, kas izraisa silšanu un attiecīgus zudumus. Ņemot vērā iepriekš teikto, šāds režīms ir ekvivalents asinhronās mašīnas elektromagnētiskās bremzes režīmam ar slīdi  $s = 2$ .

Tā kā sinhronās mašīnas rotoram ir magnētiska un elektriska nesimetrija, tad pretējās secības induktīvā pretestība ir atkarīga no stāvokļa, kādu dotajā laika momentā ieņem rotors attiecībā pret enkura pretējo lauku. Laika momentā, kad enkura pretējā lauka un rotora polu asis sakrīt, savstarpējās induktivitātes plūsma darbojas polu garenass virzienā un ar ierosmes un slāpētājtinumu ir maksimālais plūsmas saķēdējums. Ja neņem vērā

nelielās tinumu aktīvās pretestības, pretējās secības strāvām šajā gadījumā atbilst induktīvā pretestība  $X_d''$ . Momentā, kad enkura pretējā lauka asis ir savstarpēji perpendikulāras, plūsmas saķēdējums ar ierosmes tinumu ir vienāds ar nulli un enkura pretējās secības strāvām atbilst induktīvā pretestība  $X_{2q}$ . Sinhronās mašīnas pretējās secības induktīvo pretestību  $X_2$  nosaka šādi:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2}, \quad (6.77)$$

kur  $X_d''$  un  $X_q''$  nosaka attiecīgi no izteiksmēm (6.59) un (6.60).

Sinhronajā mašīnā bez slāpētājtinuma

$$X_2 = \frac{X_d' + X_q}{2} \quad (6.78.)$$

un pretestības  $X_d'$  un  $X_q$  aprēķina no formulām (6.63.) un (6.61.).

Pateicoties rotora strāvu ekranējošai darbībai, pretestība  $X_2$  ir mazāka nekā pretestības  $X_d$  un  $X_q$  (sk. 6.10. apakšnodaļu).

Nullsecības strāvas  $I_0$  statora tinumā rada gaisa spraugā pulsējošu magnētisko lauku, kas satur harmonikas ar kārtas numuriem  $\nu = 3, 9, 15 \dots$ . Tā kā sinhronajās mašīnās ir relatīvi liela gaisa sprauga, šīs harmonikas ierosmes un slāpētājtinumā inducē nelielas strāvas. Sakarā ar to, ka gaisa spraugā nav lauka pamatharmonikas, nullsecības induktīvo pretestību  $X_0$  praktiski nosaka rievās izkliedes un frontālo savienojumu izkliedes lauki.

Tādējādi sinhronajās mašīnās  $X_1 > X_2 > X_0$ .

### 6.11.3. Nesimetrisko režīmu ietekme uz sinhrono ģeneratoru darbību

Sinhrono ģeneratoru statoru tinumus parasti slēdz zvaigznē. Mazas jaudas ģeneratoros nullpunkts ir izolēts, bet lielas jaudas ģeneratoros – iezemēts ar lielu pretestību. Tāpēc nullsecības strāvas ir niecīgas vai vispār nav, un sinhronajos ģeneratoros nesimetriskas slodzes gadījumā bez tiešās secības strāvām vēl eksistē tikai pretējās secības strāvas. Pēdējās izraisa virkni nevēlamu parādību.

Divkāršās frekvences strāvas, kas rotorā inducē pretējās secības strāvas, izraisa tā silšanu, rada palielinātus zudumus un samazina mašīnas lietderības koeficientu. Šīs strāvas slāpētājtinumos un rotora masīvajos elementos var būt ievērojamas.

Turboģeneratoru rotoru pastiprināta silšana var izraisīt bīstamas deformācijas un ierosmes tinuma izolācijas bojājumus. Izvirzīto polu ģeneratoros ierosmes tinuma dzesēšanas apstākļi ir labāki, un tāpēc slāpētājtinuma pastiprināta silšana ierosmes tinumu temperatūru ietekmē mazāk. Izvirzīto polu mašīnās ierosmes tinuma izkliedes pretestība ir lielāka un tajā inducētās strāvas ir mazākas. Tāpēc ierosmes tinuma papildu silšana, ko izraisa nesimetriska slodze, šajās mašīnās ir neliela.

Ierosmes un enkura tiešo un pretējo lauku mijiedarbības rezultātā, kā arī enkura tiešās secības lauka un rotora divkāršās frekvences strāvu radītā lauka mijiedarbības rezultātā uz rotoru un statoru darbojas laikā mainīgi spēki, kas pulsē ar frekvenci  $2f_1$ , rada vibrācijas un vājina konstrukciju mehānisko stiprību: šie faktori ir jo lielāki, jo

lielāka slodzes nesimetrija.

Pretējās secības strāvas enkura tinuma fāzēs izraisa sprieguma kritumus  $I_2 Z_2$ , kuru vektori attiecībā pret tiešās secības spriegumiem dažādās fāzēs orientēti dažādi. Rezultātā ģenerators fāžu spriegumi kļūst nesimetriski, un vairāk noslogotajās fāzēs spriegums ir zemāks. Tas pasliktina patērētāju darbības apstākļus, īpaši asinhronajiem un sinhronajiem dzinējiem.

Mašīnās ar slāpētājtinumiem un masīviem rotoriem vai poliem pretestība  $Z_2$  ir mazāka, un attiecīgi spriegumu nesimetrija arī ir mazāka. Šo apstākli var izskaidrot ar to, ka saskaņā ar Lenca likumu rotorā inducētās strāvas uz enkura pretējo lauku darbojas atmagnetizējoši.

Var pierādīt, ka gadījumā, ja sinhronās mašīnas garenlauka un šķērslauka pretestības nav vienādas, statora tinumos rodas strāvas ar trīskāršu frekvenci. Šīs strāvas rada sprieguma un strāvas līknes formas kropļojumus. Sevišķi stipri strāvas līknes formas kropļojumi novērojami nesimetriskajos īsslēgumos. Strāvas augstākās harmonikas var izraisīt bīstamas rezonanses parādības, kad uz statora tinumiem rodas palielināti spriegumi, kas var būt bīstami mašīnas izolācijai. Gadījumā, ja izvirzīto polu mašīnās ir slāpētājtinums vai turboģeneratoros slāpētājtinuma lomu veiksmīgi pilda masīvais rotors, aptuveni var pieņemt, ka  $X_d'' \approx X_q''$ . Tādā gadījumā strāvas saglabājas sinusoidālas un minēto pārspriegumu rašanās nedraud.

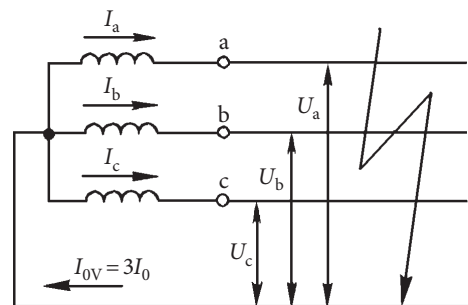
Sinhrono ģeneratoru pieļaujamo slodzes nesimetriju pirmām kārtām un galvenokārt nosaka rotora silšana, kā arī mašīnas vibrācija.

#### 6.11.4. Sinhrono ģeneratoru nesimetriskie īsslēgumi

Aplūkosim sinhronā ģenerators nesimetriskos īsslēgumus, ja tā tinumi slēgti zvaigznē un īsslēgumi notiek tukšgaitā. Lai noteiktu īsslēguma strāvas, sastādīsim vienādojumus, kuri saista dažādu secību strāvas  $I_1, I_2, I_0$ , pretestības  $Z_1 = X_1, Z_2 = X_2, Z_0 = X_0$  un spriegumus  $U_1, U_2, U_0$ . Spriegumi  $U_1, U_2, U_0$  ir fāžu spriegumu  $U_a, U_b, U_c$  simetriskās komponentes īsslēguma vietā (6.29. att.).

Ierosmes strāva inducē tikai tiešās secības EDS  $E_1 = E$ , tāpēc  $E_2 = E_0 = 0$ . Tā kā visas fāzes līdz īsslēguma vietai ir simetriskas, tiešās, pretējās secības un nullsecības spriegumu vienādojumi ir šādi:

$$(6.79.) \left. \begin{aligned} \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 + jX_1 \dot{I}_1; \\ 0 &= \dot{U}_2 + jX_2 \dot{I}_2; \\ 0 &= \dot{U}_0 + jX_0 \dot{I}_0. \end{aligned} \right\}$$



6.29. att. Fāžu spriegumi un strāvas ģenerators nesimetriskos īsslēgumos.

Fāžu strāvas un spriegumus var izteikt ar to simetriskajām komponentēm:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{I}_c &= a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.80.)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_b &= a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \\ \dot{U}_c &= a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.81.)$$

kur  $a = e^{j2\pi/3}$ ;  $a^2 = e^{j4\pi/3}$ , turklāt  $1 + a + a^2 = 0$ .

Uzskatīsim, ka lielumi  $X_1, X_2, X_0$  un  $E$  ir zināmi. Tad deviņi vienādojumi (6.79.–6.81.) satur divpadsmit nezināmās strāvas un spriegumus. Lai tos atrisinātu, katram konkrētajam īsslēguma veidam papildus vēl jā sastāda trīs vienādojumi.

Vienfāzes īsslēgumā saskaņā ar 6.30. attēlā parādītajām shēmām:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= 0; \\ \dot{I}_b &= 0; \\ \dot{I}_c &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.82.)$$

divfāžu īsslēgumā:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{U}_c; \\ \dot{I}_a &= 0; \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.83.)$$

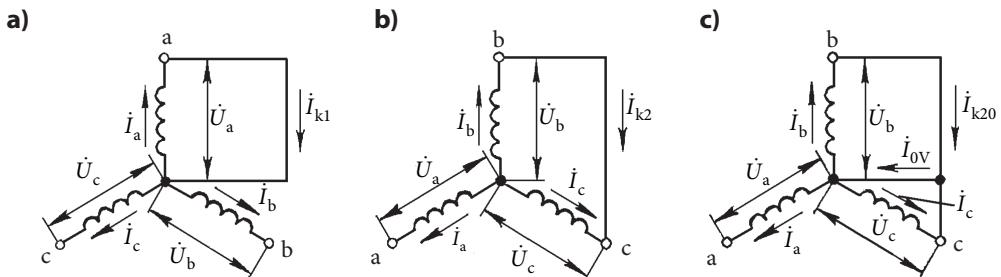
divfāžu īsslēgumā uz neitrāli:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0; \\ \dot{U}_b &= 0; \\ \dot{U}_c &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6.84.)$$

Izteiksmes (6.82.), (6.83.) un (6.84.) veido nepieciešamos papildu vienādojumus katram īsslēguma veidam.

Atrisinot katram īsslēguma veidam atbilstošo vienādojumu sistēmu, iegūstam:

$$\dot{I}_{k1} = -j \frac{3\dot{E}}{X_1 + X_2 + X_3}; \quad (6.85.)$$



6.30. att. Sinhronā ģeneratora nesimetrisko īsslēgumu shēmas: a – vienfāzes īsslēgums; b – divfāžu īsslēgums; c – divfāžu īsslēgums uz neitrāli.

$$\dot{I}_{k2} = -j \frac{\sqrt{3}\dot{E}}{X_1 + X_2}; \quad (6.86.)$$

$$\dot{I}_{k20} = -j \frac{\sqrt{3} \left[ \left( \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) X_2 + X_0 \right] \dot{E}}{X_1 X_2 + X_1 X_0 + X_2 X_0}. \quad (6.87.)$$

Strāvu efektīvās vērtības vienfāzes īsslēgumā, divfāžu īsslēgumā un divfāžu izslēgumā uz neitrāli attiecīgi var aprēķināt:

$$I_{k1} = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}; \quad (6.88.)$$

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}E}{X_1 + X_2}; \quad (6.89.)$$

$$I_{k20} = \frac{\sqrt{3}E \sqrt{X_2^2 + X_2 X_0 + X_0^2}}{X_1 X_2 + X_1 X_0 + X_2 X_0}. \quad (6.90.)$$

Simetriskā īsslēgumā (sk. 6.10. apakšnodaļu) strāvu aprēķina pēc formulas:

$$I_{k3} = \frac{E}{X_1}. \quad (6.91.)$$

Ja nullvada pretestība ir vienāda ar nulli un īsslēgums notiek uz mašīnas spailēm,  $X_1 > X_2 > X_0$ . Tāpēc pie vienādām EDS  $E$  vērtībām  $I_{k1} > I_{k2} > I_{k20} > I_{k3}$ . Fizikāli tas izskaidrojams ar to, ka vienfāzes īsslēgumā atmagnetizējošu enkura reakciju rada tikai vienas fāzes strāva. Palielinoties īsslēgto fāžu skaitam, enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pastiprinās, rezultējošā plūsma gaisa spraugā samazinās, un tāpēc samazinās arī īsslēguma strāva. Teikto ilustrē 6.31. attēlā parādītās īsslēguma raksturlīknes. Tās ir lineāras, jo enkura reakcijas plūsma atmagnetizē mašīnu, un tāpēc magnētiskā ķēde ir vāji piesātināta.

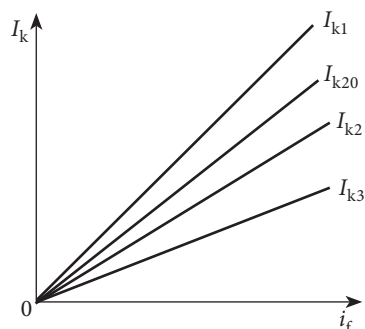
Ja ir zināma noteiktai ierosmes strāvai atbilstošā tukšgaitas EDS  $E$  vērtība, izmantojot eksperimentāli uzņemtās īsslēguma raksturlīknes, var noteikt sinhronās mašīnas pretestības  $X_1$ ,  $X_2$  un  $X_0$

$$X_1 = \frac{E}{I_{k3}}; \quad (6.92.)$$

$$X_2 = \frac{\sqrt{3}E}{I_{k2}} - \frac{E}{I_{k3}}; \quad (6.93.)$$

$$X_0 = \frac{3E}{I_{k1}} - \frac{\sqrt{3}E}{I_{k2}}. \quad (6.94.)$$

Pretestības  $X_2$  un  $X_0$  var noteikt arī eksperimentāli, veicot attiecīgos mēģinājumus – divfāžu īsslēgumu un divfāžu izslēgumu uz neitrāli – un izmērot strāvu, spriegumu un jaudu.



6.31. att. Sinhronā ģeneratora īsslēguma raksturlīknes.

## 6.12. SPECIĀLAS NOZĪMES SINHRONĀS MAŠĪNAS

### 6.12.1. Sinhronās mašīnas ar pastāvīgajiem magnētiem

Sinhrono mašīnu ar ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem (magnetoelektrisko) ieviešanu ilgu laiku kavēja augstvērtīgu un relatīvi lētu magnētu trūkums.

20. gadsimta sākumā, kad izmantoja tēraudu ar palielinātu hroma un volframa saturu (maksimālā enerģija  $0,9 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$ ), pastāvīgo magnētu praktiskā lietošana aprobežojās ar kompasēm, telefoniem, magnetoelektriskajiem mēraparātiem u. c.

Kad sāka ražot kobaltu saturošus tēraudus ar magnētisko enerģiju  $3,5 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$ , pastāvīgos magnētus sāka izmantot nelielas jaudas elektriskajās mašīnās. Tomēr sakarā ar kobalta augsto cenu pastāvīgo magnētu izmantošana paplašinājās lēni. Pagājušā gadsimta 50. gados tika uzsākta jaunu materiālu ražošana uz alumīnija-niķeļa bāzes (alni, alnisi, alniko u. c.) ar enerģiju līdz  $60 \text{ kJ/m}^3$ . Apgūstot lētos alumīnija-niķeļa sakausējumus, pastāvīgo magnētu lietošanas lauks paplašinājās. Sevišķi strauji elektriskās mašīnas ar pastāvīgajiem magnētiem sāka attīstīties pagājušā gadsimta 70. gados, kad tika uzsākta magnētu ražošana uz samārija-kobalta bāzes un citu retzemju elementu bāzes ar enerģiju līdz  $360 \text{ kJ/m}^3$ .

Sinhronajām mašīnām ar pastāvīgajiem magnētiem uz rotora nav ierosmes tinuma, bet to statoram ir parastā konstrukcija ar divfāžu vai trīsfāžu tinumiem. Šīm mašīnām ir vienkārša un droša konstrukcija, jo tām nav rotējošu tinumu un suku kontaktu.

Pastāvīgos magnētus parasti lieto nelielas un vidējas jaudas dzinējos un sinhronajos ģeneratoros, īpaši vēja enerģētiskajās iekārtās.

Sinhronos magnetoelektriskos dzinējus izgatavo divu veidu: ar radiālu un aksiālu pastāvīgo magnētu novietojumu.

Dzinējos ar radiālu magnētu novietojumu labs šihētots rotors ar īsslēgtu palaišanas tinumu novietots uz pastāvīgo magnētu poliem (6.32. att.). Dobā cilindra iekšpusē starp poliem izveidotas spraugas, kas neļauj magnētu plūsmai noslēgties šajā cilindrā.

Dzinējos ar aksiālu magnētu novietojumu rotors ir salikts – vidū atrodas parasts īsslēgts tinums, bet galos diskveida pastāvīgie magnēti (6.33. att.).

Palaižot sinhronos dzinējus ar pastāvīgajiem magnētiem, jāņem vērā tas apstāklis, ka rotors arī asinhronajā palaišanas režīmā rada ierosmes lauku. Šajā gadījumā uz rotoru bez asinhronā un slodzes statiskā momenta darbojas arī bremsējošs griezes moments. Palaižot sinhronos dzinējus ar pastāvīgajiem magnētiem, jāņem vērā, ka rotors arī asinhronajā palaišanas režīmā rada ierosmes lauku. Šajā gadījumā uz rotoru bez asinhronā un slodzes statiskā momenta darbojas arī bremsējošs griezes moments, kas rodas pastāvīgo magnētu lauka un statora tinumā inducēto strāvu mijiedarbības rezultātā. Minētais bremsējošais moments pasliktina palaišanas raksturlielnes. Turklāt pastāvīgie magnēti šādos dzinējos pakļauti enkura reakcijas atmagnetizējošai darbībai.

Sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem galvenās priekšrocības ir stabila darbība sinhronos režīmos ar mainīgu slodzi un samērā augsti enerģētiskie rādītāji. Pie trūku-

miem jāpieskaista sliktākas palaišanas raksturlieknes un augstākas cenas. Dzinējus ar pastāvīgajiem magnētiem parasti izgatavo ar nominālo jaudu, kas nepārsniedz 30–40 kW.

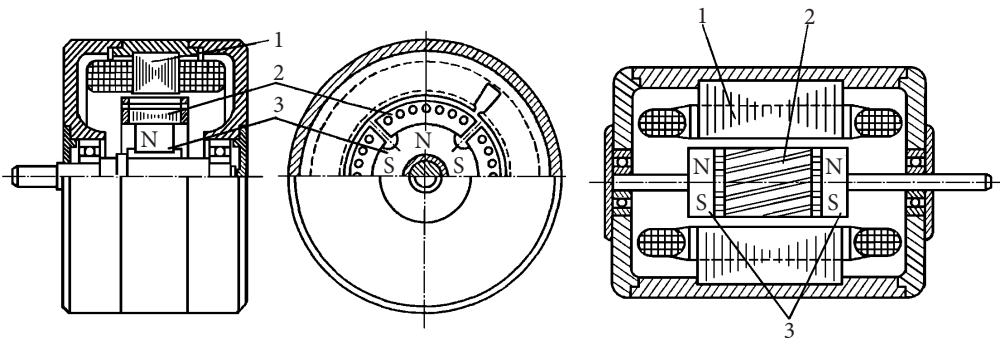
Sinhronās mašīnas ar pastāvīgajiem magnētiem aizvien plašāk izmanto kā ģeneratorus, piemēram, vēja enerģētiskajās iekārtās (VEI). Šādās iekārtās ģeneratorus tieši savieno ar vēja turbīnu, izņemot gadījumus, kad tiek izmantots multiplikators, kas palielina ģeneratora rotācijas frekvenci. Pirmajā gadījumā ģeneratoru rotācijas frekvence ir zema, bet polu pāru skaits liels. Polu pāru skaita palielināšana sinhronajos ģeneratoros ar elektromagnētisko ierosmi būtiski palielina arī rotora izmērus, masu un zudumus ierosmes tinumā, tādējādi samazinot VEI lietderības koeficientu kopumā. Tāpēc pastāvīgo magnētu izmantošana VEI ģeneratoru ierosmes sistēmās ir visai perspektīva.

Vienlaikus ar ģeneratoru konstrukcijas pilnveidošanu un pastāvīgo magnētu parametru uzlabošanu nemitīgi paplašinās arī jaudas diapazons. Mūsdienās pastāvīgos magnētus izmanto VEI ar jaudu no dažiem vatiem līdz 2–3 megavatiem. Turklāt jaudu diapazonā no 20 līdz 30 kW šādiem ģeneratoriem ir dominējošā loma.

Pastāvīgo magnētu augstie magnētiskie parametri (paliekošā indukcija lielāka par 1,2 T un koercitīvais spēks lielāks par 900 kA/m) ļauj izveidot tādu sinhronās mašīnas ierosmes sistēmu, kuras tilpums un svars ir vairākas reizes mazāks nekā sinhronai mašīnai ar elektromagnētisko ierosmi. Sevišķi spilgti šī atšķirība izpaužas daudzpolu ģeneratoru konstrukcijām.

Bez minētajām vēl jāpiemin šādas priekšrocības, kas piemīt sinhronajiem ģeneratoriem ar pastāvīgajiem magnētiem: augsts lietderības koeficients un nenozīmīga rotora silšana sakarā ar to, ka nav zudumu ierosmes tinumā un slīdošajos kontaktos; mazāki traucējumi radio un citai aparatūrai, jo nav slīdošo kontaktu ar dzirksteļošānu; lielāka ātrdarbība; ierosmei nav vajadzīgs ārējs enerģijas avots.

Ģeneratoriem ar pastāvīgajiem magnētiem piemīt arī daži trūkumi: sarežģīti regulēt un stabilizēt ģeneratora spriegumu un frekvenci; pastāvīgie magnēti ir relatīvi dārgi.



6.32. att. Sinhronais dzinējs ar radiālu magnētu novietojumu: 1 – sta-

6.33. att. Sinhronais dzinējs ar aksiālu magnētu novietojumu: 1 – stators; 2 – isslēgts rotors; 3 – pastāvīgie magnēti.



## 6.12.2. Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliem

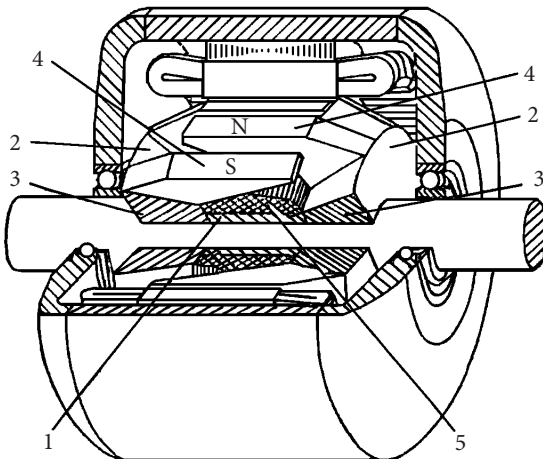
Izmantojot īpašu rotora konstrukciju – ar ķetnveida poliem, sinhronajās mašīnās iespējams atteikties no ierosmes tinuma spolēm uz katra pola un aizvietot ar vienu spoli, ko caur sukām un gredzeniem baro no līdzstrāvas avota (6.34. att.).

Rotora magnētiskā sistēma sastāv no ieliktna 1, kas nekustīgi nostiprināts uz vārpstas un divām dažādas polaritātes polu sistēmām 2. Katra polu sistēma sastāv no gredzenveida jūga 3, kas liets kopā ar ķetnveida izciļņiem 4. Polu sistēmas nostiprinātas tā, lai vienas polu sistēmas izciļņi novietotos starp otras polu sistēmas izciļņiem. Ķetnveida rotora ierosmes tinums 5 novietots starp abām polu sistēmām un tā vijumi aptver ieliktni. Līdzstrāvu ierosmes tinumam pievada ar kontaktgredzenu starpniecību (6.34. attēlā gredzeni nav parādīti).

Ķetnveida rotora priekšrocība salīdzinājumā ar parastās konstrukcijas izvērto polu rotoru ir tā vienkāršā konstrukcija un izgatavošana, jo katru polu sistēmu var izveidot kā viengabala lējumu. Tādējādi nav atsevišķi jāizgatavo un jānostiprina tajā  $2p$  poli un tikpat daudz ierosmes tinuma spoles. Tāpēc vara patēriņš un jaudas zudumi ierosmes tinumā ir mazāki nekā parastās konstrukcijas izvērto polu sinhronajās mašīnās.

Vēl viena priekšrocība, kas piemīt sinhronajām mašīnām ar ķetnveida poliem, ir iespēja izveidot tās ar nekustīgu ierosmes tinumu statorā, tātad bez slidošiem kontaktiem.

6.35. attēlā parādīts izveidojuma princips bezkontakta sinhronajai mašīnai ar ķetnveida poliem. Abi tinumi šajā gadījumā novietoti statorā 1. Ierosmes tinums sastāv no divām gredzenveida spolēm 2, kas nostiprinātas gultņu vairogos. Rotora īpatnība ir tāda, ka tajā izveidota nemagnētiska starplika 4, kas atdala polus vienu no otra. Magnētiskā



6.34. att. Sinhronā mašīna ar ķetnveida poliem: 1 – ieliktnis; 2 – polu sistēmas; 3 – polu sistēmas jūgi; 4 – polu izciļņi; 5 – ierosmes tinums.

plūsma  $\Phi$  noslēdzas caur statora serdi, papildu gaisa spraugām 7, gultņu vairogiem un ārējo magnētvaudu (korpusu) 6. Rezultātā gaisa spraugā starp statoru un rotoru ar nekustīgu ierosmes tinumu izdodas iegūt tādu pašu magnētiskā lauka sadalījumu kā parastās konstrukcijas sinhronajā mašīnā.

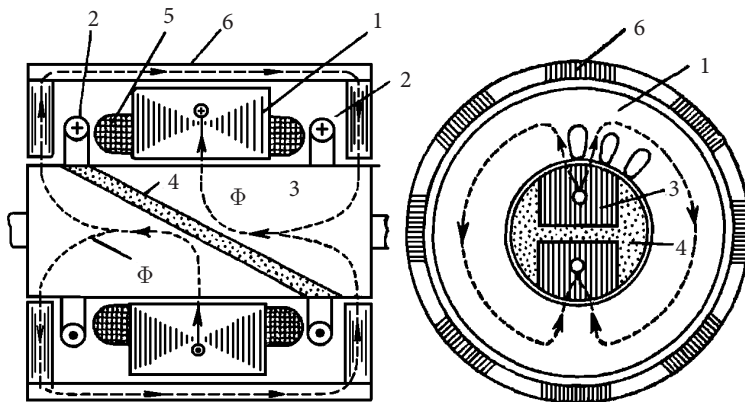
Sinhronos ģeneratorus ar ķetnveida poliem samērā plaši izmanto automobiļu, traktoru un citu transportlīdzekļu elektroapgādes sistēmās. Bezkontakta sinhronie dzinēji ar ķetnveida poliem atsevišķos gadījumos var aizstāt išslēgtos asinhronos dzinējus. Šiem dzinējiem izmanto asinhrono palaišanu, turklāt palaišanas tinuma lomu šeit veic rotora masīvie ķetnveida poli.

Jāatzīmē, ka bezkontakta sinhrono mašīnu ķetnveida rotora priekšrocības nav tik izteiktas, jo šajās mašīnās sakarā ar palielinātu magnētiskās ķēdes garumu un divām papildu gaisa spraugām nepieciešams lielāks ierosmes tinuma MS. Turklāt šādu mašīnu korpusi un gultņu vairogi jāizgatavo no magnētiska materiāla.

### 6.12.3. Induktormašīnas

Par induktormašīnām sauc sinhronās mašīnas, kurām jebkurā enkura virsmas punktā magnētiskā indukcija mainās pēc lieluma (pulsē), saglabājot nemainīgu zīmi. Būtiska šo mašīnu konstruktīvā iezīme ir tāda, ka tajās nav rotējošo tinumu (visi tinumi novietoti statorā), bet rotors izveidots kā zobrats, kuram rotējot, notiek magnētiskās plūsmas pulsācija enkura tinumā.

Induktormašīnām ir vienkārša uzbūve un augsta drošuma pakāpe. Tām ir virkne priekšrocību salīdzinājumā ar parastās konstrukcijas sinhronajiem ģeneratoriem.



6.35. att. Bezkontakta sinhronā mašīna ar ķetnveida poliem: 1 – stators; 2 – ierosmes tinums; 3 – rotors ar ķetnveida poliem; 4 – nemagnētiska starplika; 5 – enkura tinums; 6 – ārējais magnētvauds (korpus).

Induktormāšīnas galvenokārt izmanto kā ģeneratorus vēja enerģētikā, dažādu rūpniecisko iekārtu, kā arī lidmašīnu, kuģu u. c. elektrisko sistēmu barošanai.

Eksistē dažādi induktorģeneratori, kuri atšķiras ne tikai ar konstrukcijas elementiem, bet arī ar magnētiskās ķēdes konfigurāciju un tinumu shēmām. Induktorģeneratoru klasifikācijas pamatā var likt magnētiskās plūsmas izmaiņas raksturu rotējošā rotora zobā. Šeit var būt divi raksturīgi gadījumi:

- magnētiskā plūsma zobā, rotoram griežoties, paliek praktiski nemainīga. Šāda tipa ģeneratorus sauc par unipolāriem;
- magnētiskā plūsma zobā maina gan lielumu, gan virzienu. Tādus ģeneratorus sauc par heteropolāriem.

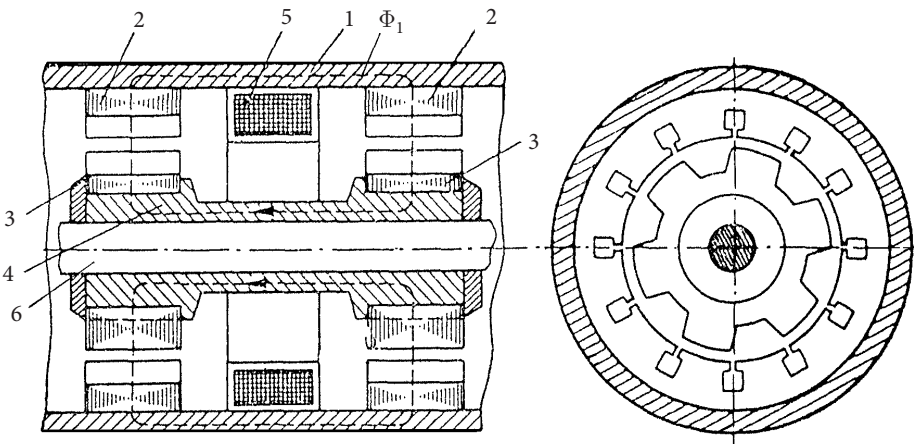
No unipolārajām mašīnām plašāku lietojumu ir radis divpakešu induktorģenerators, kura konstruktīvā shēma parādīta 6.36. attēlā.

Statora paketes vienmēr izgatavo no elektrotehniskā tērauda loksnešiem, bet rotora paketes lielākām rotācijas frekvencēm arī kā lietas konstrukcijas. Statora jūgu un rotora ieliktni vienmēr izgatavo no feromagnētiska materiāla, jo caur tiem noslēdzas magnētiskā plūsma  $\Phi_1$ , ko rada ierosmes tinums. Plūsmas virziens 6.36. attēlā parādīts ar bultiņām. Visiem rotora zobiem vienas paketes robežās ir viena polaritāte, bet otras paketes robežās – pretēja. Rotoram griežoties, zobu polaritāte nemainās.

Enkura tinuma spoles novieto statora rievās. To solis ir vienāds vai tuvs pusei no rotora zobu iedaļas  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi D_1}{2Z_2}, \quad (6.95.)$$

kur  $D_1$  – statora iekšējais diametrs;  
 $Z_2$  – rotora zobu skaits;  
 $p$  – polu pāru skaits ( $p = Z_2$ ).



6.36. att. Divpakešu unipolāra induktorģeneratora konstruktīvā shēma: 1 – korpusis; 2 – enkura paketes ar tinumiem; 3 – rotora paketes; 4 – rotora ieliktnis; 5 – ierosmes tinums; 6 – vārpsta.

Magnētiskās indukcijas sadalījuma līkne gaisa spraugā gar enkura aploci parādīta 6.37. attēlā. Attēla redzams, ka, rotoram griežoties, indukcija mainās (saglabājot nemainīgu virzienu) no maksimālās  $B_{\max}$  virs rotora zoba, līdz  $B_{\min}$  vērtībai virs rievās. Indukcijas izmaiņai ir periodisks raksturs. Viens periods vai 360 elektriskie grādi atbilst vienai rotora zoba iedaļai.

Pret rotora zobiem magnētiskajai indukcijai ir maksimālā, bet pret rievām – minimālā vērtība. Var uzskatīt, ka magnētiskā indukcija sastāv no divām komponentēm – nemainīgās:

$$B_0 = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{2} \quad (6.96.)$$

un periodiskās  $B_{\omega}$  ar amplitūdu:

$$B_{\omega m} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2}. \quad (6.97.)$$

Enkura tinumā EDS inducē tikai magnētiskās indukcijas periodiskā komponente  $B_{\omega}$ , jo indukcijas nemainīgā komponente  $B_0$  rada ar statora tinumu laikā un telpā nemainīgu plūsmas saķēdējumu. Turklāt komponente  $B_0$  papildus noslogo magnētisko sistēmu. Tāpēc magnētiskās ķēdes atsevišķo posmu šķērssgriezumi jāizvēlas pēc maksimālās indukcijas vērtības. Tas savukārt palielina mašīnas izmērus un masu.

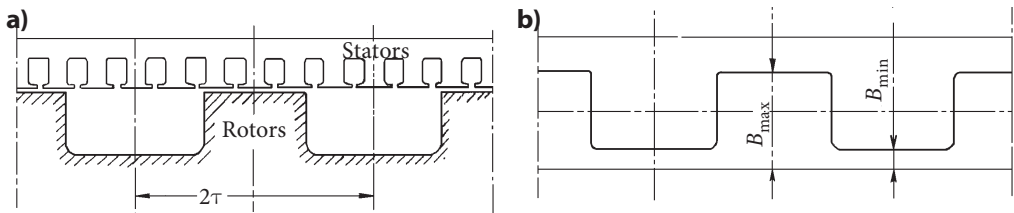
Enkura tinumā inducētā EDS frekvence (Hz):

$$f_1 = \frac{Z_2 n}{60}, \quad (6.98.)$$

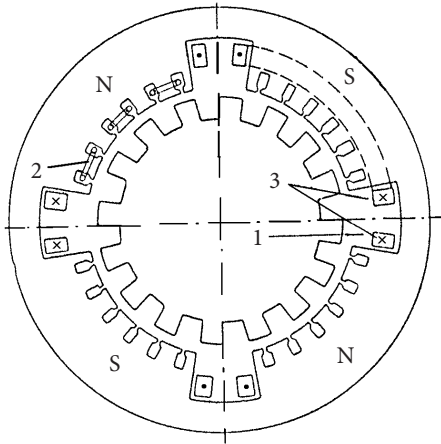
kur  $n$  – rotora rotācijas frekvence ( $\text{min}^{-1}$ ).

Paaugstinātas frekvences dēļ, induktorģeneratora enkura tinumam ir relatīvi liela induktīvā pretestība, kas, ģeneratoru slogojot, izraisa ievērojamu sprieguma izmaiņu. Tāpēc, lai uzlabotu ģeneratora raksturlīknes, dažreiz virknē ar enkura tinumu slēdz kondensatorus.

Induktorģeneratorus, tāpat kā parastās sinhronās mašīnas, var izveidot ar vienfāzes vai daudzfāžu enkura tinumiem. Divpakešu gadījumā pakešu spoles var savienot savā starpā gan virknē, gan paralēli.



6.37. att. Induktorģeneratora zoba zona (a) un magnētiskās indukcijas sadalījums (b).



6.38. att. Heteropolārā induktorgenerators šķērs griezumā: 1 – lielās rievās; 2 – enkura tinums; 3 – ierosmes tinums.

Heteropolārā ģenerators konstruktīvā shēma parādīta 6.38. attēlā. Statora un rotora paketes saliek no elektrotehniskā tērauda loksnēm. Enkura paketē izveidotas mazās un lielās rievās. Mazajās rievās tiek novietots vienfāzes vai daudzfāžu enkura tinums, bet lielajās – ierosmes tinums.

Ierosmes tinuma spoles, kuras baro ar līdzstrāvu, uz enkura virsmas izveido polus N un S. Pola iedaļu izvēlas tā, lai uz pola aploci būtu vesels rotora zobu iedaļu skaits. Tādā gadījumā, rotoram griežoties, plūsma visā magnētiskajā ķēdē paliek nemainīga. Tā pulsē tikai statora zobos. Pateicoties šim plūsmas pulsācijām, enkura tinumā inducējas EDS. Elektromagnētiskie procesi viena pola robežās šajā gadījumā neatšķiras no analoģiskiem procesiem unipolārā induktorgeneratorā. Atšķirība ir tikai tāda, ka rotora zobi pārmaiņus pārvietojas zem ziemeļpola un dienvidpola, tāpēc plūsma maina virzienu.

Unipolāriem induktorgeneratoriem salīdzinājumā ar heteropolāriem ģeneratoriem piemīt vairākas priekšrocības: lielāks lietderības koeficients, jo rotorā nav magnētisko zudumu; visai vienkārša konstrukcija; rotoru var veidot kā masīvu; rotora diametrs, tātad arī mašīnas ārējais diametrs ir mazāks; pilnīgāk var izmantot enkura tinumu, jo nav jāveido lielās rievās, kurās novietot ierosmes tinumu.

Tomēr unipolāriem ģeneratoriem salīdzinājumā ar heteropolāriem piemīt arī vairāki trūkumi: lielāks mašīnas garums; masīvais rotors un garāka vārpsta rada smagākus darba apstākļus gultņiem; biežāks jūgs, jo tas kalpo par magnēt vadu; mašīnā eksistējošās plūsmas var noslēgties caur gultņiem un piedziņas mehānismu; lielā inerce sakarā ar masīviem elementiem rotorā palielina pārejas procesu laiku.

Heteropolāros ģeneratoros visa magnētiskā ķēde tiek veidota no elektrotehniskā tērauda loksnēm. Korpusa un jūga izmērus nosaka, vadoties tikai no mehāniskās stiprības. Mašīnai ir mazs inerces moments. Šī ģenerators diametrs ir lielāks salīdzinājumā ar unipolāro ģeneratoru, bet garums mazāks. Ja rotora zobu skaits ir relatīvi neliels, heteropolārā ģenerators enkura tinums tiek izmantots sliktāk. Kopumā abu tipu ģeneratoru masas un gabarītu rādītāji ir līdzīgi.

#### 6.12.4. Ventilģzinēji

Lidzstrāvas dzinēju lieliskās īpašības – liels palaišanas moments un iespēja regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā – bieži vien nevar istenot sakarā ar trūkumiem, kas piemīt suku kolektora mezglam. Tāpēc par dabisku var uzskatīt vēlmi aizvietot suku kolektoru ar tranzistoru vai tiristoru pusvadītāju komutatoru. Šādi dzinēji pazīstami ar dažādiem nosaukumiem – sākumā tos sauca par bezkolektora lidzstrāvas dzinējiem, bet pēdējā laikā plašāk izplatīts nosaukums “ventilģzinēji”. Ventilģzinējus zināmā mērā var uzskatīt par lidzstrāvas mašīnas bezkolektora analogiem. Tiem piemīt liels palaišanas moments, paaugstināts kalpošanas ilgums, augsti enerģētiskie un drošuma rādītāji.

Lielas jaudas ventilģzinēji rod pielietojumu tur, kur agrāk izmantoja neregulējamus asinhronos un sinhronos dzinējus. Sevišķi veiksmīga ir izrādījies ventilģzinēju izmantošana kosmiskajā elektromehānikā.

Ventilģzinējos, tāpat kā lidzstrāvas kolektordzinējos, var izmantot dažādas konstrukcijas un tinumu slēguma shēmas. Visbiežāk izmanto trīsfāžu shēmu. Tāds dzinējs sastāv no trīsfāžu sinhronās mašīnas un vadāma invertora, kas lidzstrāvu pārveido maiņstrāvā. Pusvadītāju elementus invertorā atver un aizver noteiktā secībā, padodot uz to vadības elektrodiem attiecīga garuma impulsus. Impulsus izstrādā speciāla ierīce – rotora stāvokļa devējs, kas reaģē uz rotora stāvokli. Vienkāršākā gadījumā rotora stāvokļa devējs sastāv no pastāvīgā magnēta, kas nostiprināts uz rotora vārpstas, un simetriski pa aploci novietotām spolēm. Pastāvīgajam magnētam rotējot, spolēs, kas pieslēgtas vadības elektrodiem, pēc kārtas inducējas EDS, un vadības elektrodi saņem periodiskus sprieguma impulsus. 6.39. attēlā parādīta ventilģzinēja blokshēma.

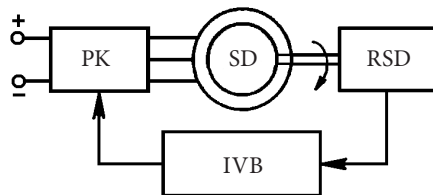
Tajā ietilpst pats sinhronais dzinējs SD, kurā notiek elektromehāniska enerģijas pārveidošana. Dzinēja statora tinumi saņem barošanu no pusvadītāju komutatora PK (vadāma invertora). No rotora stāvokļa devēja RSD saņemtie signāli caur invertora vadības bloku IVB nokļūst pusvadītāju komutatorā. Turklāt katram rotora stāvoklim atbilst noteikts signāls attiecīgo pusvadītāju elementu (tranzistoru vai tiristoru) atvēršanai un aizvēršanai invertorā.

Par rotora stāvokļa devējiem izmanto dažādus elementus, piemēram, induktīvos, transformortipa, magnetodiodes, Holla devējus un citus.

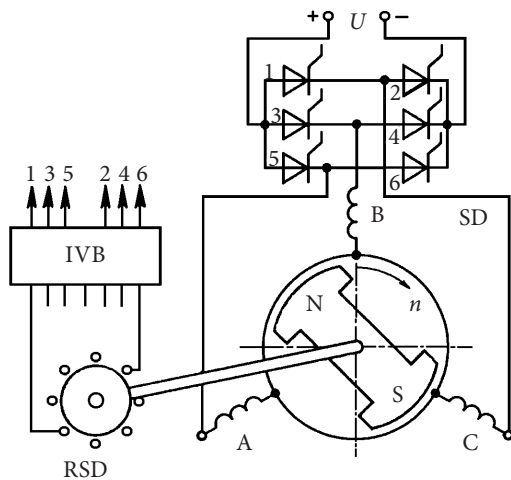
Gadījumā, ja ventilģzinēja barošana notiek no maiņstrāvas tīkla, 6.39. attēlā parādīto blokshēmu papildina ar taisngriezi un filtru.

6.40. attēlā parādīta ventilģzinēja funkcionālā shēma. Invertors izveidots no sešiem tiristoriem, kurus caur vadības bloku IVB vada signāli no rotora stāvokļa devēja RSD. Lidzstrāvas barošanas spriegums  $U$  tiek pieslēgts invertora ieejai.

Kā zināms, tiristori nav pilnībā vadāmi elementi: ar elektriskā signāla palīdzību tos var atvērt, bet lai aizvērtu, jāpārtrauc strāva anoda ķēdē. Tiristori 1, 3 un 5 veido anoda grupu,



6.39. att. Ventilģzinēja blokshēma.



6.40. att. Ventilādzinēja funkcionālā shēma.

tinumos, līdz ar to izmainot statora magnētiskā lauka virzienu. Šī magnētiskā lauka un polu lauka mijiedarbības rezultātā rotors pagriežas. Tā, piemēram, ja atver tiristorus 1, 5 un 4, tad strāvas statora tinumos  $I_A = I/2$ ,  $I_B = -I$ ,  $I_C = I/2$  un magnētiskā lauka ass sakrīt ar B fāzes asi. Ja atver tiristorus 1, 4 un 6, tad  $I_A = I/2$ ,  $I_B = I/2$ ,  $I_C = I$ , statora lauka ass sakrīt ar tinuma C asi un rotors pagriežas šī tinuma ass virzienā utt.

No iepriekš teiktā var secināt, ka ventilādzinējs darbojas tāpat kā sinhronais dzinējs, jo tā rotora un statora magnētiskā lauka rotācijas frekvences skatīt. Atšķirība no klasiskā sinhronā dzinēja ir tāda, ka šajā gadījumā statora magnētiskā lauka rotācijas frekvenci, pateicoties RSD signāliem, nosaka rotora rotācijas frekvence. Tāpēc, mainoties rotācijas ātrumam, ventilādzinējam izkrišana no sinhronisma nedraud.

Otra ventilādzinēja īpatnība slēpjas tajā apstākļi, ka aplūkojamā shēmā, ja netiek veikti speciāli pasākumi, mainoties slodzei, tā slodzes leņķis  $\theta$  paliek nemainīgs.

Ventilādzinēji var nodrošināt mehāniskās raksturlieknes, kas līdzīgas paralēlās, virknes un jauktās ierosmes līdzstrāvas dzinēju raksturlieknēm. To rotācijas frekvenci var regulēt, mainot pievadīto spriegumu, ierosmes strāvu un slodzes leņķi  $\theta$ . Minēto lielumu regulēšana pēc noteiktiem likumiem paver ceļu elektropiedziņas sintēzei ar iepriekš uzdotām raksturlieknēm.

Daudzu valstu zinātnieki ventilādzinēju izpētē izmanto dažādas pieejas: apskatot tos no līdzstrāvas klasiskās vai automātiskās regulēšanas teorijas pozīcijām, balstoties uz sinhronās mašīnas teorijas pamatprincipiem vai aprakstot ventilādzinēja darbību nepārtrauktā pārejas procesā kopā ar pusvadītāju komutatoru ar diferenciālo vienādojumu sistēmu. Katrai no šīm pieejām ir savas priekšrocības un trūkumi, tomēr pēdējā laikā aizvien biežāk ventilādzinēju aplūko kā sinhrono mašīnu, kas darbojas specifiskos režīmos. Šādā gadījumā analīze ir relatīvi vienkāršāka un uzskatāmāka.

No izvērīto polu sinhronā dzinēja vektoru diagrammas (6.41. att.) var iegūt izteiksmes visu galveno elektromagnētisko parametru noteikšanai ventilādzinēja darbībai ar  $\theta = const$ :

jo tiem pievienota barošanas avota „+” spāile, bet tiristori 2, 4 un 6 veido katodgrupu – tiem pievienota „-” spāile.

Rotoram griežoties, ierosmes lauks statora fāzēs inducē EDS. Šie EDS darbojas preti barošanas spriegumam, līdzīgi kā pret EDS līdzstrāvas dzinējos. Atsevišķos laika momentos statora tinumos inducētie līnijas EDS pārvar barošanas spriegumu, pārtrauc strāvu tiristoru anoda ķēdē un nodrošina to aizvēršanos zināmā secībā.

Tādējādi noteiktā secībā atverot un aizverot tiristorus, izmaina strāvas virzienu un lielumu statora atsevišķos

$$I_1 = \frac{\sqrt{[U_1(\sigma\omega L_{ad} \sin\theta + R_1 \cos\theta) - I_2\omega L_{ad}R_1]^2}}{R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A} + \frac{\sqrt{[U_1(\omega L_{ad} A \cos\theta - R_1 \sin\theta) - I_2\omega^2 L_{ad}^2 A]^2}}{R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A}; \quad (6.99.)$$

$$M = \frac{mpL_{ad}[U_1(\sigma\omega L_{ad} \sin\theta + R_1 \cos\theta) - I_2\omega L_{ad}R_1]}{R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A} \cdot \left( I_2 + \frac{[U_1(\omega L_{ad} A \cos\theta - R_1 \sin\theta) - I_2\omega^2 L_{ad}^2 A]B}{(R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A)^2} \right); \quad (6.100.)$$

$$P_1 = mU_1 \left[ \frac{U_1 R_1 + 1/2 \cdot U_1 \omega L_{ad} B \sin 2\theta}{R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A} \right] + mU_1 \left[ \frac{I_2 \omega L_{ad} (\omega L_{ad} A \sin\theta - R_1 \cos\theta)}{R_1^2 + \sigma\omega^2 L_{ad}^2 A} \right]; \quad (6.101.)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_{ad} [U_1(\sigma \sin^2 \theta + A \cos^2 \theta) - I_2(R_1 \sin\theta + \omega L_{ad} A \cos\theta)]}{U_1 R_1 + 1/2 U_1 \omega L_{ad} B \sin 2\theta + I_2 \omega L_{ad} (\omega L_{ad} A \sin\theta - R_1 \cos\theta)}; \quad (6.102.)$$

$$I_\mu = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \sin(\theta - \varphi_1)}, \quad (6.103.)$$

kur  $\omega$  – enkura strāvas leņķiskā frekvence;

$p$  – polu pāru skaits;

$m$  – fāžu skaits;

$L_{ad}$  – induktivitāte, kas atbilst enkura reakcijas plūsmas garenass virzienā;

$\sigma$  – enkura tinuma izkliedes koeficients;

$R_1$  – enkura tinuma aktīvā pretestība;

$I_2$  – ierosmes tinuma strāva, kas reducēta uz enkura tinumu;

$k_q$  un  $k_d$  – lauka formas koeficienti attiecīgi šķērsass un garenass virzienā;

$A = k_q/k_d + \sigma - 1$ ;

$B = 1 - k_q/k_d$ .

Dzinēja lietderīgo jaudu  $P_2$  aptuveni var aprēķināt, atņemot no jaudas  $P_1$  zudumus enkura tinumā, kas ir proporcionāli  $I_1^2$ , zudumus ierosmes tinumā (proporcionāli  $I_2^2$ ), mehāniskos zudumus (proporcionāli  $\omega^3$ ) un zudumus serdē (proporcionāli  $I_\mu^2$  un  $\omega^{1,4}$ ). Lietderības koeficientu  $\eta$  nosaka kā

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.104.)$$

Mainot frekvences  $\omega$  vērtību visā interesējošā diapazonā, no izteiksmēm (6.99.–6.104.) var aprēķināt dzinēja darba un citas raksturlielnes. Ievietojot formulās (6.99.–6.103.)  $\omega = 0$ , iegūstam attiecīgo lielumu vērtības, kas atbilst dzinēja palaišanai. Piemēram, dzinēja palaišanas momentu  $M_p$  nosaka izteiksme:



$$M_p = \frac{mpL_{ad}}{R_1} \cdot \left( I_2 \cos \theta - \frac{U_1}{2R_1} B \sin 2\theta \right). \quad (6.105.)$$

No (6.105.) izteiksmes redzams, ka  $M_p > 0$  ja  $\theta \leq 0$ , bet gadījumos, kad  $\theta > 0$ , atkarībā no ierosmes strāvas vērtības palaišanas momentam var būt gan pozitīva, gan negatīva vērtība.

Pusvadītāju, ar kuriem kopā darbojas sinhronais ventiļdzinējs, komutatoru shēmās var izdalīt posmus, kur plūst strāva, kas ir proporcionāla aktīvai, reaktīvai vai abu enkura strāvas komponentu algebriskai summai. Šis apstāklis ļauj izveidot ventiļdzinējā vairākus ierosmes tinumus un vispārīgā gadījumā reducētās ierosmes strāvas regulēšanas likumu izteikt šādā formā:

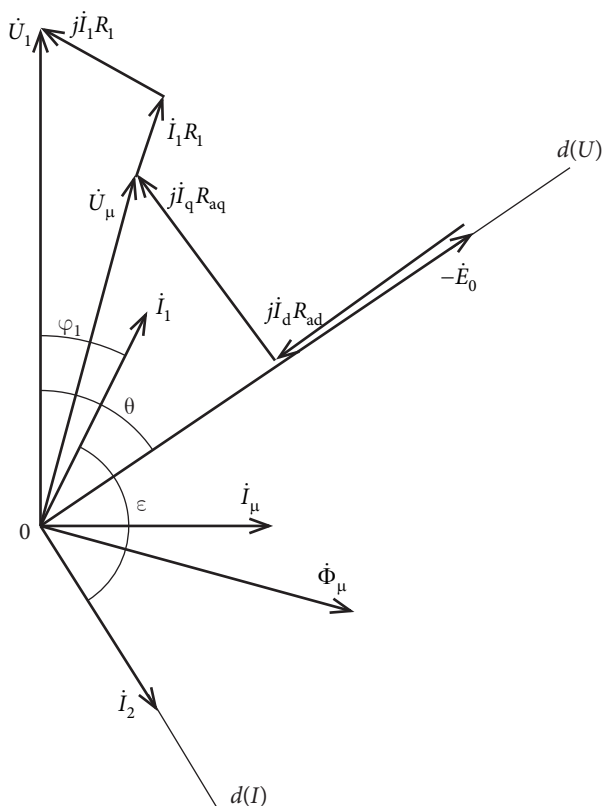
$$I_2 = I_{20} + I_1 \cdot (k_1 \cos \varphi_1 + k_2 \sin \varphi_1), \quad (6.106.)$$

kur  $I_{20}$  – ierosmes strāvas nemainīgā komponente;

$k_1$  un  $k_2$  – proporcionalitātes koeficienti.

Koeficienti  $k_1$  un  $k_2$  ir atkarīgi no pārveidotāja shēmas un tinumu reducēšanas koeficienta. Tos var regulēt, izmantojot arī zināmo šuntēšanas paņēmieni.

Sinhronajā ventiļdzinējā bez  $\theta = const$  var īstenot arī citus speciālos režīmus, piemēram,  $\epsilon = const$ , kad nemainīgs saglabājas leņķis  $\epsilon$  starp enkura un ierosmes MS asīm. Izvirzīto



6.41. att. Izvirzīto polu sinhronā dzinēja vektoru diagramma.

polu sinhronās mašīnas vienādojumi, kas ļauj aprēķināt dzinēja raksturlieknes, ir šādi:

$$I_1 = \frac{\sqrt{F^2 G^2 + (G^2 + H^2) \cdot (U_1^2 - F^2)} - FG}{G^2 + H^2}; \quad (6.107.)$$

$$P_{em} = m\omega L_{ad} I_1 \cdot \left( I_2 \sin \varepsilon + \frac{1}{2} I_1 A \sin 2\varepsilon \right); \quad (6.108.)$$

$$P_1 = mI_1 \cdot \left[ \omega L_{ad} \left( I_2 \sin \varepsilon + \frac{1}{2} AI_1 \sin 2\varepsilon \right) + I_1 R_1 \right]; \quad (6.109.)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_{ad} \cdot \left[ I_1 \cos^2 \varepsilon + I_2 \cos \varepsilon + \frac{k_q}{k_d} I_1 \sin^2 \varepsilon + I_1 \cdot (\sigma - 1) \right]}{\omega L_{ad} \cdot \left( I_2 \sin \varepsilon + \frac{1}{2} AI_1 \sin 2\varepsilon \right) + I_1 R_1}, \quad (6.110.)$$

kur  $F = \omega L_{ad} I_2$ ;

$G = R_1 \sin \varepsilon + \omega L_{ad} \sigma \cos \varepsilon$ ;

$H = A\omega L_{ad} \sin \varepsilon - R_1 \cos \varepsilon$ ;

Elektromagnētisko griezes momentu  $M$  var iegūt no izteiksmes (6.108.), izdalot elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$  ar leņķisko rotācijas ātrumu  $\Omega = \omega/p$ .

Sakarību starp leņķiem  $\theta$  un  $\varepsilon$  sinhronajā ventiļdzinējā nosaka izteiksme:

$$\varepsilon = \theta - \varphi_1 + \frac{\pi}{2}. \quad (6.111.)$$

Formulas (6.99.–6.110.) iegūtas vispārīgam gadījumam izvirzīto polu sinhronai mašīnai ar ierosmes tinumu. Ievietojot tajās  $k_d/k_q = 1$ , iegūstam attiecīgās izteiksmes neizvirzīto polu mašīnai, bet, ievietojot  $I_2 = 0$ , – sinhronai reaktīvai mašīnai. Šādos gadījumos formulas būtiski vienkāršojas.

Sinhronā ventiļdzinēja vienādojumu analīze rāda, ka tā raksturlieknes būtiski ietekmē uzdotā leņķa  $\theta$  vai  $\varepsilon$  un ierosmes strāvas vērtības. Mazākā mērā šī ietekme vērojama neizvirzīto polu mašīnās, kuru izmantošana var pasargāt no negatīviem palaišanas momentiem. Izvirzīto un neizvirzīto polu sinhronais dzinējs ar ierosmes tinumu var darboties ar apsteidzošu attiecībā pret spriegumu  $U_1$  enkura strāvu tikai gadījumos, ja  $\theta > 0^\circ$  vai  $\varepsilon > \pi/2$ , bet reaktīvais ventiļdzinējs – tikai ar atpaliekošu enkura strāvu. Kopumā sinhronie ventiļdzinēji speciālajos darba režīmos ( $\theta = \text{const}$  un  $\varepsilon = \text{const}$ ) var nodrošināt mehāniskās raksturlieknes, kas līdzīgas virknes, paralēlās un jauktas ierosmes līdzstrāvas dzinēju raksturlieknēm.

Neregulējama ventiļdzinēja gadījumā, ja  $U_1 = \text{const}$ ,  $I_2 = \text{const}$  un  $\theta = \text{const}$ , raksturliekņu aprēķins ir samērā vienkāršs. Mainot frekvences  $\omega$  vērtības visā interesējošā diapazonā, no izteiksmēm (6.99.–6.104.) (izvirzīto polu dzinējam ar ierosmes tinumu) vai no atvasinātām izteiksmēm (neizvirzīto polu dzinēja un sinhronā reaktīvā dzinēja gadījumā) aprēķina tādu lielumu kā  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $M$ ,  $\cos \varphi$ ,  $I_\mu$ ,  $P_2$  un  $\eta$ . Tādējādi iegūtie rezultāti ļauj konstruēt visas dzinēja raksturlieknes un analizēt tā īpašības. Raksturliekņu analīze parāda, ka, lai nodrošinātu augstākus ventiļdzinēju enerģētiskos rādītājus, mainoties to slodzei

un rotācijas frekvencei, attiecīgi jāregulē arī slodzes leņķis  $\theta$ .

Izvirzot uzdevumu par ventiļdzinēja iepriekš uzdotu raksturliķņu nodrošināšanu un tā optimizāciju, lietderīgi šos abus posmus apvienot. Var ieteikt šādu aprēķinu metodiku. Vispirms uzdod grafiski, analītiski vai tabulas veidā iepriekš nepieciešamo raksturliķni, piemēram, mehānisko raksturliķni  $\omega = f(M)$ . Izvēlas uzdotos un pieļaujamus izmaiņu diapazonus lielumiem  $\omega$ ,  $M$ ,  $I_2$ ,  $\theta$  un  $U_1$ . Tad uzdevums tiek formulēts šādi: atrast katram uzdotās raksturliķnes  $\omega = f(M)$  punktam tādas  $I_2$ ,  $\theta$  un  $U_1$  vērtības, kas nodrošina, pirmkārt, uzdotos  $\omega$  un  $M$  lielumus, otrkārt, optimizācijas kritērija minimumu, piemēram, minimālos kopējos zudumus. Atkārtojot šādus aprēķinus vairākiem raksturliķnes  $\omega = f(M)$  punktiem (parasti 5–10), var iegūt regulēšanas likumus  $I_2 = f(M)$ ,  $\theta = f(M)$  un  $U_1 = f(M)$ . Regulēšanas likumus var viegli iegūt arī kā enkura strāvas  $I_1$  vai citu lielumu funkcijas atkarībā no praktiskās realizācijas īpatnībām konkrētā gadījumā.

Jāpiezīmē, ka aprēķinu laikā, lai nodrošinātu uzdotu mehānisko raksturliķni  $\omega = f(M)$ , nevar uzskatīt par neatkarīgiem visus trīs mainīgos  $I_2$ ,  $\theta$  un  $U_1$ , bet tikai jebkurus divus. Tāpēc ikreiz, izvēloties divus mainīgos, piemēram,  $I_2$  un  $\theta$ , no (6.100.) tiek aprēķināta atbilstošā  $U_1$  vērtība.

Sīkāk režīmu  $\theta = const$  un  $\varepsilon = const$  analīze aplūkota darbā [16]. Dzinēju vispārīgo īpašību analīzei var izmantot arī strāvu diagrammas (sk. 7.4. apakšnodaļu).

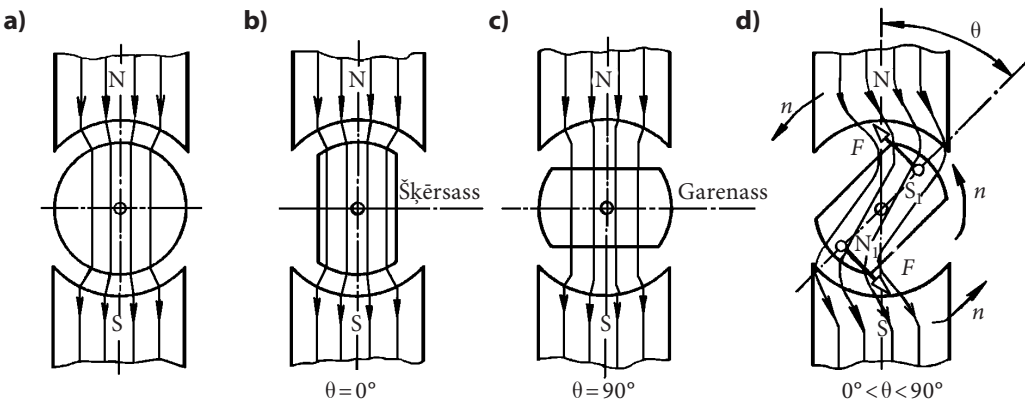
### 6.12.5. Sinhronie reaktīvie dzinēji

Kā jau tika noskaidrots iepriekš (sk. 6.7.2. apakšnodaļu), izvirzīto polu sinhronā mašīna var darboties bez ierosmes tinuma. Tādu mašīnu sauc par sinhrono reaktīvo mašīnu.

Kā izriet no izteiksmes (6.22.), sinhronā reaktīvā dzinēja elektromagnētisko momentu var aprēķināt:

$$M = \frac{mU_1^2}{2\Omega} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (6.112.)$$

No šīs izteiksmes redzams, ka reaktīvā dzinēja moments ir jo lielāks, jo lielāka atšķirība



6.42. att. Sinhronā reaktīvā dzinēja darbības principa skaidrojums.

starp induktīvo pretestību  $X_d$  un  $X_q$  vērtībām, kuras savukārt atkarīgas no magnētiskajām pretestībām rotora garenass  $d$  un šķērsass  $q$  virzienā.

Sinhronā reaktīvā dzinēja darbības princips paskaidrots 6.42. attēlā, kur statora tinuma radītais magnētiskais griezes lauks uzskatāmības dēļ aizstāts ar N un S poliēm.

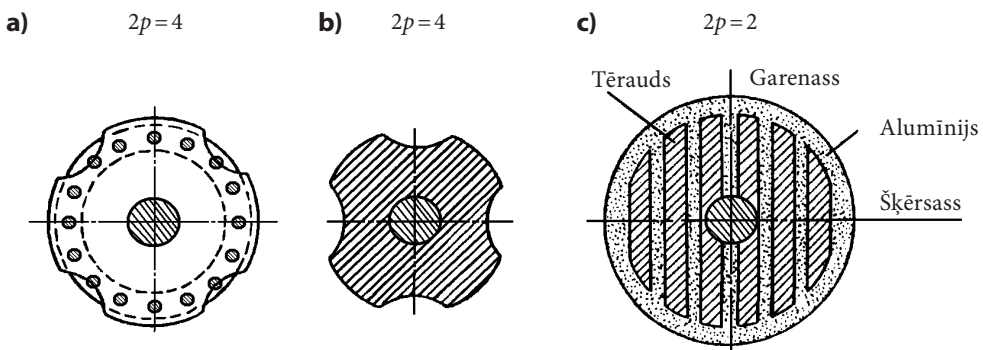
Ja dzinēja rotoram ir cilindriska forma (6.42. att. a), tad ķēdes magnētiskā pretestība nav atkarīga no rotora stāvokļa, tādēļ rotors negriežas. Bet, ja rotoram ir 6.42. attēlā b un c parādītā forma, tad ķēdes magnētiskā pretestība atkarīga no rotora stāvokļa. Turklāt rotors atrodas līdzsvarā tikai divos stāvokļos: tad, kad ķēdes magnētiskā pretestība ir vismazākā (stabils līdzsvars), t. i., kad rotora garenass sakrīt ar N–S polu asi un leņķis  $\theta = 0^\circ$ , un tad, kad  $\theta = 90^\circ$  (nestabils līdzsvars).

Ja rotors atrodas kādā starpstāvoklī ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ), tad savstarpējās iedarbības spēki starp statora un rotora pretējā nosaukuma poliēm cenšas rotoru atgriezt stabilā stāvoklī, t. i., uz rotoru darbojas reaktīvais griezes moments, ko rada statora plūsmas un tās magnetizētā rotora mijiedarbība. Tādējādi reaktīvā dzinēja rotors vienmēr tiecas nostāties tā, lai magnētiskās ķēdes pretestība būtu minimāla.

Ja statora tinuma radītais magnētiskais lauks rotē (6.42. att. d), tad uz rotoru darbojas griezes moments, kas rotoru griež sinhroni ar statora magnētiskā lauka rotācijas frekvenci. Turklāt, jo lielāka dzinēja slodze, jo lielāks slodzes leņķis  $\theta$ . Sasniedzot vērtību  $\theta = 45^\circ$ , dzinējs izkrīt no sinhronisma.

Sinhronajos reaktīvajos dzinējos biežāk izmanto rotorus, kas konstruktīvi atšķiras no asinhronā dzinēja parastā īsi slēgtā rotora tikai ar cilindriskajā virsmā aksiālā virzienā izveidotiem iedobumiem, kuri veido rotora izciļņus (6.43. att. a), kā arī masīvus feromagnētiska materiāla rotorus ar izciļņiem (6.43. att. b). Labākus rezultātus uzrāda dzinēji ar slāņainu rotoru (6.43. att. c), kuriem magnētiskā pretestība garenass virzienā daudzkārt mazāka nekā šķērsass virzienā.

Reaktīvo dzinēju palaišanai izmanto asinhrono palaišanas paņēmieni. Palaišanas tinuma lomu pilda “vāveres rats” (6.43. att. a), masīvais tērauda rotors (6.43. att. b) vai alumīnija cilindrs (6.43. att. c).



6.43. att. Sinhrono reaktīvo dzinēju rotoru: a – no elektrotehniskā tērauda loksņēm ar īsslēgtu palaišanas tinumu; b – masīvs feromagnētisks; c – slāņains.

Sinhrono reaktīvo dzinēju priekšrocības: vienkārša konstrukcija, lēti, darbā droši. Trūkumi: zems  $\cos\varphi$ , jo dzinējs no tīkla praktiski uzņem tikai magnetizēšanas strāvu magnētiskā lauka radīšanai, zems lietderības koeficients. Tāpēc sinhronās reaktīvās mašīnas galvenokārt izmanto kā mikrodzinējus.

### 6.12.6. Histerēzes dzinēji

Histerēzes dzinējs sastāv no statora, kas izveidots līdzīgi asinhronajam dzinējam, un rotora bez tinumiem. Rotors ir cilindrisks ķermenis ar gludu virsmu, kas izgatavots no magnētiski cietā materiāla, piemēram, vialoja. Tas var būt masīvs vai šīhtēts.

Sinhronā histerēzes dzinēja darbības princips paskaidrots 6.44. attēlā, kurā statora divpolu rotējošais magnētiskais lauks aizstāts ar rotējošiem poliņiem  $N_1$  un  $S_1$ .

Statora tinumu pieslēdzot tīklam, tā radītais rotējošais magnētiskais lauks magnetizē rotoru. Statora lauka poliņiem pagriežoties, rotora polu ass pagriešanās aizkavējas, pateicoties histerēzes parādībai, kas magnētiski cietos materiālos ir stipri izteikta. Tādējādi starp rotora poliņiem  $S_2-N_2$  un statora poliņiem  $N_1-S_1$  izveidojas tā sauktais histerēzes leņķis  $\theta_h$ . Reizē ar to rodas pretēja nosaukuma polu pievilkšanās spēku tangenciālā komponente  $F_t$ , kas darbojas uz rotoru lauka griešanās virzienā. Tādējādi rotora materiāla histerēzes dēļ uz rotoru darbojas griezes moments, ko sauc par histerēzes momentu.

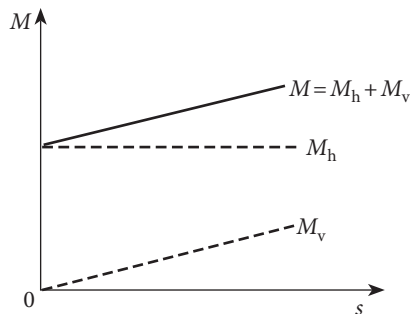
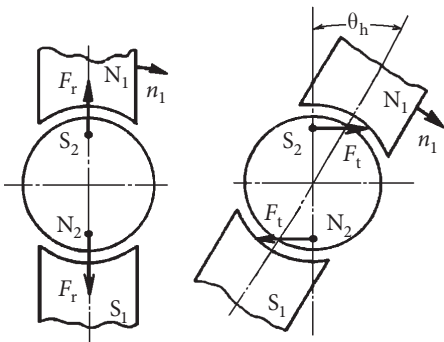
Elektromagnētisko jaudu, ko stators ar magnētiskā lauka palīdzību atdod rotoram (sk. 6.4. apakšnodaļu), var aprēķināt:

$$P_{em} = \frac{\Delta P_2}{s}, \tag{6.113.}$$

kur  $\Delta P_2$  – zudumi rotorā;  
 $s$  – slīde.

Zudumi rotorā sastāv no histerēzes zudumiem  $\Delta P_h$  un virpuļstrāvu zudumiem  $\Delta P_v$ :

$$\Delta P_2 = \Delta P_h + \Delta P_v. \tag{6.114.}$$



6.44. att. Histerēzes dzinēja darbības principa skaidrojums. 6.45. att. Histerēzes dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes.

Histerēzes zudumi ir proporcionāli rotora frekvencei  $f_2$ , bet virpuļstrāvu zudumi proporcionāli  $f_2^2$ . Ņemot vērā, ka rotora frekvence  $f_2 = sf_1$ , tad

$$\Delta P_h = \Delta P'_h s; \quad \Delta P_v = \Delta P'_v s^2, \quad (6.115.)$$

kur  $\Delta P'_h$  un  $\Delta P'_v$  – attiecīgi histerēzes un virpuļstrāvu zudumi rotorā, ja rotors nekustīgs ( $s = 1$ ).

Ievērojot, ka griezes moments  $M = P_{em}/\Omega_1$ , kur  $\Omega_1$  – rotējošā magnētiskā lauka leņķiskais ātrums, no izteiksmēm (6.113.–6.115.) iegūstam sakarību:

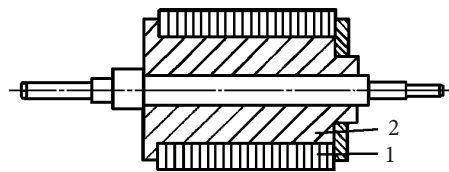
$$M = \frac{\Delta P_h + \Delta P_v}{s\Omega_1} = \frac{\Delta P'_h}{\Omega_1} + \frac{\Delta P'_v}{\Omega_1} s = M_h + M_v. \quad (6.116.)$$

Tādējādi histerēzes moments nav atkarīgs no slīdes, t. i., no rotora rotācijas frekvences (6.45. att.).

Histerēzes dzinēju rotoru parasti izgatavo no divām daļām (6.46. att.). Ārējā daļa 1 no magnētiski cieta materiāla tiek nostiprināta uz cilindrveida serdes 2.

Histerēzes dzinējos, kuru rotors ir šihētēts, darbojas tikai histerēzes moments ( $M = M_h$ ), bet virpuļstrāvu radītais moments  $M_v = 0$ . Šādi dzinēji strādā tikai sinhronajā režīmā, bet dzinēji ar masīvu rotoru atkarībā no slodzes momenta lieluma var darboties gan sinhronajā, gan arī asinhronajā režīmā.

Histerēzes dzinējiem salīdzinājumā ar sinhronajiem reaktīvajiem dzinējiem ir nedaudz labāki tehniski ekonomiskie rādītāji. Tos izgatavo ar jaudu līdz dažiem simtiem vatu.



6.46. att. Histerēzes dzinēja saliktais rotors: 1 – čaula no magnētiski cieta materiāla; 2 – serde.

### 6.12.7. Soļu dzinēji

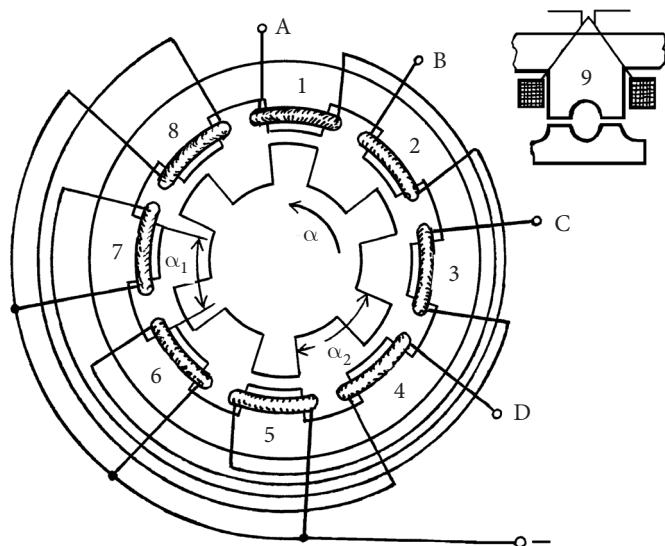
Mūsdienu diskrētajās piedziņās plaši izmanto sinhronos soļu dzinējus. Tie var būt gan ar ierosmi, gan sinhronie reaktīvie. Soļu dzinēji pārveido elektriskos signālus mehāniskā kustībā (diskrētos soļos).

Soļu dzinēja uzbūvi un darbības principu var paskaidrot, aplūkojot vienkāršāko sinhrono reaktīvo mašīnu (6.47. att.). Statora un rotora zobu skaits šajā gadījumā ir dažādi. Dažādas ir arī attiecīgās statora  $\alpha_1$  un rotora  $\alpha_2$  zobu iedaļas. Uz statora zobiem novietotas vadības tinuma spoles. Katrā fāzē ir divas spoles, kas novietotas diametrāli un slēgtas virknē, piemēram, spoles 1 un 5 (sk. 6.47. att.).

Aplūkosim soļu dzinēja darbību 6.47. attēlā parādītajā laika momentā, kad līdzstrāvas avotam pieslēgta fāze A. Rotors reaktīvā sinhronizējošā momenta ietekmē ieņem attēlā parādīto stāvokli. Mirklī, kad fāzes A vietā līdzstrāvas avotam tiek pieslēgta fāze B, rotors pagriežas (izdara vienu soli) pretēji pulksteņa rādītāju kustības virzienam tā, lai tā zobi nostātos pretī statora zobiem 2, 6. Fāzi B atslēdzot un fāzi C pieslēdzot avotam, dzinējs izdara kārtējo soli. Tādējādi tinumu A, B, C, D secīga pieslēgšana līdzstrāvas avotam

izraisa rotora diskrētu pagriešanos (soļošanu). Ja izmaina fāžu pieslēgšanas secību uz A, D, C, B, A, ..., tad rotora diskrētā kustība notiek pulksteņa rādītāju kustības virzienā.

Lai samazinātu dzinēja soli, tā statora polu izciļņos papildus izveido sīkākus zobus, kā tas parādīts 6.47. att. pozīcijā 9. Šāda soļu dzinēju konstrukcija ar “ķemmes” zobu struktūru ir visplašāk izmantotā, jo tā ar minimālām dzinēja izgatavošanas izmaksām nodrošina augstu drošumu, precizitāti un īpatnējo momentu (momentu uz dzinēja masas vienību). Pat soļu dzinēji ar ierosmi no pastāvīgajiem magnētiem būtiski atpauk tehnisko raksturojumu un izmantošanas iespēju ziņā no iepriekš aplūkotajiem reaktīvajiem soļu dzinējiem.



6.47. att. Soļu dzinēja konstruktīvā shēma: A, B, C, D – vadības tinuma fāzes; 1 – 8 – statora polu izciļņi ar fāžu spolēm; 9 – pola izcilnis ar diviem zobiem.

# 7. MAIŅSTRĀVAS ELEKTRISKO MAŠĪNU STRĀVAS DIAGRAMMAS

## 7.1. VISPĀRĪGI NORĀDĪJUMI

Maiņstrāvas elektrisko mašīnu īpašības visai ērti var pētīt, izmantojot strāvu diagrammas (strāvu ģeometriskās vietas vai hodogrāfus). Dažādām maiņstrāvas mašīnām, mainoties to režīmam, enkura tinuma strāvas vektora galapunkts apraksta noteiktas ģeometriskas figūras (riņķa līnija, elipse u. c.).

No strāvas diagrammām var noteikt visus elektromagnētiskos lielumus, kas raksturo mašīnas darba režīmu, turklāt visai uzskatāmi redzamas šo lielumu izmaiņas, mainoties darba režīmiem. Tāpēc diagrammām ir liela metodoloģiska nozīme. Tām ir arī būtiska praktiska nozīme, iegūstot mašīnu raksturlieknes bez to tiešas sloģošanas.

Aplūkojot diagrammas, parasti operē ar vienādas frekvences sinusoidāliem EDS, spriegumiem un strāvām, turklāt mašīnas tinumu aktīvās un induktīvās pretestības uzskata par nemainīgām.

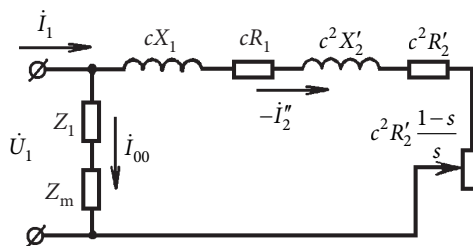
## 7.2. ASINHRONĀS MAŠĪNAS RIŅĶA DIAGRAMMA

Asinhronās mašīnas riņķa diagramma dod priekšstatu par kvalitatīvām un kvantitatīvām strāvu, jaudu un spriegumu attiecībām dažādos tās elementos. Riņķa diagramma atbilst asinhronās mašīnas ekvivalentajai shēmai un vektoru diagrammai ar dažādām papildu konstrukcijām. No riņķa diagrammas var noteikt visus lielumus, kas nepieciešami asinhronā dzinēja darba raksturliekņu konstruēšanai.

Riņķa diagrammas pamatošanai var izmantot asinhronās mašīnas  $\Gamma$  veida ekvivalento shēmu (7.1. att.), kas jau iepriekš aplūkota 5.3. apakšnodaļā. Šajā shēmā statora strāva ir:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{00} + (-\dot{I}_2''). \quad (7.1.)$$

Tukšgaitas strāva  $\dot{I}_{00}$  ir nemainīga un atpaliek fāzē no sprieguma  $\dot{U}_1$  aptuveni par leņķi  $\varphi_0 \approx 90^\circ$ , jo  $X_1 + X_m \gg R_1 + R_m$  (7.2. att. a).



7.1. att. Asinhronās mašīnas  $\Gamma$  veida ekvivalentā shēma.



Kontūrā, kurā plūst strāva  $-\dot{I}_2''$  (7.1. att.), ieslēgtas nemainīgas induktīvās pretestības  $cX_1$  un  $c^2X_2'$  un mainīga aktīvā pretestība

$$cR_1 + c^2R_2' + c^2 \frac{1-s}{s} R_2' = cR_1 + c^2R_2' / s. \quad (7.2.)$$

Tāpēc, mainoties slīdei  $s$ , izmainās arī strāva  $-\dot{I}_2''$ . Šī strāva sasniedz maksimālo vērtību, ja  $cR_1 + c^2R_2' / s = 0$ . Šajā gadījumā strāva  $\dot{I}_{2\max}''$  būs tīri induktīva:

$$\dot{I}_{2\max}'' = \frac{U_1}{cX_1 + c^2X_2'}. \quad (7.3.)$$

Mainoties slīdei  $s$  un pretestībai  $c^2R_2' / s$ , strāvas  $-\dot{I}_2''$  vektora galapunkts pārvietosies pa riņķa līniju 0AB (7.2. att. b), kuras diametrs 0B strāvas mērogā  $m_1$  atbilst tās maksimālai vērtībai  $\dot{I}_{2\max}''$ .

Atlīksim uz abscisu ass 7.2. attēlā b nogriezni 0b, kas pretestību mērogā  $m_2$  ataino kontūra reaktīvo pretestību  $cX_1 + c^2X_2'$ , un no punkta b perpendikulāri abscisu asij nogriezni ba, kas noteiktai slīdes  $s$  vērtībai ataino aktīvo pretestību  $cR_1 + c^2R_2' / s$ .

Nogrieznis 0a =  $\sqrt{(0b)^2 + (ba)^2}$  pretestību mērogā atbilst kontūra pilnai pretestībai

$$Z_p = \sqrt{(cX_1 + c^2X_2')^2 + (cR_1 + c^2R_2' / s)^2}. \quad (7.4.)$$

Trīsstūri 0ba un 0BA 7.2. attēlā b ir līdzīgi. Tāpēc var rakstīt, ka 0b/0a = 0A/0B un

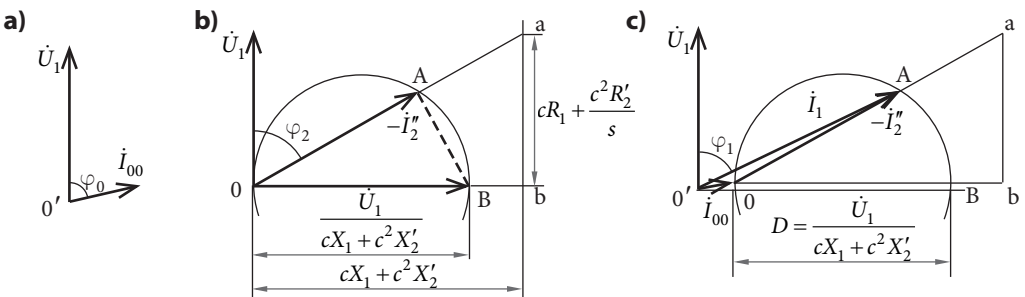
$$0A = \frac{0B \cdot 0b}{0a} = \frac{\dot{I}_{2\max}'' (cX_1 + c^2X_2')}{Z_p} = \frac{U_1}{Z_p} = \dot{I}_2''. \quad (7.5.)$$

Strāvas vektora  $\dot{I}_2''$  galapunkts, ja  $U_1 = const$ , mainoties slīdei  $s$ , aprakstīs riņķa līniju, jo vektori 0A un AB savā starpā ir perpendikulāri un balstās uz diametru 0B kā hordu.

Leņķa  $\varphi_2$  tangensu starp ordinātu asi un nogriezni 0A var noteikt kā

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{0b}{0a} = \frac{cX_1 + c^2X_2'}{cR_1 + c^2R_2' / s}. \quad (7.6.)$$

Savietosim strāvas  $\dot{I}_2''$  vektora sākumu ar strāvas  $\dot{I}_{00}$  vektora galapunktu un iegūsim asinhronās mašīnas riņķa diagrammu (7.2. att. c), kurā strāvas mērogā nogrieznis 0'A atbilst strāvai  $I_1$ , bet nogrieznis 0A – strāvai  $I_2''$ . Šo strāvu hodogrāfs ir riņķa līnija ar diametru 0B.



7.2. att. Asinhronās mašīnas  $\Gamma$  veida ekvivalentās shēmas tukšgaitas strāvas (a), darba kontūra strāvas (b) vektoru diagrammas un riņķa diagramma (c).

No riņķa diagrammas var noteikt ne tikai strāvas, bet arī jaudas, griezes momentus un citus mašīnas darba režīmu raksturojošus lielumus.

Statoram pievadītā aktīvā jauda  $P_1$  ir proporcionāla strāvas  $I_1$  aktīvajai komponentei  $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$ . Tāpēc jaudas mērogā tā ir vienāda ar nogriezni AC, kas novilkts perpendikulāri līnijai  $O'G$ , t. i.,

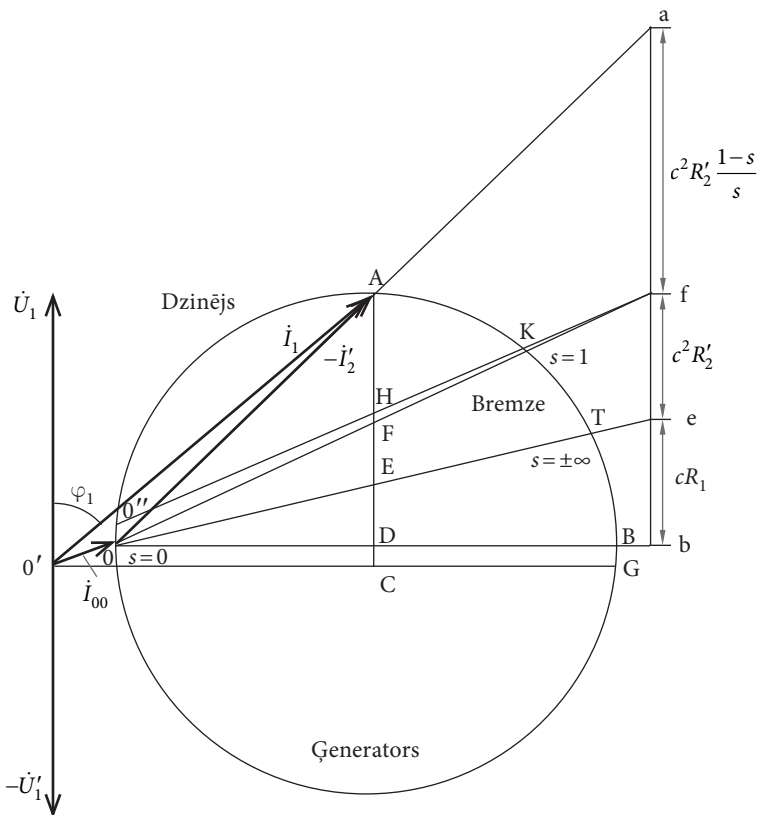
$$P_1 = AC m_p, \quad (7.7.)$$

kur  $m_p = m_1 m_i U_1$  – jaudas mērogs;  
 $m_1$  – statora fāžu skaits.

Līniju  $O'G$  sauc par pievadītās jaudas līniju.

Jauda, ko pievada magnetizēšanas zaram, praktiski vienāda ar magnetizēšanas zudumiem  $\Delta P_{mg}$  statora tēraudā. Tā ir proporcionāla tukšgaitas strāvas aktīvajai komponentei un to ataino nogrieznis DC, t. i.,

$$\Delta P_{mg} = DC m_p. \quad (7.8.)$$



7.3. att. Asinhronās mašīnas riņķa diagramma.

Kontūram, kurā plūst strāva  $I_2''$ , pievadītā jauda  $P_D$  proporcionāla šīs strāvas aktīvajai komponentei, tāpēc:

$$P_D = ADm_p. \quad (7.9)$$

Jaudu  $P_D$  lietderīgi sadalīt trīs daļās atbilstoši 7.1. attēla shēmai.

$$P_D = m_1 I_2''^2 (cR_1 + c^2 R_2' + c^2 \frac{1-s}{s} R_2') = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} + P_{meh}, \quad (7.10)$$

kur  $\Delta P_{e1} = m_1 I_2''^2 cR_1$  – elektriskie zudumi statora tinumā;

$\Delta P_{e2} = m_1 I_2''^2 c^2 R_2'$  – elektriskie zudumi rotora tinumā;

$P_{meh} = m_1 c^2 I_2''^2 \frac{1-s}{s} R_2'$  – rotora mehāniskā jauda.

Riņķa diagrammā minēto jaudu sadalījumu var veikt grafiski. Šajā nolūkā uz diametra turpinājuma atliek nogriežni 0b, kurš pretestību mērogā  $m_z$  attēlo pretestību  $cX_1 + c^2 X_2'$  (7.3. att.). No punkta b novelk perpendikulu pret līniju 0b un tajā pašā mērogā atliek pretestībām  $cR_1$  un  $c^2 R_2'$  atbilstošos nogriežņus be un ef. Turpinot taisni 0A līdz tā krustojas ar minēto perpendikulu, atrod punktu a. Acīmredzot nogrieznis ab attēlo pretestību  $cR_1$ ,  $c^2 R_2'$  un  $c^2 \left( (1-s)/s \right) R_2'$  summu. Savienojot punktu 0 ar punktiem e un f, iegūstam attiecīgi punktus E un F, kas sadala nogriezni AD šādā proporcijā:

$$DE : EF : FA = cR_1 : c^2 R_2' : c^2 \frac{1-s}{s} R_2'.$$

Tādējādi atsevišķas jaudas sastāvdaļas var noteikt:

$$\Delta P_{e1} = DE m_p; \Delta P_{e2} = EF m_p; P_{meh} = FA m_p.$$

Acīmredzot taisņņu 0f un 0e novietojums nav atkarīgs no mašīnas darba režīma, jo  $cR_1$  un  $c^2 R_2'$  nav atkarīgas no slīdes. Tās ir neatņemama riņķa diagrammas sastāvdaļa. Parasti diagrammā neatspoguļo līniju ab un tās sastāvdaļas, bet aprobežojas ar to, ka novelk līnijas 0f un 0e līdz to krustpunktiem ar riņķa līniju (punkti K un T).

Līniju 0K, līdz kurai izmēra mehānisko jaudu, sauc par mehāniskās jaudas līniju, bet līniju 0T – par elektromagnētiskās jaudas līniju, jo nogrieznis AE raksturo rotoram pievadīto elektromagnētisko jaudu:

$$P_{em} = P_{meh} + \Delta P_{e2} = AE m_p. \quad (7.11)$$

Asinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments  $M$  ir proporcionāls jaudai:

$$M = \frac{p P_{em}}{\omega_1},$$

jo maiņstrāvas leņķiskā frekvence  $\omega_1 = 2\pi f_1$  ir nemainīga. Tāpēc elektromagnētisko momentu var noteikt šādi:

$$M = AE p m_p / \omega_1 = AE m_M, \quad (7.12)$$

kur  $m_M = p m_p / \omega_1$  – momentu mērogs;

$p$  – mašīnas polu pāru skaits.

Tādējādi nogrieznis AE momentu mērogā attēlo elektromagnētisko momentu. Tāpēc līniju OT sauc arī par momentu līniju.

Asinhronā dzinēja slīdi  $s$  var noteikt kā rotora elektrisko zudumu attiecību pret elektromagnētisko jaudu:

$$s = \frac{\Delta P_{e2}}{P_{em}} = \frac{EF}{AE}. \quad (7.13.)$$

Zinot slīdi  $s$ , no formulas

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p}(1-s)$$

var noteikt dzinēja rotācijas frekvenci  $n$ .

Reālās tukšgaitas strāvas punkts  $0''$  riņķa diagrammā, pateicoties mehāniskajiem zudumiem un papildzudumiem, atrodas nedaudz augstāk par ideālās tukšgaitas punktu 0. Ja punktu  $0''$  un punktu K savieno ar taisni, tad nogrieznis HF aptuveni ataino minētos zudumus:

$$\Delta P_{meh} + \Delta P_{pap} = HF m_p. \quad (7.14.)$$

Asinhronā dzinēja lietderīgo jaudu  $P_2$  uz vārpstas no riņķa diagrammas var noteikt šādi:

$$P_2 = AH m_p, \quad (7.15.)$$

bet lietderības koeficientu  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{AH}{AC}. \quad (7.16.)$$

Bez iepriekš aplūkotajiem no riņķa diagrammas var noteikt arī citus asinhrono dzinēju raksturojošos lielumus, piemēram, tā pārslodzes spēju, palaišanas momentu u. c.

Noteiksim slīdes vērtības riņķa diagrammas raksturīgajiem punktiem. Punktā 0 strāva  $I_2''$  ir vienāda ar nulli. Tāpēc šis punkts atbilst ideālai tukšgaitai, kad slīde  $s=0$ .

Punktam K atbilst mašīnas režīms, kad kopējā aktīvā pretestība vienāda ar  $cR_1 + c^2R_2'$  (sk. 7.3. att.). Šajā gadījumā slīde  $s=1$  un rotors ir nekustīgs (īsslēguma režīms). Nogrieznis OK atbilst rotora strāvai  $-I_{2K}''$  īsslēguma režīmā, bet nogrieznis  $0'K$  statora strāvai  $I_{1K}$ .

Punktā T kopējā aktīvā pretestība ir:

$$cR_1 + c^2R_2' + c^2 \frac{1-s_T}{s_T} R_2' = cR_1. \quad (7.17.)$$

No izteiksmes (7.17.) izriet, ka  $s_T = \pm\infty$ .

Punkti 0, K un T sadala 7.3. attēlā parādīto riņķa diagrammu trīs apgabalos atbilstoši mašīnas darbībai dzinēja režīmā (apgabals 0AK), ģenerators režīmā (apgabals 0BT) un elektromagnētiskās bremzes režīmā (apgabals KT).

Dzinēja režīmā, kad  $0 < n < n_1$ , slīde mainās robežās no  $s=1$  līdz  $s=0$  un strāvas  $\dot{I}_1$  vektora galapunkts pārvietojas pa riņķa līniju no punkta K līdz punktam 0.

Ģenerators režīmā, kad  $n > n_1$ , slīde teorētiski mainās robežās no  $s = 0$  līdz  $s = -\infty$  un vektora  $\dot{I}_1$  galapunkts pārvietojas no punkta 0 līdz punktam T.

Elektromagnētiskās bremzes režīmā, kad  $n < 0$  un rotors griežas pretī statora magnētiskā lauka rotācijas virzienam, slīde mainās no  $s = 1$  līdz  $s = +\infty$ . Vektora  $\dot{I}_1$  galapunkts šajā gadījumā pārvietojas no punkta K līdz punktam T.

Lai konstruētu riņķa diagrammu, jāzina riņķa līnijas divi punkti un tās centrs. Visvienkāršāk šos punktus var atrast pēc tukšgaitas un īsslēguma mēģinājuma datiem.

Tukšgaitas mēģinājumā nenoslogota dzinēja statora tinumam pievada spriegumu  $U_1$  un izmēra dažādām šī sprieguma vērtībām atbilstošās tukšgaitas jaudas  $P_0$  un tukšgaitas strāvas  $I_0$  vērtības. Spriegumu  $U_1$  parasti maina  $(0,5 \div 1,1)U_{1N}$  robežās. No iegūtajiem rezultātiem nosaka jaudas koeficientu tukšgaitā:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 I_0 U_1}. \quad (7.18.)$$

No tādā veidā iegūtajiem rezultātiem konstruē tukšgaitas raksturlīknes  $I_0 = f(U_1)$ ,  $P_0 = f(U_1)$  un  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$  (7.4. att.). Savukārt no šīm raksturlīknēm nosaka lielumus, kas atbilst nominālajam fāzes spriegumam  $U_{1N}$ .

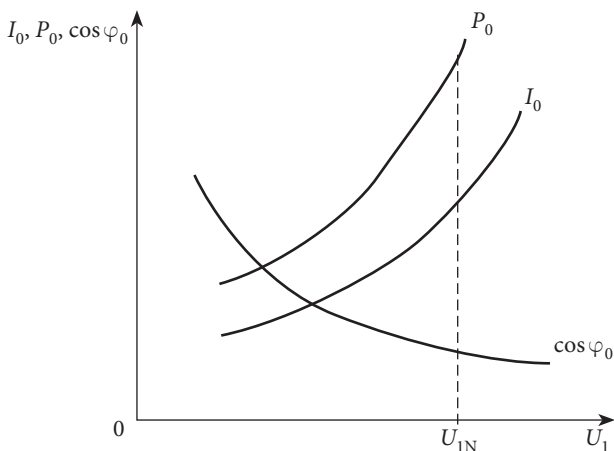
Reālā tukšgaitā, kā zināms, slīde nav vienāda ar nulli, tāpēc diagrammā jāatrod ideālās tukšgaitas punkts 0 ( $s = 0$ ).

Reālās tukšgaitas režīmā zudumi

$$P_0 = \Delta P_{\text{mg}} + \Delta P_{\text{meh}} + m_1 I_0^2 R_1, \quad (7.19.)$$

no kurienes jebkurai sprieguma  $U_1$  vērtībai atbilstošā magnētisko un mehānisko zudumu summa

$$\Delta P_{\text{mg}} + \Delta P_{\text{meh}} = P_0 - m_1 I_0^2 R_1. \quad (7.20.)$$



7.4. att. Asinhronā dzinēja tukšgaitas raksturlīknes.

Tukšgaitas režīmā rotācijas frekvence praktiski nav atkarīga no sprieguma, tāpēc, mainot spriegumu  $U_1$ , mehāniskie zudumi  $\Delta P_{\text{meh}} \approx \text{const}$ , bet magnētiskie zudumi proporcionāli sprieguma kvadrātam. Tāpēc, attēlojot grafiski sakarību  $\Delta P_{\text{mg}} + \Delta P_{\text{meh}} = f(U_1^2)$ , iegūst taisni (7.5. att. a). Turpinot šo taisni līdz ordinātu asij, vispirms atrod mehāniskos zudumus  $\Delta P_{\text{meh}}$  un pēc tam magnētiskos zudumus  $\Delta P_{\text{mgN}}$ , kas atbilst nominālajam spriegumam  $U_{1N}$ .

Ideālās tukšgaitas punktu diagrammā nosaka šādi. Leņķī  $\varphi_0$  attiecībā pret spriegumu  $\dot{U}_1$  atliek strāvas  $\dot{I}_0$  vektoru un iegūst punktu  $0''$  (7.5. att. b). No punkta  $0''$  jaudas mērogā vertikāli uz leju atliek lielumu

$$P'_0 = \Delta P_{\text{meh}} + m_1 I_0^2 R_1$$

un iegūst ideālās tukšgaitas punktu 0.

Īsslēguma mēģinājumā dzinēja rotoru nobremzē un statora tinumam pievada tiktāl pazeminātu spriegumu  $U_1$ , lai strāva  $I_{1K}$  būtu tuva nominālajai vērtībai. Mēģinājuma laikā izmēra pievadīto spriegumu  $U_1$ , strāvu  $I_{1K}$  un jaudu  $P_{1K}$ . Tādējādi var uzņemt īsslēguma raksturlīknes (7.6. att.). Pēc tam aprēķina īsslēguma strāvas  $I_{1KN}$ , jaudas  $P_{1KN}$  un  $\cos \varphi_{KN}$  vērtības, kas atbilst nominālajam spriegumam

$$I_{1KN} = I_{1K} \frac{U_{1N}}{U_1}; \quad (7.21.)$$

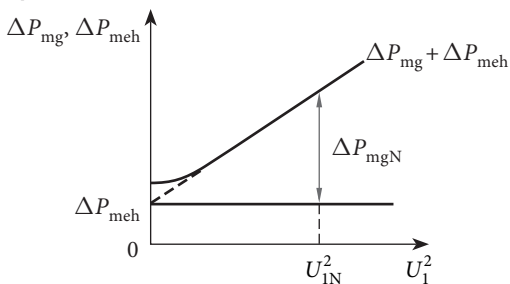
$$P_{1KN} = P_{1K} \left( \frac{U_{1N}}{U_1} \right)^2; \quad (7.22.)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{1KN}}{m_1 I_{1KN} U_{1N}}. \quad (7.23.)$$

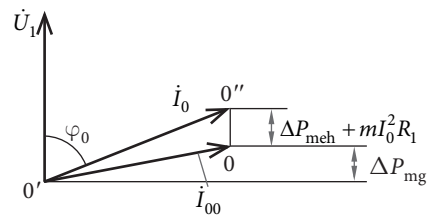
Zinot strāvas  $I_{1KN}$  un leņķa  $\varphi_K$  vērtības, atrod punktu K. Tādējādi ir zināmi divi punkti (0 un K), kas atrodas uz riņķa diagrammas (7.7. att.).

Riņķa līnijas centru  $O_1$  atrod, velkot perpendikulu no hordas 0K viduspunkta pret līniju 0B.

a)



b)



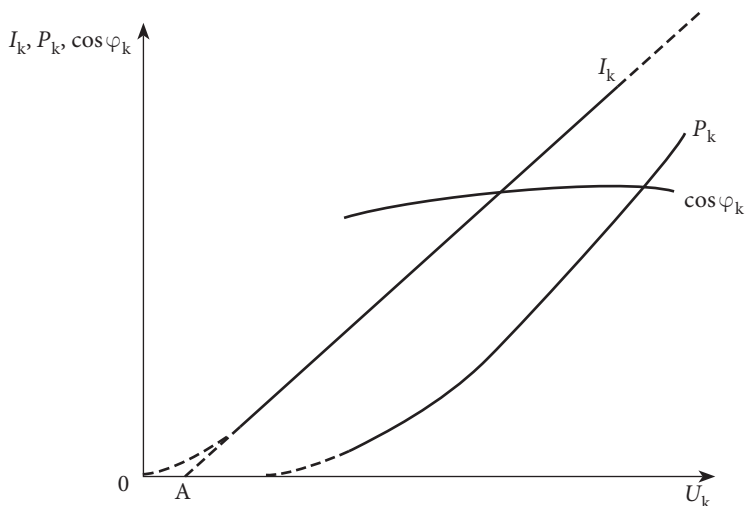
7.5. att. Asinhronā dzinēja mehānisko un magnētisko zudumu sadalīšana (a) un ideālā tukšgaitas punkta noteikšana (b).

Elektromagnētiskās jaudas līniju OT 7.7. attēlā atrod, sadalot nogriezni KB<sub>1</sub> attiecībā

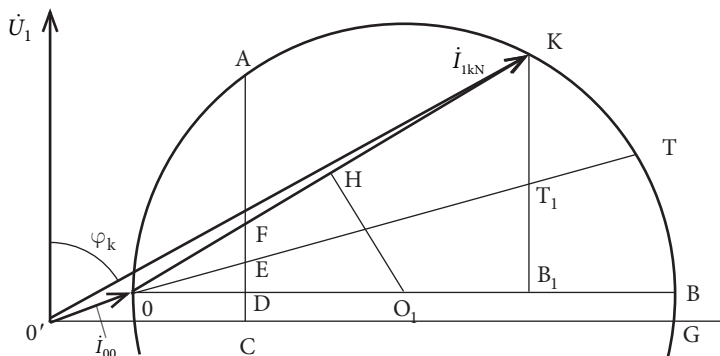
$$B_1T_1 : B_1K = R_1 : R_K,$$

kur īsslēguma pretestību  $R_K$  nosaka no īsslēguma mēģinājuma datiem.

Jāatzīmē, ka asinhronās mašīnas riņķa diagramma tika pamatota, pieņemot, ka mašīnas parametri ir nemainīgi. Īstenībā, mainoties darba režīmam, šie parametri mainās, jo tos ietekmē magnētiskās ķēdes piesātinājums un virsmas efekts. Normālas konstrukcijas asinhronajās mašīnās to parametri ir praktiski nemainīgi tikai režīmos, kad strāva  $I_1 \leq (1,0 \div 1,5) I_{1N}$   $I_1 \leq (1,0 \div 1,5) I_{1N}$ .



7.6. att. Asinhronā dzinēja īsslēguma raksturlieknes.



7.7. att. Asinhronās mašīnas riņķa diagrammas konstruēšana.

### 7.3. SINHRONO MAŠĪNU STRĀVAS DIAGRAMMAS

Mainoties sinhronās mašīnas darba režīmam, mainās statora tinuma strāvas  $I_1$  vērtība un fāze attiecībā pret spriegumu  $U_1$  uz tās spailēm. Tāpēc, līdzīgi asinhronās mašīnas gadījumam, ja tās parametri, spriegums  $U_1$  un tukšgaitas EDS  $E_0$  ir nemainīgi, strāvas vektora  $\dot{I}_1$  galapunkts, mainoties režīmam, apraksta noteiktu ģeometrisku figūru.

Aplūkosim sinhronās mašīnas strāvas diagrammu, balstoties uz tās vektoru diagrammu un pieņemot, ka statora tinuma aktīvā pretestība  $R_1$  ir vienāda ar nulli.

7.8. attēlā parādīta pārierosināta izvērzīto polu sinhronā ģeneratora vektoru diagramma. No šīs diagrammas var noteikt statora strāvas garenkomponenti un šķērskomponenti:

$$I_d = \frac{E_0 - U_1 \cos \theta}{X_d}; \quad (7.24.)$$

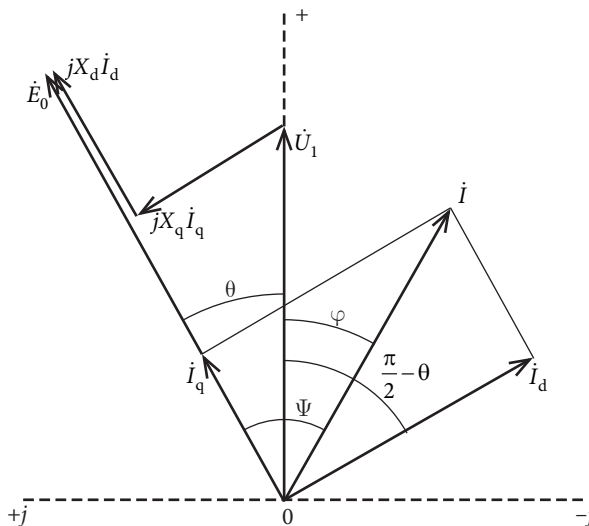
$$I_q = \frac{U_1 \sin \theta}{X_q}. \quad (7.25.)$$

Novietosim 7.8. att. vektoru diagrammu uz kompleksās plaknes tā, lai reālo skaitļu ass sakristu ar sprieguma vektoru  $\dot{U}_1$ . Tad statora strāvu var izteikt:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_q e^{-j\theta} + \dot{I}_d e^{j\left(\frac{\pi}{2}-\theta\right)}. \quad (7.26.)$$

Ievietojot izteiksmē (7.26.)  $I_d$  un  $I_q$  vērtības no formulām (7.24.) un (7.25.) un ņemot vērā zināmās sakarības:

$$\sin \theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j} = \frac{1}{2} e^{-j\frac{\pi}{2}} (e^{j\theta} - e^{-j\theta}); \quad (7.27.)$$



7.8. att. Sinhronā ģeneratora vektoru diagramma.



$$-\cos\theta = -\frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2} = \frac{1}{2}e^{-j\pi}(e^{j\theta} + e^{-j\theta}), \quad (7.28.)$$

iegūsim

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{U_1}{2X_q} e^{-j(\frac{\pi}{2}+\theta)} \cdot (e^{j\theta} - e^{-j\theta}) + \frac{U_1}{2X_d} e^{-j(\frac{\pi}{2}+\theta)} \cdot (e^{j\theta} + e^{-j\theta}) + \frac{\dot{E}_0}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)} = \\ &= \frac{U_1}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{U_1}{2} \left( -\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-j(\frac{\pi}{2}+2\theta)} + \frac{E_0}{X_d} e^{j(\frac{\pi}{2}-\theta)} \end{aligned}$$

vai

$$\dot{I}_1 = \dot{M} + \dot{R}_U e^{-j2\theta} + \dot{R}_E e^{-j\theta}, \quad (7.29.)$$

kur

$$\dot{M} = \frac{U_1}{2} \left( \frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-j\frac{\pi}{2}}; \quad (7.30.)$$

$$\dot{R}_U = \frac{U_1}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) e^{j\frac{\pi}{2}}; \quad (7.31.)$$

$$\dot{R}_E = \frac{E_0}{X_d} e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (7.32.)$$

Izteiksme (7.29.) ir sinhronās mašīnas strāvas diagrammas vienādojums, saskaņā ar kuru strāvas  $\dot{I}_1$  virzienu, ja  $U_1 = const$  un  $E_0 = const$ , nosaka slodzes leņķis  $\theta$ .

Tā kā neizvirzīto polu sinhronajā mašīnā  $X_d = X_q$ , arī  $R_U = 0$ , un strāvas diagrammas vienādojums ir šāds:

$$\dot{I}_1 = \dot{M} + \dot{R}_E e^{-j\theta}, \quad (7.33.)$$

kur

$$\dot{M} = \frac{U_1}{X_d} e^{-j\frac{\pi}{2}}; \quad \dot{R}_E = \frac{E_0}{X_d} e^{j\frac{\pi}{2}}. \quad (7.34.)$$

No vienādojuma (7.33.) redzams, ka, mainoties slodzes leņķim  $\theta$  robežās no 0 līdz  $2\pi$ , strāvas  $\dot{I}_1$  vektora galapunkts apraksta riņķa līniju. Vektors  $\dot{M}$  nosaka aploces centru, bet  $R_E = E_0/X_d$  – rādiuss vektoram, kura lielumu savukārt nosaka ierosmes strāvas radītais tukšgaitas EDS  $E_0$ .

Neizvirzīto polu mašīnai strāvas riņķa diagrammas dažādām  $E_0$  vērtībām parādītas 7.9. attēlā. Šajā attēlā apgabals  $0 < \theta < \pi$  atbilst dzinēja režīmam, bet apgabals  $\pi < \theta < 2\pi$  – ģenerators režīmam.

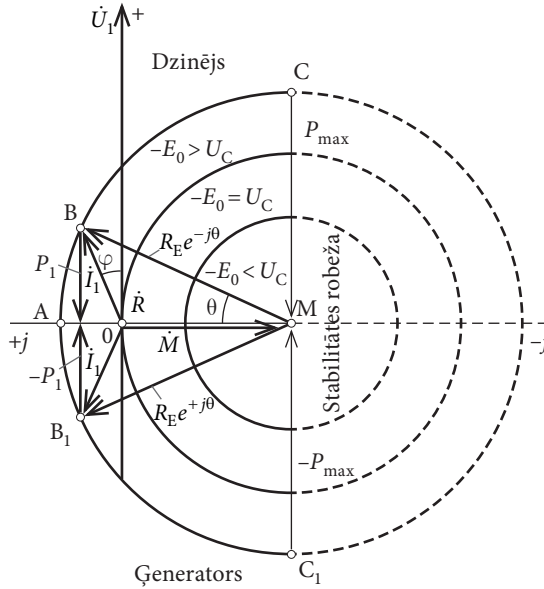
Strāvas  $\dot{I}_1$  aktīvā komponente, t. i., tās projekcija uz sprieguma vektoru  $U_1$ , ir proporcionāla aktīvai jaudai  $P_1$  uz mašīnas spailēm. Riņķa līniju apgabali, kas parādīti 7.9. attēlā ar pārtrauktām līnijām, atbilst nestabilajiem darba režīmiem. No diagrammas tāpat redzams, ka sinhronā mašīna var atdot tīklā reaktīvo jaudu, ja  $E_0 > U_1$ .

Kā zināms, izvirzīto polu sinhronā mašīna paralēli ar tīklu var darboties bez ierosmes strāvas (sk. 6.7. un 6.12. apakšnodaļu). Šādu mašīnu sauc par sinhrono reaktīvo mašīnu.

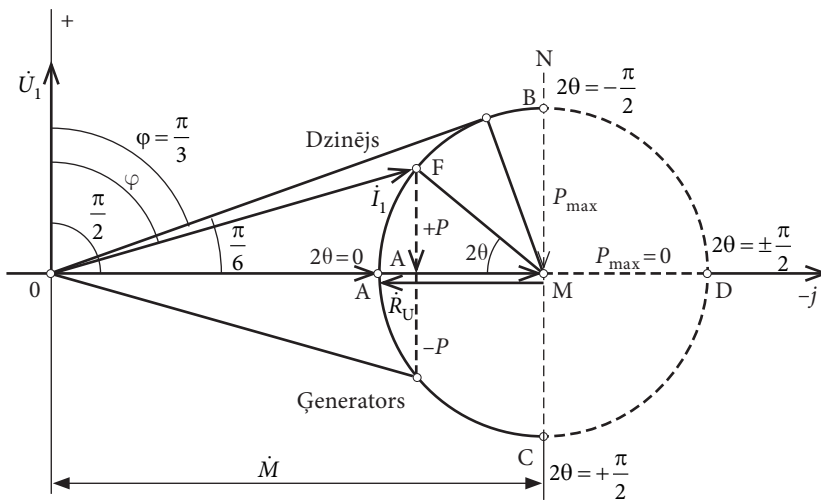
Tādējādi, ievietojot izteiksmē (7.29.)  $R_E = 0$ , iegūstam sinhronās reaktīvās mašīnas strāvas diagrammas vienādojumu:

$$\dot{I}_1 = \dot{M} + \dot{R}_U e^{-j2\theta}. \quad (7.35.)$$

Vienādojumam (7.35.) atbilst riņķa diagramma, kas parādīta 7.10. attēlā. Turklāt vienai riņķa līnijai atbilst slodzes leņķa  $\varphi$  izmaiņa no 0 līdz  $\pi$ , bet otrai riņķa līnijai, kas uzklājas pirmajai, atbilst leņķa  $\theta$  izmaiņa no  $\pi$  līdz  $2\pi$ .



7.9. att. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas strāvas diagramma.



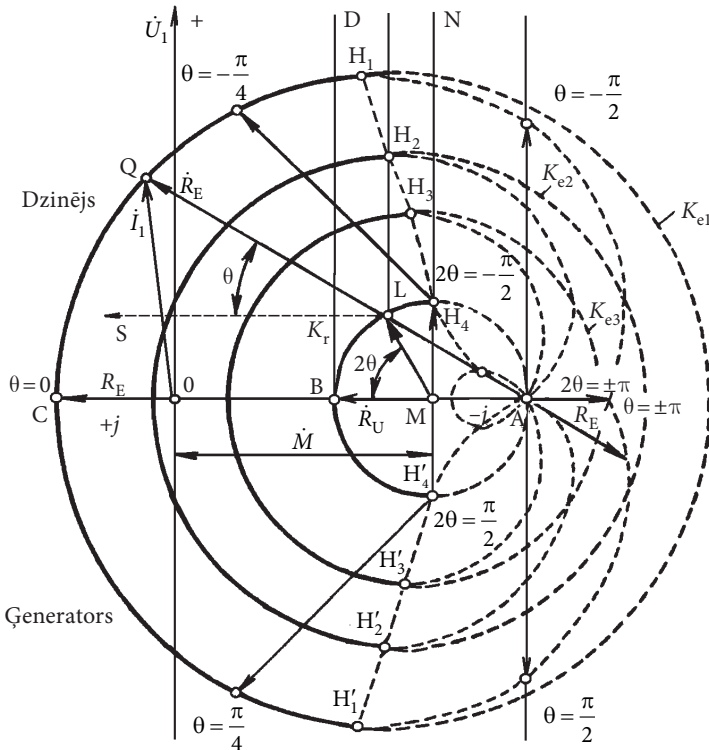
7.10. att. Sinhronās reaktīvās mašīnas strāvas diagramma.

Ierosinātas izvirzīto polu sinhronās mašīnas strāvas diagrammas vienādojums atbilst izteiksmei (7.29). Šajā gadījumā diagramma veido Paskāla cilpu (7.11. att.).

Strāvas diagrammu var konstruēt šādā secībā. Vertikāli atliekam sprieguma vektoru  $\dot{U}_1$  un no tā pulksteņa rādītāju kustības virzienā leņķī  $\pi/2$  atliekam centra vektoru  $\dot{M}$ . Mašīnai bez ierosmes novelkam riņķa līniju ar rādiusu  $R_U$  un centru punktā  $M$ . Punkts  $B$  atbilst leņķim  $2\theta = 0$ . Pa kreisi no punkta  $B$  atliekam nogriezni  $R_E$  un iegūstam punktu  $C$ . Pārejot dzinēja režīmā ar noteiktu slodzes leņķi  $\theta$  rādiussvektors  $\dot{R}_U e^{-j2\theta}$  pagriežas no horizontālā stāvokļa  $MB$  par leņķi  $2\theta$  un ieņem stāvokli  $ML$ . Vienlaikus rādiussvektors  $R_E e^{-j\theta}$  pagriežas no horizontālā stāvokļa  $LS$  par leņķi  $\theta$  pretēji pulksteņa rādītāju kustības virzienam un ieņem stāvokli  $LQ$ . Punkts  $Q$  nosaka noteiktam slodzes leņķim  $\theta$  atbilstošo strāvas  $\dot{I}_1$  vektora galapunktu. Strāvas diagrammas daļa, kas atrodas virs abscisu ass, atbilst dzinēja režīmam, bet zem abscisu ass – ģenerators režīmam.

7.11. attēlā parādītas trīs strāvu diagrammas, kas atbilst dažādām EDS  $E_0$  vērtībām. Samazinot ierosmes strāvu, diagrammas saraujas un, ja  $R_E < 2R_U$ , aploces  $K_r$  iekšpusē parādās iekšējā Paskāla cilpa.

Ja uz strāvu diagrammas savieno punktus  $H_1, H_2, H_3, H_4, H'_1, H'_2, H'_3, H'_4$ , kas dažādām  $E_0$  vērtībām atbilst strāvas aktīvās komponentes un jaudas maksimālām vērtībām, iegūst līkni, kas atbilst mašīnas statiskās stabilitātes robežai. Pa labi no šīs līnijas atrodas nestabīlie darba režīmi.



7.11. att. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas strāvas diagramma.

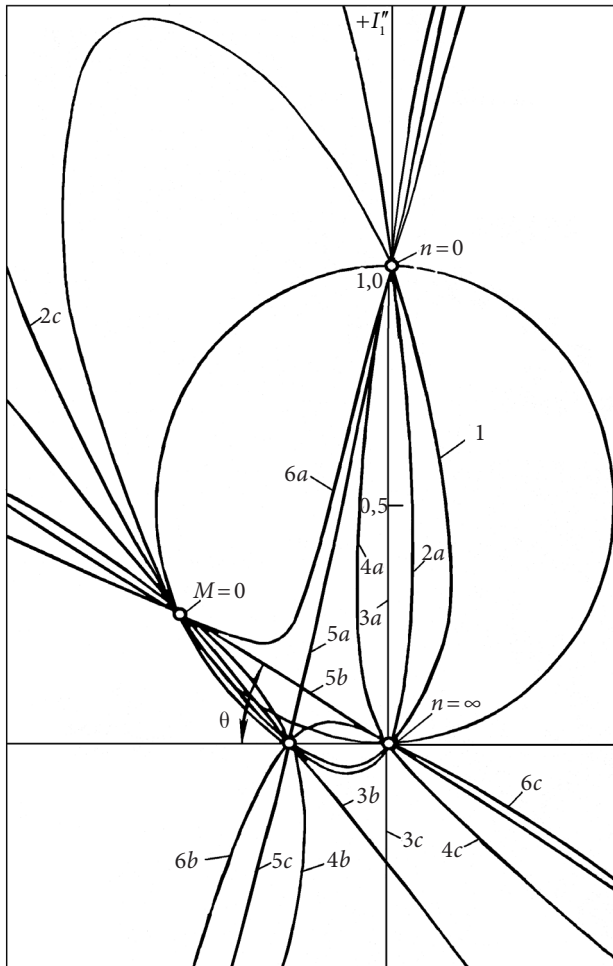
## 7.4. SINHRONO VENTIĻDZINĒJU STRĀVAS DIAGRAMMAS

Ventiļdzinēja vispārīgo īpašību un iespēju novērtēšanai lietderīgi izmantot enkura strāvas diagrammas. Analīze rāda, ka strāvas  $I_1$  diagrammu režīmā  $\theta = const$  veido otrās kārtas līkņu saime, kuru formu būtiski ietekmē koeficienti  $k_1$  un  $k_2$  (sk. 6.12.4. apakšnodaļu).

7.12. attēlā parādītas strāvas  $I_1$  diagrammas gadījumam, kad ierosmes tinums ieslēgts virknē ar komutatoru un strāva  $I_2$  mainās saskaņā ar izteiksmi:

$$I_2 = k_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (7.36.)$$

Diagrammu pieņems raksturot ar invariantiem  $C, D, E$ , centra koordinātēm  $x_0$  un  $y_0$ , kā arī ekscentritāti  $e$ .



7.12. att. Izvirzīto polu virknes ierosmes ventiļdzinēja strāvas diagramma ar  $\theta = const$ .

$$C = - \left[ 1 + \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \sin^2 \theta - k_1 \frac{L_{ad}}{L_q} \sin \theta \right] \cdot (L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta) \cdot \frac{1}{L_q}; \quad (7.37.)$$

$$D = 1 + \frac{1}{L_q} \cdot (L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta); \quad (7.38.)$$

$$E = \frac{1}{L_q} \cdot \left[ (L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta) - \frac{1}{4L_q} \cdot (L_{ad} k_1 \cos \theta)^2 \right]; \quad (7.39.)$$

$$x_0 = \frac{U_1 \left[ L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \frac{1}{2} \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) L_{ad} k_1 \sin \theta \cos^2 \theta \right]}{2 \cdot R_1 \left[ L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \frac{1}{L_q} \cdot \left( \frac{1}{2} L_{ad} \cos \theta \right)^2 \right]}; \quad (7.40.)$$

$$y_0 = \frac{-U_1 L_{ad} \cos \theta \cdot \left[ 1 + \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \cdot \sin^2 \theta - \frac{L_{ad}}{L_q} \sin \theta \right]}{4R_1 \cdot \left[ L_d - L_{ad} k_1 \sin \theta - \frac{1}{L_q} \cdot \left( \frac{1}{2} L_{ad} \cos \theta \right)^2 \right]}; \quad (7.41.)$$

$$e = \sqrt{\frac{2Y}{1 + \frac{L_d}{L_q} - \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \sin \theta + Y}}. \quad (7.42.)$$

kur  $L_d$  un  $L_q$  – induktivitātes, kas atbilst sinhronām pretestībām pa garenasi un šķērsasi;

$$Y = \sqrt{\left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right)^2 - 2 \left( \frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \sin \theta + \left( \frac{L_{ad}}{L_q} k_1 \right)^2}.$$

Diagrammas parametri, kā redzams no izteiksmēm (7.36.–7.42), ir atkarīgi no koeficienta  $k_1$ . Tāpēc lietderīgi izdalīt tā 6 raksturīgās vērtības.

Pirmkārt,

$$0 < k_1 < \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta - \sin \theta}}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta}. \quad (7.43.)$$

Šajā gadījumā  $E > 0$ ,  $C/D < 0$  un diagramma ir elipse (7.12. att. likne 1).

Otrkārt,

$$k_1 = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta - \sin \theta}}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta}. \quad (7.44.)$$

Diagrammu veido parabola 2a un 2c.

Treškārt,

$$\frac{\sqrt{\sin^2 \theta + \frac{L_d}{L_q} \cos^2 \theta} - \sin \theta}{\frac{1}{2} \frac{L_{ad}}{L_q} \cos^2 \theta} < k_1 < \frac{L_{ad}}{L_d \sin \theta}. \quad (7.45.)$$

$E < 0, C \neq 0$  un diagramma ir hiperbola (7.12. att. liknes 4a, 4c, 4b).

Ceturtkārt, īpaši jāatzīmē  $k_1$  vērtība

$$k_{10} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{k_d}{k_q} - 1 \right) \sin^2 \theta \right] L_q}{L_{ad} \sin \theta}.$$

( $E < 0, C = 0$ ) un diagramma attēlojas ar divām taisnēm, kas krustojas (taisnes 3a, 3c, 3b). Taisne 3a atbilst dzinēja darbībai ar nemainīgu  $\cos \varphi_1 = 1$  jebkurām rotācijas frekvencēm. Ja  $k_1 < k_{10}$ , dzinējs darbojas ar atpaliekošu, bet, ja  $k_1 > k_{10}$ , – ar apsteidzošu strāvu.

Piektkārt,

$$k_1 = \frac{L_{ad}}{L_d \sin \theta}. \quad (7.46.)$$

( $E < 0, C = 0$ ) Arī šajā gadījumā diagrammu veido divas taisnes (taisnes 5a, 5c, 5b).

Sestkārt, tālāk pieaugot koeficienta  $k_1$  vērtībai, diagramma attēlojas ar hiperbolu (liknes 6a, 6c, 6 b).

7.12. attēlā parādītajā diagrammā ir vairāki raksturīgi punkti, caur kuriem iet visi hodogrāfi. Punktam  $I_1 = U_1 / R_1$  atbilst dzinēja palaišanai ( $n = 0$ ), punktā  $I_1 = 0$   $n \rightarrow \infty$ , bet punktā  $I_{1a} = I_2 \cdot L_{ad} / L_d \cdot \sin \theta$  un  $I_{1r} = -I \cdot L_{ad} / L_q \cdot \cos \theta$  mašīnas elektromagnētiskais griezes moments  $M$  ir vienāds ar nulli. Caur minētajiem punktiem var novilkt riņķa līniju, kas atdala apgabalus, kur elektromagnētiskā jauda ir pozitīva un negatīva. Diagrammas un šīs riņķa līnijas krustpunktos elektromagnētiskā jauda ir vienāda ar nulli.

Maiņstrāvas mašīnu teorijā strāvas diagrammas var izmantot ne tikai vispārīgo īpašību novērtēšanai, bet, līdzīgi kā asinhronajam dzinējam, arī galveno elektromagnētisko lielumu un raksturlīkņu noteikšanai [16].

Virknes ierosmes ventiļdzinēja raksturlīknes var aprēķināt, izmantojot pamatvienādojumus, kurus savukārt var iegūt no izteiksmēm (6.99.–6.105), ievietojot tajās  $I_2 = k_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ .

Analīze rāda, ka virknes ierosmes ventiļdzinējs atkarībā no  $k_1$  vērtības var nodrošināt ļoti plašu raksturlīkņu spektru. Labākie rādītāji ir dzinējam ar  $k_1 = k_{10}$ .

# 8. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI UN MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

## 8.1. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI

### 8.1.1. Divenkuru pārveidotāji

Elektroenerģijas pārveidošanai bez transformatoriem, jonu, elektroniskajiem un pusvadītāju pārveidotājiem izmanto arī rotējošās elektriskās mašīnas. Ar elektromašīnu pārveidotāju var pārveidot frekvenci, spriegumu un fāžu skaitu.

Viens no parastākajiem elektromašīnu pārveidotājiem ir divu mašīnu agregāts, kurā dzinējs mehāniski savienots ar ģeneratoru, bet elektriski tie nav saistīti. Ja mehāniski sajūdz kopā divas maiņstrāvas mašīnas, tad var pārveidot maiņstrāvas frekvenci, spriegumu un fāžu skaitu. Pārveidojot maiņstrāvu līdzstrāvā vai otrādi, asinhrono vai sinhrono mašīnu sajūdz kopā ar līdzstrāvas mašīnu. Ir sastopami agregāti, kuros abas mašīnas izvietotas vienā korpusā, bet rotoru uz vienas vārpstas.

Pārveidojot lielākas jaudas maiņstrāvu līdzstrāvā, kā dzinēju ieteicams ņemt sinhrono mašīnu, jo to var darbināt ar lielāku jaudas koeficientu. Kā līdzstrāvas mašīnu parasti lieto paralēlas ierosmes ģeneratoru.

Dzinēja-ģeneratora priekšrocība salīdzinājumā ar citiem elektromašīnu pārveidotājiem ir iespēja plašās robežās vienmērīgi regulēt spriegumu, kā arī iespēja izmantot sērījveidā ražotās mašīnas. Kā trūkums jāmin šādu pārveidotāju pazeminātais lietderības koeficients, kas ir vienāds ar divu mašīnu lietderības koeficientu reizinājumu, lielas izmaksas un lieli gabarīti.

### 8.1.2. Līdzstrāvas vienkura pārveidotāji

Elektrisko mašīnu ar vienu enkuru, kurā ir viens vai divi tinumi, sauc par vienkura pārveidotāju. Visplašāk izplatīti ir vienkura pārveidotāji ar vienu tinumu. Vienkura pārveidotāju strāva tiek pārveidota tieši bez elektriskās enerģijas pārvēršanas mehāniskajā, kā tas ir dzinējos-ģeneratoros.

Līdzstrāvas vienkura pārveidotājs (8.1. att.) līdzstrāvu līdzstrāvā pārveido ar diviem neatkarīgiem tinumiem (pozīcija 1 un 2 8.1. attēlā), kuri pievienoti katrs savam kolektoram. Tā uzdevums ir pārveidot viena sprieguma līdzstrāvu cita sprieguma līdzstrāvā.

No kolektora  $K_1$  puses pārveidotāju pievieno līdzstrāvas tīklam un tas darbojas kā dzinējs, bet no kolektora  $K_2$  puses – kā ģenerators.

EDS pārveidošanas koeficients šajā mašīnā vienāds ar virknē saslēgto vijumu attiecību abos tinumos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{pN_1}{600_2} \Phi n}{\frac{pN_2}{600_2} \Phi n} = \frac{N_1 a_2}{N_2 a_1}, \quad (8.1.)$$

kur  $N_1$  un  $N_2$  – aktīvo vadu skaits tinumos;  
 $a_1$  un  $a_2$  – paralēlo zaru skaits tinumos.

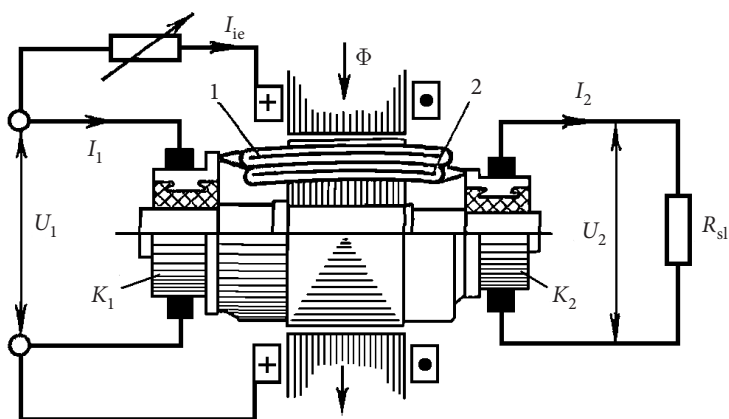
Dzinēja un ģenerators tinuma radīto momentu starpība nav liela, jo to nosaka tikai mašīnas mehāniskie un magnētiskie zudumi.

Abu enkura tinumu magnetizējošie spēki praktiski līdzsvaro viens otru. Šis apstākļi ļauj samazināt gaisa spraugu, tādējādi veidot vieglāku ierosmes tinumu un samazināt arī zudumus tajā.

Vienlaikus komutējot sekcijas, kas atrodas vienā rievā, savstarpējās indukcijas EDS samazina sekciju reaktīvo EDS un uzlabo komutācijas apstākļus.

Kā pārveidotāja trūkums jāmin tas, ka nav iespējams neatkarīgi regulēt ģenerators tinuma spriegumu, jo, mainot ierosmes strāvu, piemēram, to palielinot, samazinās enkura rotācijas frekvence un EDS praktiski nemainās.

Līdzstrāvas vienkura pārveidotājus bieži izmanto 12–24 V sprieguma pārveidošanai 750–1500 V spriegumā.



8.1. att. Līdzstrāvas vienkura pārveidotāja shēma: 1, 2 – neatkarīgi tinumi.



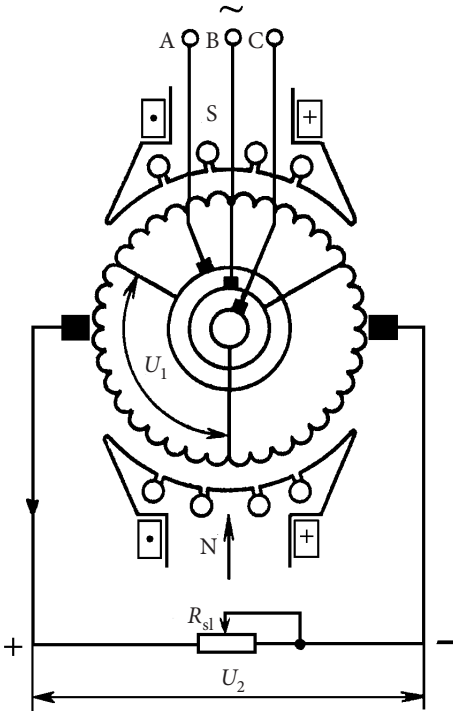
### 8.1.3. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāji

Vienkura pārveidotājs pēc uzbūves ir līdzīgs līdzstrāvas mašīnai, tikai ar to atšķirību, ka tā enkura tinums ir pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem (8.2. att.). Kontaktgredzenus caur transformatoru bieži pievieno maiņstrāvas tīklam. Visbiežāk lieto trīsfāžu un sešfāžu pārveidotājus.

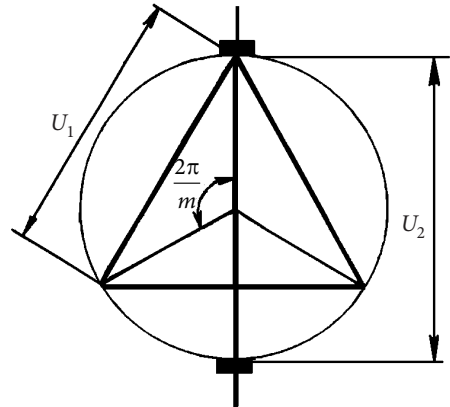
Gadījumos, kad pārveidotāju lieto maiņsprieguma pārveidošanai līdzspriegumā, tad no kontaktgredzenu puses tas darbojas kā sinhronais dzinējs, bet no kolektora puses – kā līdzstrāvas ģenerators. Pārveidojot līdzspriegumu maiņspriegumā, mašīna no kolektora puses darbojas kā līdzstrāvas dzinējs, bet no kontaktgredzenu puses – kā sinhronais ģenerators.

Vienfāzes vienkura pārveidotājā inducētais EDS  $E_1$  attiecas pret līdzspriegumu  $E_2$  kā  $1:\sqrt{2}$ . Vairākfāžu vienkura pārveidotājā ar to pašu enkura tinumu inducētā līdzsprieguma vērtība nemainās, bet maiņsprieguma amplitūdas vērtība ir vienlīdzīga aploces hordai, kas atbilst leņķim  $2\pi/m$ , kur  $m$  – fāžu skaits (8.3. att.). Tātad maiņsprieguma maksimālā vērtība ir:

$$E_{1m} = E_2 \sin \frac{\pi}{m}, \quad (8.2.)$$



8.2. att. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāja uzbūves princips.



8.3. att. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāja diagramma.

bet tā efektīvā vērtība:

$$E_{1m} = \frac{E_2}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (8.3.)$$

Vienfāzes vienkura pārveidotājam šī izteiksme derīga, ja pieņem  $m = 2$ .

Tādējādi pārveidotāja transformācijas koeficients

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} \quad (8.4.)$$

nav atkarīgs no tinuma parametriem, bet tikai no fāžu skaita  $m$ . Tabulā 8.1. dotas vienkura pārveidotāja transformācijas koeficienta  $K$  vērtības atkarībā no fāžu skaita.

8.1. tabula

Vienkura pārveidotāja transformācijas koeficienta vērtības atkarībā no fāžu skaita

$m$	Vienfāzes	Daudzfāžu			
	2	3	4	6	12
$K$	0,707	0,612	0,5	0,354	0,185

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var palaist no līdzsprieguma puses, pievadot tam enerģiju no kāda līdzstrāvas avota un pēc tam sinhronizējot ar maiņsprieguma tīklu. Biežāk lieto pārveidotāja asinhrono palaišanu no maiņsprieguma puses, tāpat kā sinhronajam dzinējam. Asinhronajai palaišanai paredzēts polu uzgaļos ievietotais palaišanas tinums.

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var izveidot arī ar diviem neatkarīgiem enkura tinumiem, lai bez papildu transformatora standarta spriegumus varētu izmantot abās pusēs. Pārveidotājus var izmantot arī par divu veidu strāvas – maiņstrāvas un līdzstrāvas – ģeneratoru, ja tā enkuru griež ar kādu primāro dzinēju.

Pēdējā laikā vienkura pārveidotāju vietā aizvien plašāk izmanto vienkāršākus un ekonomiskākus pusvadītāju pārveidotājus.

## 8.2. MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

### 8.2.1. Trīsfāžu kolektormašīnas

Plaši izplatītajiem trīsfāžu asinhronajiem dzinējiem (sk. 5. nodaļu) piemīt virkne priekšrocību: vienkārša konstrukcija, augsta drošuma pakāpe un neliela cena. Tanī pat laikā asinhronajiem dzinējiem ir arī būtiski trūkumi: tie patērē reaktīvo jaudu un pazemina tīkla jaudas koeficientu; tiem ir problēmas ekonomiskā rotācijas frekvences regulēšanā. Minētie trūkumi stimulēja tādu maiņstrāvas kolektormašīnu izstrādi, kuras

nodrošina laidenu rotācijas frekvences regulēšanu un jaudas koeficienta palielināšanu.

Mainstrāvas kolektormašīnas izmanto rūpniecībā un transportā. Tomēr šo mašīnu lietošana nav plaši izplatīta sakarā ar komutācijas problēmām, to sarežģīto uzbūvi un augstajām izmaksām.

Trīsfāžu maiņstrāvas kolektordzinējs būtībā ir asinhronais dzinējs, kura sekundārajā ķēdē caur kolektoru tiek ievadīts papildu EDS  $E_p$ .

Aplūkosim papildu EDS  $E_p$  ietekmi uz asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru darbību. Papildu EDS var ievadīt sekundārajā ķēdē caur kontaktgredzeniem, turklāt šī EDS frekvencei vienmēr jābūt vienādai ar slīdes frekvenci  $f_2 = s f_1$ .

8.4. attēlā a parādīta asinhronā dzinēja vektoru diagramma, ja  $E_p = 0$ . Strāva dzinēja sekundārajā ķēdē

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} \quad (8.5)$$

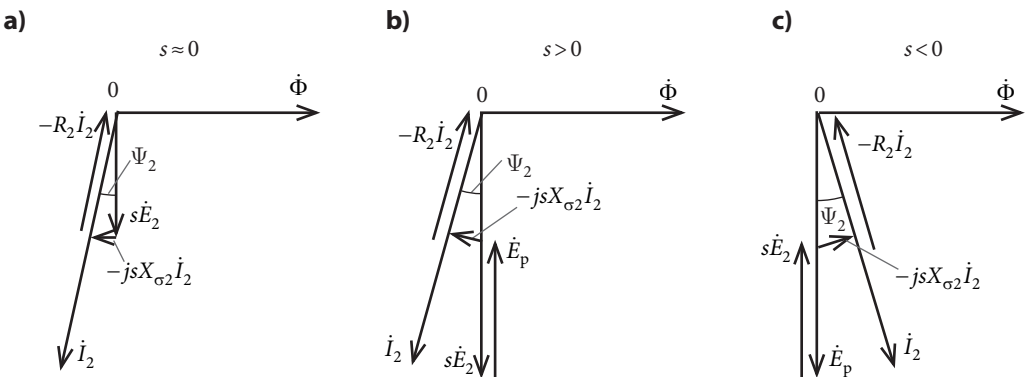
nodrošina atbilstoši slodzei vajadzīgo elektromagnētisko griezes momentu  $M$ .

Ievadot sekundārajā ķēdē papildu EDS  $E_p$ , kas vērsts pretī slīdes EDS  $E_{2s}$ , strāva rotora tinumā

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s} - \dot{E}_p}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 - \dot{E}_p}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} \quad (8.6)$$

pirmajā mirklī samazināsies. Tāpēc samazināsies arī griezes moments, dzinējs sāks bremsēties, bet slīde  $s$  pieaugs. Saskaņā ar izteiksmi (8.6.) strāva  $I_2$  un moments  $M$  atkal pieaugs līdz brīdim, kad iestāsies līdzsvars ar slodzes momentu. Dzinējs šajā gadījumā darbosies ar palielinātu slīdi un mazāku rotācijas frekvenci. Šim gadījumam atbilstošā vektoru diagramma parādīta 8.4. attēlā b.

Pieņemsim, ka ievadītā papildu EDS  $E_p$  virziens salīdzinājumā ar iepriekš aplūkoto ir mainījies uz pretējo un sakrīt fāzē ar EDS  $sE_2$ . Tad izteiksmes (8.6.) vietā iegūsim:



8.4. att. Asinhronā dzinēja sekundārās ķēdes vektoru diagrammas ar dažādiem papildu EDS  $E_p$ : a)  $E_p = 0$ ; b)  $E_p \neq 0$  (samazinot rotācijas frekvenci) un c)  $E_p \neq 0$  (palielinot rotācijas frekvenci).

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s} + \dot{E}_p}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 + \dot{E}_p}{R_2 + jsX_{\sigma 2}}. \quad (8.7)$$

Pirmajā mirklī pēc  $E_p$  ievadīšanas strāva  $I_2$  un moments  $M$  pieaugs, dzinējs sāks griezties ātrāk, bet slīde  $s$  samazināsies. Ja  $E_p$  lielums ir pietiekams, slīde  $s$  samazināsies līdz nullei un, ja  $E_p$  radītā strāva  $I_2$  joprojām būs pārāk liela slodzes momenta radīšanai, dzinēja rotācijas frekvence turpinās pieaugt, pārsniedzot arī sinhrono rotācijas frekvenci. Slīde  $s$  un EDS  $E_{2s}$  šajā gadījumā maina zīmi un turpina augt pēc absolūtās vērtības līdz brīdim, kad strāva  $I_2$  saskaņā ar (8.7.) nenokritīs līdz vajadzīgajai vērtībai. Ja  $s < 0$ , leņķis

$$\psi_2 = \arctg \frac{sX_{\sigma 2}}{R_2}$$

ir negatīvs (8.4. att. c).

Tādējādi, izmainot papildu EDS  $E_p$  vērtību un virzienu, var īstenot dzinēja laidenu rotācijas frekvences regulēšanu gan zem, gan virs sinhronās rotācijas frekvences.

Ja neņem vērā zudumus, tad papildu EDS avota jauda ir vienāda ar slīdes jaudu  $sP_{em}$ , turklāt, ja  $s > 0$ , šis avots patērē jaudu no sekundārās ķēdes, bet ja  $s < 0$ , atdod jaudu dzinēja sekundārajā ķēdē.

Mehāniskā jauda, ko attīsta dzinējs,

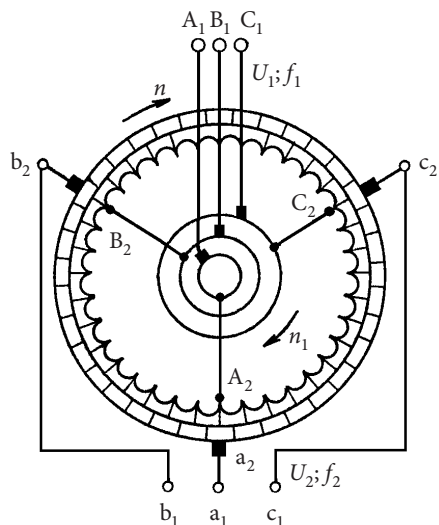
$$P_{meh} = (1 - s)P_{em} \quad (8.8.)$$

gadījumā, ja  $s > 0$ , ir mazāka par elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$ , bet gadījumā, ja  $s < 0$ , tās zīme mainās un  $P_{meh} > P_{em}$ .

Jāatzīmē, ka sekundārajā tinumā ievadāmā papildu EDS frekvencei jābūt vienādai ar  $f_2 = sf_1$ . Trīsfāžu maiņstrāvas kolektormašīnās šādai frekvenču pārveidošanai parasti kalpo kolektors.

Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma parādīta 8.5. attēlā. Rotors ir izveidots tāpat kā līdzstrāvas mašīnas enkurs, tikai ar to atšķirību, ka tinums pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem punktos  $A_2, B_2, C_2$ . Šie punkti savukārt ar suku palīdzību pievienoti trīsfāžu maiņstrāvas tīklam. Punktos  $a_2, b_2, c_2$  kolektors savienots ar sukām, kuras savstarpēji nobīdītas par  $120^\circ$ . Kolektorpārveidotāja statorā (attēlā stators nav parādīts) nav tinumu un tas veic tikai magnētva funkcijas.

Aplūkosim vispirms gadījumu, kad rotors ir nekustīgs ( $n = 0$ ) un suku  $a_2, b_2, c_2$  ir novietotas pret tinuma punktiem  $A_2, B_2, C_2$ , kā tas parādīts 8.5. attēlā.



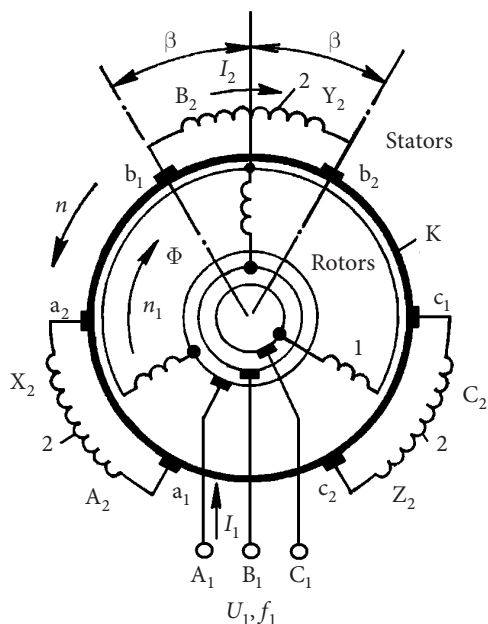
8.5. att. Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma.

Ja spailēm  $A_1, B_1, C_1$  caur kontaktgredzeniem pievada sinusoidālu maiņspriegumu  $U_1$  ar frekvenci  $f_1$ , mašīnā rodas rotējošais magnētiskais lauks, kas attiecībā pret rotoru griežas ar rotācijas frekvenci  $n_1 = 60f_1/p$ . Tā kā rotors ir nekustīgs, tad tāda pati ir lauka rotācijas frekvence attiecībā pret nekustīgajām sukām  $a_2, b_2, c_2$ . Rotējošais magnētiskais lauks katrā enkura tinuma sekcijā inducē sinusoidālu EDS, turklāt maksimālā EDS vērtība sekcijā ir tad, kad rotējošā lauka ass sakrīt ar dotās sekcijas asi. Tā kā katra sekcija pievienota divām kolektora plāksnītēm, tad katrā laika momentā uz kolektora ir tāds pats sprieguma sadalījums kā tinumā. Tādējādi, magnētiskajam laukam rotējot, pa kolektoru pārvietojas sinusoidāla sprieguma vilnis, kura rotācijas frekvence un virziens sakrīt ar magnētiskā lauka rotācijas frekvenci un virzienu. Tas nozīmē, ka uz sukām, kas pievienotas kolektoram, ir simetrisks trīsfāžu spriegums  $U_2$  ar frekvenci  $f_2 = f_1 = p n_1/60$ . Ja neievēro sprieguma kritumu tinumā,

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 = \dot{U}_1. \quad (8.9)$$

Ja sukas  $a_2, b_2, c_2$  nobīda par kādu leņķi, tad sprieguma  $U_2$  fāze izmainās attiecībā pret spriegumu  $U_1$ , bet tā skaitliskā vērtība paliek nemainīga.

Tagad pieņemsim, ka rotoru griež ar rotācijas frekvenci  $n$ , piemēram, lauka griešanās virzienā. Tad kolektora sprieguma vilnis saglabā nemainīgu amplitūdu un turpina griezties attiecībā pret rotoru ar iepriekšējo rotācijas frekvenci  $n_1 = 60f_1/p$ . Bet telpā un tātad attiecībā pret nekustīgajām sukām  $a_2, b_2, c_2$  sprieguma vilnis rotē ar rotācijas frekvenci  $n_2 = n_1 + n$ . Ja rotoru griež pretī lauka rotācijas virzienam, tad kolektora sprieguma vilnis



8.6. att. Principiālā shēma trīsfāžu paralēla slēguma maiņstrāvas kolektordzinējam ar rotora barošanu.

attiecībā pret nekustīgajām sukām griežas ar rotācijas frekvenci  $n_2 = n_1 - n$ . Tādējādi spriegums  $U_2$  mainās ar frekvenci

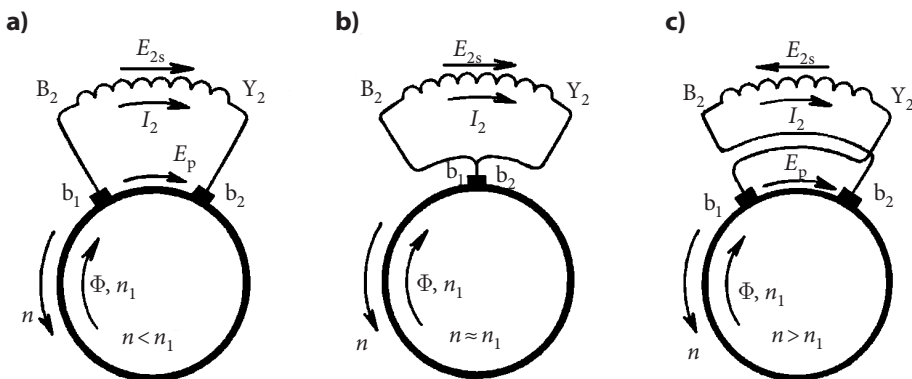
$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 \pm n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 \pm n}{n_1} = f_1 s. \quad (8.10.)$$

Sprieguma  $U_2$  skaitliskā vērtība nav atkarīga no rotora rotācijas frekvences un no suku stāvokļa. Mainot suku stāvokli, var izmainīt sprieguma  $U_2$  fāzi attiecībā pret  $U_1$  un, mainot rotora rotācijas frekvenci, var izmainīt  $U_2$  frekvenci. Teiktais pierāda, ka frekvences kolektorpārveidotāju var izmantot kā papildu EDS avotu asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanai.

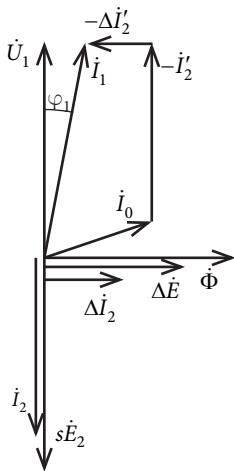
Plašāku lietojumu rod paralēla slēguma maiņstrāvas kolektordzinējs ar rotora barošanu (Šrāge-Rihtera dzinējs). Šajā dzinējā (8.6. att.) trīsfāžu primārais tinums 1 novietots rotorā un caur kontaktgredzeniem pieslēgts tīklam (spaiļes  $A_1, B_1, C_1$ ) sk. att., bet sekundārā tinuma 2 fāzes novietotas statorā. Par papildu EDS avotu kalpo papildu tinums, kas ir analogs līdzstrāvas mašīnas enkura tinumam un ir novietots kopējās rievās ar primāro tinumu 1 (8.6. attēlā papildu tinums nav parādīts). Ar suku  $a_1-a_2, b_1-b_2$  un  $c_1-c_2$  palīdzību papildu tinums tiek savienots ar sekundāro tinumu 2.

Primārā tinuma magnetizēšanas strāva rada magnētisko plūsmu  $\Phi$ , kas rotē attiecībā pret rotoru ar rotācijas frekvenci  $n_1 = 60f_1/p$ , inducējot primārajā un papildu tinumā EDS ar frekvenci  $f_1$ , bet sekundārajā tinumā ar frekvenci  $f_2 = sf_1$ . Papildu EDS  $E_p$  ir proporcionāls attālumam starp vienas fāzes sukām, piemēram,  $b_1-b_2$ . Strāva  $I_2$  sekundārajā tinumā 2 plūst ar frekvenci  $f_2$ , bet papildu tinumā ar frekvenci  $f_1$ . Frekvences pārveidošanu veic kolektors.

Statora tinumam pievadītā papildu EDS  $E_p$  lielumu var mainīt, regulējot attālumu starp šī tinuma vienas fāzes sukām (8.7. att.). Jo lielāks ir šis attālums, jo lielāks papildu EDS tiek pievadīts statora tinumam. Ja sukas atrodas uz vienas kolektora plāksnītes (8.7. att. b), tad  $E_p = 0$ . Visas trīs statora tinuma fāzes šajā gadījumā ir išslēgtas, un mašīnas darbība ir līdzīga parastā asinhronā dzinēja darbībai ar išslēgtu sekundāro tinumu. Ja katras fāzes sukas pārbīda no tinuma simetrijas ass uz abām pusēm par vienādu



8.7. att. Papildu EDS  $E_p$  atkarība no suku stāvokļa: a)  $E_p < 0$ ; b)  $E_p = 0$ ; c)  $E_p > 0$ .



8.8. att. Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinēja vektoru diagramma.

Tas nozīmē, ka dzinēja rotācijas frekvence nemainās, bet mainās primārā strāva, kas iegūst papildu komponenti  $\Delta I_2'$ . Līdz ar to samazinās leņķis  $\varphi_1$  un uzlabojas dzinēja jaudas koeficients (sk. 8.8. attēlu).

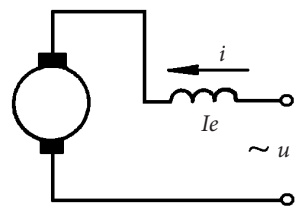
Var atzīmēt, ka tad, ja  $E_p$  pārsniedz noteiktu vērtību, primārā strāva  $I_1$  var apsteigt fāzē spriegumu  $U_1$ . Šādos apstākļos kolektordzinējs atdod tīklā reaktīvo jaudu un darbojas kā kompensators, t. i., līdzīgi pārierosinātai sinhronajai mašīnai.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas atpaliek fāzē no tinumā inducētā EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad papildstrāvai  $\Delta I_2$  ir pretējs virziens, leņķis  $\varphi_1$  palielinās un jaudas koeficients samazinās.

Vispārīgā gadījumā, kad vienlaikus maina  $E_p$  skaitlisko vērtību un fāzi, mainās dzinēja rotācijas frekvence un jaudas koeficients.

Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinējos, tāpat kā vienfāzes dzinējos, komutējamās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas transformācijas EDS, kas pasliktina komutācijas apstākļus. Šis apstākļis jāmin kā viens no šo dzinēju trūkumiem.

## 8.2.2. Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji



8.9. att. Virknes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja shēma.

attālumu (8.7. att. a), tad papildu EDS  $E_p$  sekundārā tinuma ķēdē darbojas preti šajā tinumā inducētajam EDS  $sE_2$ . Ja sukcas attiecībā pret statora tinuma fāžu asīm pārbīda pretējos virzienos (8.7. att. c), tad mainās  $E_p$  virziens, kas tagad sakrīt ar sekundārajā tinumā inducētā EDS virzienu.

Dzinējam ar fiksētu suku stāvokli mehāniskās raksturlienes ir līdzīgas parastā asinhronā dzinēja mehāniskajām raksturlikenēm.

Noskaidrosim, kā, pievadot sekundārajam tinumam papildu EDS, var regulēt trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinēja jaudas koeficientu  $\cos\varphi$ .

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas apsteidz tinumā inducēto EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad šajā tinumā rodas papildstrāva  $\Delta I_2$  (8.8. att.), kas tāpat apsteidz EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$  un tāpēc nerada nekādu papildu griezes momentu.

Tas nozīmē, ka dzinēja rotācijas frekvence nemainās, bet mainās primārā strāva, kas iegūst papildu komponenti  $\Delta I_2'$ . Līdz ar to samazinās leņķis  $\varphi_1$  un uzlabojas dzinēja jaudas koeficients (sk. 8.8. attēlu).

Var atzīmēt, ka tad, ja  $E_p$  pārsniedz noteiktu vērtību, primārā strāva  $I_1$  var apsteigt fāzē spriegumu  $U_1$ . Šādos apstākļos kolektordzinējs atdod tīklā reaktīvo jaudu un darbojas kā kompensators, t. i., līdzīgi pārierosinātai sinhronajai mašīnai.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas atpaliek fāzē no tinumā inducētā EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad papildstrāvai  $\Delta I_2$  ir pretējs virziens, leņķis  $\varphi_1$  palielinās un jaudas koeficients samazinās.

Vispārīgā gadījumā, kad vienlaikus maina  $E_p$  skaitlisko vērtību un fāzi, mainās dzinēja rotācijas frekvence un jaudas koeficients.

Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinējos, tāpat kā vienfāzes dzinējos, komutējamās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas transformācijas EDS, kas pasliktina komutācijas apstākļus. Šis apstākļis jāmin kā viens no šo dzinēju trūkumiem.

Visplašāk izmanto virknes ierosmes vienfāzes kolektordzinējus. Šo dzinēju uzbūve un slēguma shēma ir līdzīga līdzstrāvas dzinējiem (8.9. att.). Atšķirība ir tā, ka maiņstrāvas kolektordzinējiem statora serde ir šīhtēta, lai samazinātu virpuļstrāvu zudumus, ko rada mainīgs lauks. Bez 8.9. attēlā parādītā ierosmes tinuma, dzinējā var būt arī papildpoli un kompensācijas tinums.

Tā kā kolektordzinēja ierosmes tinums slēgts virknē ar enkuru, tad enkura strāva  $i_a$  ir vienāda ar ierosmes strāvu,

kas rada mašīnas galveno magnētisko plūsmu  $\Phi$ . Sakarā ar zudumiem serdē, plūsma  $\Phi$  atpaliek fāzē no strāvas  $i_a$  par leņķi  $\alpha$ . Ja pieņem, ka minētie lielumi mainās sinusoidāli, to momentānās vērtības ir šādas:

$$i_a = \sqrt{2} I_a \sin \omega t, \quad (8.11.)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha). \quad (8.12.)$$

Tā kā vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja darbības princips ir līdzīgs līdzstrāvas dzinēja darbības principam, elektromagnētiskā griezes momenta noteikšanai var izmantot izteiksmi (2.29.), ievietojot tajā enkura strāvas un plūsmas momentānās vērtības no formulām (8.11.) un (8.12.):

$$\begin{aligned} M &= c_m i_a \Phi = c_m I_a \Phi_m \sin \omega t \sin(\omega t - \alpha) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} c_m I_a \Phi_m [\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)]. \end{aligned} \quad (8.13.)$$

Enkura strāvas un magnētiskās plūsmas virziens mainās gandrīz vienlaikus, jo leņķis  $\alpha$  ir mazs. Tāpēc moments darbojas pārsvarā vienā virzienā, bet pulsē ar divkārtšu frekvenci (8.10. att.). Dzinēja rotācijas frekvenci nosaka momenta vidēja vērtība  $M_{\text{vid}}$ , ko var noteikt pēc formulas:

$$M_{\text{vid}} = \frac{\sqrt{2}}{2} c_m I_a \Phi_m \cos \alpha. \quad (8.14.)$$

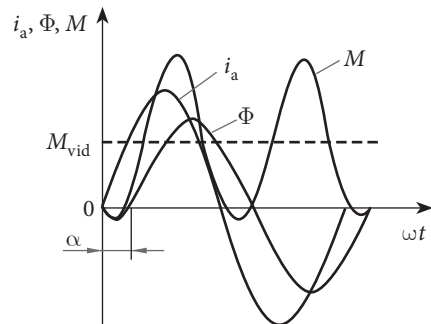
Virtnes ierosmes kolektordzinējos leņķis  $\alpha$  ir mazs un momenta vidējo vērtību praktiski neietekmē. Turpretī, ja ierosmes tinumu slēdz paralēli enkuram, enkura strāvas un plūsmas fāžu nobīde ir daudz lielāka un moments jūtami samazinās. Tāpēc paralēlas ierosmes maiņstrāvas kolektordzinējus praktiski nelieto.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvu  $I$  var noteikt no spriegumu vienādojuma:

$$\dot{U} = \dot{E} + jIX + IR, \quad (8.15.)$$

kur  $\dot{E}$  – rotācijas EDS enkura tinumā;  
 $X, R$  – virknē slēgto enkura, ierosmes, kompensācijas un papildpolu tinumu induktīvā un aktīvā pretestība.

Vienādojumam (8.15.) atbilst dzinēja vektoru diagramma, kas parādīta 8.11. attēlā. Acīmredzams, ka induktīvā pretestība  $X$  izraisa fāžu nobīdi starp strāvu  $I$  un spriegumu  $U$ , parasti  $\cos \varphi = 0,7-0,95$ . Turklāt, jo lielāka dzinēja rotācijas frekvence, jo lielāks jaudas koeficients.



8.10. att. Virtnes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvas, plūsmas un griezes momenta izmaiņu grafiki.



Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja un līdzstrāvas virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlieknes ir līdzīgas, t. i., palielinot slodzi, rotācijas frekvence strauji samazinās. Arī rotācijas frekvenci maiņstrāvas kolektordzinējiem var regulēt, tāpat kā līdzstrāvas virknes ierosmes dzinējiem (sk. 2.7. apakšnodaļu).

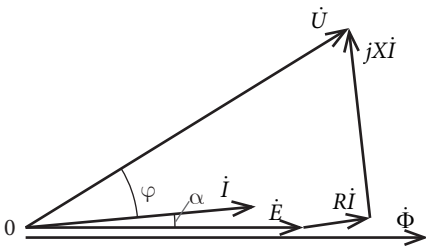
Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem komutācijas apstākļi ir sliktāki nekā līdzstrāvas dzinējiem, jo komutācijas procesa laikā išslēgtajās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas vēl arī transformācijas EDS. Reaktīvais EDS ir proporcionāls dzinēja rotācijas frekvencei un plūsmai (strāvai  $I$ ), transformācijas EDS strāvai  $I$  un šīs strāvas frekvencei un nav atkarīgs no dzinēja rotācijas frekvences. Šis EDS nobīdīts fāzē attiecībā pret plūsmu par  $90^\circ$ .

Mazjaudas virknes ierosmes kolektordzinējus izveido bez papildpoliem. To komutācijas apstākļu uzlabošanai var izmantot suku nobīdi no ģeometriskās neitrāles pret enkura rotācijas virzienu. Lielas jaudas dzinējus izgatavo ar papildpoliem un kompensācijas tinumu uz statora. Visus dzinēja tinumus slēdz virknē (sk. 8.12. att.).

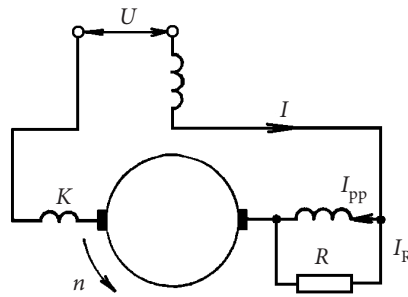
Rotācijas EDS un transformācijas EDS savā starpā nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ , turklāt transformācijas EDS nav atkarīgs no dzinēja rotācijas frekvences. Šie apstākļi apgrūtinā transformācijas EDS kompensāciju ar papildpolu palīdzību. Šuntējot papildpolu tinumu ar aktīvu pretestību  $R$  (8.12. att.) var panākt pilnīgu transformācijas EDS kompensāciju noteiktai rotācijas frekvencei. Šajā gadījumā (sk. 8.12. un 8.13. att.)

$$\dot{I} = \dot{I}_{pp} + \dot{I}_R \quad (8.16.)$$

Tā kā papildpolu tinuma induktīvā pretestība ir daudz lielāka nekā aktīvā pretestība, tad strāvas  $I_{pp}$  un  $I_R$  nobīdītas fāzē gandrīz par  $90^\circ$ , un strāva  $I_{pp}$  atpaliek fāzē no strāvas  $I$ . Strāvu  $I_{pp}$  var sadalīt divās komponentēs  $I_p$  un  $I_{tr}$  (8.13. att.). Komponente  $I_p$  sakrīt fāzē ar strāvu  $I$ , bet komponente  $I_{tr}$  atpaliek fāzē no strāvas  $I$  par  $90^\circ$ . Šo strāvas komponentu radītās plūsmas komutējamās sekcijās inducē attiecīgos EDS, kas vērsti preti rotācijas un transformācijas elektrodzinējspēkiem. Tādējādi, attiecīgi izvēloties papildpolu tinuma vijumu skaitu un pretestības  $R$  lielumu, var panākt pieņemamus komutācijas apstākļus dzinējam, kas darbojas ar noteiktu rotācijas frekvenci  $n$ . Tomēr, mainoties rotācijas



8.11. att. Virknes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja vektoru diagramma.



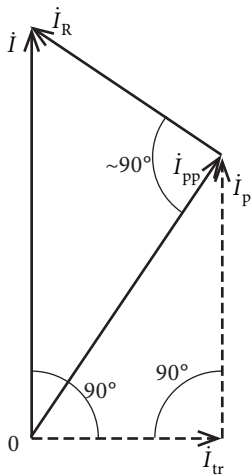
8.12. att. Virknes ierosmes vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja shēma ar kompensācijas tinumu un papildpoliem.

frekvencei, mainās arī komutācijas apstākļi. Kopumā maiņstrāvas kolektormašīnās komutācijas kvalitāte ir zemāka nekā līdzstrāvas kolektormašīnās.

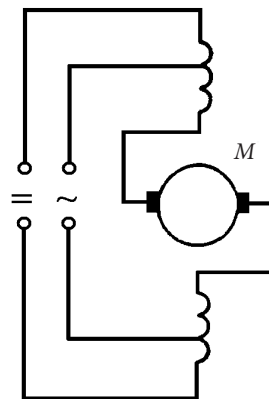
Mazjaudas virknes ierosmes kolektordzinējus samērā plaši lieto elektroinstrumentu, kā arī mājsaimniecības ierīču piedziņai. Viena no maiņstrāvas kolektordzinēju priekšrocībām salīdzinājumā ar vienfāzes asinhronajiem dzinējiem ir iespēja, barojot tos no 50 Hz frekvences tīkla, iegūt rotācijas frekvenci, kas lielāka par  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Turklāt vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem ir arī lielāks palaišanas moments un mazāka palaišanas strāva, tie mazāk jutīgi pret pārslodzēm.

Nelielas jaudas vienfāzes kolektordzinējus dažkārt izgatavo darbam no līdzstrāvas un maiņstrāvas avota. Šādus dzinējus sauc par universāliem kolektordzinējiem. Tā kā dzinēja tinumu pretestība maiņstrāvai ir lielāka nekā līdzstrāvai, tad ierosmes tinumam paredz papildu izvadus (8.14. att.). Darbinot dzinēju ar līdzstrāvu, ieslēdz visu ierosmes tinumu, bet, darbinot ar maiņstrāvu, tikai tinuma daļu. Tādējādi panāk, ka dzinēja griezes moments praktiski nav atkarīgs no barošanas tīkla strāvas veida.

Pie vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem var pieskaitīt arī tā sauktos repulsijas dzinējus. Šajos dzinējos enkura tinums nav elektriski savienots ar statora tinumu un barošanas tīklu. Sukas saslēgtas īsi, un enerģija šajā gadījumā rotoram tiek nodota tikai transformācijas ceļā caur magnētisko lauku. Dzinēja rotācijas frekvences regulēšana notiek, pārbīdot sukas uz kolektora, bet palaišana – tieši pieslēdzot tīkla spriegumam.



8.13. att. Virknes ierosmes vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvu vektoru diagramma.



8.14 att. Universālā kolektordzinēja shēma.

# 8. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI UN MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

## 8.1. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI

### 8.1.1. Divenkuru pārveidotāji

Elektroenerģijas pārveidošanai bez transformatoriem, jonu, elektroniskajiem un pusvadītāju pārveidotājiem izmanto arī rotējošās elektriskās mašīnas. Ar elektromašīnu pārveidotāju var pārveidot frekvenci, spriegumu un fāžu skaitu.

Viens no parastākajiem elektromašīnu pārveidotājiem ir divu mašīnu agregāts, kurā dzinējs mehāniski savienots ar ģeneratoru, bet elektriski tie nav saistīti. Ja mehāniski sajūdz kopā divas maiņstrāvas mašīnas, tad var pārveidot maiņstrāvas frekvenci, spriegumu un fāžu skaitu. Pārveidojot maiņstrāvu līdzstrāvā vai otrādi, asinhrono vai sinhrono mašīnu sajūdz kopā ar līdzstrāvas mašīnu. Ir sastopami agregāti, kuros abas mašīnas izvietotas vienā korpusā, bet rotoru uz vienas vārpstas.

Pārveidojot lielākas jaudas maiņstrāvu līdzstrāvā, kā dzinēju ieteicams ņemt sinhrono mašīnu, jo to var darbināt ar lielāku jaudas koeficientu. Kā līdzstrāvas mašīnu parasti lieto paralēlas ierosmes ģeneratoru.

Dzinēja-ģeneratora priekšrocība salīdzinājumā ar citiem elektromašīnu pārveidotājiem ir iespēja plašās robežās vienmērīgi regulēt spriegumu, kā arī iespēja izmantot sērījveidā ražotās mašīnas. Kā trūkums jāmin šādu pārveidotāju pazeminātais lietderības koeficients, kas ir vienāds ar divu mašīnu lietderības koeficientu reizinājumu, lielas izmaksas un lieli gabarīti.

### 8.1.2. Līdzstrāvas vienkura pārveidotāji

Elektrisko mašīnu ar vienu enkuru, kurā ir viens vai divi tinumi, sauc par vienkura pārveidotāju. Visplašāk izplatīti ir vienkura pārveidotāji ar vienu tinumu. Vienkura pārveidotāju strāva tiek pārveidota tieši bez elektriskās enerģijas pārvēršanas mehāniskajā, kā tas ir dzinējos-ģeneratoros.

Līdzstrāvas vienkura pārveidotājs (8.1. att.) līdzstrāvu līdzstrāvā pārveido ar diviem neatkarīgiem tinumiem (pozīcija 1 un 2 8.1. attēlā), kuri pievienoti katrs savam kolektoram. Tā uzdevums ir pārveidot viena sprieguma līdzstrāvu cita sprieguma līdzstrāvā.

No kolektora  $K_1$  puses pārveidotāju pievieno līdzstrāvas tīklam un tas darbojas kā dzinējs, bet no kolektora  $K_2$  puses – kā ģenerators.

EDS pārveidošanas koeficients šajā mašīnā vienāds ar virknē saslēgto vijumu attiecību abos tinumos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{pN_1}{600_2} \Phi n}{\frac{pN_2}{600_2} \Phi n} = \frac{N_1 a_2}{N_2 a_1}, \quad (8.1.)$$

kur  $N_1$  un  $N_2$  – aktīvo vadu skaits tinumos;  
 $a_1$  un  $a_2$  – paralēlo zaru skaits tinumos.

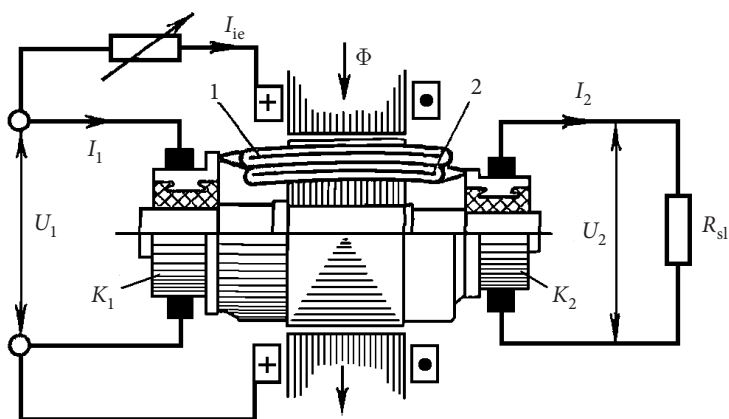
Dzinēja un ģenerators tinuma radīto momentu starpība nav liela, jo to nosaka tikai mašīnas mehāniskie un magnētiskie zudumi.

Abu enkura tinumu magnetizējošie spēki praktiski līdzsvaro viens otru. Šis apstākļi ļauj samazināt gaisa spraugu, tādējādi veidot vieglāku ierosmes tinumu un samazināt arī zudumus tajā.

Vienlaikus komutējot sekcijas, kas atrodas vienā rievā, savstarpējās indukcijas EDS samazina sekciju reaktīvo EDS un uzlabo komutācijas apstākļus.

Kā pārveidotāja trūkums jāmin tas, ka nav iespējams neatkarīgi regulēt ģenerators tinuma spriegumu, jo, mainot ierosmes strāvu, piemēram, to palielinot, samazinās enkura rotācijas frekvence un EDS praktiski nemainās.

Līdzstrāvas vienkura pārveidotājus bieži izmanto 12–24 V sprieguma pārveidošanai 750–1500 V spriegumā.



8.1. att. Līdzstrāvas vienkura pārveidotāja shēma: 1, 2 – neatkarīgi tinumi.

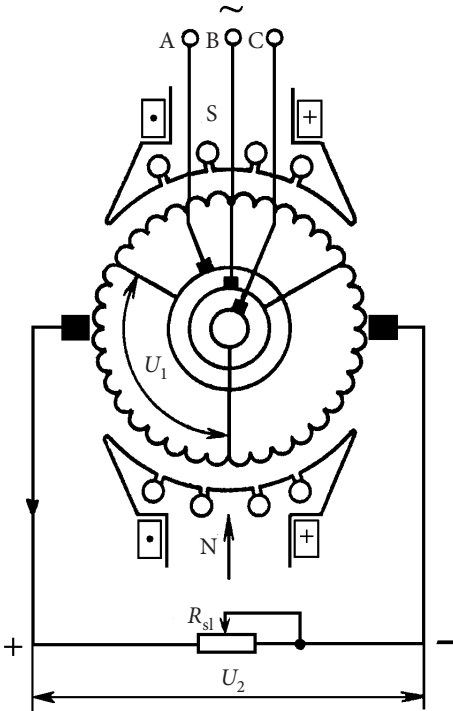
### 8.1.3. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienenkura pārveidotāji

Vienenkura pārveidotājs pēc uzbūves ir līdzīgs līdzstrāvas mašīnai, tikai ar to atšķirību, ka tā enkura tinums ir pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem (8.2. att.). Kontaktgredzenus caur transformatoru bieži pievieno maiņstrāvas tīklam. Visbiežāk lieto trīsfāžu un sešfāžu pārveidotājus.

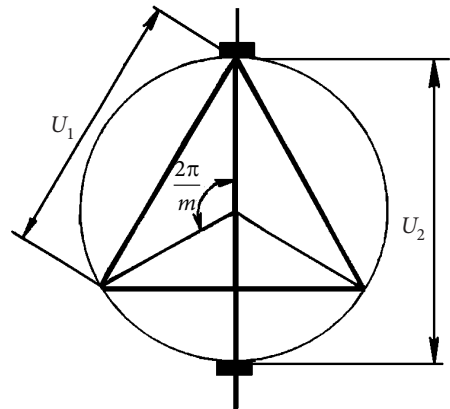
Gadījumos, kad pārveidotāju lieto maiņsprieguma pārveidošanai līdzspriegumā, tad no kontaktgredzenu puses tas darbojas kā sinhronais dzinējs, bet no kolektora puses – kā līdzstrāvas ģenerators. Pārveidojot līdzspriegumu maiņspriegumā, mašīna no kolektora puses darbojas kā līdzstrāvas dzinējs, bet no kontaktgredzenu puses – kā sinhronais ģenerators.

Vienfāzes vienenkura pārveidotājā inducētais EDS  $E_1$  attiecas pret līdzspriegumu  $E_2$  kā  $1 : \sqrt{2}$ . Vairākfāžu vienenkura pārveidotājā ar to pašu enkura tinumu inducētā līdzsprieguma vērtība nemainās, bet maiņsprieguma amplitūdas vērtība ir vienlīdzīga aploces hordai, kas atbilst leņķim  $2\pi/m$ , kur  $m$  – fāžu skaits (8.3. att.). Tātad maiņsprieguma maksimālā vērtība ir:

$$E_{1m} = E_2 \sin \frac{\pi}{m}, \quad (8.2.)$$



8.2. att. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienenkura pārveidotāja uzbūves princips.



8.3. att. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienenkura pārveidotāja diagramma.

bet tā efektīvā vērtība:

$$E_{1m} = \frac{E_2}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m}. \quad (8.3.)$$

Vienfāzes vienkura pārveidotājam šī izteiksme derīga, ja pieņem  $m = 2$ .

Tādējādi pārveidotāja transformācijas koeficients

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} \quad (8.4.)$$

nav atkarīgs no tinuma parametriem, bet tikai no fāžu skaita  $m$ . Tabulā 8.1. dotas vienkura pārveidotāja transformācijas koeficienta  $K$  vērtības atkarībā no fāžu skaita.

8.1. tabula

Vienkura pārveidotāja transformācijas koeficienta vērtības atkarībā no fāžu skaita

$m$	Vienfāzes	Daudzfāžu			
	2	3	4	6	12
$K$	0,707	0,612	0,5	0,354	0,185

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var palaist no līdzsprieguma puses, pievadot tam enerģiju no kāda līdzstrāvas avota un pēc tam sinhronizējot ar maiņsprieguma tīklu. Biežāk lieto pārveidotāja asinhrono palaišanu no maiņsprieguma puses, tāpat kā sinhronajam dzinējam. Asinhronajai palaišanai paredzēts polu uzgaļos ievietotais palaišanas tinums.

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var izveidot arī ar diviem neatkarīgiem enkura tinumiem, lai bez papildu transformatora standarta spriegumus varētu izmantot abās pusēs. Pārveidotājus var izmantot arī par divu veidu strāvas – maiņstrāvas un līdzstrāvas – ģeneratoru, ja tā enkuru griež ar kādu primāro dzinēju.

Pēdējā laikā vienkura pārveidotāju vietā aizvien plašāk izmanto vienkāršākus un ekonomiskākus pusvadītāju pārveidotājus.

## 8.2. MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

### 8.2.1. Trīsfāžu kolektormašīnas

Plaši izplatītajiem trīsfāžu asinhronajiem dzinējiem (sk. 5. nodaļu) piemīt virkne priekšrocību: vienkārša konstrukcija, augsta drošuma pakāpe un neliela cena. Tanī pat laikā asinhronajiem dzinējiem ir arī būtiski trūkumi: tie patērē reaktīvo jaudu un pazemina tīkla jaudas koeficientu; tiem ir problēmas ekonomiskā rotācijas frekvences regulēšanā. Minētie trūkumi stimulēja tādu maiņstrāvas kolektormašīnu izstrādi, kuras

nodrošina laidenu rotācijas frekvences regulēšanu un jaudas koeficienta palielināšanu.

Mainstrāvas kolektormašīnas izmanto rūpniecībā un transportā. Tomēr šo mašīnu lietošana nav plaši izplatīta sakarā ar komutācijas problēmām, to sarežģīto uzbūvi un augstajām izmaksām.

Trīsfāžu maiņstrāvas kolektordzinējs būtībā ir asinhronais dzinējs, kura sekundārajā ķēdē caur kolektoru tiek ievadīts papildu EDS  $E_p$ .

Aplūkosim papildu EDS  $E_p$  ietekmi uz asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru darbību. Papildu EDS var ievadīt sekundārajā ķēdē caur kontaktgredzeniem, turklāt šī EDS frekvencei vienmēr jābūt vienādai ar slīdes frekvenci  $f_2 = s f_1$ .

8.4. attēlā a parādīta asinhronā dzinēja vektoru diagramma, ja  $E_p = 0$ . Strāva dzinēja sekundārajā ķēdē

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} \quad (8.5)$$

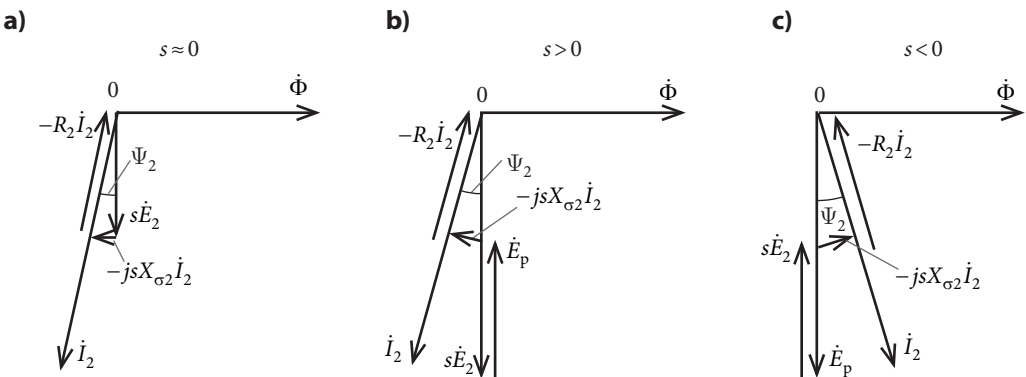
nodrošina atbilstoši slodzei vajadzīgo elektromagnētisko griezes momentu  $M$ .

Ievadot sekundārajā ķēdē papildu EDS  $E_p$ , kas vērsts pretī slīdes EDS  $E_{2s}$ , strāva rotora tinumā

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s} - \dot{E}_p}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 - \dot{E}_p}{R_2 + jsX_{\sigma 2}} \quad (8.6)$$

pirmajā mirklī samazināsies. Tāpēc samazināsies arī griezes moments, dzinējs sāks bremsēties, bet slīde  $s$  pieaugs. Saskaņā ar izteiksmi (8.6.) strāva  $I_2$  un moments  $M$  atkal pieaugs līdz brīdim, kad iestāsies līdzsvars ar slodzes momentu. Dzinējs šajā gadījumā darbosies ar palielinātu slīdi un mazāku rotācijas frekvenci. Šim gadījumam atbilstošā vektoru diagramma parādīta 8.4. attēlā b.

Pieņemsim, ka ievadītā papildu EDS  $E_p$  virziens salīdzinājumā ar iepriekš aplūkoto ir mainījies uz pretējo un sakrīt fāzē ar EDS  $sE_2$ . Tad izteiksmes (8.6.) vietā iegūsim:



8.4. att. Asinhronā dzinēja sekundārās ķēdes vektoru diagrammas ar dažādiem papildu EDS  $E_p$ : a)  $E_p = 0$ ; b)  $E_p \neq 0$  (samazinot rotācijas frekvenci) un c)  $E_p \neq 0$  (palielinot rotācijas frekvenci).

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s} + \dot{E}_p}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2 + \dot{E}_p}{R_2 + jsX_{\sigma 2}}. \quad (8.7)$$

Pirmajā mirklī pēc  $E_p$  ievadīšanas strāva  $I_2$  un moments  $M$  pieaugs, dzinējs sāks griezties ātrāk, bet slīde  $s$  samazināsies. Ja  $E_p$  lielums ir pietiekams, slīde  $s$  samazināsies līdz nullei un, ja  $E_p$  radītā strāva  $I_2$  joprojām būs pārāk liela slodzes momenta radīšanai, dzinēja rotācijas frekvence turpinās pieaugt, pārsniedzot arī sinhrono rotācijas frekvenci. Slīde  $s$  un EDS  $E_{2s}$  šajā gadījumā maina zīmi un turpina augt pēc absolūtās vērtības līdz brīdim, kad strāva  $I_2$  saskaņā ar (8.7.) nenokritīs līdz vajadzīgajai vērtībai. Ja  $s < 0$ , leņķis

$$\psi_2 = \arctg \frac{sX_{\sigma 2}}{R_2}$$

ir negatīvs (8.4. att. c).

Tādējādi, izmainot papildu EDS  $E_p$  vērtību un virzienu, var īstenot dzinēja laidenu rotācijas frekvences regulēšanu gan zem, gan virs sinhronās rotācijas frekvences.

Ja neņem vērā zudumus, tad papildu EDS avota jauda ir vienāda ar slīdes jaudu  $sP_{em}$ , turklāt, ja  $s > 0$ , šis avots patērē jaudu no sekundārās ķēdes, bet ja  $s < 0$ , atdod jaudu dzinēja sekundārajā ķēdē.

Mehāniskā jauda, ko attīsta dzinējs,

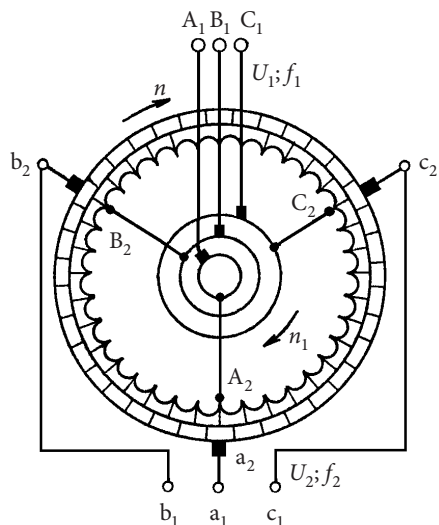
$$P_{meh} = (1 - s)P_{em} \quad (8.8.)$$

gadījumā, ja  $s > 0$ , ir mazāka par elektromagnētisko jaudu  $P_{em}$ , bet gadījumā, ja  $s < 0$ , tās zīme mainās un  $P_{meh} > P_{em}$ .

Jāatzīmē, ka sekundārajā tinumā ievadāmā papildu EDS frekvencei jābūt vienādai ar  $f_2 = sf_1$ . Trīsfāžu maiņstrāvas kolektormašīnās šādai frekvenču pārveidošanai parasti kalpo kolektors.

Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma parādīta 8.5. attēlā. Rotors ir izveidots tāpat kā līdzstrāvas mašīnas enkurs, tikai ar to atšķirību, ka tinums pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem punktos  $A_2, B_2, C_2$ . Šie punkti savukārt ar suku palīdzību pievienoti trīsfāžu maiņstrāvas tīklam. Punktos  $a_2, b_2, c_2$  kolektors savienots ar sukām, kuras savstarpēji nobīdītas par  $120^\circ$ . Kolektorpārveidotāja statorā (attēlā stators nav parādīts) nav tinumu un tas veic tikai magnētva funkcijas.

Aplūkosim vispirms gadījumu, kad rotors ir nekustīgs ( $n = 0$ ) un suku  $a_2, b_2, c_2$  ir novietotas pret tinuma punktiem  $A_2, B_2, C_2$ , kā tas parādīts 8.5. attēlā.



8.5. att. Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma.





attiecībā pret nekustīgajām sukām griežas ar rotācijas frekvenci  $n_2 = n_1 - n$ . Tādējādi spriegums  $U_2$  mainās ar frekvenci

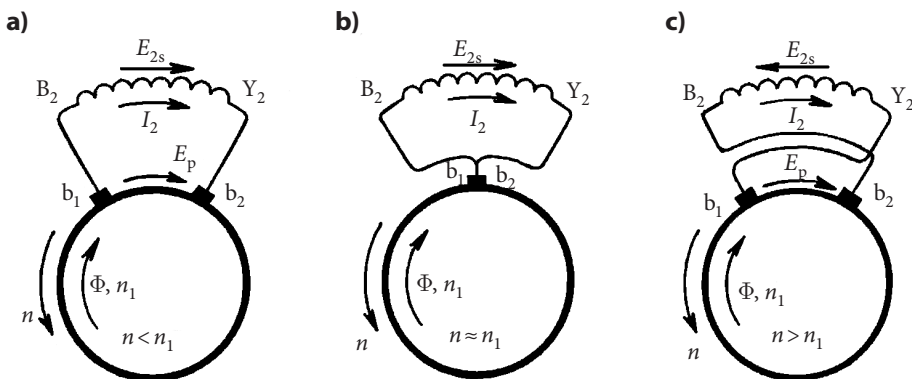
$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 \pm n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 \pm n}{n_1} = f_1 s. \quad (8.10.)$$

Sprieguma  $U_2$  skaitliskā vērtība nav atkarīga no rotora rotācijas frekvences un no suku stāvokļa. Mainot suku stāvokli, var izmainīt sprieguma  $U_2$  fāzi attiecībā pret  $U_1$  un, mainot rotora rotācijas frekvenci, var izmainīt  $U_2$  frekvenci. Teiktais pierāda, ka frekvences kolektorpārveidotāju var izmantot kā papildu EDS avotu asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanai.

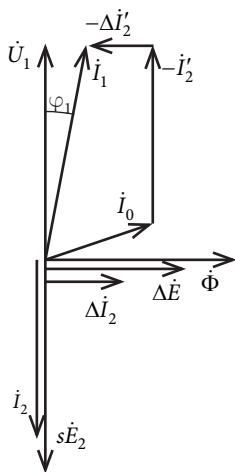
Plašāku lietojumu rod paralēla slēguma maiņstrāvas kolektordzinējs ar rotora barošanu (Šrāge-Rihtera dzinējs). Šajā dzinējā (8.6. att.) trīsfāžu primārais tinums 1 novietots rotorā un caur kontaktgredzeniem pieslēgts tīklam (spaiļes  $A_1, B_1, C_1$ ) sk. att., bet sekundārā tinuma 2 fāzes novietotas statorā. Par papildu EDS avotu kalpo papildu tinums, kas ir analogs līdzstrāvas mašīnas enkura tinumam un ir novietots kopējās rievās ar primāro tinumu 1 (8.6. attēlā papildu tinums nav parādīts). Ar suku  $a_1-a_2, b_1-b_2$  un  $c_1-c_2$  palīdzību papildu tinums tiek savienots ar sekundāro tinumu 2.

Primārā tinuma magnetizēšanas strāva rada magnētisko plūsmu  $\Phi$ , kas rotē attiecībā pret rotoru ar rotācijas frekvenci  $n_1 = 60f_1/p$ , inducējot primārajā un papildu tinumā EDS ar frekvenci  $f_1$ , bet sekundārajā tinumā ar frekvenci  $f_2 = sf_1$ . Papildu EDS  $E_p$  ir proporcionāls attālumam starp vienas fāzes sukām, piemēram,  $b_1-b_2$ . Strāva  $I_2$  sekundārajā tinumā 2 plūst ar frekvenci  $f_2$ , bet papildu tinumā ar frekvenci  $f_1$ . Frekvences pārveidošanu veic kolektors.

Statora tinumam pievadītā papildu EDS  $E_p$  lielumu var mainīt, regulējot attālumu starp šī tinuma vienas fāzes sukām (8.7. att.). Jo lielāks ir šis attālums, jo lielāks papildu EDS tiek pievadīts statora tinumam. Ja sukas atrodas uz vienas kolektora plāksnītes (8.7. att. b), tad  $E_p = 0$ . Visas trīs statora tinuma fāzes šajā gadījumā ir išslēgtas, un mašīnas darbība ir līdzīga parastā asinhronā dzinēja darbībai ar išslēgtu sekundāro tinumu. Ja katras fāzes sukas pārbīda no tinuma simetrijas ass uz abām pusēm par vienādu



8.7. att. Papildu EDS  $E_p$  atkarība no suku stāvokļa: a)  $E_p < 0$ ; b)  $E_p = 0$ ; c)  $E_p > 0$ .



8.8. att. Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinēja vektoru diagramma.

Tas nozīmē, ka dzinēja rotācijas frekvence nemainās, bet mainās primārā strāva, kas iegūst papildu komponenti  $\Delta I'_2$ . Līdz ar to samazinās leņķis  $\varphi_1$  un uzlabojas dzinēja jaudas koeficients (sk. 8.8. attēlu).

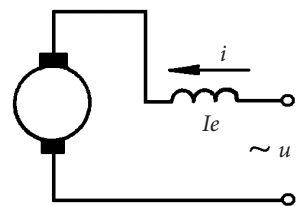
Var atzīmēt, ka tad, ja  $E_p$  pārsniedz noteiktu vērtību, primārā strāva  $I_1$  var apsteigt fāzē spriegumu  $U_1$ . Šādos apstākļos kolektordzinējs atdod tīklā reaktīvo jaudu un darbojas kā kompensators, t. i., līdzīgi pārierosinātai sinhronajai mašīnai.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas atpaliek fāzē no tinumā inducētā EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad papildstrāvai  $\Delta I_2$  ir pretējs virziens, leņķis  $\varphi_1$  palielinās un jaudas koeficients samazinās.

Vispārīgā gadījumā, kad vienlaikus maina  $E_p$  skaitlisko vērtību un fāzi, mainās dzinēja rotācijas frekvence un jaudas koeficients.

Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinējos, tāpat kā vienfāzes dzinējos, komutējamās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas transformācijas EDS, kas pasliktina komutācijas apstākļus. Šis apstākļis jāmin kā viens no šo dzinēju trūkumiem.

## 8.2.2. Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji



8.9. att. Virknes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja shēma.

attālumu (8.7. att. a), tad papildu EDS  $E_p$  sekundārā tinuma ķēdē darbojas preti šajā tinumā inducētajam EDS  $sE_2$ . Ja sukcas attiecībā pret statora tinuma fāžu asīm pārbīda pretējos virzienos (8.7. att. c), tad mainās  $E_p$  virziens, kas tagad sakrīt ar sekundārajā tinumā inducētā EDS virzienu.

Dzinējam ar fiksētu suku stāvokli mehāniskās raksturliķnes ir līdzīgas parastā asinhronā dzinēja mehāniskajām raksturliķnēm.

Noskaidrosim, kā, pievadot sekundārajam tinumam papildu EDS, var regulēt trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinēja jaudas koeficientu  $\cos\varphi$ .

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas apsteidz tinumā inducēto EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad šajā tinumā rodas papildstrāva  $\Delta I_2$  (8.8. att.), kas tāpat apsteidz EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$  un tāpēc nerada nekādu papildu griezes momentu.

Tas nozīmē, ka dzinēja rotācijas frekvence nemainās, bet

mainās primārā strāva, kas iegūst papildu komponenti  $\Delta I'_2$ . Līdz ar to samazinās leņķis  $\varphi_1$  un uzlabojas dzinēja jaudas koeficients (sk. 8.8. attēlu).

Var atzīmēt, ka tad, ja  $E_p$  pārsniedz noteiktu vērtību, primārā strāva  $I_1$  var apsteigt fāzē spriegumu  $U_1$ . Šādos apstākļos kolektordzinējs atdod tīklā reaktīvo jaudu un darbojas kā kompensators, t. i., līdzīgi pārierosinātai sinhronajai mašīnai.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS  $E_p$ , kas atpaliek fāzē no tinumā inducētā EDS  $sE_2$  par  $90^\circ$ , tad papildstrāvai  $\Delta I_2$  ir pretējs virziens, leņķis  $\varphi_1$  palielinās un jaudas koeficients samazinās.

Vispārīgā gadījumā, kad vienlaikus maina  $E_p$  skaitlisko vērtību un fāzi, mainās dzinēja rotācijas frekvence un jaudas koeficients.

Trīsfasu maiņstrāvas kolektordzinējos, tāpat kā vienfāzes dzinējos, komutējamās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas transformācijas EDS, kas pasliktina komutācijas apstākļus. Šis apstākļis jāmin kā viens no šo dzinēju trūkumiem.

Visplašāk izmanto virknes ierosmes vienfāzes kolektordzinējus. Šo dzinēju uzbūve un slēguma shēma ir līdzīga līdzstrāvas dzinējiem (8.9. att.). Atšķirība ir tā, ka maiņstrāvas kolektordzinējiem statora serde ir šīhtēta, lai samazinātu virpuļstrāvu zudumus, ko rada mainīgs lauks. Bez 8.9. attēlā parādītā ierosmes tinuma, dzinējā var būt arī papildpoli un kompensācijas tinums.

Tā kā kolektordzinēja ierosmes tinums slēgts virknē ar enkuru, tad enkura strāva  $i_a$  ir vienāda ar ierosmes strāvu,

kas rada mašīnas galveno magnētisko plūsmu  $\Phi$ . Sakarā ar zudumiem serdē, plūsma  $\Phi$  atpaliek fāzē no strāvas  $i_a$  par leņķi  $\alpha$ . Ja pieņem, ka minētie lielumi mainās sinusoidāli, to momentānās vērtības ir šādas:

$$i_a = \sqrt{2} I_a \sin \omega t, \quad (8.11.)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha). \quad (8.12.)$$

Tā kā vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja darbības princips ir līdzīgs līdzstrāvas dzinēja darbības principam, elektromagnētiskā griezes momenta noteikšanai var izmantot izteiksmi (2.29.), ievietojot tajā enkura strāvas un plūsmas momentānās vērtības no formulām (8.11.) un (8.12.):

$$\begin{aligned} M &= c_m i_a \Phi = c_m I_a \Phi_m \sin \omega t \sin(\omega t - \alpha) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} c_m I_a \Phi_m [\cos \alpha - \cos(2\omega t - \alpha)]. \end{aligned} \quad (8.13.)$$

Enkura strāvas un magnētiskās plūsmas virziens mainās gandrīz vienlaikus, jo leņķis  $\alpha$  ir mazs. Tāpēc moments darbojas pārsvarā vienā virzienā, bet pulsē ar divkārtšu frekvenci (8.10. att.). Dzinēja rotācijas frekvenci nosaka momenta vidēja vērtība  $M_{\text{vid}}$ , ko var noteikt pēc formulas:

$$M_{\text{vid}} = \frac{\sqrt{2}}{2} c_m I_a \Phi_m \cos \alpha. \quad (8.14.)$$

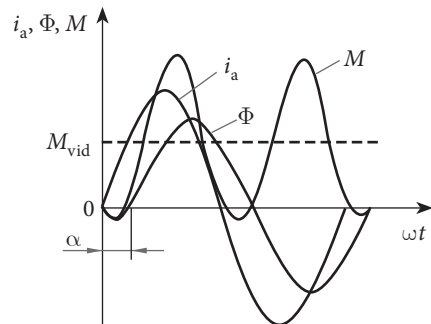
Virtnes ierosmes kolektordzinējos leņķis  $\alpha$  ir mazs un momenta vidējo vērtību praktiski neietekmē. Turpretī, ja ierosmes tinumu slēdz paralēli enkuram, enkura strāvas un plūsmas fāžu nobīde ir daudz lielāka un moments jūtami samazinās. Tāpēc paralēlas ierosmes maiņstrāvas kolektordzinējus praktiski nelieto.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvu  $I$  var noteikt no spriegumu vienādojuma:

$$\dot{U} = \dot{E} + jIX + IR, \quad (8.15.)$$

kur  $\dot{E}$  – rotācijas EDS enkura tinumā;  
 $X, R$  – virknē slēgto enkura, ierosmes, kompensācijas un papildpolu tinumu induktīvā un aktīvā pretestība.

Vienādojumam (8.15.) atbilst dzinēja vektoru diagramma, kas parādīta 8.11. attēlā. Acīmredzams, ka induktīvā pretestība  $X$  izraisa fāžu nobīdi starp strāvu  $I$  un spriegumu  $U$ , parasti  $\cos \varphi = 0,7-0,95$ . Turklāt, jo lielāka dzinēja rotācijas frekvence, jo lielāks jaudas koeficients.



8.10. att. Virtnes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvas, plūsmas un griezes momenta izmaiņu grafiki.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja un līdzstrāvas virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlieknes ir līdzīgas, t. i., palielinot slodzi, rotācijas frekvence strauji samazinās. Arī rotācijas frekvenci maiņstrāvas kolektordzinējiem var regulēt, tāpat kā līdzstrāvas virknes ierosmes dzinējiem (sk. 2.7. apakšnodaļu).

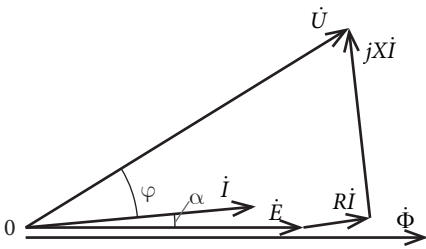
Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem komutācijas apstākļi ir sliktāki nekā līdzstrāvas dzinējiem, jo komutācijas procesa laikā išslēgtajās sekcijās bez reaktīvā EDS inducējas vēl arī transformācijas EDS. Reaktīvais EDS ir proporcionāls dzinēja rotācijas frekvencei un plūsmai (strāvai  $I$ ), transformācijas EDS strāvai  $I$  un šīs strāvas frekvencei un nav atkarīgs no dzinēja rotācijas frekvences. Šis EDS nobīdīts fāzē attiecībā pret plūsmu par  $90^\circ$ .

Mazjaudas virknes ierosmes kolektordzinējus izveido bez papildpoliem. To komutācijas apstākļu uzlabošanai var izmantot suku nobīdi no ģeometriskās neitrāles pret enkura rotācijas virzienu. Lielas jaudas dzinējus izgatavo ar papildpoliem un kompensācijas tinumu uz statora. Visus dzinēja tinumus slēdz virknē (sk. 8.12. att.).

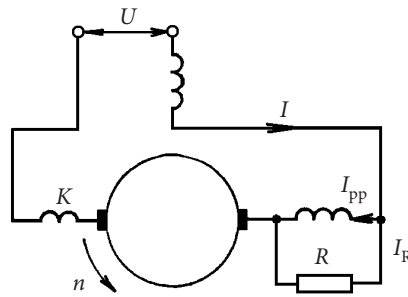
Rotācijas EDS un transformācijas EDS savā starpā nobīdīti fāzē par  $90^\circ$ , turklāt transformācijas EDS nav atkarīgs no dzinēja rotācijas frekvences. Šie apstākļi apgrūtina transformācijas EDS kompensāciju ar papildpolu palīdzību. Šuntējot papildpolu tinumu ar aktīvu pretestību  $R$  (8.12. att.) var panākt pilnīgu transformācijas EDS kompensāciju noteiktai rotācijas frekvencei. Šajā gadījumā (sk. 8.12. un 8.13. att.)

$$\dot{I} = \dot{I}_{pp} + \dot{I}_R \quad (8.16.)$$

Tā kā papildpolu tinuma induktīvā pretestība ir daudz lielāka nekā aktīvā pretestība, tad strāvas  $I_{pp}$  un  $I_R$  nobīdītas fāzē gandrīz par  $90^\circ$ , un strāva  $I_{pp}$  atpaliek fāzē no strāvas  $I$ . Strāvu  $I_{pp}$  var sadalīt divās komponentēs  $I_p$  un  $I_{tr}$  (8.13. att.). Komponente  $I_p$  sakrīt fāzē ar strāvu  $I$ , bet komponente  $I_{tr}$  atpaliek fāzē no strāvas  $I$  par  $90^\circ$ . Šo strāvas komponentu radītās plūsmas komutējamās sekcijās inducē attiecīgos EDS, kas vērsti preti rotācijas un transformācijas elektrodzinējspēkiem. Tādējādi, attiecīgi izvēloties papildpolu tinuma vijumu skaitu un pretestības  $R$  lielumu, var panākt pieņemamus komutācijas apstākļus dzinējam, kas darbojas ar noteiktu rotācijas frekvenci  $n$ . Tomēr, mainoties rotācijas



8.11. att. Virknes ierosmes maiņstrāvas kolektordzinēja vektoru diagramma.



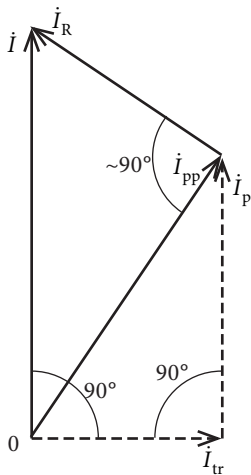
8.12. att. Virknes ierosmes vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja shēma ar kompensācijas tinumu un papildpoliem.

frekvencei, mainās arī komutācijas apstākļi. Kopumā maiņstrāvas kolektormašīnās komutācijas kvalitāte ir zemāka nekā līdzstrāvas kolektormašīnās.

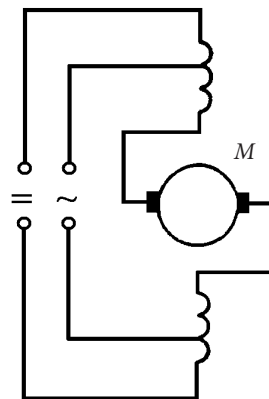
Mazjaudas virknes ierosmes kolektordzinējus samērā plaši lieto elektroinstrumentu, kā arī māsaimniecības ierīču piedziņai. Viena no maiņstrāvas kolektordzinēju priekšrocībām salīdzinājumā ar vienfāzes asinhronajiem dzinējiem ir iespēja, barojot tos no 50 Hz frekvences tīkla, iegūt rotācijas frekvenci, kas lielāka par  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Turklāt vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem ir arī lielāks palaišanas moments un mazāka palaišanas strāva, tie mazāk jutīgi pret pārslodzēm.

Nelielas jaudas vienfāzes kolektordzinējus dažkārt izgatavo darbam no līdzstrāvas un maiņstrāvas avota. Šādus dzinējus sauc par universāliem kolektordzinējiem. Tā kā dzinēja tinumu pretestība maiņstrāvai ir lielāka nekā līdzstrāvai, tad ierosmes tinumam paredz papildu izvadus (8.14. att.). Darbinot dzinēju ar līdzstrāvu, ieslēdz visu ierosmes tinumu, bet, darbinot ar maiņstrāvu, tikai tinuma daļu. Tādējādi panāk, ka dzinēja griezes moments praktiski nav atkarīgs no barošanas tīkla strāvas veida.

Pie vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem var pieskaitīt arī tā sauktos repulsijas dzinējus. Šajos dzinējos enkura tinums nav elektriski savienots ar statora tinumu un barošanas tīklu. Sukas saslēgtas īsi, un enerģija šajā gadījumā rotoram tiek nodota tikai transformācijas ceļā caur magnētisko lauku. Dzinēja rotācijas frekvences regulēšana notiek, pārbīdot sukas uz kolektora, bet palaišana – tieši pieslēdzot tīkla spriegumam.



8.13. att. Virknes ierosmes vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja strāvu vektoru diagramma.



8.14. att. Universālā kolektordzinēja shēma.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Arnold – la Cour. Gleichstrommaschine. Erster Band Theorie und Untersuchung. Berlin: J.Springer, 1919. – 732 s.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – 3-е изд. перераб. и дополн. – Л.:Энергия, 1972 – 1973. – 544, 648 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. 3-е изд. перераб. и дополн. – Л.:Энергия, 1978. – 832 с.
4. Иванов – Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2006. – 608 с.
6. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. – М., С. – П.:Питер, 2007. – 320 с.
7. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – М., С. – П.:Питер, 2007. – 352 с.
8. Austin Huges. Electric Motors and Drives. – Oxford, Newness, 1999. – 726 p.
9. Ramshaw R., R.G. van Heeswijk. Energy Conversion Electric Motors and Generators. – Saunders College Publishing, 1990. – 633 p.
10. John Hindmarsh, Alasdair Renfrew. Electrical Machines and Drive Systems. Third edition. – Oxford, Newness, 2002. – 369 p.
11. Richard Crowder. Electrical Drives and Electromechanical Systems. Elsevier, 2006. – 292 p.
12. Joe Kaiser. Electrical Power. Motors, Controls, Generators, Transformers. Publisher The Goodheart – Willcox Company, Inc., 1998. – 331 p.
13. Ribickis L. Elektriskās mašīnas un elektriskā piedziņa XIX gadsimtā. – R.: RTU izdevniecība, 2008. – 200 lpp.
14. Zviedris A. Elektriskās mašīnas. – R.: Zvaigzne, 1984. – 367 lpp.
15. Ranka G. Elektriskās mašīnas. – R.: VAS Latvijas dzelzceļš, 1996. – 248 lpp.
16. Dirba J. Sinhrono mašīnu speciālie režīmi. – R.: RTU izdevniecība, 1997. – 70 lpp.
17. Dirba J., Ketners K., Levins N., Pugačevs V. Transporta elektriskās mašīnas. – R.: Jumava, 2002. – 345 lpp.
18. Dirba J., Ketnere E., Ketners K. Enerģētisko sistēmu transformatori. – R.: RTU izdevniecība, 2004. – 296 lpp.
19. Dirba J., Meļko A., Vītolīņa S. Pārspriegumi elektrotehniskajās iekārtās. – R.: RTU izdevniecība, 2008. – 199 lpp.
20. Dirba J., Levins N., Pugačevs V. Vēja enerģijas elektromehāniskie pārveidotāji. – R.: RTU izdevniecība, 2006. – 309 lpp.
21. Кацман М.М. Электрические машины. 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2000. – 463 с.
22. Кацман М.М. Электрические машины приборных устройств и средств автоматизации. – М.: Academia, 2006. – 367 с.
23. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 364 с. 368 с.
24. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
25. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 1994. – 318 с.
26. Проектирование электрических машин / Под редакцией Копылова И.П. – М.:Энергия, 1980. – 496 с.
27. Справочник по электрическим машинам / Под редакцией Копылова И. и Клокова Б. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 619 с.
28. Гончарук А. Расчет и конструирование трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
29. Handbuch Für Electriche Maschinen. Leipzig: Fachbuchverlag, 1955. – 516 s.
30. Котеленец Н., Акимова Н., Антонов М. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин. – М.:Академия, 2003. – 385 с.
31. Dirba J., Ketners K. Elektrisko mašīnu ekspluatācija, remonts un pārbaude. – R.: RTU izdevniecība, 1995. – 101 lpp.
32. Elektroenerģētikas pamatterminu skaidrojošā vārdnīca, 2. sējums / Darba vadītājs Timmermanis K. Redaktors Zviedris A. – R.: Jumava, 1999. – 463 lpp.
33. Elektroenerģētikas pamatterminu skaidrojošā vārdnīca, 4. sējums / Darba vadītājs Timmermanis K. Redaktors Zviedris A. – R.: Jumava, 2006. – 794 lpp.