**Profesionālās izglītības kompetences centrs**

**Rīgas Valsts tehnikums**

**„Elektriskās mašīnas”**

**Lekciju konspekts**

**Vladimirs Meļņikovs**

|  |
| --- |
| **es_zils_dzeltens_ar_parakstu_2ESF**        **IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ** |

**Rīga**

**2012**

**PRIEKŠVĀRDS**

Lekciju konspekts „Elektriskās mašīnas” paredzēts Profesionālās Izglītības kompetences centra Rīgas Valsts tehnikuma Enerģētikas un elektrotehnikas specialitātes izglītojamiem. Lekciju konspekta saturs atbilst disciplīnu mācību programmai „Enerģētika un elektrotehnika”.

Lekciju konspektā ietverti visi svarīgākie programmas jautājumi, aplūkotas metodes elektriskās mašīnas uzdevumu risināšanai.

Nepārtraukti aug vajadzība pēc kvalificētu elektrotehniķu kadriem. Bez dziļām zināšanām elektrisko mašīnu laukā nav iespējams produktīvi darboties daudzās ar enerģētiku un elektrotehniku saistītajās profesijās.

Lekciju konspektu sastādīja Dr.Ph. V. Meļņikovs un elektroinženieris V.Ozoliņš.

232 lapaspuses, 191 ilustrācijas, 20 bibliogrāfiskie nosaukumi.

**IEVADS**

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

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

Lekciju konspekts sastāv no ievada un piecām nodaļām: elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un nozīme; līdzstrāvas mašīnas; transformatori; asinhronās mašīnas un sinhronās mašīnas. Šajās nodaļās aplūkoti attiecīgo mašīnu uzbūve, īpatnības, darba režīmi, raksturlīknes, zudumi un speciālās nozīmes elektriskās mašīnas. Lekciju konspekta saturs atbilst Profesionālās Izglītības kompetences centra Rīgas Valsts tehnikuma mācību programmai „Elektriskās mašīnas, piedziņa, vadība”.

**SATURS**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Priekšvārds | | | | | 2 |
| Ievads | | | | | 3 |
| Saturs | | | | | 4 |
| 1. | Elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un nozīme | | | | 8 |
|  | 1.1. | Elektrisko mašīnu klasifikācija | | | 8 |
|  | 1.2 | Līdzstrāvas mašīnu jaudas zudumi un lietderības koeficients | | | 10 |
|  |  | 1.2.1. | Elektrisko mašīnu dzesēšana un ventilācija | | 12 |
|  |  | 1.2.2. | Transformatoru dzesēšana | | 14 |
|  |  | 1.2.3. | Elektrisko mašīnu silšana | | 15 |
|  |  |  | 1.2.3.1. | Silšanas pamatvienādojums | 15 |
|  |  |  | 1.2.3.2. | Silšanas un atdzišanas raksturlīknes. | 16 |
|  |  |  | 1.2.3.3. | Pieļaujamā temperatūra | 18 |
|  |  |  | 1.2.3.4. | Izolācijas materiālu siltumizturība | 19 |
|  | 1.3. | Elektrisko mašīnu darba režīmi | | | 19 |
| 2. | Līdzstrāvas mašīnas | | | | 27 |
|  | 2.1. | Līdzstrāvas mašīnu darbības princips un uzbūve | | | 27 |
|  | 2.2. | Līdzstrāvas mašīnas enkura tinums | | | 36 |
|  | 2.3. | Enkura reakcija | | | 39 |
|  | 2.4. | Enkura reakcijas ietekme uz mašīnas darbību | | | 41 |
|  | 2.5. | Enkura reakcijas darbības vājināšana | | | 43 |
|  | 2.6. | Komutācija | | | 44 |
|  |  | 2.6.1. | Suku dzirksteļošana | | 44 |
|  |  | 2.6.2. | Komutācijas procesa būtība | | 46 |
|  |  | 2.6.3. | Komutācijas uzlabošanas paņēmieni | | 47 |
|  | 2.7. | Līdzstrāvas mašīnu klasifikācija pēc ierosmes veida | | | 53 |
|  | 2.8. | Līdzstrāvas mašīnas EDS un elektromagnētiskais moments | | | 54 |
|  |  | 2.8.1. | Līdzstrāvas mašīnas elektrodzinējspēks | | 54 |
|  |  | 2.8.2. | Līdzstrāvas mašīnas elektromagnētiskais moments | | 56 |
|  | 2.9. | Līdzstrāvas ģenerators | | | 57 |
|  |  | 2.9.1. | Līdzstrāvas neatkarīgās ierosmes (svešierosmes) ģenerators | | 57 |
|  |  | 2.9.2. | Līdzstrāvas paralēlās ierosmes (pašierosmes) ģenerators | | 62 |
|  |  | 2.9.3. | Līdzstrāvas virknes ierosmes ģenerators | | 68 |
|  |  | 2.9.4. | Līdzstrāvas jauktās ierosmes ģenerators | | 69 |
|  | 2.10. | Līdzstrāvas dzinējs | | | 72 |
|  |  | 2.10.1. | Vispārīgi norādījumi | | 72 |
|  |  | 2.10.2. | Dzinēja momentu vienādojums | | 74 |
|  |  | 2.10.3. | Dzinēja rotācijas frekvence | | 75 |
|  |  | 2.10.4. | Dzinēja palaišana | | 77 |
|  |  | 2.10.5. | Paralēlās ierosmes dzinējs | | 78 |
|  |  | 2.10.6. | Paralēlas ierosmes dzinēja vienādojumi | | 84 |
|  |  | 2.10.7. | Virknes ierosmes dzinējs | | 88 |
|  |  | 2.10.8. | Jauktās ierosmes dzinējs | | 91 |
|  |  | 2.10.9. | Līdzstrāvas dzinēju darba raksturlīknes | | 93 |
|  |  | 2.10.10. | Līdzstrāvas dzinēju elektriskā bremzēšana | | 97 |
|  |  | 2.10.11. | Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas | | 99 |
| 3. | Transformatori | | | | 104 |
|  | 3.1. | Transformatoru nozīme | | | 104 |
|  | 3.2. | Transformatoru uzdevums. Pamatdefinīcijas | | | 105 |
|  | 3.3. | Transformatoru nominālie lielumi | | | 106 |
|  | 3.4. | Vienfāzes transformatora darbības princips | | | 108 |
|  | 3.5. | Transformatora tukšgaita | | | 115 |
|  | 3.6. | Trīsfāžu transformatori | | | 117 |
|  | 3.7. | Tinumu savienojumu grupas | | | 119 |
|  | 3.8. | Trīsfāžu transformatora transformācijas koeficients | | | 122 |
|  | 3.9. | Transformatoru paralēlā darbība | | | 127 |
|  | 3.10. | Slogota transformatora sprieguma izmaiņa | | | 131 |
|  | 3.11. | Vienfāzes un trīsfāžu transformatoru uzbūves pamatelementi | | | 132 |
|  | 3.12. | Sprieguma regulēšana | | | 137 |
|  | 3.13. | Sprieguma regulēšana slodzes režīmā | | | 140 |
|  | 3.14. | Autotransformators | | | 144 |
|  | 3.15. | Transformatori taisngriežu ierīču barošanai | | | 145 |
|  | 3.16. | Magnētiskie pastiprinātāji | | | 146 |
|  | 3.17. | Līdzstrāvas un līdzsprieguma transformatori | | | 150 |
|  | 3.18. | Mērtransformatori | | | 151 |
| 4. | Asinhronās mašīnas | | | | 153 |
|  | 4.1. | Maiņstrāvu mašīnu pamati | | | 153 |
|  | 4.2. | Asinhrono mašīnu uzbūve | | | 154 |
|  | 4.3. | Rotējošais magnētiskais lauks | | | 158 |
|  | 4.4. | Rotora slīde | | | 162 |
|  | 4.5. | Asinhronā dzinēja enerģētiskā bilance un lietderības koeficients | | | 164 |
|  | 4.6. | Asinhrono dzinēju EDS | | | 167 |
|  | 4.7. | Rotora strāva | | | 168 |
|  | 4.8. | Asinhronā dzinēja griezes moments | | | 170 |
|  | 4.9. | Asinhrono dzinēju darba raksturlīknes | | | 174 |
|  | 4.10. | Asinhrono dzinēju jaudas koeficients | | | 175 |
|  | 4.11. | Īsslēgto asinhrono dzinēju palaišana, reversēšana un regulēšana | | | 177 |
|  | 4.12. | Asinhrono dzinēju darbība no vienfāzes tīkla | | | 185 |
| 5. | Sinhronās mašīnas | | | | 190 |
|  | 5.1. | Sinhronās mašīnas uzbūve | | | 190 |
|  | 5.2. | Sinhrono mašīnu ierosmes tinuma barošana | | | 194 |
|  | 5.3. | Sinhronā ģeneratora tukšgaita | | | 195 |
|  | 5.4. | Enkura reakcija | | | 197 |
|  | 5.5. | Sinhronā ģeneratora ārējās raksturlīknes | | | 200 |
|  | 5.6. | Sinhronā ģeneratora regulēšanas raksturlīknes | | | 201 |
|  | 5.7. | Sinhronās mašīnas lietderības koeficients un zudumi | | | 203 |
|  | 5.8. | Sinhronā dzinēja darbības princips | | | 205 |
|  | 5.9. | Sinhrono dzinēju īpatnības | | | 208 |
|  | 5.10. | Sinhronā dzinēja darba raksturlīknes | | | 209 |
|  | 5.11. | Sinhronais kompensators | | | 210 |
|  | 5.12. | Slodzes raksturlīkne | | | 210 |
|  | 5.13. | Sinhrono dzinēju palaišana | | | 211 |
|  | 5.14. | Speciālas nozīmes sinhronās mašīnas | | | 214 |
|  |  | 5.14.1. | Sinhronās mašīnas ar pastāvīgiem magnētiem | | 214 |
|  |  | 5.14.2. | Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliem | | 217 |
|  |  | 5.14.3. | Induktormašīnas | | 218 |
|  |  | 5.14.4. | Ventiļdzinēji | | 222 |
|  |  | 5.14.5. | Sinhronie reaktīvie dzinēji | | 225 |
|  |  | 5.14.6. | Histerēzes dzinēji | | 226 |
|  |  | 5.14.7. | Soļu dzinēji | | 229 |
| Literatūras saraksts | | | | | 231 |
|  |  |  |  | |  |
|  |  |  |  | |  |

**1. ELEKTRISKO MAŠĪNU VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS UN NOZĪME**

Elektriskās mašīnas ir ierīces, kas paredzētas mehāniskās ener­ģijas pārveidošanai elektroenerģijā vai elektroenerģijas pārveidoša­nai mehāniskajā, vai arī atsevišķu elektroenerģijas parametru pārveidošanai.

* 1. **ELEKTRISKO MAŠĪNU KLSIFIKĀCIJA**

Elektriskas mašīnas iedala kolektormašīnās un mašīnās bez kolektora (1.1. att.), kuras atšķiras ne vien pēc darbības principa, bet arī konstruktīvi.

Kolektormašīnas galvenokārt lieto darbam līdzstrāvas ķēdēs. Tikai nelielas jaudas kolektormašīnas izgatavo universālas, kuras var darbināt gan līdzstrāvas, gan arī maiņstrāvas ķēdēs.

Mašīnas (bez kolektora) iedala sinhronajās un asinhronajās, un tās var būt gan daudzfāžu, gan arī vienfāzes mašīnas.

Elektriskās mašīnas, kas mehānisko enerģiju pārveido elektro­enerģijā, sauc par elektromašīnu ***ģeneratoriem.***Tos darbina tvaika turbīnas, gāzturbīnas vai hidroturbīnas, iekšdedzes un cita veida primārie dzinēji.

Elektriskās mašīnas, kas elektroenerģiju pārveido mehāniskajā, sauc par ***elektrodzinējiem***jeb *elektromotoriem.* Tie darbina dažādus ražošanas mehānismus, elektrificēto transportu un citas iekārtas.

|  |
| --- |
|  |

1.1. att. Elektrisko mašīnu klasifikācija pēc to darbības principa.

Elektriskās mašīnas izmanto arī strāvas veida, sprie­guma, frekvences un citu parametru pārveidošanai. Šādas mašīnas sauc par *elektromašīnu pārveidotājiem.* Pie tām pieskaita arī ***trans­formatorus.***Transformators ir statisks elektromagnētisks aparāts, un tam nav elektriskajām mašīnām raksturīgo rotējošo daļu. Tomēr elektromagnētiskie procesi un konstrukcijas pamatelementi transfor­matoriem un rotējošām elektriskajām mašīnām ir daudzējādā ziņā līdzīgi, tāpēc tos parasti aplūko kopā.

Atkarībā no elektriskās mašīnas galvenajā (darba) tinumā plūs­tošās strāvas veida izšķir *maiņstrāvas* un *līdzstrāvas mašīnas.*

Maiņstrāvas mašīnas atkarībā no magnētiskā lauka un rotora rotā­cijas frekvences iedala *sinhronajās* un *asinhronajās mašīnās.* Sinhro­najās mašīnās minētās frekvences ir vienādas, bet asinhronajās mašīnās dažādas.

Pēc fāzu skaita izšķir vienfāzes un daudzfāzu maiņstrāvas mašīnas, no kurām visbiežāk lieto trīsfāzu mašīnas.

Līdzstrāvas mašīnu raksturīga daļa ir kolektors, kas līdzstrāvas ģeneratoros maiņspriegumu pārveido līdzspriegumā, bet līdzstrāvas dzinējos — otrādi. Retāk lieto *maiņstrāvas kolektormašīnas,* kuras ir dārgākas un ekspluatācijā mazāk drošas nekā bezkolektora maiņstrāvas mašīnas.

Atkarībā no jaudas elektriskās mašīnas nosacīti var iedalīt šādas grupās:

līdz 0,5 kW — mikromašīnas,

0,5 ... 20 kW — mazjaudas,

20 ... 250 kW — vidējas jaudas

virs 250 kW — lieljaudas mašī­nas.

Atkarībā no rotācijas frekvences mašīnas var iedalīt šādi:

līdz 300 min-1 — lēngaitas,

300 ...1500 min-1 — vidēja ātruma,

virs 1500 min-1 — ātrgaitas mašīnas.

Jebkuras elektriskās mašīnas galvenās sastāvdaļas ir *stators* un *rotors* (1.2. att.), kuri viens no otra atdalīti ar gaisa spraugu. Enerģijas pārveidošana elektriskajās mašīnās notiek ar magnētiskā lauka starpniecību, kura pastiprināšanai statorā un rotorā izmanto *magnētiska materiāla serdes.* Lai ierobežotu virpuļstrāvas, mainīgu magnē­tisko lauku gadījumā serdes saliek no savstarpēji izolētiem elektrotehniskā tē­rauda skārdiem. Statorā iekšējā un rotora ārējā virsmā izveidotās rievās ievietoti *tinumi.*

Enerģijas pārveidošana elektriskajās mašīnās ir saistīta ar enerģijas zudu­miem. Tiem pārvēršoties siltumā, pa­augstinās elektriskās mašīnas atsevišķu daļu temperatūra. Visjutīgākie silšanas ziņa ir izolācijas materiāli, un tāpēc tieši no izolācijas siltumizturības ir at­karīgs mašīnas pieļaujamais sasilums. Enerģijas zudumi palielinās, pieaugot mašīnas slodzei. Tāpēc no pieļaujamā sasiluma savukārt ir atkarīga mašīnas pieļaujamā slogošanas jauda, pie tam maiņstrāvas mašīnām tā ir pilnā jauda. To lietderīgo jaudu, kurai aprēķināta elektriskā mašīna, sauc par *nominālo jaudu.* Arī pārējos lielumus (spriegumu, strāvu, rotācijas frekvenci, lietderības koeficientu, frekvenci u. c.), kuri raksturo mašīnas darbību ar nomi­nālo jaudu, sauc par nominālajiem. Šos lielumus reglamentē Valsts standarts, un tie uzrādīti pie mašīnas piestiprinātā uzrakstu plāk­snītē— tehniskajā pasē. Elektrisko mašīnu nominālie spriegumi Valsts standartā saskaņoti ar elektrisko tīklu nominālajiem spriegumiem, pie tam elektrodzinēju un transformatoru primārie spriegumi ir vie­nādi ar standartspriegumiem, bet ģeneratoru un transformatoru se­kundārie spriegumi ir par 5-10% lielāki.

|  |
| --- |
| 1.2. att. Elektriskās mašī­nas uzbūves shēma: 1 — stators, 2 — rotors, 3— gultņi, 4 — vārpsta, 5 — gaisa sprauga, 6 — gultņu vairogi, 7 — korpuss. |

**1.2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU JAUDAS ZUDUMI UN**

**LIETDERĪBAS KOEFICIENTS**

Pārveidojot mehānisko enerģiju elektriskajā (ģenerators) un elek­trisko - mehāniskajā (dzinējs), rodas jaudas zudumi, kuri rada elek­triskās mašīnas sasilšanu. Uzskatāmi tas ir redzams enerģētiskajās dia­grammās (1.3. att.).

Elektriskajai mašīnai **pievadītā jauda:**

P1 = P2 + ΔP.

Ģeneratoram pievada mehānisko jaudu P1 = M1·Ω (M1 - primārā dzinēja griezes moments, Ω - enkura leņķiskais ātrums), dzinējam - elektrisko P1 = U·I, ΔP - kopējie zudumi līdzstrāvas mašīnā.

Lietderīgā jauda: ģeneratoram tā ir elektriskā jauda P2 = U·I dzinējam – mehāniskā P2 = M2·Ω (M2 - lietderīgais moments). Mašīnas tehniskajā pasē tā ir norādīta kā nominālā jauda PN.

Kopējie zudumi līdzstrāvas mašīnā

ΔP = ΔPmg + ΔPel + ΔPs + ΔPmeh + ΔPpap.

Magnētiskie zudumi ΔPmgrodas enkura serdes pārmagnetizēšanas rezultātā ar frekvenci f = p·n/60, enkuram griežoties polu magnētiskajā laukā ar ātrumu n, kā arī no virpuļstrāvām. Tos aprēķina, izmantojot empīrisku formulu:



kur *kp* - koeficients, kas ievēro tehnoloģiskus faktorus;

*p* - īpatnējie zudumi (ja f = 50 Hz un B = 1,0 T);

G - tērauda masa.

|  |
| --- |
| **a** |
| **b** |

1.3. att. Līdzstrāvas ģeneratora (a) un dzinēja (b) enerģētiskas diagrammas.

Magnētiskos zudumus var uzskatīt par nemainīgajiem zudumiem, kuri nav atkarīgi no slodzes.

Elektriskie zudumi tinumos:

,

kur *Ie* - enkura strāva;

 - enkura ķēdes pretestība;

*Iie* - ierosmes strāva;

*Rie* - ierosmes ķēdes pretestība.

Tos sauc arī par mainīgajiem zudumiem, jo tie ir atkarīgi no slodzes. Tā kā tinuma pretestība ir atkarīga no temperatūras, tad elektriskie zudumi tinumos jāaprēķina atbilstoši tinuma darba temperatūrai, kuru pieņem 750C vai 1150C atkarība no izolācijas klases.

Elektriskie zudumi suku kontaktos:

Δ*Ps* = Δ*Us·Ie*,

kur Δ*Us* - sprieguma kritums suku kontaktos ar enkuru (ogles-grafīta sukām pieņem ΔUs = 1 V, metāla-grafīta sukām Δ*Us* = 0,3 V).

Mehāniskos zudumus ΔPmehrada berze gultņos, suku un kolektora berze, enkura berze gaisā, kā arī ventilācijas zudumi. Mašīnas ar jaudu līdz 100 kW mehāniskie zudumi ir 2…4 % no nominālas jaudas.

*Papildzudumus* ΔPpaprada magnētiskās plūsmas pulsācijas poluuzgaļos un tās kropļojums enkura reakcijas darbības rezultātā, komutācijas un izlīdzinošās strāvas u.c. To aprēķins ir sarežģīts, un tāpēc pieņem, ka

Δ*Ppap* = 0,01·*PN*.

Lietderības koeficients:



kur - kopējie zudumi mašīnā.

Tā vērtība ir atkarīga no slodzes un jaudas zudumu ΔPmgun ΔPel attiecības. Lietderības koeficienta maksimālā vērtība ir tad, kad ΔPmg= ΔPel. Tālāk slodzei pieaugot, lietderības koeficients samazināssakarā ar to, ka strauji pieaug elektriskie zudumi ΔPel (1.4. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 1.4. att. Lietderības koeficienta  atkarība no slodzes |

**1.2.1. Elektrisko mašīnu dzesēšana un ventilācija**

Atkarībā no tā, kā mašīnas izdalītais siltums tiek aizvadīts apkārtējā vidē, izšķir dabisko un mākslīgo dzesēšanu. Dabiskā dzesēšana nav efektīva, un to lieto tikai mazas jaudas mašīnās. Šajā gadījumā gaisma plūsma nodrošina tikai mašīnas rotējošās daļas.

Mašīnu dzesējot mākslīgi, gaisa plūsmu nodrošina speciālas ierīces. Elektriskā mašīna var būt ar pašventilāciju un neatkarīgu ventilāciju. Pasventilācijas gadījumā uz mašīnas vārpstas uzmontēts ventilators, kurš rada gaisa plūsmu. Slēgta tipa elektriskajām mašīnām var būt ārējā pašventilācija (1.5. att. *a*), ventilatoru 1novietojot uz vārpstas ārpus mašīnas korpusa. Lai palielinātu siltumatdeves virsmu, korpusu parasti izveido ar ribām.

|  |  |
| --- | --- |
|  | *d)* |
|  | e) |
|  |

1.5. att. Elektrisko mašīnu dzesēšanas shēmas: arēja pašventilācija (*a*); iekšēja pašventilācija ar

ventilatoru (*b*); iekšējā pašventilācija ar ventilācijas kanāliem (c); neatkarīga vaļēja cikla ventilācija (*d*)un neatkarīga slēgta cikla ventilācija (*e*): 1 -ventilators; 2 - elektriskā mašīna; 3, 4- cauruļvadi; 5 - ventilatora dzinējs; 6 - dzesinātājs

Efektīvāka ir iekšējā pašventilācija, kad ventilators *1* novietots korpusa iekšpusē (1.5. att. *b*). Gaiss tiek pievadīts caur spraugām gultņu vairogā.

Vidējas un lielas jaudas mašīnās 2 (1.5. att. *d* un *e*)izmanto neatkarīgu ventilāciju, radot gaisa plūsmu ar speciālu ventilatoru, kuram ir savs dzinējs 5. Gaisu pievada pa cauruļvadu *4* un izvada pa cauruļvadu *3.*

Ventilācijas sistēma var būt vaļēja (1.5. att. *d*), ja sasilušais gaiss tiek izvadīts apkārtējā vidē, vai arī slēgta (1.5. att. *e*).

Pēdējā gadījumā ventilācijas sistēmā cirkulē gaiss vai ūdeņradis, kuri tiek dzesēti speciālā dzesinātāja *6.*

Intensīvāk mašīna tiek dzesēta, ja tās atsevišķās daļās, piemēram, rotorā un statorā, ir speciāli ventilācijas kanāli. Tie var būt izvietoti aksiāli,t.i., paralēli mašīnas asij (1.6. att. *a*), vai radiāli, t.i., per­pendikulāri mašīnas asij (1.5. att. *b*).

Slēgtā ventilācijas sistēmā efektīva ir dzesēšana ar ūdeņradi, lieto­jot to gaisa vietā. Tas ir desmit reizes vieglāks par gaisu, kā rezultātā ievērojami samazinās jaudas zudumi ventilācijas sistēmā. Mašīnas dzesēšana notiek intensīvāk, jo ūdeņraža siltumvadītspēja ir 6-7 reizes lielāka nekā gaisam. Dzesēšanu ar ūdeņradi var izmantot tikai slēgtā ventilācijas sistēmā. Elektriskā mašīna ir dārgāka, un tās ekspluatācijas izdevumi lielāki.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

1.6. att. Aksiāla *(a)* un radiālā *(b)* ventilācijas shēma: 1 - stators; 2 - rotors.

**1.2.2.** **Transformatoru dzesēšana**

Atšķirībā no elektriskajām mašīnām transformatoriem nav rotējošu daļu un tiem nevar būt dzesēšana ar pašventilāciju.

Galvenie transformatoru dzesēšanas veidi: dabiskā un mākslīgā.

Dabisko dzesēšanu ar gaisu lieto mazas jaudas transformatoros. Dzesēšana notiek, sasilušajām daļām izstarojot siltumu apkārtējā vidē. Šo procesu veicina gaisa konvekcija.

Lielākas jaudas transformatoros gaisa dzesēšana nenodrošina pietiekamu siltuma aizvadīšanu apkārtējā vidē. Tāpēc lieto dabisko dzesēšanu ar eļļu. Magnētvadu ar tinumiem novieto tvertnē ar speciālu transformatoru eļļu, kura no silstošajām daļām siltumu nova­da tvertnes sienām. Tālāk siltums tiek izstarots apkārtējā vidē. Lai palielinātu siltumizstarošanas virsmu, tvertnes ārējā siena var būt ar ribām vai ar piemetinātām caurulēm. Transformatoru eļļai ir augstas elektroizolācijas īpašības, kuras ekspluatācijas laikā pavājinās. Tāpēc darbības laikā jākontrolē transformatoru eļļas kvalitāte un pēc noteikta laika eļļa jānomaina.

Parasti transformatoros ar jaudu lielāku par 1000 kVA izmanto mākslīgo ellas dzesēšanu ar gaisa pūsmu. Transformatoram ir venti­latori ar elektrisko piedziņu, kuri appūš ar gaisu eļļas radiatorus. Eļļas pārvietošanās tvertnē notiek dabiskās konvekcijas ceļā.

Mākslīgās dzesēšanas ar piespiedcirkulāciju shēma parādīta 1.7. attēlā.

Transformatora tvertnē *1* eļļas cirkulāciju nodrošina eļļas sūknis 2, kurš to sūknē uz eļļas dzesētāju *3.*

Eļļas dzesēšanas sistēmā var būt arī gaisa atdalītājs *4* un eļļas filtrs 5.

|  |
| --- |
| 1.7. att. Transformatora dzesēšanas ar eļļas piespiedcirkulāciju shēma:  1-transformatora tvertne; 2 - eļļas sūknis; *3 -* eļļas dzesētājs; *4* - gaisa atdalītājs; 5 - eļļas filtrs. |

**1.2.3. Elektrisko mašīnu silšana**

***1.2.3.1. Silšanas pamatvienādojums.***

Elektriskās mašīnas darba procesā izdalītie jaudas zudumi paaugstina tās atsevišķo daļu temperatūru, kura nedrīkst pārsniegt attiecīgajai izolācijas klasei pieļaujamās vērtības. Siltuma daudzums, kas izdalās elektriskās mašīnas atsevišķās daļās, ir dažāds, un dažādi ir arī šo daļu dzesēšanas apstākļi. Jautājumu vienkāršojot, tomēr var pieņemt, ka mašīna ir homogēns ķermenis ar vienādu temperatūru un vienādiem dzēšanas apstākļiem visās vietās.

Pieņemsim, ka laika vienībā mašīnā izdalās siltuma daudzums *Q*. Tad bezgalīgi mazā laika sprīdī *dt* izdalītais siltums ir *Qdt*. Daļa šī siltuma daudzuma uzkrājas mašīnā un palielina tās virstemperatūru, bet otra daļa tiek aizvadīta apkārējā vidē. Ja laika sprīdī *dt* mašīnas virstemperatūra pieaug par *dθ*, tad siltuma daudzums, kas uzkrājas mašīnā šajā laika sprīdī, ir *mCdθ*, kur *m* – mašīnas masa un *C* – īpatnējā siltumietilpība. Ja aplūkojamā bezgalīgi mazā laika posmā mašīnas virstemperatūra ir *θ*, tad siltuma daudzums, kas aizvadīts apkārtējā vidē ir *Sλθdt*, kur *S* –dzesējošās virsmas laukums un *λ* – siltuma atdeves koeficients.

Saskaņa ar enerģijas nezūdamības likumu

*Qdt = mCdθ + Sλθdt* (1.1)

Pēc pietiekami ilga laika (teorētiski *t = ∞*) mašīnas virstemperatūra sasniedz nemainīgu stacionārā režīma vērtību *θ = θ∞* = const un tāpēc *dθ* = 0. Tad no vienādojuma (1.1) iegūstam

*Qdt = Sλ θ∞dt,*

no kurienes

 (1.2)

No iegūtās izteiksmes redzams, ka stacionārā režīmā virstemperatūra ir atkarīga no izdalītā siltuma daudzuma *Q* un siltuma atdeves apstākļiem (*S* un *λ*).

Izdalot vienādojuma (1.1) abas puses ar lielumu *Sλ* un ievērojot izteiksmi (1.2), iegūstam diferenciālvienādojumu

*θ∞dt = Tdθ + θdt,* (1.3)

kur *T = mC/Sλ*, vai, sadalot mainīgos,

 (1.4)

Lielumam *T* ir laika dimensija, un to sauc pa silšanas laika konstanti. Katrai elektriskajai mašīnai ir sava, no slodzes neatkarīga laika konstante, kura mazjaudas mašīnām ir 10…20 minūtes, bet lieljaudas mašīnām – vairākas stundas.

Integrējot diferenciālvienādojumu (1.4), iegūstam

 (1.5)

Integrēšanas konstanti *A* atrod, izmantojot sākuma noteikumus: ja *t* = 0, mašīnai ir noteikta sākuma virstemperatūra *θ = θ*0. Ievērojot šos noteikumus, no vienādojuma (1.5) var atrast, ka

*A =* ln(*θ∞* - *θ*0).

Ievietojot atrasto *A* vērtību izteiksmē (1.5) un izdarot pārveidojumus, iegūstam



no kurienes

 (1.6)

***1.2.3.2. Silšanas un atdzišanas raksturlīknes***.

Ja mašīnas sākuma virstemperatūra *θ*0 = 0, tad saskaņā ar izteiksmi (1.6)

 (1.7)

Tas nozīmē, ka mašīnas virstemperatūra pieaug eksponenciāli, kā parādīts 1.8. attēlā *a*. Silšanas procesa sākumā, kad virstemperatūra ir zema, siltuma atdeve apkārtējai videi praktiski nenotiek, un gandrīz viss izdalītais siltums uzkrājas mašīnā, strauji paaugstinot tās virstemperatūru. Pieaugot virstemperatūrai, palielinās arī siltuma atdeve, un mašīnas temperatūra paaugstinās lēnāk. Silšanas laika konstanti *T* grafiski var noteikt, velkot silšanas līknes sākuma punktā pieskari (1.8. att. *a*). Laika konstante *T* skaitliski ir vienāda ar laiku, kurā mašīna sasniegtu stacionāro virstemperatūras vērtību, ja nebūtu siltuma atdeves apkārtējai videi.

Ja mašīnu, kurai darbojoties virstemperatūra sasniegusi noteiktu vērtību, atslēdz no tīkla, to atdziest. Tad *θ*0 ≠ 0, *Q =* 0 un saskaņā ar izteiksmi (1.2) *θ∞* = 0, iegūstam mašīnas atdzišanas vienādojumu

 (1.8)

|  |  |
| --- | --- |
| *a* | *b* |

1.8. att. Elektriskās mašīnas silšanas (*a*) un atdzišanas (*b*) raksturlīknes.

Atdzišana laika konstante T mašīnām ar pašventilāciju ir divas trīs reizes lielāka par silšanas laika konstanti, jo mašīnai ar nekustīgu rotoru ir sliktāki dzesēšanas apstākļi.

Saskaņā ar izteiksmi (1.8) mašīnas virstemperatūra samazinās eksponenciāli, kā attēlots 1.8. attēlā *b*. Sākumā, kad virstemperatūra un siltuma atdeve ir lielāka atdzišana notiek strauji, bet pēc tam temperatūra samazinās lēnāk.

Stacionāru temperatūras režīmu (*θ = θ∞* vai *θ* = 0) mašīna teorētiski sasniedz bezgalīgi ilgā laikā. Tomēr praktiski var uzskatīt, ka silšanas vai atdzišanas process ir beidzies laika *t =* 4*T*, jo šajā laikā mašīna sasilst līdz *θ* = 0,982*θ∞* vai atdziest līdz *θ* = 0,018*θ*0.

Vispārīgā gadījumā, kad *θ*0 ≠ 0 un *θ∞* ≠ 0, mašīnas virstemperatūras izmaiņu raksturo izteiksme (1.6). Sakarības *θ = f*(*t*) grafiskais attēls šajā gadījumā ir līkne 3 (1.9. att.) kuru var iegūt, summējot līkņu 1 un 2 ordinātas, kas atbilst vienādojumiem (1.7) un (1.8).

Jāatzīmē, ka silšanas process elektriskajās mašīnās ir sarežģītāks par šeit aplūkoto, jo īstenība elektriskā mašīna nav homogēns ķermenis. Tā sastāv no atsevišķām daļām, kuras atdalītas ar izolāciju, pie tam izolācijai ir relatīvi zema siltumvadītspēja, un tāpēc mašīnas atsevišķām daļām ir dažāda virstemperatūra. Šo atsevišķo daļu virstemperatūru var noteikt precīzāk, ja elektrisko mašīnu aplūko kā vairāku tādu homogēnu ķermeņu, starp kuriem notiek siltumapmaiņa.

|  |
| --- |
|  |

1.9. att. Elektriskās mašīnas silšanas raksturlīkne, ja *θ*0 ≠ 0 un *θ∞* ≠ 0.

***1.2.3.3. Pieļaujamā temperatūra***.

Elektriskās mašīnas darba procesa izdalītie jaudas zudumi paaugstina tās atsevišķo daļu temperatūru, kura nedrīkst pārsniegt attiecīgajai izolācijas klasei pieļaujamās vērtības.

Silšanu normē, dodot vadītāju un elektroiekārtu strāvu vadošo daļu, kā galveno siltuma avotu ilgstoši pieļaujamo temperatūru *θpieļ*. Transformatoriem, kabeļiem un izolētiem vadiem *θpieļ* ierobežo izolācijas darbmūžs; kailvadiem, kopnēm un komutācijas aparātiem – kontaktu drošums.

Strāvu vadošās daļas temperatūra θ veidojas no apkārtējās vides temperatūras *θ*0 un virstemperatūras Θ (strāvu vadošās daļas un apkārtējās vides temperatūru starpība):

*θ = θ*0 + Θ. (1.9)

Tādēļ vadītājiem un elektroiekārtām bez ilgstoši pieļaujamās temperatūras *θpieļ* normē arī vides nominālo temperatūru *θ*0*N* un ilgstoši pieļaujamo virstemperatūru Θ*pieļ*.

Ilgstoši pieļaujamā virstemperatūra noteikta kā divu pārējo normēto temperatūru starpība:

Θ*pieļ* = *θpieļ* - *θ*0*N*. (1.10)

Elektriskajiem aparātiem un iekārtām izgavotājrūpnīcas dod nominālo strāvu, ko attiecīgais aparāts vai iekārta ilgstoši spēj izturēt nominālos apstākļos (nominālā apkārtējās vides temperatūra ar nominālo spriegumu un frekvenci). Elektriskās mašīnas nominālo strāvu nosaka, veicot eksperimentālā parauga silšanas pārbaudi nominālā režīma. Elektriskās mašīnas viskārstāko punktu temperatūra nedrīkst pārsniegt attiecīgās ilgstošo pieļaujamas vērtības.

***1.2.3.4. Izolācijas materiālu siltumizturība***.

Siltumizturību skaitliski raksturo ar maksimālo ilgstoši pieļaujamo darba temperatūru. Pēc siltumizturības izolācijas materiālus iedala septiņas klases:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Siltumizturības klase | Y | A | E | B | F | H | C |
| Pieļaujamā temperatūra, 0C | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

**1.3. ELEKTRISKO MAŠĪNU DARBA REŽĪMI**

Elektrisko mašīnu darba režīmi ekspluatācijas apstākļos ir ļoti dažādi. Mašīnas var strādāt ilgstoši ar pilno slodzi (piemēram, ģeneratori elektrostacijās, ventilatori, sūkņi un konveijeru dzinēji), īslaicīgi (piemēram, celtņu dzinēji) vai arī ar periodiski atkārtotu slodzi (piemēram, metālgriešanas darbmašīnu, transporta ierīču dzinēji). Izvēloties elektriskās mašīnas jaudu, jāievēro tas darbības īpatnības dažādos ekspluatācijas apstākļos.

Lai vienkāršotu elektriskās mašīnas jaudas izvēli, vadoties no silšanas, visus patērētājus un atbilstoši elektrisko mašīnu darba režīmus iedala 8 raksturīgos režīmos, kurus apzīmē S1-S8.

S1— ilgstošs darba režīms ar nemainīgu slodzi, kuras ilgums ir pietiekams aparāta termiskā līdzsvara sasniegšanai. Mašīnas darbības periods ir tik liels, ka mašīna sasniedz stacionāro virstemperatūru Θ *=* Θ∞ = const. Šajā režīmā mašīnas slodzes grafiks *P = f*1(*t*) un jaudas zudumu grafiks Δ*P* = *f*2(*t*) ir abscisu asij paralēla taisne. Mašīnas virstemperatūras izmaiņu tad attēlo silšanas līkne 1.10. attēlā.

1.11. attēlā parādītas elektriskās mašīnas silšanas līknes dažāda lieluma ilgstošām slodzēm. Ikviena atdotās jaudas vērtība (*P*3 < *P*2 = *PN* < *P*1) saistīta ar tai atbilstošu jaudas zudumu vērtību un tātad ar citu stacionāro virstemperatūru Θ∞.

Darbojoties ar jaudu *P*3 mašīna nav termiski apdraudēta, jo Θ∞3 < Θ*max*, bet tā darbojas neekonomiski. Siltuma ziņā mašīna ir pilnīgi izmantota tikai tad, kad tā attīsta nominālo jaudu *PN = P*2, jo tad Θ∞ = Θ*max*. Tādējādi elektriskās mašīnas nominālā jauda *PN*, kas dota tās pasē, ir vislielākā jauda, kādu mašīna var atdot, tas tinuma izolācijas temperatūrai nepārsniedzot ilgstoši pieļaujamo temperatūru, ja apkārtējas vides temperatūra ir 400C. Mašīnu pārslogojot (*P*1 > *PN*), tinumu izolācija netiek termiski apdraudēta tikai tad ja mašīnu slogo ar jaudu *P*1 > *PN* īslaicīgi, t.i., laika sprīdi *t*1.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.10. att. Silšanas process ilgstošā darba režīmā ar nemainīgu slodzi (S1) | 1.11. att. Elektriskās mašīnas silšanas līknes  dažādām ilgstošām slodzēm |

Ja apkārtējās vides temperatūra ir zemāka par 400C, tad mašīna var ilgstoši slogot virs nominālās jaudas *PN*, bet ja vides temperatūra ir augstāka par 400C, tad ilgstošai slodzei jābūt mazākai par *PN*.

S2— īslaicīgs režīms ar nemainīgu slodzi, kuras ilgums nav pietiekams ter­miskā līdzsvara sasniegšanai un slodzei sekojošās pauzes ilgums ir tik liels, ka elektriskās mašīnas sastāvdaļas temperatūras izmaiņa attiecībā pret dzesētājaģenta temperatūru iekļaujas ±10C robežās. S2 režīmam raksturīgs, ka slodzes iedarbības laikā mašīnas temperatūra ne­paspēj sasniegt stacionāro vērtību θ∞, bet slodzes pārtraukumā atdziest līdz apkār­tējās vides temperatūrai (1.12. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 1.12. att. Silšanas process īslaicīgā režīmā (S2) | 1.13. att. Silšanas process S3 režīmā |

Standarti nosaka slodzes ilgumu td: 10, 30, 60, 90 min. Slodzes ilgumu obligāti jāparada mašīnas darba režīma apzīmējumā, piemēram, S2 – 30 min, S2 – 60 min.

Lai elektrisko mašīnu termiski pilnībā noslogotu, *θpieļ = θ*∞ *= θmax*. Tātad īslaicīgā režīmā var palielināt elektriskās mašīnas slodzi *P* tā, lai *θ*∞ *= θmax*. Tā kā maksimālā virstemperatūra

 un 

slodzi var palielināt *n* reizes



kur *RT* — koeficients, kas raksturo siltuma plūsmas pretestību.

S3 — pārtraukumaini ciklisks režīms: elektriskās mašīnas režīms ar secīgiem identiskiem cikliem, no kuriem katrs ietver darbību ar nemainīgu slodzi un bezsprieguma miera stāvokli. Šajā režīmā palaides strāva jūtami neietekmē mašīnas silšanu. S3 režīmā slodzes laikā mašīnas temperatūra nesasniedz stacionāro vērtību, bet pauzes laikā nepaspēj atdzist līdz apkārtējās vides temperatūrai (1.13. att.).

Šo režīmu raksturo pieslēguma ilgums, kas izteikts procentos



kur *td* — slodzes ilgums, *t*0 — atslēguma ilgums. Standarti nosaka PI% vērtības: 15, 25, 40, 60% ar cikla *tc = td + t*0 laiku 10 min. 1.13. attēlā redzams, ka *θmax* < *θ*∞, tātad arī šajā režīmā var palielināt iekārtas slodzi.

S4 — atkārtoti -īslaicīgs režīms ar palaidi: aparāta režīms ar secīgiem iden­tiskiem cikliem, no kuriem katrs ietver palaidi, darbību ar nemainīgu slodzi un bez sprieguma miera stāvokli (1.14. att.). Standarti nosaka ieslēgšanas biežumu 30, 60, 120 un 120 reizes stundā ar noteiktu inerces koeficientu FI : 1,2, 1,6, 2,0, 2,5, 4,0, 6,3 vai 10.

Šo režīmu raksturo pieslēguma ilgums (*PI*), kas izteikts procentos



kur *td* — slodzes ilgums, *t*0 — atslēguma ilgums, *tp* – palaides ilgums.

Nosacīta mašīnas apzīmējuma paradīts ieslēguma ilgums procentos, ieslēgumu skaits stundā un inerces koeficients, piemēram, S4 – 25%, 120 ieslēgšanas skaits stundā, FI – 2,0. Tas nozīme, ka dzinējs pie inerces koeficienta vērtību FI = 2,0, aprēķināts darbam ar 120 ieslēgumam stundā, katra cikla ilgums sastāda 60/120 = 0,5 min, pie tam palaišanas (D) un darba (N) laika ilgums vienāds ar 25%, t.i., 7,5 s, atslēguma ilgums - 22,5 s.

Sakarā ar katra cikla īslaicību mašīnas palaišanas (iegriešanās) laiks samērojams ar tās darba laiku, tādēļ zudumu palielinājums palaišanas periodā tieši ietekmē mašīnas silšanu.

Palaišanas, darba un pauzes laiki savstarpēji saistīti ar izteiksmi

PI%=

|  |  |
| --- | --- |
| 1.14. att. Silšanas process S4 režīmā | 1.15. att. Silšanas process S5 režīma |

S5 — atkārti-īslaicīgs režīms ar palaidi un bremzēšanu: aparāta režīms ar secīgiem iden­tiskiem cikliem, no kuriem katrs ietver palaidi, darbību ar nemainīgu slodzi bremzēšanu un bez sprieguma miera stāvokli (1.15. att.). Katra cikla beigas notiek elektriskā bremzēšana. Dzinēja ekspluatācija aprēķināta pie noteiktiem inerces koeficientiem FI: 1,2, 1,6, 2,0, 2,5, un 4,0.

Šo režīmu raksturo pieslēguma ilgums (*PI*), kas izteikts procentos



kur *td* — slodzes ilgums, *t*0 — atslēguma ilgums, *tp* – palaides ilgums, *tb* – bremzēšanas ilgums.

Atkārtoti – īslaicīgs režīms ar biežu palaišanu un elektrisko bremzēšanu (S5) atšķiras no apskatītā ar to, ka katra cikla beigās notiek dzinēja elektriskā bremzēšana. Dzinēja ekspluatācija aprēķināta pie sekojošiem inerces koeficientiem vienādiem ar 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 un 4,0.

Ieslēgšanas ilgumu nosaka ar attiecību

PI%=

kur D – palaišanas laiks, N – darba laiks; F – elektriskās bremzēšanas laiks;

R – pauze.

Ieslēgšanas skaits stundā pieņemts tāds pats kā režīmā S4. Režīmā nosacīta’jā apzīmējumā ieslēgšanas ilgumu procentos, ieslēgšanas skaitu stundā un inerces koeficientu, piemēram, S5 – 40 %, 60 ieslēgšanas stundā, F1 – 1,2.

S6 — nepārtraukts ciklisks režīms: aparāta režīms ar secīgiem identiskiem cik­liem, no kuriem katrs ietver darbību ar nemainīgu slodzi un tukšgaitu, bet neietver bezsprieguma miera stāvokli (1.16. att.). S6 režīms no S3 atšķiras ar tukšgaitas strāvas esamību un papildus zudumiem). Standarti nosaka ieslēgšanas biežumu ar nemainīgo slodzi procentos – 15, 25, 40 vai 60 reizes stundā. Šo režīmu, analogi S3, raksturo slodzes ilgums PI%



kur *td* — slodzes ilgums, *t*0 — tukšgaitas ilgums. Standarti nosaka PI vērtības: 15, 25, 40 un 60%.

Intermitējošajā režīmā darba periodi pie noteiktas slodzes un griešanās frekvences mainās ar dzinēja brīvgaitas periodiem vai reversiem pie elektriskās bremzēšanas vai darba pie citas griešanās frekvences. Darba laiku ar nemainīgas slodzes (PI) nosaka procentos no viena cikla ilguma – 15, 25, 40 vai 60 %.

Intermitējošā režīmā (S6) viena cikla ilgums pieņemts 10 min.. Palaišanas zudumu ietekme uz dzinēja daļu silšanu netiek ņemta vērā. Dzinēja slodze intermitējas ar dzinēja tukšgaitu.

Slodzes ilgumu procentos nosaka pēc izteiksmes

PI =

kur N – darba laiks ar nemainīgu slodzi, V – tukšgaitas laiks.

Nosacītā apzīmējumā norāda PI procentos, piemēram, S6 – 40 %.

S7 — nepārtraukti ciklisks režīms: aparāta režīms ar secīgiem identiskiem cik­liem, no kuriem katrs ietver darbību ar nemainīgu slodzi, tukšgaitu un elektrisko bremzēšanu, bet neietver bezsprieguma miera stāvokli (1.17. att.).

Intermitējošā režīmā ar biežiem reversiem pie elektriskās brezēšanas (S7) darba cikla ilgums tiek noteikts ar ieslēgumu skaitu stundā – 30, 60, 120 vai 240 pie noteikta inerces koeficienta F1 – 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 vai 4,0. Sakarā ar nemainīgas slodzes īslaicību zudumi palaišanas periodos un reversu laikā ievērojami ietekmē dzinēja daļu silšanu. Nosacītā apzīmējumā norāda ieslēgšanas skaitu stundā un inerces koeficientu, piemēram, S7 – 120 ieslēgšanas stundā, F1 – 2,5.

|  |  |
| --- | --- |
| 1.16. att. Silšanas process S6 režīma | 1.17. att. Silšanas process S7 režīma |

Intermitējošajā režīmā ar divām un vairāk griešanās frekvencēm (S8) noteikta secīga nemainīgas slodzes vienas griešanās frekvences darba periodu maiņa ar citas frekvences darba periodu arī pie nemainīgas slodzes, kas atbilst šai griešanās frekvencei. Režīmu nosaka ar ciklu skaitu stundā – 30, 60, 120 vai 240, inerces koeficientu F1 = 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 vai 4,0 un attiecināto (procentos no cikla ilguma) slodzes ilgumu pie katras griešanās frekvences (

kur iegriešanās laiks; darba laiks; - elektriskās bremzēšanas laiks pie katras griešanās frekvences.

|  |
| --- |
| 1.18. att. Silšanas process S8 režīma |

Dzinēja zudumu izmaiņas, pārejot pie citas griešanās frekvences un pie elektriskās bremzēšanas, ievērojami ietekmē mašīnas daļu silšanu.

Nosacītā režīma apzīmējumā norāda ieslēgšanas skaitu stundā, inerces koeficientu, slodzi katrai griešanās frekvencei, un tās attiecināto ilgumu procentos no cikla kopējā ilguma, kuru nosaka vienošanās starp pasūtītāju un izgatavotāju. Apzīmējuma piemērs – S8 – 60 ieslēgšanas stundā, F1 – 2,0; 22 kW, 740 apgr./min., 40%, 55 kW, 1470 apgr./min., 60%.

**2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS**

**2.1. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU DARBĪBAS PRINCIPS UN UZBŪVE**

Līdzstrāvas mašīnas plaši izmanto kā ģeneratorus un dzinējus. Ģeneratori pārveido mehānisko enerģiju elektriskajā, bet dzinēji — elektrisko enerģiju mehāniskajā.

Elektrisko mašīnu darbības principa pamatā ir elektromagnētiskās indukcijas parādība un elektromagnētisko spēku darbība. Elektrodzinējspēku (EDS), kas inducējas vadā, tam pārvietojoties magnētiskajā laukā, aprēķina pēc formulas

*e = Bℓv*, (2.1)

kur *B* — magnētiskā indukcija tajā punktā, kur dotajā laika momentā atrodas vads, T;

*ℓ* — vada aktīvais garums, t.i., tā daļa, kas atrodas magnētiskajā laukā, m;

*v* — vada kustības relatīvais ātrums attiecībā pret magnētisko lauku per­pendikulāri magnētiskā lauka spēka līnijām, m/s.

Ja vada galus pieslēdz pretestībai, tad inducētais EDS noslēgtajā ķēdē uzturēs strāvu *i*. Uz vadu, kurā plūst strāva un kas novietots perpendikulāri magnētiskā lauka spēka līnijām, darbojas elektromagnētisks spēks

*Fv = Biℓ,* (2.2)

kur *i* — strāvas stiprums, A.

EDS virzienu nosaka *labās rokas likums:* ja novietojam labo roku tā, ka magnētiskā spēka līnijas ieiet delnā (uzskatām, ka magnētiskā spēka līnijas plūst no ziemeļpola) un atvirzītais īkšķis norāda vada pārvietošanās virzienu, tad izstieptie četri pirksti norādīs inducētā EDS virzienu (2.1. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | ***I*** |
| 2.1. att. EDS virziena noteikšana pēc labās rokas likuma. | 2.2. att. Elektromagnētiskā spēka darbības virziena noteikšana pēc kreisās rokas likuma. |

Spēka darbības virzienu nosaka kreisās rokas likums: ja kreiso roku novieto tā, ka magnētiskā spēka līnijas ieiet delnā un četri izstiep­tie pirksti norāda strāvas virzienu vadā, tad atvirzītais īkšķis norāda spēka darbības virzienu (2.2. att.). Ģeneratora režīmā šis spēks darbojas pretī vada kustībai un to pārvar primārā dzinēja radītais spēks (moments), kas griež ģeneratora rotoru.

2.3. attēlā parādīts līdzstrāvas ģeneratora vienkāršots modelis.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.3. att.Līdzstrāvas ģeneratora vienkāršots modelis | 2.4. att.Magnētiskas indukcijas sadalījums gaisa spraugā |

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) abcd. 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 rādītāja kustības virzienam. Tad tinumā inducēsies EDS, kura virziens uzrādīts 2.3. attēlā, bet tā skaitlisko lielumu nosaka formula

*ev* = 2*B·l·v·*sin*α*, (2.3.)

kur 2 - virknē slēgto vadu skaits vijumā;

*B* - magnētiskā indukcija telpā, kur aplūkojamā laika momentā atrodas vadi;

*l* - vadu aktīvais garums (tā vijuma daļa, kuru šķērso magnētiskā spēka līnijas);

 - vijuma aploces ātrums (*D* - vijuma platums, *n* - vijuma rotācijas frekvence min-1);

*α* - leņķis starp magnētiskās indukcijas un vijuma aploces ātruma vektoriem.

No izteiksmes (2.3) 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 (2.4. att.).

Līniju 00', kura 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 ieņem dažādus stāvokļus magnētiskajā laukā. Tāpēc atbilstoši mainīgām indukcijas vērtībām tinumā inducējas arī 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. 2.3. attēlā parādītā tinuma stāvoklī strāva ģeneratora ārējā ķēdē plūst no sukas A (**+**) uz suku B (**—**). Tad, kad enkurs pa­griezīsies par 180°, strāvas virziens tinumā mainī­sies uz pretējo. Tomēr strāvas virziens un suku pola­ritāte ārējā ķēdē nemainās, jo tai brīdī, kad strāva tinuma izmaina virzienu, mainās arī kolektora plāksnītes zem sukām. Tādā veidā zem sukas A vienmēr atrodas plāksnīte, kas savienota ar vadu zem ziemeļpola, bet zem sukas B — plāksnīte, kas savienota ar vadu zem dienvidpola (2.5. att.). No teiktā var secināt, ka kolektors ar sukām darbojas kā taisngriezis.

Strāvas un sprieguma pulsācijas ģeneratora ārējā ķēdē var samazināt, palielinot sekciju skaitu enkura tinumā. Attiecīgi jāpalielina arī kolektora plāksnīšu skaits, un katras sekcijas gali jāpievieno attiecīgajam plāksnīšu pārim. Ja divus vijumus novieto perpendikulāri un to galus pievieno četriem izolētiem segmentiem (2.6. att.), tad vijumos kā iepriekš inducējas mainīgs EDS, bet uz sukām EDS pulsācijas būs ievērojami mazākas (2.7. att.). Lietojot 16 sekcijas un kolektora plāksnītes, strāvas pulsācijas ārējā ķēdē jau kļūst maznozī­mīgas (2.8. att.).

Līdzstrāvas elektriskās mašīnas paredzētas darbam dažādos apstākļos. Tāpēc to atsevišķiem mezgliem var būt dažāda konstrukcija, tomēr to uzbūves shēmas ir vie­nādas (2.9. 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 (2.10. att.).

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

2.10. attēlā parādīta līdzstrāvas elektriskās mašīnas uzbūve.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| ***a***  ***b*** |  |

2.5. att.Līdzstrāvas ģeneratora darbības princips: *a* — EDS un strāva enkura tinumā;

*b* - EDS un strāva enkura ārējā ķēdē

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 2.6. att. Divu vijumu elementārs līdzstrāvas ģenerators. | 2.7. att. Divu vijumu elementāra līdzstrāvas  ģeneratora EDS uz sukām. |

|  |  |
| --- | --- |
| 2.8. *att.* Iztaisnotas strāvas grafiks | 2.9. *att. L*īdzstrāvas mašīnas konstruktīvā shēma: 1 — statne; 2 — galvenie poli; 3 — enkura serde; 4 — kolektors; 5 — vārpsta;  6 — gultnis; 7 — gultņa vairogs; 8 — ventilators |

|  |
| --- |
|  |

2.10 a. att. Līdzstrāvas mašīnas uzbūve: 1 – ass; 2 – aizmugures gultņa vāks; 3 – kolektors;

4 – sukas; 5 – enkura serdenis; 6 – galvenā pola serdenis; 7 – ierosmes tinums; 8 – statne;

9 – priekšējā gultņa vāks; 10 – ventilators; 11 – stiprinājuma pēdas; 12 - gultņi.

Apskatīsim tās atsevišķus mezglus.

**Statne.** Statne (2.11. att.) kalpo polu un gul­tņu vairogu stiprināšanai. Turklāt caur statni no­slēdzas mašīnas galvenā magnētiskā plūsma. Tā­pēc statni 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 osskrūve 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.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.11. *att.* Līdzstrāvas mašīnas statne | 2.12. *att.* Galvenais pols: 1 — statne; 2 — ierosmes spoles; 3 — polu uzgalis; 4 - pola serde |

**Galvenie poli**. Līdzstrāvas mašīnās magnē­tisko plūsmu rada ierosmes tinuma magnetizējo­šais spēks (MS). Ierosmes tinums sastāv no spo­lēm, kas novietotas uz galveno polu serdes (2.12. att.). Serde izveidota no 1-2 mm biezām tērauda loksnēm, kas sapresētas un savilktas ar tapskrūvēm. Šāda konstrukcija samazina zu­dumus serdē un silšanu no virpuļstrāvām, ku­ras izsauc magnētiskās indukcijas pulsācija polu uzgaļos, enkuram griežoties.

Polus piestiprina statnei 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.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.13. att.Papildpols | **Papildpols** (2.13. 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. Papīldpolus novieto starp galvenajiem poliem, un tos stiprina pie statnes ar bultskrūvēm. Spoli veido no izolēta vara vada ar tādu šķērsgriezumu, 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 (2.14. att.) veido no štancētām elektrotehniskā tērauda loksnēm (2.15. att.). Lokšņu biezums ir 0,35-0,5 mm. Loksnes izolē vienu no otras. Parasti to dara, virsmas lakojot. Lokšņu paketi saspiestā stāvoklī uz vārpstas notur ar piespiedplāksnēm. Šāda ser­des konstrukcija ļauj samazināt enerģijas zu­dumus no virpuļstrāvām, kuras rodas no serdes pārmagnetizēšanas, tai rotējot magnētiskajā laukā. Lai uzlabotu mašīnas dzesēšanu, jau lokšņu štancēšanas laikā serdē izveido ventilācijas kanālus. Enkura tinumu novieto serdes rievās (2.16. att.).

Enkura tinumu veido no apaļiem vai taisnstūrveida vara vadiem, tos rūpīgi izo­lējot no serdes. Rievas var būt atvērtas (2.17. att., a) vai pusaizvērtas (2.17. att., b). Atvērtās rievas lieto vidējas un lielas jaudas, bet pusaizvērtās — mazas jaudas ma­šīnām. Enkura tinums sastāv no sekcijām, kuru galus piestiprina (parasti pielodē) pie kolektora plāksnītēm.

Vadu nostiprināšanai rievas izmanto getinaksa vai tekstolīta ķīļus (2.17. att.). Mazas jaudas mašīnās ķīļus nelieto, bet to lomu veic bandāža. Lai bandāža neizvirzītos ārpus enkura izmēriem, to novieto speci­ālās gropēs uz enkura virsmas (2.14. att.). Bandāžai parasti lieto tērauda stiepli, to tieši uztinot uz enkura virsmas.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.14. *att.* Enkurs bez tinuma | 2.15. *att.* Enkura serdes loksne:  1 — tērauds; 2 — izolācija |

Tinuma frontālo savienojumu stiprināšanai tāpat izmanto stieples bandāžu. Kolektors. Līdzstrāvas mašīnas kolektoru (2.14. att.) izgatavo no auksti vel­mēta vara plāksnītēm. Lai izolētu tās vienu no otras, parasti izmanto mikanītu. Pie plāksnītes izciļņiem pielodē enkura tinuma sekciju galus. Kolektora plāksnīšu apak­šējai malai ir bezdelīgas astes forma. Tāda konstrukcija tiek izmantota plāksnīšu no­stiprināšanai ar piespiedgredzeniem.

Plāksnīšu 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 pastprinātu dzirksteļošanu, starp plāk­snītēm frēzē līdz 1,5 mm dziļas gropes (2.19. att.).

Mazas jaudas mašīnām kolektora plāksnītes iepresē plastmasas korpusā (2.20. att.).

Plastmasa šajā gadījumā kalpo gan plāksnīšu nostiprināšanai, gan kā izolācijas materiāls. Tādas konstrukcijas izgatavo­šana ir visai vienkārša, bet to var izmantot tikai rotācijas frekvencēm līdz 10000 min-1.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.16. *att.* Enkura tinuma novietojums rievas | 2.17. *att.* Enkura rievas: 1 — ķīlis; 2 — eleklrokartons; 3 — tinuma vadi; 4 — izolācijas lente |

|  |  |
| --- | --- |
| 2.18. *att.* Kolektora uzbūve:  1 — kolektora korpuss; 2 — bultskrūve; 3 — piespiedgredzens; 4 — izolācija (mikanīts); 5 — bezdelīgas aste; 6 — plāksnīte | 2.19. *att.* Kolektora plāksnīšu (1) un izolācijas starpliku (2) novietojums    2.20. *att.* Kolektors ar plastmasas korpusu:  1 — kolektora plāksnīte; 2 — plastmasa;  3 — tērauda bukse |

**Suku mezgls.** Suku mezgls sastāv no suku traversas (2.21. att.) un suktura (2.22. att.).

Traversa parasti piestiprināta 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 sastāv no aptveres 1, kurā novieto sukas 3, un suku piespie­šanas mehānisma 2. Visas vienas polaritātes sukas savieno savā starpā ar kopni, kuru pievieno mašīnas izvadiem. Viens no līdzstrāvas mašīnas drošas darbības sva­rīgākiem nosacījumiem ir labs kontakts starp sukām un kolektoru. Tāpēc suku mezgls ir viens no nozīmīgākajiem mašīnā. Atsperēm, kas piespiež sukas pie kolek­tora, jābūt attiecīgi noregulētām, jo pārmērīgs spiediens izsauc paātrinātu suku no­dilumu, bet nepietiekams — pastiprinātu dzirksteļošanu.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.21. att.Suktura traversa | 2.22. att.Sukturis |

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

|  |  |
| --- | --- |
|  | ***b)*** |

2.23. att. Līdzstrāvas mašīnas dzesēšana ar pašventilāciju *(a)* un neatkarīgu ventilāciju *(b):1 -* gaisa ieplūde; *2 -* gaisa izplūde; *3 -* ventilators; *4 -* enkura serde; 5 - poli;*6 -* kolektors; 7 - neatkarīgs ventilators; 5 - gaisa vads; 9 - vilces elektrodzinējs.

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

Līdzstrāvas elektriskās mašīnas var dzesēt ar pašventilāciju (2.23. att. a) vai neatkarīgu ventilāciju (2.23. att. b).

**2.2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS ENKURA TINUMS**

Tagad līdzstrāvas mašīnām ir tikai cilindrveida en­kuri (2.14. att.). Enkura tinuma elements ir sekcija, ko izgatavo no izolēta vara vada ar apaļu vai taisnstūrveida šķērsgriezumu. Sekcija sastāv no viena vai vairākiem vijumiem. Sekcijas posmu, kas at­rodas enkura rievā, sauc par sekcijas aktīvo malu, jo tajā, enkuram rotējot, inducējas EDS, bet posmus ārpus enkura — par frontālajiem savienojumiem, jo tajos neinducējas EDS.

Mazas un vidējas jaudas mašīnās ar daudzām sekcijām un ar samērā mazu enkura rievu skaitu divas, trīs vai vairākas sek­cijas apvieno spolē ar kopēju izolāciju pret rievu. Katru spo­les aktīvo malu ievieto savā rievā (2.24. att.); šādu tinumu sauc par spoļu tinumu.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** |  |  |
| ***b*** |  |
| 2.24. att. Spoles novietojums enkura rievās:  a – vienslāņa tinums; b - divslāņu tinums. | | 2.25. att. Enkura rievu veidi (a un b) un tinuma nostiprinājums ar ķīli (c). |

Ja spoļu aktīvās malas enkura rievas ievieto tikai viena kārta, tad tinumu sauc par vienslāņa tinumu.

Tagad izmanto gandrīz tikai divs1āņu tinumu, t. i., tādu, kur katra rieva ievietotas divu spoļu malas viena virs otras divos slāņos (2.24. att. b). Divslāņu tinumā katras sekcijas viena aktīvā mala atrodas rievas augšpusē, bet otra — rievas dibenā.

Spoļu malas vaļējās rievās vai nu nostiprina ar koka, getinaksa vai tekstolīta ķīļiem (2.25. att. c), vai arī enkura virsmas atsevišķus posmus notin ar neferomagnētiska tērauda stiep­les bandāžu.

Tinuma sekcijas noteiktā kārtībā izvietotas enkura rievās; sek­ciju sākumi un beigas arī no-teiktā kārtībā pievienoti kolektora plāksnītēm. Izveidojas noslēgts enkura tinums, t. i., pie katras kolektora plāksnītes pievienotas vienas sekcijas beigas un nāko­šas sekcijas sākums. Tādēļ līdzstrāvas mašīnas kolektoram ir tik­pat plāksnīšu, cik sekciju enkura tinumam.

Vienas sekcijas aktīvās malas jānovieto zem dažāda nosau­kuma poliem, lai sekciju malās inducētie EDS summētos, t. i., attālumam starp sekcijas aktīvajām malām jābūt aptuveni vienā­dam ar polu dalījumu %, kas mērīts pa enkura virsmas aploci (% — vienam polam atbilstošais enkura aploces garums, izteikts ar enkura rievu skaitu).

Atkarībā no tā, kādā kārtībā enkura tinuma sekcijas izvieto­tas rievās un kādā kārtībā sekciju gali pievienoti kolektora plāk­snītēm, izšķir cilpas tinumu un viļņa tinumu (lieto arī vēl cita veida tinumus).

Cilpas tinumam raksturīgs tas, ka virknē savienoto bla­kus sekciju attiecīgās malas atrodas zem viena un tā paša pola.

Cilpas tinuma izveidojuma princips parādīts 2.26. attēlā, kur vienvijuma sekcijas zīmētas virs polu kurpēm N un S (virs «polu izklājuma»). Sekciju izvietojums veido cilpas.

Lai tinuma sekcijas varētu pareizi izvietot rievās un pareizi saslēgt, tad lieto jēdzienu tinuma solis.

Ar rievu skaitu izteiktu attālumu starp sekcijas aktīvajām malām enkurā sauc par tinuma pirmo soli y1. Izsakot polu dalī­jumu τ ar enkura rievu skaitu Z, dabū, ka

 (2.4.)

kur 2p — mašīnas polu skaits.

Kā jau atzīmēts, tinuma pirmais solis y1 ≈ τ vai

 (2.5)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

2.26. att. Cilpas tinums

Lai tinuma sekcijas varētu pareizi izvietot rievās un pareizi saslēgt, tad lieto jēdzienu tinuma solis.

Ar rievu skaitu izteiktu attālumu starp sekcijas aktīvajām malām enkurā sauc par tinuma pirmo soli y1. Izsakot polu dalī­jumu τ ar enkura rievu skaitu Z, dabū, ka

 (2.6.)

kur 2p — mašīnas polu skaits.

Kā jau atzīmēts, tinuma pirmais solis y1 ≈ τ vai

 (2.7)

Nelielā korekcija ± k rodas tādēļ, ka y1 jābūt veselam skaitlim. Praksē izmanto tikai enkura tinumus ar saīsinātu soli (y < τ), jo tā samazina vara patēriņu.

Attālumu (rievu skaitu) starp vienas sekcijas beigu malu un tai sekojošās sekcijas sākuma malu sauc par tinuma otro soli y2, bet attālumu starp pirmās un tai sekojošas sekcijas sakuma maļam sauc par tinuma rezultējošo soli y. Cilpas tinumam

y = y1- y2. (2.8.)

Cilpas tinumā vienas sekcijas gali pievienoti kolektora bla­kus plāksnītēm, un tādēļ kolektora solis yk = 1.

Sukas enkura tinumu sadala paralēlos zaros. Cilpas tinuma paralēlo zaru skaits 2a vienmēr vienāds ar mašīnas polu skaitu 2p, t. i.,

2a = 2p. (2.9)

Tātad, jo vairāk mašīnai polu, jo vairāk paralēlo zaru ir en­kura tinumam un jo mazāka strāva I plūst katrā paralēlajā zarā:

 (2.10)

kur Ie — enkura strāva.

Tādēļ cilpas tinumu lietderīgi izmantot vidējas un lielas jau­das mašīnās lielām strāvām un zemiem spriegumiem, jo tad tinumu var izveidot no mazāka šķērsgriezuma vadiem.

Viļņa tinumam raksturīgs tas, ka blakus sekciju aktīvās malas atrodas zem dažādiem poliem. Tātad viļņa tinums iespē­jams tikai mašīnām ar 4 un vairāk poliem.

Viļņa tinuma izveidojuma princips dots 2.27. attēlā. Tinuma soļi y1 un y2 pēc lieluma tuvi polu dalījumam τ.

Viļņa tinuma rezultējošais solis

y = y1 + y2 = yk. (2.11)

Vilna tinumā vienas sekcijas gali pievienoti kolektora plāk­snītēm, starp kurām atrodas vairākas plāksnītes. Tinuma veido­jums atgādina vilni.

Viļņa tinumam vienmēr neatkarīgi no mašīnas polu skaita ir tikai divi paralēli zari:

2a = 2. (2.12)

Viļņa tinumu ir lietderīgi izmantot mazas jaudas (līdz 100 kW) mašīnās.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

2.27. att. Viļņa tinums.

**2.3. ENKURA REAKCIJA**

Tukšgaitā (*Ie* = 0, *Iie* ≠ 0 ) līdzstrāvas mašīnas enkura tinuma vados strāva neplūst, un mašīnā pastāv tikai pret polu asi simetriska galvenā magnētiskā plūsma Ф = Ф*e*, ko rada galveno polu ieros­mes tinumā plūstošā ierosmes strāva *Ie* (2.28. att. *a*).

Vienkāršības un uzskatāmības dēļ 2.28. attēlā un turpmāk mašīnas kolektors nav parādīts, bet sukas nosacīti pievienotas enkura virsmai pret tiem vadiem, kuros inducētie EDS ir vienādi ar nulli, t. i., tās novietotas uz diametrālas, polu asij perpendiku­lāras taisnes, ko sauc par ģeometrisko neitrālo līniju (n — n).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |

*Ie* = 0, *Iie* ≠ 0 *Ie* ≠ 0, *Iie* = 0  *Ie* ≠ 0, *Iie* ≠ 0

2.28. att. Divpolu līdzstrāvas mašīnas magnētiskais lauks: a – polu magnētiskais lauks, b – enkura magnētiskais lauks, c – rezultējošais magnētiskais lauks.

Īstenībā, protams, sukas tiek novietotas uz kolektora pret po­liem, jo, kaut gan sekciju neitrālās malas (kurās EDS vienāds ar nulli) atrodas starp poliem, kolektora plāksnītes, kurām pie­vienoti šo sekciju gali, atrodas pret poliem (2.29. att.)

Slogotā mašīnā (*Ie* ≠ 0, *Iie* = 0) enkura tinuma vados plūstošā strāva rada savu, t. s. enkura magnētisko plūsmu Φe, kura attie­cībā pret galveno magnētisko plūsmu ir šķersplūsma; tas skaitliskā vērtība mainās līdz ar mašīnas slodzi. 2.28. attēla b parādīts enkura plūsmas Φe izkārtojums divpolu mašīnā, pieņe­mot, ka mašīnā nav galvenās plūsmas (*Ie* = 0), ierosmes strāva *Iie* = 0 un enkura tinumu baro ārējs līdzstrāvas avots.

Slogotā mašīnā, kad strāva vienlaikus plūst enkurā un ierosmes tinumā (*Ie* ≠ 0, *Iie* ≠ 0),

magnētiskās plūsmas Φe un Φie rada rezultējošo plūsmu Φ, kura vairs nav simetriska pret polu asi (2.28. att. c).

Mašīnas enkura plūsmas Φe iedarbību uz galveno plūsmu sauc par enkura reakciju.

Enkura reakcijas rezultātā magnētiskais lauks gaisa spraugā zem mašīnas poliem ir izkropļots — pola viena mala pastiprināts (enkura plūsma un galvenā plūsma te vērstas viena virzienā) un pola otrā malā — vājināts (enkura plūsma un galvenā plūsma te vēr­stas pretējos virzienos). Tādēļ mašīnas fizikālā neitrāla līnija *n´-n´* (taisne, kas savieno enkura virsmas punktus, kuros magnē­tiskā indukcija Ф = 0) vairs nesakrīt ar ģeometrisko neitrālo līniju *n—n*: slogotā ģeneratorā fizikāla ne­itrālā līnija pagriežas enkura grieša­nās virzienā (to konstatē, izmantojot labās rokas likumu) par leņķi β, bet dzinējā — pret enkura griešanas vir­zienu (to konstatē, izmantojot kreisas rokas likumu). Fizikālās neitrālas līni­jas nobīdes leņķis β mainās reize ar mašīnas slodzi.

Ja slogotai mašīnai sukas nosacīti paliek uz ģeometriskās neitrālas līnijas n—n, tad fizikālās neitrālās līnijas nobīde var izraisīt dzirksteļošanu pie sukām. Sukas dzirksteļo tādēļ, ka šajā gadījumā tās saslēdz īsi enkura tinuma sekcijas, kad tas pariet no viena paralēlā zara otrā. Tas notiek momentā, kad šajās sekcijās enkura reakcijas dēļ inducēts ievērojams EDS, kas sukas un īsi slēgtās sekcijas kontūrā rada ievērojamu strāvu. Šo īsi slēgto līdzstrāvas ķēdi pārtraucot (vienai kolektora plāksnītei atraujoties no sukas), pie sukas «noskrejošās» malas rodas sīki elektriskie loki, ko sauc par suku dzirksteļošanu.

Enkura reakcija ir nevēlama: mašīnā ar nepiesātinātu magnē­tisko ķēdi (tad Φ ~ *Iie*) enkura reakcija, kaut arī tā neizmaina galvenā pola plūsmas skaitlisko vērtību (jo, par cik enkura plūsma samazina galvenā pola plūsmu pola vienā malā, par tik­pat to pastiprina pola otrā malā), tā tomēr izkropļo magnētisko lauku zem poliem un izraisa suku dzirksteļošanu; piesātinātā ma­šīnā (mašīnā ar relatīvi lielu slodzi) enkura reakcija samazina mašīnas EDS, jo samazinās rezultējošā plūsma Φ (mašīnas pie­sātinājuma dēļ enkura plūsma galveno plūsmu pastiprina mazāk nekā to vājina).

|  |
| --- |
| 2.29. att. Komutējamas sek­cijas. |

Tā rezultātā pasliktinās līdzstrāvas mašīnu dar­bība: ģeneratoriem samazinās EDS, bet dzinējiem samazinās grie­zes moments.

Lieljaudai mašīnās izteikts magnētiskā lauka kropļojums zem poliem palielina spriegumu starp kolektora blakus plāksnītēm, — starp tam var rasties dzirksteles un rezultātā nepārtraukta dzirk­steļošana ap kolektoru, t. s. riņķveida uguns (lentveida dzirksteles starp sukām), kas mašīnu izved no ierindas.

Enkura reakcijas kaitīgo ietekmi varētu samazināt, palielinot magnētisko pretestību enkura plūsmai, t. i., palielinot gaisa spraugu starp enkuru un poliem un magnētisko indukciju enkura zobos. Bet tādi pasākumi saistīti ar mašīnas galveno polu mag­netizējoša speķa palielināšanu; sakarā ar to palielinās mašīnas gabarīti un svars, turklāt iegūtais efekts ir apmierinošs tikai ma­zas jaudas mašīnās.

Tādēļ praksē enkura reakciju līdzstrāvas mašīnās ierobežo ar citādiem paņēmieniem.

**2.4. ENKURA REAKCIJAS IETEKME UZ MAŠĪNAS DARBĪBU**

Enkura reakcijas ietekme ir atkarīga no suku stāvokļa un mašīnas magnētiskās ķēdes piesātinātības. Apskatīsim gadījumu, kad sukas novietotas uz ģeometriskās neitrāles a-a (2.28. un 2.30. att.), t. i., uz taisnes, kura ir perpendikulāra galveno polu magnētiskā lauka spēka līnijām, un mašīnas magnētiskā ķēde nepiesātināta. 2.30. a un b attēlos parādīts galveno polu Bie un enkura tinuma Be magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā. Rezultējošo Brez magnētiskās indukcijas sadalījumu atrodam, summējot līkņu Bie un Be ordinātas. Kā redzams 41. c attēlā, rezultējošā magnētiskā indukcija Brez zem poliem nav simetriski sadalīta attiecībā pret poliem. Enkura reakcija samazina Brez (Bie un Ba virzieni ir pretēji) ģeneratora režīmā zem uzskrejošās pola malas, dzinēja režīmā - zem noskrejošās malas.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.30. att. Līdzstrāvas mašīnas galveno polu (a), enkura tinuma (b) un rezultējošās (c) magnētiskās indukcijas sadalījums gaisā spraugā. | 2.31. att. Elektriskais loks: a - riņķa uguns;  b - lokpārklāšanās; 1 - ierosmes tinums;  2 -sukas; 3 - kontaktvads. |

Fizikālā neitrāle b-b (2.28. c un 2.30. c att.), t. i., taisne, kura ir per­pendikulāra rezultējošā magnētiskā lauka Brez spēka līnijām, novirzās no ģeometriskās neitrāles a-a par leņķi β ģeneratora režīmā enkura griešanās virzienā, dzinēja režīmā - pretēji griešanās virzienam. Palielinoties mašīnas slodzei, arī leņķis β palielinās.

Rezultējošās magnē­tiskās indukcijas *Brez* nevienmērīga sadalījuma dēļ (2.30. c att.) atsevišķās sekcijās ievērojami palie­linās inducētais EDS (*ev* = 2*Blv*). Starp kolektora blakus plāksnītēm, kurām pievienotas šīs sekcijas, rodas palielināts sprie­gums, kurš pieaug, palieli­noties slodzei. Mašīnu pārslogojot, šis spriegums var kļūt tik liels, ka starp plāksnītēm rodas elek­triskais loks, kurš var pāriet t. s. riņķa ugunī (2.31. a att.).

Šis loks var daļēji vai pat pilnīgi saslēgt īsi enkura tinumu, izraisot avāriju. Vilces elektrodzinējos elek­triskais loks var pārsviesties uz polu uzgaļiem, radot t. s. lokpārklāšanos (2.31. b att.) un bojājot mašīnu.

Ja mašīna nav magnētiski piesātināta, enkura reakcija rezultē­jošās magnētiskās plūsmas lielumu neizmaina, jo tās samazinājums zem vienas pola uzgaļa malas ir vienāds ar palielinājumu zem otras malas.

Piesātināta mašīna maksimāla rezultējošā indukcija samazinās (2.30. c att.). Tāpēc samazinās arī EDS (*E = cE·n·*Φ) un elektromagnētiskais moments (*Mem = cM·Ie·*Φ), bet dzinēja enkura rotācijas frekvence ( kur ∑Re - enkura ķēdes elektriskā pretestība) palielinās.

|  |
| --- |
|  |

2.32. att. Enkura tinuma magnetizējošais spēks ar suku nobīdi no ģeometriskas neitrāles (a),

ja nobīdes leņķis ir 90° *(b): Fie* - ierosmes tinuma magnetizējošais spēks.

Sukām atrodoties uz ģeometriskās neitrāles, enkura tinuma mag­netizējošais spēks darbojas perpendikulāri polu asij (2.28. b att.). Ja sukas nobīdītas no ģeometriskās neitrāles, tad enkura tinuma magne­tizējošajam spēkam Fa ir divas komponentes: Faq - šķērskomponente un Fad - garenkomponente (2.32. *a* att.).

Šķērskomponente Faq kropļo rezultējošo magnētisko lauku. Garenkomponente Fad atkarībā no suku nobīdes virziena atmagnetizē vai magnetizē mašīnu. Sukas drīkst nobīdīt ģeneratoram tikai enkura griešanās virzienā, bet dzinējam - pretēji griešanās virzienam (sk. komutācijas uzlabošanas paņēmienus).

Ja suku nobīdes leņķis ir 90°, tad darbojas tikai garenkomponente (2.32. *b* att.).

**2.5. ENKURA REAKCIJAS DARBĪBAS VĀJINĀŠANA**

Enkura reakcijas iedarbību samazina, izmantojot kompensācijas tinumu (2.33. att.), vai izveidojot lielāku gaisa spraugu zem galvenā pola uzgaļa malām.

Kompensācijas tinumu ievieto rievās (2.33. att. a), kas izveidotas polu uzgaļos. Strāvas virzienam kompensācijas tinumā jābūt tādam, lai tas pola iedaļas robežās būtu pretējs enkura strāvas virzienam. Lai panāktu enkura reakcijas kompensāciju jebkuras slodzes gadījumā, kompensācijas tinumu slēdz virknē ar enkura tinumu. Kompensācijas tinuma magnētiskā plūsma Φk pretdarbojas enku­ra tinuma magnētiskajai plūsmai Φe (2.33. att. a). Izmantojot kompensācijas tinumu, mašīnas uzbūve kļūst sarežģīta un samazinās galveno polu magnētiskā plūsma, jo palielinās to magnētiskā pretestība (2.33. b att.) salīdzinājumā ar poliem bez kompensācijas tinuma. Līdzstrāvas mašīnas ar kompensācijas tinumu ir dārgākas, tāpēc šādu tinumu lieto tikai lieljaudas mašīnās (*PN* = 150…500 kW, *UN* > 400 V), bet pārējos gadījumos enkura reakciju ierobežo, izveidojot mašīnā palielinātu gaisa spraugu. Tomēr jāievēro, ka līdz ar gaisa spraugas palielināšanu jāpalielina arī ierosmes tinuma MS un tātad arī ierosmes tinuma izmēri.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.33. att. Kompensācijas tinuma darbības shēma *(a)* un tā novietojums (*b*): 1 - kompensācijas tinums; 2 - enkura tinums: 3 - papildpola serde; 4 - papildpola tinums; 5 - galvenā pola ierosmes tinums; 6 - galvenā pola serde; 7 - enkura serde; Φk – kompensācijas tinuma magnētiskā plūsma.

Tā ka, enkura tinuma magnetizējošais spēks *Fa* palielinās zem pola uzgaļa malām. Lai vājinātu tā radīto magnētisko plūsmu, palielina gaisa spraugu zem pola uzgaļiem, tos nošķeļot (2.34. *a* att.), vai arī izgatavojot pola uzgali ar palielinātu liekuma rādiusu *Rp* (2.34. b att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.34.att. Šķeltais galvenā pola uzgalis *(*a*)* un uzgalis ar palielinātu liekuma rādiusu *(*b*):*  bp *-* pola uzgaļa platums; re, rp - enkura un pola uzgaļa liekuma rādiusi. |

**2.6.KOMUTĀCIJA**

**2.6.1. *Suku dzirksteļošana***

Dzirksteļošanas pakāpi zem sukām novērtē pēc dzirksteļošanas skalas (2.35. att.).

Ideāli ir 1. pakāpe, kad nav dzirksteļošanas. 1¼ pakāpe - viet­vietām neliela punktveida dzirksteļošana, kad kolektors nenomelnē, un uz sukām neveidojas piededzi. 1½ pakāpe - vāja dzirksteļošana zem sukas lielākās daļas, kad uz kolektora veidojas nomelnēšanas pēdas un uz sukām - piededzi. Nomelnēšanas pēdas izzūd, tīrot kolektoru ar benzīnu. Dzirksteļošana ir pieļaujama, ja nominālā darba režīmā tā nepārsniedz 1½ pakāpi. 2. pakāpe - dzirksteļošana zem visas sukas. Kolektora nomelnēšanas pēdas nevar notīrīt ar benzīnu, bet uz sukām paliek piededžu pēdas. Šīs pakāpes dzirksteļošana pieļaujama īslaicīgas pārslodzes režīmos. 3. pakāpe - spēcīga dzirksteļošana zem visas sukas, izdaloties lielām dzirkstelēm. Kolektors stipri nomelnē, un to nevar notīrīt, sukas apdeg un sagrūst. Šāda dzirksteļošana pieļaujama tikai īslaicīgi, piemēram, bez reostata palaišanā un izmainot enkura griešanās virzienu, ja kolektors un sukas saglabā darbspēju.

Dzirksteļošanas cēloņi var būt mehāniska, potenciāla (sk. enkura reakci­ju) un elektromagnētiska rakstura.

Mehāniska rakstura dzirksteļošanu var novērst, kvalitatīvi veicot mašīnu remontu un apkopi. Dzirksteļošanas iemesli var būt dažādi, piemēram, kolekto­ra vibrēšana, eliptiskums, nelīdzena vai netīra virsma, sukas nav piespiestas ar vajadzīgo spēku u. c. Sevišķi liela vērība jāpievērš kolektora apkopei. Ja starp kolektora plāksnītēm nokļūst svešķermeņi, piemēram, suku šķembas vai to putekļi, dīzeļdegviela vai eļļa u. c, kolektora blakus plāksnītes saslēdzas (2.36. a att.).

Pa "tiltiņu" starp kolektora plāksnītēm plūst strāva, un tās izdeg. Bet, ja starp kolektora plāksnītēm ir palielināts spriegums, izveidojas sākotnējs elektriskais loks (2.36. c att.), ap kuru izveidojas jonizēta sakarsētu gāzu un vara tvaiku telpa. Tāpēc elektriskais loks var pār­sviesties uz citām kolektora plāksnītēm (2.36. d att.), kā rezultātā ap kolektoru var izveidoties riņķa uguns.

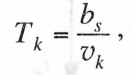
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | | 2.35. att. Dzirksteļošanas skala:  1 – kolektora plāksnīte; 2 – suka. | |
|  |  | |
| 2.36. att. Kolektora riņķa uguns izveido­šanās shēma: 1 - kolektora plāksnīšu saslēgums; 2 - svešķermenis; 3 - kolektora plāksnītes radziņi, kuri izveidojas berzes un kolektora sakaršanas rezultātā; 4 - suku putekļi; 5 - izdegušais mikanīts; 6 - sākotnējais elektriskais loks; 7 -gāzes un vara tvaiki; 8 - spēcīgs elektriskais loks; n - kolektora pārvietošanās virziens; A, B - kolektora plāksnītes. | |

**2.6.2. Komutācijas procesa būtība**

Enkuram griežoties, tā tinuma sekcijas pārslēdzas no viena paralēlā zara uz citu (2.37 a un b att.). Vienlaikus komutējošajā sekcijā strauji izmainās strāvas stiprums un virziens (2.37. c att.) no +ie līdz -ie kur ie - paralēlā zara strāva.

Par komutāciju sauc parādību kopumu, kuras norisinās, līdzstrāvas mašīnas enkura tinuma sekcijai pārslēdzoties no viena paralēlā zara uz citu.

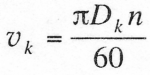
Komutācijas periods Tk ir laika sprīdis, kurā sekcija pāriet no viena paralēlā zara uz citu:



|  |
| --- |
|  |

2.37. att. Komutējošās sekcijas pārslēgšanas no viena paralēla zara uz citu (a un b) un strāvas izmaiņa sekcijā (c): 1 - komutējošā sekcija; S, B - sekcijas sākums un beigas; Ie - enkura strāva; ie - paralēlā zara strāva; n - enkura griešanās virziens; +ie, -ie - paralēlā zara strāvas; Tk - komutācijas periods.

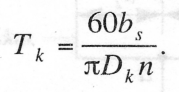
kur bs - sukas platums;

 - kolektora aploces ātrums;

Dk - kolektora diametrs;

n - enkura rotācijas frekvence (min-1)*.*

Komutācijas perioda ilgums ir no sekundes tūkstošās līdz desmittūkstošajai daļai un atkarīgs no suku platuma, kolektora diamet­ra un enkura rotācijas frekvences:

****

**2.6.3. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni**

Līdzstrāvas mašīnas enkuram rotējot, kolektora plāksnītes pēc kārtas saskaras ar nekustī-

gajām sukām, un enkura tinuma sekcijas viena pēc otras pāriet no tinuma viena paralēlā zara otrā blakus zara.

Visu parādību kopumu, kuras noris, enkura tinuma sekcijai pārslēdzoties no viena paralēlā zara otrā, sauc par komutā­ciju.

Laba komutācija noris bez suku dzirksteļošanas, bet slikta komutācija izraisa dzirksteļošanu suku «noskrejošajās» malās. Dzirksteļošana bojā kolektora un suku virsmu, tādēļ palielinās pārejas pretestība starp suku un kolektora plāksnītēm un kolek­tors pārkarst.

Suku dzirksteļošanu var izraisīt arī mehāniska rakstura cē­loņi — pavirši apstrādāts kolektors (eliptisks vai ar negludu virsmu), nepietiekams suku spiediens uz kolektora virsmu, netīra kolektora virsma u. c. vai lieljaudas mašīnās — stipri izkropļots magnētiskais lauks zem poliem.

Komutācijas elektromagnētiskie procesi ir visai komplicēti. Tā­dēļ vienkāršības dēļ pieņemam, ka sukas platums vienāds ar ko­lektora plāksnītes platumu (faktiski suka divas līdz trīs reizes platāka). Pieņemot, ka enkura tinumam ir divi paralēli zari, katrā zarā, tātad katrā tinuma sekcijā, plūst strāva *Ie*/2.

Komutācijas process vienā sekcijā noris laika sprīdī, kurā suka, atrazdamās virs kolektora divām blakus plāksnītēm, saslēdz īsi tām pievienoto komutējamo sekciju (2.38. att.); šajā laikā komutējamā sekcijā izmainās strāvas virziens.

Laika sprīdi, kurā suka pilnīgi pāriet no kolektora vienas plāksnītes uz otru (2.38. att. *a*—c) sauc par komutācijas periodu *Tk*. Tā ilgums atkarīgs no mašīnas enkura griešanas ātruma un no kolektora plāksnīšu skaita un platuma.

Strāvas virziena maiņa komutējamā sekcija, kas zīmēta ar biezu līniju, paskaidrota 2.38. attēlā (2 = 2).

|  |
| --- |
| 2.38. att. Enkura tinuma sekcijas komutācijas process. |

Komutācijas process sākas momenta, kad suka pieskaras ko­lektora plāksnītei 2. Komutācijas laikā (2.38. att. b) komutējamo sekciju suka saslēdz īsi. Šī īsi slēgtā kontūra pretestību praktiski nosaka tikai pārejas pretestības starp suku un kolektora plāksnī­tēm 1 un 2, jo sekcijas pretestība ir neievērojami maza. Var pie­ņemt, ka pārejas pretestības apgriezti proporcionālas sukas un plāksnīšu saskares virsmu laukumiem, kuru lielums komutācijas laikā nepātraukti mainās (ar plāksnīti 1 samazinās, ar 2 — pa­lielinās). Atbilstoši pārejas pretestību izmaiņām nepārtraukti mainās no sukas uz plāksnītēm *1 un 2* plūstošās strāvas i*1* un i*2.*

Ja pieņemam, ka komutējamā sek­cijā pašindukcijas EDS, galvenās plūs­mas EDS un enkura plūsmas EDS vie­nādi ar nulli, tad strāvas maiņas procesu komutējamā sekcijā nosaka tikai minēto pārejas pretestību maiņa. Var pieradīt, ka tādā gadījumā strāva *il* īsi slēgtajā (komutējamā) sekcijā mai­nās proporcionāli laikam *t* (2.39. att. a)*:*

 (2.13)

Tādu komutāciju sauc par line­āru. Lineāra komutācija noris bez dzirksteļošanas, jo strāvas blīvums zem sukas ir vienmērīgs.

Tomēr īstenībā strāvas izmaiņa ko­mutējamā sekcijā ir atkarīga ne tikai no pārejas pretestībām starp suku un kolektora plāksnītēm 1 un *2,* bet arī no šajā sekcijā inducētajiem EDS.

Tā kā komutācijas periods Tk ir ļoti īss (aptuveni 10-4—10-5 s), tad strāvas virziena izmaiņa komutējamā sekcijā noris ļoti ātri, un šajā sekcijā inducējas ne tikai pašindukcijas EDS, bet arī savstarpējas indukcijas EDS, jo patiesībā suka savieno vairākas kolektora plāksnītes, t. i., komutācijā vienlaicīgi piedalās divas vai trīs sekcijas.

Pašindukcijas un savstarpējās indukcijas rezultējošo EDS ko­mutējama sekcijā sauc par reaktīvo elektrodzinējspēku *er*, jo tas saskaņa ar Lenca likumu *kavē strā*vas izmaiņu komu­tējama sekcija:



kur LT — sekcijas induktivitāte, kurā ietverta arī savstarpējā induktivitāte;

i —strāva komutējamā sekcijā.

Ja komutējamā sekcijā strāva mainās lineāri, tad

 (2.14)

t. i., reaktīvais EDS, ja mašīnas slodze nemainās, ir konstants. Vispār er ir jo lielāks, jo lielāka mašīnas slodze (Ie) un enkura griešanas ātrums un jo vairāk vadu sekcijā.

Bez minētā reaktīva EDS er enkura plūsma inducē rotējošā komutējama sekcija arī elektrodzinējspēku *ee*, kura virziens sa­krīt ar reaktīva EDS er virzienu.

Komutējamā sekcija inducētais EDS *ee* ir jo lielāks, jo lielāka enkura plūsma, jo ātrāk rotē enkurs un jo vairāk vijumu sekcijai.

Komutējamā sekcijā inducētie EDS *er* + *ee* šajā sekcijā rada papildstrāvu *ip* (2.39. att. b), un tādēļ sekcijas strāva *i* nullvertību sasniedz vēlāk nekā lineārajā komutācijā. Tādu komu­tāciju sauc par palēninātu.

Palēninātā komutācijā strāvas blīvums zem sukas vairs nav vienmērīgs: tas sukas «noskrejošajā» malā (pret plāksnīti 1) ievē­rojami palielinās (2.39. att. b). Tādēļ, sukai noslīdot no kolek­tora plāksnītes (1, 2, 3 utt.), suka dzirksteļo.

Lai novērstu suku dzirksteļošanu, tad komutējamā sekcijā arējam magnētiskajam laukam jārada cits, t.s. komutējošais elektrodzinējspēks *ek*, kas skaitliski vienāds ar elektrodzinējspēku *er + ee* un vērsts tam pretējā virzienā.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a***  ***b*** |  |

2.39. att. Lineāra (a) un palēnināta (b) komutācija.

Tātad komutācija būs lineāra, ja būs izpildīts noteikums

(*er +ee*) +*ek* = 0 (2.15)

Līdzstrāvas mašīnā komutāciju visvienkāršāk varētu uzlabot, pārvietojot sukas no ģeometriskās neitrālās līnijas aiz fizikālās neitrālās līnijas: ģeneratorā — enkura griešanās virzienā, dzi­nējā — pretī griešanās virzienam. Tomēr noteikums (*er +ee*) +*ek* = 0 te izpildās tikai noteiktai slodzei, jo *er* mainās reizē ar slodzi, bet *ek* noteiktam suku stāvoklim ir konstants. Tādēļ, mainoties mašīnas slodzei, būtu jāmaina suku stāvoklis, kas ļoti apgrūti­nātu mašīnas ekspluatāciju.

Vislabākais pasākums komutācijas uzlabošanai ir papi1dpoli (2.40. att. a), kurus ar bultām piestiprina mašīnas kor­pusa iekšējai virsmai starp galvenajiem poliem (2.40. att. b). Papildpolu *Np — Sp* ass sakrīt ar ģeometrisko neitrālo līniju, uz kuras nosacīti novietotas arī sukas.

Papildpolu magnētiskās plūsmas Φp virzienam jābūt pretējam enkura plūsmas Φe virzienam. Tādēļ ģeneratorā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola ir tam pretēja nosaukuma papildpols, bet dzinējā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola — tā paša nosaukuma papildpols. Mašīnai pārejot no ģeneratora re­žīma dzinēja režīmā vai otrādi, papildpolu polaritāte mainās.

Papildpolu magnētiskās plūsmas Φp virzienam jābūt pretējam enkura plūsmas Φe virzienam. Tādēļ ģeneratorā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola ir tam pretēja nosaukuma papildpols, bet dzinējā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola — tā paša nosaukuma papildpols. Mašīnai pārejot no ģeneratora re­žīma dzinēja režīmā vai otrādi, papildpolu polaritāte mainās.

Lai papildpolu plūsmas Φp komutējamā sekcijā inducētais ko­mutējošais elektrodzinējspēks *ek* mainītos reizē ar mašīnas slodzi resp. reizē ar reaktīvo elektrodzinējspēku *er*, tad papildpolu tinumu savieno virknē ar enkura tinumu; ar to nodrošina automātisku *ek* maiņu atbilstoši mašīnas slodzei. Tā kā komutējošais *ek* inducē tikai komutējamās sekcijās, tad papildpolu magnētiskā plūsma Φp jārada tikai komutācijas zonā. Tāpēc papildpoli ir šauri. Papildpoli ir visām līdzstrāvas mašīnām, kuru jauda pārsniedz 1 kW.

|  |
| --- |
| 2.40. att. Papildpols (a) un papildpolu novietojums līdzstrāvas mašīna (b). |

Tomēr mašīnas ar papildpoliem magnētiska lauka kropļojums zem galvenajiem poliem ir tāds pats kā mašīnās bez papildpoliem.

Tādēļ lieljaudas līdzstrāvas mašīnām, kuras darbojas smagos apstākļos un pakļautas lielām pārslodzēm (piem., velmēšanas stāvu elektrodzinēji), bez papildpoliem iekārto vēl kompensā­cijas tinumu, kas novērš lauka kropļojumu zem galvenajiem poliem, t. i., kompensē enkura škērsplūsmu polu kurpju zona.

Kompensācijas tinumu ievieto polu kurpju aksiālās rievās (2.40. att. b) un pievieno virknē enkura tinumam tā, lai strāvu virzieni kompensācijas tinumā būtu pretēji strāvu virzieniem en­kura tinumā šo polu zonās.

Kompensācijas tinumu parasti izmanto ātri rotējošam lieljau­das mašīnām (kam jauda virs 100 kW uz vienu polu), ja sprie­gums pārsniedz 400 V un mašīnas pakļautas ievērojamam īslai­cīgām pārslodzēm.

Labas komutācijas nodrošināšanā liela nozīme ir arī suku markai. Palielinot pārejas pretestību starp suku un kolektora plāksnītēm, t. i., vara suku vietā izmantojot ogles sukas, papildstrāva *ip* sekcijā samazinās. Cietās ogles sukas rada lielāku pār­ejas pretestību nekā mīkstās. Tādēļ, jo lielāks reaktīvais elektro­dzinējspēks er paredzams komutējamā sekcijā, jo cietākas sukas jālieto.

**2.7. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU KLASIFIKĀCIJA PĒC IEROSMES VEIDA**

Līdzstrāvas mašīnas — ģeneratorus un dzinējus — atkarībā no tā, *kas* un *kā* baro mašīnas ierosmes tinumu, iedala svešierosmes (neatkarīgās ierosmes), paralēlās (šunta) ierosmes, virknes (sērijas) ierosmes un jauktās (kompaunda) ierosmes mašīnas.

Svešierosmes mašīnas ierosmes tinumu baro no mašī­nas neatkarīgs līdzstrāvas avots (2.41. att.*a),* piemēram, līdzstrā­vas ģenerators, akumulatoru baterija, pusvadītāju taisngriezis u. c.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** | ***d*** |

2.41. att. Līdzstrāvas mašīnu ierosmes shēmas.

Tā ka svešierosmes mašīnas ierosmes ķēde nav elektriski saistīta ar enkura ķēdi, tad ierosmes strāva *Iie* nav atkarīga no mašīnas slodzes.

Ģeneratorus ar paralēlo, virknes un jaukto ierosmi sauc par pašierosmes ģeneratoriem, jo to ierosmes linumu baro pats ģenerators, t. i., pašierosmes ģeneratora ierosmes tinums pie­vienots ģeneratora enkuram.

Paralēlās ierosmes mašīnā ierosmes tinums pieslēgts paralēli enkura tinumam (2.41. att. *b*). Mašīnas slodzes lielums maz ietekmē galveno polu magnētisko plūsmu resp. ierosmes strāvu (*Iie* ≈ const). Galveno polu ierosmes spolēm, kas izgatavotas no tieva vara vada, ir *daudz* vijumu. Tātad paralēlās ierosmes tinu­mam ir liela pretestība, un *ierosmes strāva Iie* *normālā darba režīmā daudzkārt mazāka par enkura nominālo strāvu: Iie* = (1—5)% *Ien*; jaudas zudums *I*ie2*r*1paralēlās ierosmes tinumā rela­tīvi *mazs.*

*Virknes ierosmes mašīnā* ierosmes tinums saslēgts virknē ar enkura tinumu (2.41. att. c). Tā kā visa enkura strāva plūst caur ierosmes tinumu, tad to dimensionē atbilstoši enkura strāvas nominālajai vērtībai. Polu ierosmes spolēm, kas izgatavotas no samērā liela šķērsgriezuma vada, ir neliels vijumu skaits un maza kopējā pretestība. Šo mašīnu slodzei mainoties, plašās robežās mainās ierosmes strāva un reizē ar to arī galveno polu magnē­tiskā plūsma Ф.

*Jauktās ierosmes mašīnā* ir divi ierosmes tinumi, no kuriem viens savienots virknē ar enkura tinumu, bet otrs pievienots tam paralēli (2.41. att. d). Tātad uz katras galvenā pola serdes ir divas ierosmes spoles. Abus ierosmes tinumus var saslēgt līdz slēgumā (tad abu ierosmes spoļu plūsmas summējas) vai pretslēguma (tad abu ierosmes spoļu plūsmām ir pratēji virzieni). Parasti viens no ierosmes tinumiem ir galvenais, bet otram ir palīgnozīme.

Tādējādi līdzstrāvas mašīnas ierosmes veids nosaka mašīnas īpašības darba.

*Mazas jaudas ģeneratorus* (*Pn*< 1 kW) parasti izgatavo ar pastāvīgo magnētu poliem. Pēc savām īpašībām tie tuvi svešierosmes ģeneratoriem.

**2.8. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS EDS UN ELEKTROMAGNĒTISKAIS**

**MOMENTS**

**2.8.1. Līdzstrāvas mašīnas elektrodzinējspēks**

Līdzstrāvas mašīnas enkuram rotējot (ģeneratora vai dzinēja režīma), enkura tinuma vadi šķel galveno polu magnētisko plūsmu, un katra vadā inducējas periodiski mainīgs EDS.

Magnētiskajai indukcijai *B* enkura aploces dažādos punktos ir dažādas skaitliskas vērtības; tas redzams 2.41. attēlā: aiz polu kurpēm magnētiska indukcija strauji samazinās, un vidū starp poliem *B* = 0.

Tādēļ, aprēķinot enkura tinuma vienā vadā inducēto EDS, izdevīgi pieņemt, ka magnētiska indukcija gaisa spraugā gar enkura aploci ir nemainīga un vienāda ar magnētiskās indukcijas vidējo vērtību *B*vid:

 (2.16)

kur Ф — viena pola magnētiskā plūsma, Wb;

2*p* — mašīnas polu skaits (vienmēr pārskaitlis);

D — enkura diametrs, m;

*l* — enkura garums (vai enkura tinuma viena vada aktī­vais garums), m.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.41. Magnētiskās indukcijas B sadalījuma līkne pa enkura virsmas aploci. |

Tā kā enkura tinuma vadi pārvietojas perpendikulāri magnē­tiskajām līnijām, tad saskaņā ar elektromagnētiskās indukcija likumu enkura tinuma viena vada inducētais vidējais EDS



kur v — enkura tinuma vadu lineārais ātrums, m/s.

Enkuram griežoties ar ātrumu n (apgr./min),



Ja enkura tinumā ir *N* vadi un sukas sadala tinumu 2*a* para­lēlos zaros, tad tinuma katrā paralēlajā zarā virknē savienoti *N*/2*a* vadi.

Tātad līdzstrāvas mašīnas enkura EDS

 (2.17)

Bet katrai mašīnai lielumi *p*, *N* un *a* ir nemainīgi, un tādēļ

*E = cenΦ*, (2.18)

kur

 (2.19)

ir dotajai mašīnai nemainīgs koeficients.

Secinājums. Dotajā līdzstrāvas mašīnā EDS vērtība ir atkarīga tikai no enkura rotācijas frekvences un magnētiskās plūsmas (ierosmes strāvas).

Tādējādi līdzstrāvas ģeneratora EDS var mainīt, mainot vai nu enkura griešanās ātrumu, vai polu magnētisko plūsmu Φ resp. ierosmes strāvu *Iie*. Praksē kā lietderīgāko izmanto pēdējo paņē­mienu.

**2.8.2. Līdzstrāvas mašīnas elektromagnētiskais moments**

Līdzstrāvas mašīnu darbinot ģeneratora vai dzinēja režīmā, mašīnas ierosmes plūsmas un enkura tinuma vados plūstošo strāvu mijiedarbība rada elektromagnētisko momentu, kas ģeneratora režīmā ir bremzējošais, bet dzinēja režīma — grie­zes moments.

Ja enkura tinumam ir 2*a* paralēli zari, pa kuriem sadalās enkura strāva *Ie* tad katrā zarā, t.i., enkura tinuma katrā vada plūst strāva



Saskaņa ar Ampēra likumu uz enkura tinuma katru vadu dar­bojas elektromagnētiskais spēks, kura vidējā vērtība

*Fvid = Bvid·I·l.*

Tad uz enkura tinuma katru vadu darbojas elektromagnētis­kais moments, kura vidējā vērtība



Ja enkura tinumā ir *N* vadu, tad mašīnas elektromagnētiskais moments

 (2.20)

Tā kā

 (2.21)

dotajai mašīnai ir nemainīgs lielums, tad līdzstrāvas mašīnas enkura attīstītais elektromagnētiskais moments (*N·m*)

*M = cmIe*Φ.(2.22)

Secinājums. Dotajā līdzstrāvas mašīnā elektromagnētiskā momenta vērtība ir atkarīga tikai no enkura strāvas un magnētiskās plūsmas.

Ģeneratora režīmā mašīnas bremzējošo elektromagnētisko mo­mentu līdzsvaro primārā dzinēja griezes moments, bet dzinēja režīmā mašīnas elektromagnētiskais griezes moments pārvar dzi­nēja berzes spēku radīto momentu un griež ar enkura vārpstu saistītā mehānisma vārpstu.

**2.9. LĪDZSTRĀVAS ĢENERATORS**

Līdzstrāvas ģeneratoru darbību raksturo četri pamatlielumi: ģeneratora spriegums *U*, slodzes strāva *I*, ierosmes strāva *Iie* un enkura griešanās ātrums *n*, kuru parasti uztur konstantu.

Par mašīnas piemērotību darbam spriež pēc mašīnas rak­sturlīknēm, kuras grafiski attēlo sakarību starp diviem mašī­nas pamatlielumiem, ja pārējie divi nemainās.

Līdzstrāvas ģeneratora darbību raksturo tukšgaitas, ārējā un regulēšanas raksturlīkne.

*Tukšgaitas raksturlīkne* rāda ģeneratora enkurā inducētā EDS atkarību no ierosmes strāvas *Iie*, ja ģenerators dar­bojas bez slodzes ar nemainīgu griešanās ātrumu, t. i.,

E=U0=f1(*Iie*), ja *I* = 0 un *n = nN =* const,

kur *U*0 — ģeneratora spriegums tukšgaitā.

*Arējā raksturlīkne* rāda ģeneratora sprieguma *U* at­karību no slodzes strāvas *I*, ja griešanās ātrums konstants un nemainīga ierosmes strāva (svešierosmei) vai nemainīga ierosmes ķēdes pretestība *Rie* (pašierosmei), t. i.,

*U = f*2(*I*), ja *n = nN =* const un *Iie* = const vai *Rie* = const.

Regulēšanas raksturlīkne rāda, kā jāmaina ierosmes strāva *Iie*, lai, mainoties ģeneratora slodzei (*I*), uzturētu konstantu ģeneratora spriegumu, ja griešanās ātrumu nemaina, t. i.,

*Iie = f*3(*I*), ja *U* = const *n = nN* = const.

Ģeneratoru raksturlīknes uzņem eksperimentāli.

**2.9.1. Līdzstrāvas neatkarīgās ierosmes (svešierosmes) ģenerators**

Svešierosmes ģeneratora slēguma shēma dota 2.42 attēlā. Ģeneratora ierosmes strāvu maina ar ierosmes ķēdē ieslēgto regulēšanas reostatu *Rr*; ģeneratoram pievienotos patērētājus atvieto slodzes reostats *Rsl*.

Regulēšanas reostata *Rr* kontakts „0” (ierosmes ķēdes pārtraukšanai) pievienots ierosmes tinuma pretējam galam. Tad pārbīdot slīdkontaktu, varam pārtraukt ierosmes ķēdi, iepriekš saslēgtu īsi ierosmes tinumu. Ierosmes ķēdi pārtraucot tieši, ķēdes lielās induktivitātes dēļ ierosmes tinumā inducētais liels pašindukcijas EDS, kas varētu caursist tinuma izolāciju un starp priekšpēdējo kontaktu un slīdkontaktu radītu elektrisko loku, tādēļ šie kontakti stipri apdegtu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.42. *att.* Neatkarīgas ierosmes ģeneratora shēma (a) un tukšgaitas raksturlīkne (b)

***Tukšgaitas raksturlīkne***. Tukšgaitas raksturlīkni *E = f*1(*Iie*) uzņemot, ģeneratoru darbina tukšgaitā (slēdzis S atslēgts, slodzes strāva *I = Ie* = 0) ar nominālo griešanas ātrumu *n = nN* = const.

Tā kā tukšgaitā ģeneratora spriegums U0 = E, tad enkura spailēm pievienotais voltmetrs uzrāda ģeneratora elektrodzinējspēku E. Ja *n* = const, tad saskaņā ar izteiksmi E = cE·n·Φ, E ir atkarīgs tikai no pola magnētiskās plūsmas Φ, t.i., no ierosmes strāvas *Iie*.

Uzņemot tukšgaitas raksturlīkni, ar ierosmes ķēdē ieslēgto reostatu Rr pakāpeniski maina ierosmes strāvu Iie no nulles līdz vērtībai, ar kuru E = (1,1-1,25)UN, pēc tam atkal samazina līdz nullei.

Palielinot ierosmes strāvu, iegūst tukšgaitas raksturlīknes kāpjošo zaru (2.42. att. b); ja *Iie* = 0, enkurā tomēr inducējas t.s. paliekošais elektrodzinējspēks Epal = (2-3)%UN, ko enkura tinumā inducē polu paliekošais magnētisms.

Samazinot ierosmes strāvu, iegūst raksturlīknes lejupejošo zaru, kurš histerēzes dēļ atrodas nedaudz virs kāpjošā zara. Praksē par tukšgaitas raksturlīkni parasti pieņem vidējo starp abām līknēm.

Šīs raksturlīknes lineārā daļa atbilst nepiesātinātai magnētiskai ķēdei. Tālāk palielinot strāvu Iie, mašīna piesātinās un raksturlīkne kļūst nelineāra. Sakarība *E = f*1(*Iie*) forma līdzīga tērauda magnetizēšanas līknei un cita mēroga atkārto mašīnas magnetizēšanas raksturlīkni Φ = *f*1(*Iie*).

Ģeneratori darbojas normālajā darba režīmā parasti ar vidēju magnētisko piesātinājumu, t.i., ģeneratora nominālajam spriegumam atbilstošais punkts atrodas raksturlīknes izliekumā. Ja šis punkts atrastos pirms raksturlīknes izliekuma tās taisnajā posmā, tad neliela Iie izmaiņa radītu lielu EDS un tātad arī U izmaiņu, bet ja punkts atrastos aiz līknes izliekuma, tad būtu ierobežota sprieguma U regulēšana uz augšu.

Ārējo raksturlīkni U = f2(I) uzņemot (2.43. att.), ieslēdz slēdzi S un ar regulēšanas reostata Rr un slodzes reostata Rsl (2.42. att.) palīdzību ģeneratoram ieregulē nominālo sprie­gumu (U = UN) un nominālo strāvu (I = IN). Pēc tam, palielinot slodzes reostata Rsl pretestību, pakāpeniski samazina ģeneratora slodzes strāvu I no nominālās vērtības IN līdz nullei (slodzes ķēde pārtraukta), bet ierosmes strāvu un ģeneratora griešanas ātrumu uztur konstantu (*Iie* = const, *n = nN* = const).

|  |  |
| --- | --- |
| 2.43. att. Svešierosmes ģeneratora ārējā  raksturlīkne. | 2.44. att. Svešierosmes ģeneratora regulēšanas raksturlīkne. |

Pievienojot svešierosmes ģeneratoram slodzi, ģeneratora EDS noslēgtajā enkura ķēdē uztur slodzes strāvu *I = Ie*.

Otrā Kirhofa likuma izteiksme ģeneratora enkura ķēdei ar pievienoto slodzes pretestību *Rsl* ir šāda:

*E = I· Rsl* + *I·Re*, (2.23)

kur *Re* — enkura ķēdes pretestība, kura sevī ietver šādas virknē saslēgtas pretestības: enkura tinuma pretestību, pārejas pretestības starp sukām un kolektoru un ar enkuru virknē slēgto tinumu, piemēram, papildpolu tinuma pretes­tību.

Tā kā ģeneratora spriegums *U = I·Rsl* , tad *E = U +* *IeRe* vai

*U = E* - *IeRe*. (2.24)

Pēdējo izteiksmi sauc par līdzstrāvas ģeneratora sprieguma vienādojumu. Redzam, ka slogota ģeneratora spriegums *U* vienmēr ir mazāks nekā ģeneratora EDS *E* par sprieguma kritumu enkura ķēdē *IeRe*.

Ģeneratora sprieguma procentuālā izmaiņa Δ*U*, ģeneratora slodzei mainoties no nulles līdz nominālajai:

 (2.25)

Svešierosmes ģeneratoriem parasti Δ*U* = 5—10%.

Ģeneratora sprieguma izmaiņai ir divi cēloņi: slodzei pieaugot, palielinās sprieguma kritums *IeRe* enkura ķēdē un pastiprinās en­kura reakcija, tādēļ samazinās ģeneratora magnētiskā plūsma un tātad samazinās arī ģeneratora EDS *E*. Sprieguma *U* vērtību enkura reakcija jūtami ietekmē gan tikai tad, kad slodze pārsniedz nominālo.

Lai, slodzei mainoties, ģeneratora spriegumu *U* uzturētu kon­stantu, tad jāregulē ģeneratora EDS, mainot galveno plūsmu resp. ierosmes strāvu *Iie* ar ierosmes ķēdē ieslēgto regulēšanas reostatu *Rr*. Tā kā *E = cE·n·*Φ, tad

*U = cE·n·*Φ – *IeRe*. (2.26)

Regulēšanas raksturlīkne *Iie* = *f*3(*I*) parādīta 2.44. attēla. Lai, slodzei pieaugot, uzturētu *U* = const, ierosmes strāva jāpalielina. Praksē līdzstrāvas ģeneratoru spriegumu regulē auto­mātiski ar speciāliem ātras darbības regulatoriem.

Svešierosmes ģeneratorus lieto tad, kad ģeneratora spriegums *U* jāregulē ļoti plašās robežās — no vērtības, kas tuva nullei, līdz nominālajai vērtībai, piemēram, ģeneratora-dzinēja sistēmas shēmā. Bez tam svešierosme ir ģeneratoriem ar zemu spriegumu (4—24 V) un arī ar augstu spriegumu (virs 600 V). Tad ierosmes spriegums — 110 vai 220 V.

Svešierosmes ģeneratoru trūkums ir tas, ka tiem nepieciešams atsevišķs līdzstrāvas avots.

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

Šādos apstākļos spriegums uz ģeneratora spailēm ir mazāks nekā EDS, kas aprēķināts pēc izteiksmes *U = Ee - Ie*·Σ*R*. Tāpēc slodzes raksturlīkne 1 atrodas zemāk par tukšgaitas raksturlīkni 2 (2.45. att.). Ja no punkta a, kas atbilst nominālam spriegu­mam, uz augšu atliek nogriezni ab = *Ia*Σ*R* un novelk horizontālu nogriezni bc līdz krustojumam ar tukšgaitas raksturlīkni, iegūst reaktīvo trīsstūri abc.

Neatkarīgas ierosmes (svešierosmes) ģeneratora vienādojumi

1. EDS vienādojums *E =* *cE·*Ф*·n.*

Parasti ģeneratora enkuru griež ar konstantu ātrumu *n*. Magnētisko plūsmu Ф vajadzības gadījumā regulē ar reostatu ierosmes ķēdē.

2. Momenta vienādojums 

Momenta vienādojums rāda, ka enkura vārpstai pievadāmais moments *M* (ja magnētisko lauku nemaina Ф = const) atkarīgs no strāvas *Ie*, ar kādu ģeneratoru slogo.

3. Sprieguma vienādojums



Sprieguma vienādojums rāda, ka slodzes strāvu palielinot spriegums uz ģeneratora spailēm samazinās.

4. Strāvu vienādojums *I = Ie*.

No shēmas (2.42. att.) redzams, ka ierosmes strāva neatkarīga no enkura strāvas, bet enkura ķēdē un ārējā ķēdē plūst viena un tā pati strāva *I*.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.45. att. Neatkarīgas ierosmes ģeneratora  slodzes raksturlīkne |

***1.1. piemērs.*** Aprēķināt neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas mašīnas, kurā darbojas ģeneratora režīmā, enkura EDS un elektromagnētisko bremzējošo momentu, ja mašīnas polu skaits 2*p* = 6, enkura rotācijas frekvence n = 750 min-1, enkura tinuma aktīvo vadu skaits N = 500 un paralēlo zaru skaits 2*a* = 6, bet polu magnētiskā plūsma Ф = 0,05 Wb, strāva enkura ķēdē *Ie* = 16 A. Atrisinājums.

1. Enkura EDS



2. Elektromagnētiskais bremzējošais moments



***1.2. piemērs***. Aprēķināt spriegumu uz ģeneratora spailēm un konstruēt tā ārējo raksturlīkni, ja neatkarīgas ierosmes ģeneratora EDS *E* = 120 V, enkura ķēdes pretestība *Re* = 0,1 Ω un, slodzei izmainoties, strāva enkura ķēdē izmainās sekojoši: 0; 50; 100 A.

Atrisinājums.

1. Ģeneratora spriegums, izmainoties slodzei

*U*0 = *E – Ie*0*·Re* = 120 - 0·0,1 = 120 V.

*U*1 = *E – Ie*1*·Re* = 120 - 50·0,1 = 115 V.

*U*2 = *E – Ie*2*·Re* = 120 - 100·0,1 = 110 V.

2. Izmantojot 1. punktā aprēķinātos lielumus, konstruē ārējo raksturlīkni *U* = *f*(*Ie*)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.46. att. Neatkarīgas ierosmes ģeneratora  ārēja raksturlīkne |

***1.3. piemērs.*** Aprēķināt līdzstrāvas ģeneratora EDS pie nemainīgas magnētiskas plūsmas (Ф = const), ja palielinot enkura rotācijas frekvenci 1,5 reizes, tā EDS palielinājās par 110 V.

Atrisinājums.

1. Sākotnējais enkura EDS: 

2. Enkura EDS, palielinot rotācijas frekvenci 1,5 reizes (*E* + 110) = *cE·*1,5*·n·*Ф.

3. Izdalot 2. vienādojumu ar 1. vienādojumu, iegūst  no kurienes 

**2.9.2. Līdzstrāvas paralēlās ierosmes (pašierosmes) ģenerators**

Paralēlās ierosmes ģeneratora, kuru sauc arī par šunta ģeneratoru, slēguma shēma dota 2.47. at­tēlā. Ģeneratora ierosmes tinumu, kas pieslēgts paralēli enkuram, baro pats ģenerators. Enkura strāva *Ie = I + Iie*., kur *I* – slodzes strāva.

Ierosmes tinuma spoles izgatavotas ar lielu vijumu skaitu no maza šķērsgriezuma vada. Tāpēc ierosmes tinumam ir relatīvi liela pretestība un ierosmes strāva *Iie* normālā darba režīmā daudzkārt mazāka par enkura strāvu (*Iie* = (0,01…0,05)*Ie*).

Ar primāro dzinēju griežot paralēlās ierosmes ģeneratora en­kuru, ģenerators pats ierosinās, t. i., ierosmes tinums rada mašīnas darbībai nepieciešamo galveno magnētisko plūsmu Φ bez ārēja līdzstrāvas avota.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

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

Pašierosināšanās pamatā ir paliekošais magnētisms mašī­nas polos. Paliekošā magnētisma plūsma Φ*pal* ir 2—3% no gal­venās plūsmas Φ pilnās vērtības.

Ģeneratora pašierosināšanās process noris pirms slodzes pieslēgšanas, t. i., tukšgaitas režīmā, sekojoši.

Griežot ģeneratora enkuru, tā tinuma vadi šķeļ paliekošā magnētisma plūsmu Φ*pal*, tādēļ enkurā inducējas neliels EDS *Epal*, kas ierosmes ķēdē rada nelielu ierosmes strāvu *Ii*0, kura savukārt rada papildu magnētisko plūsmu Φ*i*0. Mašīna pati var ierosināties tikai tad, ja ierosmes tinums pievienots enkura tinumam tā, ka ierosmes strāvas *Ii*0 radītā magnētiskā plūsma Φi0 pastiprina pa­liekošā magnētisma plūsmu Φ*pal*. Tad summārā plūsma Φ*pal* + Φ*i*0 rada jau lielāku enkura EDS, un tā rezultātā palielinās ierosmes strāva un pastiprinās polu plūsma. Bet lielāka magnētiska plūsma rada enkurā lielāku EDS un arī lielāku ierosmes strāvu utt. Pašierosināšanās process turpinās, kamēr EDS sasniedz vērtību E (2.47. att. *b*), kura atbilst ģeneratora tukšgaitas raksturlīknes krustpunktam K ar taisni

*E = Iie*(*Re + Rie + Rr*), (2.20)

kur *Rie* — ierosmes tinuma pretestība;

*Rr* — ierosmes ķēdes reostatam ieregulēta pretestība. Šī taisne ir jo stāvāka, jo lielāka ierosmes ķēdē ieslēgtā pre­testība *Rr*.

Tātad, jo lielāka ierosmes ķēdē ieslēgta pretestība *Rr*, jo mazāks ģeneratora tukšgaitas EDS. Bet EDS samazināšana iespē­jama tikai līdz noteiktai vērtībai *Emin* (punkts M), t i., līdz noteiktai vērtībai *Emin* (punkts M), t i., līdz tukšgaitas raksturlīknes *E = f*(*Iie*) taisnā posma sākumam, kad minēta taisne sakrīt ar raksturlīknes *E = f*(*Iie*) taisno posmu.

EDS minimālajai vērtībai *Emin* atbilstošo pretestības *Rr* vērtību sauc par kritisko pretestību *Rkr*:

 (2.27)

Pašierosināšanas nav iespējama, ja *Rr > Rkr*. Ja regulēšanas reostatu pilnīgi izslēdz (*Rr* = 0), tad ierosmes strāva sasniedz vis­lielāko vērtību *Iie max* un enkura tinuma inducējas maksimāli iespē­jamā EDS vērtība *Emax*.

Tādējādi ar ierosmes ķēdē ieslēgto reostatu *Rr* var regulēt pa­ralēlas ierosmes ģeneratora EDS robežās *Emin ≤ E ≤ Emax*.

Redzam, ka pašierosmes ģeneratoru EDS resp. sprieguma *U* regulēšanas iespējas ir stipri šaurākas nekā svešierosmes ģene­ratoriem.

*Tukšgaitas raksturlīkni* *E = f*(*Iie*) paralēlās ierosmes ģeneratoram uzņem tāpat ka svešierosmes ģeneratoram (*I* = 0 un *n* = const), mainot ar regulēšanas reostatu *Rr* ierosmes strāvu. Tā ka ierosmes strāva nepārsniedz 1—5% no ģeneratora nominālās strāvas, tad ar paralēlo ierosmi uzņemtās tukšgaitas raksturlīknes forma praktiski neatšķiras no svešierosmes ģeneratora tukš­gaitas raksturlīknes (2.48. att.)

*Ārējo raksturlīkni* *U = f*(*I*) uzņemot (2.49. att.), ģeneratoru pakā­peniski slogo, nemainot ierosmes ķēdes pretestību (*Rr* = const un *n* = const).

Paralēlās ierosmes ģeneratora spriegums *U*, palielinot ģene­ratora slodzi *I* no nulles līdz nominālajai vērtībai *IN*, samazinās ievērojami straujāk nekā svešierosmes ģeneratoram (2.49. att.): normāli slogotiem ģeneratoriem ar papildpoliem sprieguma sa­mazinājums ir (8—15)%*UN*, bet bez papildpoliem — (12—18)%*UN*.

Ģeneratora, spriegums *U = E — IeRe* slodzei pieaugot, samazinās trīs iemeslu dēļ: a) palielinās sprieguma kritums enkura ķēdē *IeRe*; b) pastiprinoties enkura reakcijai, samazinās ģeneratora EDS E un c) samazinoties spriegumam *U* divu pirmo faktoru ietekmē, sama­zinās ierosmes strāva  un tādēļ vel samazinās ģeneratora EDS, kas papildus samazina sprie­gumu U.

Ja nepārtraukti samazina ģene­ratora slodzes pretestību *Rsl*, tad slo­dzes strāva *I* pieaug arvien lēnāk, jo spriegums *U* samazinās aizvien straujāk.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.48. *att.* Pašierosmes raksturlīkne | 2.49. *att.* Paralēlas ierosmes ģeneratora ārējā raksturlīkne |

Tad, kad ģeneratora sprieguma samazināšanās ātrums sasniedz slodzes pretestības *Rsl* samazināšanās ātrumu, slodzes strāva *I* ir sasniegusi maksimāli iespējamo vērtību, ko sauc par kritisko strāvu *Ikr*. Parasti *Ikr* = (2—2,5)*IN*, jo, pieaugot strāvai *I*, pa­stiprinās ģeneratora magnētiskas ķēdes atmagnetizēšanās (pastip­rinās enkura reakcija un samazinās ierosmes strāva *Iie*), un ma­šīna pāriet nepiesātinātā stāvoklī, kurā neliela ierosmes strāvas samazināšanās ievērojami samazina ģeneratora EDS (2.47. b att.).

Vēl tālāk samazinot slodzes pretestību *Rsl* ģeneratora sprie­gums *U* samazinās straujāk nekā slodzes pretestība, un tādēļ slodzes strāva *I* samazinās. Līdz ar to spriegums *U* samazinās līdz nullei (ar pārtraukto līniju zīmētais raksturlīknes posms 2.49. attēlā atbilst ģeneratora nestabilai darbībai). Bet, ja ģene­ratora spriegums *U* = 0, tad arī ierosmes strāva *Iie* = 0, un ģenera­tors darbojas stacionārā īsslēguma režīmā: enkura ķēde plūst stacionāra īsslēguma strāva *Ik*, kura parasti ir mazāka par ģene­ratora nominālo strāvu *IN*. Īsslēguma strāvu *Ik* uztur paliekoša magnētisma inducētais enkura EDS. Tādēļ paralēlas ierosmes ģeneratoriem nav bīstams īsslēguma režīms, kas iestājas *I* un *U* lēnu izmaiņu rezultātā.

Tomēr pēkšņs īsslēgums enkura ārējā ķēdē paralēlās ierosmes ģeneratoru apdraud ne mazāk kā svešierosmes ģeneratoru, jo ģe­neratora magnētiska ķēde nespēj momentāni atmagnetizēties, un tādēļ, pastāvot ievērojami lielam enkura EDS, enkura strāva ļoti īsā laika sprīdī sasniedz vērtību, kas 8—12 reizes lielāka par nominālo. Šī strāva bīstama kolektoram (izraisa spēcīgu dzirk­steļošanu, kas var pāriet riņķveida ugunī) un pakļauj ģeneratora vārpstu bīstami lielam bremzējošam momentam.

Ģeneratorus pret īsslēguma strāvām un lielam pārslodzēm [(1,5—2,0)*IN*] aizsargā ar kūstošajiem drošinātajiem vai ar citiem aparātiem.

Regulēšanas raksturlīkne *Iie = f*(*I*) paralēlās ieros­mes ģeneratoram praktiski neatšķiras no svešierosmes ģeneratora regulēšanas raksturlīknes. Slogotam ģeneratoram uztur U = const, mainot ierosmes strāvu ar ierosmes ķēdē ieslēgto regulēšanas reostatu.

Paralēlās ierosmes ģeneratorus lieto tur, kur nav krasu slo­dzes izmaiņu.

Tādējādi ģeneratora pašierosmes process iespējams, izpildot šādus nosacī­jumus:

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

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

*Ģeneratora vienādojumi.* EDS, momenta un enkura ķēdes sprieguma vienādojumi ir tādi paši, kā svešierosmes ģeneratoram

*E =* *cE·*Ф*·n.*





*Strāvu vienādojums*. No shēmas (2.47. att.) redzams, kā vislielākā ir enkura strāva *Ie*: tā sadalās divas nevienādās strāvas



Pie pietiekami lielas slodzes strāvas ierosmes strāvas vērtība ir tikai daži procenti no enkura strāvas.

***1.4. piemērs.*** Paralēlās ierosmes ģeneratora nominālais spriegums *UN* = 220 V, nominālā slodzes pretestība *RN* = 5,5 Ω, enkura tinuma pretestība *Re* = 0,5 Ω, paralēlās ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 110 Ω, enkura nomināla rotācijas frekvence *nN* = 1460 min-1.

Aprēķināt ģeneratora EDS, primārā dzinēja griezes momentu, ģeneratora jaudas zudumus enkurā un ierosmes tinumos, ģeneratora lietderības koeficientu, ja tā summārie jaudas zudumi sastāda Δ*P* = 2,2 kW.

Atrisinājums.

1. Slodzes nominālā strāva



2. Strāva ierosmes tinumā



3. Strāva enkura ķēdē



4. Ģeneratora EDS



5. Ģeneratora elektromagnētiskā jauda



6. Ģeneratora atdota (lietderīgā) jauda



7. Primārā dzinēja jauda, kas nepieciešama ģeneratora enkura griešanai



8. Primārā dzinēja nepieciešamais griezes moments



9. Ģeneratora lietderības koeficients



10. Jaudas zudumi enkurā *Pe* un ierosmes tinumā *Pie*





***1.5. piemērs.*** Paralēlās ierosmes ģeneratora spriegums *UN* = 230 V pie slodzes *I* = 200 A. Aprēķināt strāvu enkura ķēdē un ģeneratora atdoto jaudu, ja ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 40 Ω.

Atrisinājums.

1. Strāva ierosmes tinumā 

2. Strāva enkura ķēdē 

3. Ģeneratora atdotā jauda *P*2 = *U·I* = 230·200 = 46000 W = 46 kW.

**2.9.3. Virknes ierosmes ģenerators**

Virknes ierosmes ģeneratorā, ko sauc arī par sērijas ģeneratoru, ierosmes tinumam ir nedaudz vijumu, un tie uztīti ar liela šķērsgriezuma vadiem. Virknes ierosmes ģeneratora ierosmes tinums pievienots vir­knē enkura tinumam, un tādēļ *I = Ie = Iie*.

Tukšgaitas un īsslēguma raksturlīknes virknes ierosmes ģeneratoram uzņem, saslēdzot svešierosmes shēmu. Šo raksturlīkņu veids ir tāds pats kā svešierosmes ģeneratora raksturlīknēm. Regulēšanas raksturlīkni šiem ģeneratoriem neuzņem.

Uzņemot ārējo raksturlīkni *U = f*(*I*) (2.50. att.), ne­var izpildīt noteikumu *Iie* = const, jo ierosmes strāva mainās līdz ar slodzi. Sākot slogot ģeneratoru, tā magnētiskā plūsma Φ, EDS un spriegums *U = E – IeRe – IeRie = E - I*(*Re + Rie*) pieaug lineāri, jo mašīna tad ir magnētiski nepiesātināta.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.50. att. Virknes ierosmes ģenerators: *a* – shēma; *b* - ārējā rakstur­līkne.

Tālāk palielinot slodzi, mašīnas magnētiska sistēma sāk piesātināties, tādēļ ģeneratora magnētiskās plūsmas Φ pieaugums kļūst aizvien mazāks. Bet, tā kā enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pastiprinās un sprie­guma kritums enkura ķēdē *I*(*Re + Rie*) palielinās, tad ģeneratora spriegums sāk samazināties. Tāda virknes ieros­mes ģeneratoru ārējā raksturlīkne iz­slēdz iespēju tos izmantot līdzstrāvas patērētāju barošanai, kuri normālā re­žīma strādā ar nemainīgu spriegumu. Tāpēc šos ģeneratorus praksē izmanto ļoti reti, tikai speciālām vajadzībām, piemēram, elek­triski bremzējot virknes ierosmes dzinēju, kas bremzēšanas laikā darbojas ģeneratora režīmā.

**2.9.4. Līdzstrāvas jauktās ierosmes ģenerators**

Jauktās ierosmes ģeneratoriem, kurus sauc arī par kompaund – ģeneratoriem, ir divi ierosmes tinumi, kas slēgti enkura tinu­mam virknē un paralēli (2.51. att. a). Mašīnas plūsmu galvenokārt nodrošina para­lēlais tinums, bet virknes tinums, kas slēgts saskaņoti ar paralēlo (to radītās plūsmas sakrīt), kalpo ārējās raksturlīknes stingruma palielināšanai.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.51. *att.* Jauktas ierosmes ģeneratora shēma (*a*) un ārējās raksturlīknes (*b*)

EDS, momenta un enkura ķēdes sprieguma vienādojumi ir tādi paši, kā svešierosmes ģeneratoram

*E =* *cE·*Ф*·n.*





Strāvu vienādojums. No shēmas (2.51. att.) redzams, kā vislielākā ir enkura strāva *Ie*: tā sadalās divas nevienādās strāvas



Tukšgaitā ģeneratorā darbojas tikai paralēlās ierosmes tinums, jo *I* = 0. Pieslē­dzot slodzi, virknes ierosmes tinumā arī plūst strāva, kura uzmagnetizē mašīnu un pilnīgi kompensē enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību un sprieguma kritumu enkura ķēdē. Ārējās raksturlīknes stingrums pieaug (līkne 1 2.51. attēlā *b*). Tādē­jādi var panākt, lai spriegums uz ģeneratora spailēm būtu gandrīz nemainīgs.

Ja nepieciešams kompensēt vēl sprieguma kritumu līnijā līdz patērētājiem, to panāk, vēl 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 atmagnetizējošo darbību attiecībā pret paralēlās ierosmes tinumu.

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

***1.6. piemērs.*** Aprēķināt jauktas ierosmes ģeneratora EDS, ja ģeneratora nominālais spriegums *UN* = 110 V, ierosmes strāva *Iie* = 2 A, enkura tinuma pretestība *Re* = 0,25 Ω, virknes ierosmes tinuma pretestība *Riev* = 0,15 Ω un nominālā slodzes strāva *IN* = 30 A.

Atrisinājums.

1. Strāva enkura ķēdē



2. Ģeneratora EDS



***1.7. piemērs.*** Konstruēt līdzstrāvas ģeneratora regulēšanas raksturlīkni, ja tā spriegums *U* = 110 V, enkura ķēdes pretestība *Re* = 1 Ω, enkura ķēdes strāva izmainās no 0 līdz 30 A un ģeneratora tukšgaitas raksturlīkne attēlota 2.52. attēlā.

Atrisinājums.

1. Ģeneratora EDS 

Ievietojot šajā vienādojumā enkura ķēdes strāvas un pretestības vērtības aprēķina EDS vērtības. Pēc tam no tukšgaitas raksturlīknes, katrai aprēķinātai EDS vērtībai nosaka atbilstošas ierosmes strāvas vērtības un rezultātus apkopo 2.1.tabulā

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.52. att. Ģeneratora tukšgaitas raksturlīkne |

2.1. tabula

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *Ie*, A | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| *E*, V | 110 | 115 | 120 | 125 | 130 | 135 | 140 |
| *Iie*, A | 0,2 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,3 | 0,35 | 0,4 |

2. Pēc iegūtajiem datiem konstruē ģeneratora regulēšanas raksturlīkni *Iie = f*(*Ie*)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.53. att. Ģeneratora regulēšanas  raksturlīkne |

**2.10. LĪDZSTRĀVAS DZINĒJS**

**2.10.1. Vispārīgi norādījumi**

Jebkura elektriskā mašīna ir apgriežama, 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 bremzējošs, kā tas bija ģeneratorā, bet sakrīt ar rotācijas virzienu (2.54. att.).

Dzinēja darbības laikā tā enkurs griežas magnētiskā laukā. Tāpēc tā tinumā in­ducējas EDS *Ee*, kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma. Dzinējā šis EDS vērsts pretī enkura strāvas *Ie* virzienam, un tāpēc bieži to sauc arī par pret-EDS (2.55. att.).

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

*U = Ee + Ie·*∑ *R*. (2.28)

|  |  |
| --- | --- |
| 2.54. *att.* Līdzstrāvas mašīnas darbība ģeneratora (a) un dzinēja (b) režīmā | 2.55. *att.* Elektrodzinēja EDS darbības virziens |

No izteiksmes (2.28) iegūstam

 (2.29)

Reizinot vienādojuma (2.28) abas puses ar *Ie*, iegūstam jaudas vienādojumu

 (2.30)

kur *U·Ie* — enkura ķēdei pievadītā jauda;

 — elektriskie zudumi enkura ķēdē.

Lielumu *Ee·Ie* var pārveidot šādi:

 vai 

Saskaņā ar momenta vienādojumu *M = cM*Φ*Ie*



tad

 (2.31)

kur *ω =* 2*πn*/60 — enkura leņķiskā rotācijas frekvence;

*Pem* — dzinēja elektromagnētiskā jauda.

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

Ņemot vērā (2.25), izteiksmi (2.24) var pārveidot

 (2.32)

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

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 (2.41. att.).

**2.10.2. Dzinēja momentu vienādojums**

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

• elektromagnētiskais moments M;

* tukšgaitas moments M0, 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 M2, kas tiek pielikts darba mehānismam;
* dinamiskais moments MD, kas rodas vārpstas rotācijas frekvences izmaiņas dēļ un to nosaka pēc formulas

 (2.33)

kur J — visu rotējošo daļu kopējais inerces moments. Līdzstrāvas dzinēja momentu vienādojums ir šāds

M = M0 + M2 ± MD, (2.34)

vai

*M = Mst ± MD*, (2.35)

kur Mst = M0 + M2.

Rotācijas frekvencei pieaugot, dinamiskais moments summējas ar statisko mo­mentu Mst, bet, frekvencei samazinoties, moments MD darbojas pretī momentam Mst.

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

M = M0 + M2 = Mst , (2.36)

t.i., dzinēja stacionārā režīmā momenti M un Mst līdzsvaro viens otru. Dzinēja griezes momentu var noteikt pēc formulas *M = cM*Φ*Ie* . Turklāt moments ir proporcionāls elektromagnētiskai jaudai, tāpēc

 (2.37)

Ja formulā (2.37) jauda izteikta vatos (W) un rotācijas frekvence apgriezienos minūtē (min-1), tad momenta mērvienība ir ņūtonmetrs (N·m). Lietderīgā momenta vērtību nosaka analoģiski

 (2.38)

kur P2 — dzinēja lietderīgā jauda.

**2.10.3. Dzinēja rotācijas frekvence**

No EDS formulas *Ee = cen*Φ redzams, ka dzinēja rotācijas frekvence

 (2.39)

Ņemot vērā *Ee* izteiksmi, no (2.22) iegūstam

 (2.40)

No formulas (2.40) 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 plūsmu Φ, pieaug starpība *U - Ee*. Tas savukārt izraisa strāvas *Ie* palielināšanos. Tāpēc palielinās griezes moments un, ja dzinēja slodze ir nemainīga, pieaug arī dzinēja ro­tācijas frekvence.

No formulas (2.40) izriet, ka dzinēja rotācijas frekvenci var regulēt, mainot sprie­gumu U, plūsmu Φ vai enkura ķēdes pretestību .

Dzinēja rotācijas virzienu nosaka plūsmas Φ 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.

|  |
| --- |
|  |

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

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

M = Mst. (2.41)

Tomēr stabils darbs iespējams tikai noteiktos apstākļos. Ilustrācijai 2.56. attēlā parādītas raksturlīknes M = f(n) un Mst = f(n). Šo līkņu krustpunkts (M = Mst) 2.56. attēlā (a) atbilst stabilam darbam. Ja īslaicīgas iedarbes rezultātā rotācijas frekvence mainās, piemēram, no n uz n', vienādība (2.41) tiek izjaukta un bremzējošais mo­ments  kļūst lielāks par dzinēja momentu M'. Tāpēc rotācijas frekvence sama­zinās līdz tādai vērtībai n, kad M = Mst.

Analoģiski procesi notiek, ja rotācijas frekvence samazinās līdz vērtībai  un enkurs saņem paātrinājumu, kas atgriež dzinēju iepriekšējā režīmā. Tādējādi aplū­kojamā gadījumā dzinēja darbība ir stabila.

Ja dzinēja un darba mehānisma raksturlīknes atbilst 2.56. attēlā (b) parādītajām, tad dzinēja darbība ir nestabila. Tiešām, ja rotācijas frekvence īslaicīgas iedarbes rezultātā mainās no n uz n', moments M' izsauks vēl tālāku frekvences palieli­nāšanos. Ja rotācijas frekvence mainās no n uz n", tad bremzējošais moments iz­sauks vēl lielāku frekvences samazināšanos. Tātad šādos apstākļos dzinēja darbība ir nestabila.

Vispārīgā gadījumā stabils darbs ir tad, ja tiek izpildīts nosacījums

 (2.42)

Parasti šī nosacījuma izpildei nepieciešams, lai, pieaugot rotācijas frekvencei, dzinēja moments samazinātos (2.56. att., a).

**2.10.4. Dzinēja palaišana**

Dzinēja enkura tinuma strāvu nosaka kā



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

 (2.43)

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 pārsniedz nominālo 10 - 50 reižu.

Tik liela palaišanas strāva ir visai bīstama. Pirmkārt, tā mašīnā var izsaukt elek­trisko loku uz kolektora, otrkārt, rodas palielināts griezes moments, kurš triecienveidīgi 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 (2.57. att.). Pirms palaišanas reostatam iestāda maksimālo pretestību Rpmax. Tad palaišanas strāva rotācijas frekvencei pieaugot, palie­linās arī pret-EDS, bet enkura strāva sa­mazinās. Tāpēc palaišanas reostata pre­testību pakāpeniski samazina, novedot līdz Rp = 0. Citādi šajā reostatā tiks patē­rēts ievērojams enerģijas daudzums un dzinēja lietderīgā jauda samazināsies.

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

Tā kā dzinēja elektromagnētiskais moments proporcionāls plūsmai Ф, tad, lai sekmētu rotora atraku iegriešanos, paralēlas un jauktas ierosmes dzinēju regulēšanas reostatus pirms palaišanas izved uz nulli (*Rreg* = 0). Plūsma šādā gadījumā ir maksimāla un dzinējs rada vajadzīgo momentu ar mazāku enkura strāvu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.57. att. Palaišanas reostata ieslēgšanas  shēma |

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

Atslēdzot dzinēju no tīkla, jārūpējas, 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.

**2.10.5. Paralēlās ierosmes dzinējs**

Paralēlas ierosmes dzinēja shēma parādīta 2.58. attēlā. Reostats *Rr* ierosmes ķēdē kalpo dzinēja rotācijas frekvences regulēšanai. Tā, samazinot reostata *Rr* pre­testību, ierosmes strāva un plūsma Φ pieaug, bet enkura rotācijas frekvence sama­zinās. Palielinot *Rr* pretestību, rotācijas frekvence palielinās.

Dzinējam slodze ir mehāniska rakstura un shēmā tā, protams, neparadās. Toties dzinēja shēmā ir jāparāda līdzstrāvas avots ar spriegumu *U*. Dzinēja ķēdē vienmēr ir jāparedz palaišanas reostats ar pretestību *Rp*. Ierosmes ķēdē ir paralēlas ierosmes tinums ar pretestību *Rie* un reostats *Rr* magnētiskās plūsmas regulēšanai. Ierosmes ķēde pieslēgta paralēli enkura ķēdei.

Apzīmējot elektriskos lielumus, sāk ar spriegumu *U*. Tā virziens nosaka visu trīs strāvu virzienus. Dzinēja enkurā elektriskā enerģija pārveidojas mehāniskajā, tāpēc EDS virziens shēmā pretējs strāvas virzienam. Šādu EDS pieņemts saukt par pret-elektrodzinējspēku (pret-EDS).

Dzinēju palaiž, izmantojot palaišanas reostatu ar pretestību *Rp*, kuru slēdz virknē ar enkura tinumu. Palaišanas sākuma momentā *Rp* = max un summārā enkura ķēdes pretestība ir *Re + Rp*. Kad dzinējs ir sasniedzis apmēram nominālo rotācijas frekvenci palaišanas reostatu izslēdz (*Rp* = 0).

Jāatceras, ka palaišanas momentā ierosmes ķēdes reostatam *Rr* jābūt izslēgtam (*Rr* = 0).

Izmainot ierosmes ķēdes reostata pretestību *Rr* regulē enkura rotācijas frekvenci. Tā, piemēram, samazinot pretestību *Rr*, palielinās ierosmes ķēdes strāva *Iie*, resp., palielinās galveno polu magnētiskā plūsma Φ un samazinās enkura rotācijas frekvence. Turpretim, palielinot *Rr* dzinēja rotācijas frekvence palielinās.

2.59. attēlā parādītas divas dzinēja raksturlīknes *n = f* (*Iie*), ja *I < IN* un *I = IN* = const. Otrā līkne novietojas zemāk par pirmo līkni tāpēc, ka, ja *I = IN*, sprieguma kritums enkura ķēdē vairāk ietekmē rotācijas frekvenci nekā enkura rotācijas atmagnetizējošā darbība. Tomēr ar mazākām ierosmes strāvas vērtībām līknes sākumā krustojas punktā a un tālāk līkne 2 novietojas augstāk nekā līkne 1. Tas izskaidrojams ar to, ka ar mazām ierosmes strāvām arī plūsma ir maza un enkura rotācijas atmagnetizējošā darbība, ja *I = IN*, rotācijas frekvenci ietekmē stiprāk nekā sprieguma kritums enkura ķēdē.

|  |  |
| --- | --- |
| 2.58. *att.* Paralēlas ierosmes dzinēja shēma | 2.59. *att.* Paralēlas ierosmes dzinēja  regulēšanas raksturlīkne |

No 2.59. attēlā parādītām raksturlīknēm redzams, ka, pārtraucot ierosmes tinumu (*Iie* = 0), dzinēja rotācijas frekvence strauji pie­aug, un tas sāk joņot. Šāds režīms nav pieļau­jams.

Dzinēja ekspluatācijas īpašības nosaka tā darba raksturlīknes *n*, *I*, *M*2, *M = f*(*P*2), kas uzņemtas, ja *U* = const, *Iie* = const (2.60. att.).

Ātruma raksturlīknes *n* = *f*(*P*2) paskaidrošanai var izmantot formulu (2.40)

 (2.44)

no kuras redzams, ka, ja *U* = const, rotācijas frekvenci nosaka divi faktori: sprie­guma kritums *Ie*·Σ*R* un plūsma Φ*.* Palielinot slodzi, samazinās skaitītājs *U - Ie·*Σ*R*, turklāt enkura reakcijas dēļ samazinās arī plūsma Φ. Parasti pirmais faktors darbojas spēcīgāk un, pieaugot slodzei, dzinēja rotācijas frekvence krītas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.60. att. Paralēlas ierosmes dzinēja darba  raksturlīknes |

Ja enkura reakcija dzinējā jūtami samazina plūsmu Φ, tad, pieaugot slodzei, rotā­cijas frekvence var arī pieaugt (raustītā līnija 2.60. attēlā). Šāds gadījums parasti nav pieņemams no stabilitātes viedokļa.

Lai iegūtu krītošu raksturlīkni *n = f*(*P*2), paralēlas ierosmes dzinējos izveido ne­lielu virknes ierosmes tinumu, ko sauc par stabilizējošo tinumu. Šāds tinums, ja tas slēgts saskaņoti ar paralēlās ierosmes tinumu, kompensē enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību, un plūsma Φ paliek praktiski nemainīga.

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

 (2.45)

kur *n*0 — rotācijas frekvence tukšgaitā.

Parasti paralēlas ierosmes dzinējiem Δ*n* nepārsniedz 2-8%, un raksturlīkne *n* = *f* (*P*2) ir cieta.

Griezes momenta M2 atkarību no jaudas P2 nosaka formula (2.38). 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 izteiksmes (2.36) seko, ka elektromagnētiskais moments

*M = M*0 + *M*2.

Tā kā darba raksturlīknes uzņem apstākļos, kad *Iie* = const, arī magnētiskie zu­dumi ir nemainīgi un *M*0 = const.

Tāpēc grafiks *M = f*(*P*2) iet paralēli līknei *M*2 = *f*(*P*2). Ja pieņem, ka Φ = const, tad grafiks *M*2 = *f* (*P*2) vienlaikus ataino arī sakarību *Ie = f* (*P*2), jo

*M = cM∙Φ∙Ie*. (2.46)

Dzinēja mehānisko raksturlīkni apraksta vienādojums (no formulām (2.36) un (2.38)):

 (2.47)

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

No izteiksmes (2.46) un (2.47) 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, dzinēja rotācijas frekvenci var sama­zināt (2.61. att. a). Dabiskā raksturlīkne (ja *Rp* = 0) ir samērā „cieta”: slodzi mainot no tukšgaitas līdz nominālajai, griešanas ātrums samazinās parasti ne vairāk, kā 2…8%. Uz mākslīgajām raksturlīknēm (ar *Rp*) tukšgaitas ātrums neizmainās, bet ātruma samazināšanās noslodzes dēļ ir vairāk izteikta. Šis paņēmiens ļauj regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā. Tomēr tas ir visai neekonomisks, jo nepieciešams relatīvi lielas jaudas reostats, kurš jāparedz ilgstošam darbam, un regulēšana ir saistīta ar ievērojamiem enerģijas zudu­miem reostatā, kurā plūst visa enkura strāva.

Rotācijas frekvences regulēšanu, mainot magnētisko plūsmu Φ, paralēlas ieros­mes dzinējam realizē, ieslēdzot reostatu *Rr* ierosmes ķēdē. Tad, palielinot šī reostata pretestību, ierosmes strāva un arī plūsma samazinās, bet rotācijas frekvence pieaug. Ja ierosmes strāva *Iie* kļūst ļoti maza vai robežgadījumā, pārtraucot ķēdi, *Iie* = 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.

Mainot plūsmu Φ, attiecīgi mainās mehāniskās raksturlīknes (2.61. att., b). Tā, samazinot plūsmu līdz vērtībai Φ, pieaug tukšgaitas rotācijas frekvence n02 un izmainās raksturlīknes slīpums (taisne 2). Regulēšanas diapazons šajā gadījumā ir  Turklāt rotācijas frekvences apakšējo robežu nosaka mašīnas piesātinājums, bet augšējo — dzirksteļošana uz kolektora un joņošanas draudi.

Apskatītais rotācijas frekvences regulēšanas paņēmiens, mainot plūsmu, 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 (*Iie =* const), t.i., atsevišķi barojot enkura un ierosmes tinumu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |
| ***c*** | 2.61. att. Paralēlas ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlīknes: *a* — ieslēdzot enkura ķēdē papildpretestību; *b* — mainot magnētisko plūsmu; *c* — mai­not enkuram pievadīto spriegumu |

Dzinēja tukšgaitas rotācijas frekvence *n*0 ir proporcionāla barošanas spriegumam *U*. Tā­pēc tā mehānisko raksturlīkņu slīpums pret abscisu asi dažādiem spriegumiem nemainās, un raksturlīknes pārvietojas paralēli sev (2.61. 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 > UN* 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 nmax/nmin ≥ 25. Maksimālo rotācijas frekvenci šajā gadījumā ierobežo komutācijas ap­stākli, 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 (impulsregulēšanu). 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.

Impulsu pārveidotājs (2.62. att.) sastāv no ieejas filtra L, C, atpakaļdiodes D un in­duktivitātes L. Laika sprīdī τ, kad elektroslēdzis ir noslēgts (tranzistors vai tiristors atvērts) barošanas spriegums U un enkura strāva ia pieslēgta enkura tinumam (2.62. att., b).

Laikā, kad tranzistors vai tiristors ir at­vērts, strāva ia turpina plūst caur sprostdiodi D. Impulsu sekošanas frekvence no­minālos darba režīmos parasti ir no 200 līdz 400 Hz. Tāpēc perioda ilgums T aptuveni par divām kārtām ir mazāks par enkura ķē­des laika konstanti un strāva ia impulsa laikā τ nespēj jūtami pieaugt un pauzes laikā (T-τ) jūtami samazināsies.

Vidējo spriegumu, ko padod uz dzi­nēju, vienkāršoti nosaka kā



kur *α* — sprieguma regulēšanas koeficients.

Sprieguma Uvid vērtību var regulēt, mainot impulsu perioda T ilgumu (impulsu frekvenčregulēšana) vai mainot laiku τ (impulsu platuma regulēšana), vai arī mainot gan T, gan τ.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

2.62. att. Līdzstrāvas dzinēja rotācijas frekvences regulēšana ar impulsmetodi:

*a* — elektriskā shēma; b — strāvas un sprie­guma izmaiņas grafiki

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

**2.10.6. Paralēlas ierosmes dzinēja vienādojumi**

1. EDS vienādojums *E =* *cE·*Ф*·n.*

Dzinēja EDS proporcionāls griešanās ātrumam *n*. Palaišanas režīmā (kamēr *n* = 0) *E* = 0.

2. Momenta vienādojums 

Normālos apstākļos ierosmes strāvu nemaina, tāpēc magnētiskā plūsma Ф = const. No vienādojuma tad seko, ka dzinēja strāvu nosaka slodzes moments *M* (un nevis palaišanas pretestība enkura ķēdē, kā varētu domāt). No vienādojuma redzams arī, ka līdzstrāvas dzinēja griešanās virzienu iespējams mainīt, izmainot strāvas virzienu enkura ķēdē *Ie* vai ierosmes ķēdē *Iie* (bet ne abās vienlaicīgi !).

3. Enkura ķēdes sprieguma vienādojums 

Dzinējam spriegums, protams, ir lielāks ar tā darbības rezultātu – EDS.

4. Strāvu vienādojums *I = Ie +Iie*.

No shēmas (2.40. att.) redzams, ka ierosmes strāva nav atkarīga no enkura strāvas. Enkura strāva proporcionāla slodzes momentam. Pie pietiekami lielas slodzes enkura strāva ir daudz lielāka par ierosmes strāvu *I*.

**1.8. *Piemērs***. Četrpolīgai 2*p* = 4 līdzstrāvas mašīnai, kura darbojas dzinēja režīmā, aprēķināt elektromagnētisko griezes momentu un enkura pret-EDS, ja enkura tinuma aktīvo vadu skaits *N* = 360 un paralēlo zaru skaits 2*a* = 2, enkura rotācijas frekvence *n* = 1300 min-1, bet polu magnētiskā plūsma *Φ* = 0,013 Wb un strāva enkura tinumā *Ie* = 90 A.

*Atrisinājums.*

1. Elektromagnētiskais griezes moments



2. Inducētais pret-EDS



**1.9. *Piemērs***. Četrpolīgs 2*p* = 4 līdzstrāvas paralēlas ierosmes dzinējs, kura ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 200 Ω, pieslēgts pie līdzstrāvas tīkla ar spriegumu *UN* = 220 V. Dzinēja enkura rotācijas frekvence *nN* = 1300 min-1, enkura tinuma pretestība *Re* = 0,17 Ω, nomināla strāva *IN* = 90 A, enkura tinuma vijumu skaits *N* = 360, paralēlo zaru skaits 2*a* = 2 un tukšgaitas jaudas zudumi, kas sastāv no zudumiem tērauda un mehāniskiem zudumiem ir *P*0 = *P*t + *Pmeh* = 1040 W. Aprēķināt inducēto pret-EDS, polu magnētisko plūsmu, elektromagnētisko griezes momentu un griezes momentu uz enkura vārpstas, kā arī dzinēja lietderības koeficientu un tukšgaitas momentu.

Atrisinājums.

1. Strāva ierosmes tinuma



2. Strāva enkura tinumā

*Ie = IN – Iie* = 90 – 1,1 = 88,9 A.

3. Enkura tinuma inducētais pret-EDS

*Ei = UN – IeRe* = 220 – 88,9∙0,17 = 204, 9 V.

4. Galveno polu magnētiskā plūsma. Pēc formulas  atrod ka



5. Dzinēja elektromagnētiskais griezes moments



6. Dzinēja elektriskie jaudas zudumi (kas sastāv no jaudas zudumiem enkura tinumā, ierosmes tinumā un divas vara-grafīta kolektora – suku pārejas pretestības)

7. Papildu jaudas zudumi dzinējā

*Pp* = (0,01…0,005)∙*UN∙IN* = 0,01∙220∙90 = 198 W.

8. Summārie jaudas zudumi dzinējā

Δ*P* = *P*0 + *Pel + Pp* = 1040 + 1692 + 198 = 2930 W.

9. Dzinēja jauda uz enkura vārpstas

*P*2 = *P*1 – Δ*P* = *UN∙IN* – Δ*P* = 220∙90 – 2930 = 16870 W = 16,87 kW.

10. Dzinēja lietderības koeficients



11. Dzinēja griezes moments uz enkura vārpstas



12. Dzinēja tukšgaitas režīms

*M*0 = *Mem* – *M*2 = 132,5 – 123,9 = 8,6 N∙m.

***1.10. piemērs***. Paralēlas ierosmes dzinējs pieslēgts līdzstrāvas tīklam ar spriegumu *UN* = 220 V. Dzinēja enkura tinuma pretestība *Re* = 0,1 Ω, enkurā inducētais pret-elektrodzinējspēks *Ei* = 205 V. Aprēķināt strāvu dzinēja enkura ķēdē dzinēja darba režīmā un palaišanas sākuma momentā ar un bez palaišanas reostata, ja tā pretestība *Rp* = 1,0 Ω.

Atrisinājums.

1. Enkura strāva dzinēja darba režīmā



2. Enkura strāva, palaižot bez palaišanas reostata



3. Enkura strāva, palaižot ar palaišanas reostatu



***1.11. piemērs***. Paralēlas ierosmes dzinējs, kura nominālā jauda *PN* = 18,7 kW, lietderības koeficients *ηN* = 0,85, enkura tinuma pretestība *Re* = 0,01 Ω, pieslēgts līdzstrāvas tīklam ar spriegumu *UN* = 220 V. Aprēķināt palaišanas reostata nepieciešamo pretestību, lai palaišanas strāva pārsniegtu nominālo strāvu ne vairāk ka 2,5 reizes.

Atrisinājums.

1. Dzinēja nominālā strāva



2. Palaišanas strāva

*Iep* = 2,5·*IN* = 2,5·100 = 250 A.

3. Palaišanas reostata pretestība



***1.12. piemērs***. Paralēlas ierosmes dzinēja nominālā strāva *IN* = 500 A, enkura tinumā inducētais pret-EDS *Ei* = 210 V, enkura nominālā rotācijas frekvence *nN* = 1450 min-1, ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 50 Ω, lietderības koeficients *ηN* = 89,5 %. Dzinējas pieslēgts līdzstrāvas tīklam ar spriegumu *UN* = 220 V. Aprēķināt strāvu enkura tinumā Ie, jaudas zudumos dzinējā Δ*P* un tā nominālo griezes momentu *MN*.

Atrisinājums.

1. Strāva ierosmes tinumā 

2. Strāva enkura tinumā *Ie = IN – Iie* = 500 – 4,4 = 495,6 A.

3. Enkura tinuma pretestība 

4. Dzinēja patērētā jauda no tīkla *P*1*N* = *UN·IN* = 220·500 = 110000 W = 110 kW.

5. Dzinēja nominālā (lietderīgā) jauda *P*2*N* = *P*1*N*·*ηN* = 110·0,895 = 98,45 kW.

6. Summārie jaudas zudumi dzinējā Δ*P* = *P*1*N* – *P*2*N* = 110 – 98,45 = 11,55 kW.

7. Dzinēja nominālais griezes moments



***1.13. piemērs.*** Zināmi šādi paralēlās ierosmes dzinēja nominālie dati *PN* = 130 kW, *UN* = 220 V, *nN* = 600 min-1, *IN* = 640 A. Sasilušā enkura un papildpolu pretestība *Re* = 0,00725 Ω, bet ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 43,2 Ω. Aprēķināt dzinēja griezes momentu nominālajā režīmā, kā arī dzinēja enkura griešanas ātrumu tukšgaitā. Enkura strāvu neievērot.

Atrisinājums. 1. Strāva enkura tinumā nominālajā režīmā



2. Enkura tinumos inducētais pret-EDS, ja griešanās ātrums ir nominālais

*EiN = UN - Re·IeN* = 220 – 634,9·0,00725 = 215,3 V.

3. Nominālā elektromagnētiskā (patērētā no tīkla) jauda

*P*1*N = EiN·IN* = 215,4·634,9 = 136757 W = 136,8 kW.

4. Nominālajā režīmā attīstītais elektromagnētiskais griezes moments



5. Enkura griešanās ātrums ideālā tukšgaitas režīmā, kad *UN = EN*: Enkura griešanas ātrums nominālā slodzes režīmā  Izmantojot griešanas ātrumu attiecību, iegūsim



**2.10.7. Virknes ierosmes dzinējs**

Šajā dzinējā ierosmes tinums ieslēgts virknē ar enkura tinumu (2.63. att. *a*), un tāpēc magnētiskā plūsma ir atkarīga no slodzes strāvas.

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

*Ф* = *k∙Ie*,

kur k — proporcionalitātes koeficients.

Tādā gadījumā izteiksmi *M = cm·Ф·Ie* var pārrakstīt forma

*M = cM∙k∙Ie∙Ie* = *c'M·Fe*.. (2.48.)

Rotācijas frekvenci šajā gadījumā var noteikt kā

 (2.49.)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

2.63. att. Virknes ierosmes dzinēja shēma (*a*) un virknes ierosmes dzinēja darba raksturlīknes

*M = f* (*Ia*) (*b*) un *n = f*(*Ia*) (*c*): 1 — dabiskā; 2 — mākslīgā

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

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

Dzinēja ātruma raksturlīkne rāda, ka, mainoties dzinēja slodzei, strauji mainās arī tā rotācijas frekvence. Tādējādi, mainot virknes ierosmes dzinēja slodzi, dzinēja grie­šanās ātrums *n* mainās plašās robežās.

Slodzei samazinoties zem 25% no nominālās, dzinējs var sākt joņot. Tas izskaid­rojams ar to, ka tukšgaitā samazinās dzinēja strāva un tātad arī plūsma. Tāpēc vir­knes ierosmes dzinēja 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 (2.49) ievieto strāvu *Ie* no formulas *U = Ee + Ie·*Σ *R*

 (2.50)

Saskaņā ar šo vienādojumu mehāniskās raksturlīknes (2.63. att. c) ir strauji krī­tošas hiperboliskas līknes (mīkstas raksturlīknes). Tādas līknes nodrošina dzinēja stabilu darbu jebkurai mehāniskai slodzei. Dzinēju spēja radīt lielu momentu, kas ir proporcionāls enkura strāvas kvadrātam, ir ļoti svarīga pārslodzes gadījumos, jo, pieaugot slodzei, dzinēja jauda palielinās lēnāk nekā elektromagnētiskais moments. Šī īpatnība kalpo par iemeslu virknes dzinēju plašai izmantošanai transportā, celtņos un dažādās pacelšanas ierīcēs.

Nominālo rotācijas frekvences izmaiņu virknes ierosmes dzinējam nosaka kā

 (2.51)

kur *n*(0,25) — dzinēja rotācijas frekvence, ja slodze ir 25% no nominālās.

Virknes ierosmes dzinēju rotācijas frekvenci regulē, mainot spriegumu *U* vai plūsmu Ф.

Pirmajā gadījumā virknē enkura tinumam ieslēdz reostatu *Rp* (2.64. att., a). Palielinot reostata pretestību, enkuram pievadītais spriegums samazinās un krītas arī dzinēja rotācijas frekvence. Šo metodi izmanto tikai mazas jaudas dzinējiem, jo reostatā ir ievērojami enerģijas zudumi. Turklāt, reostati jāaprēķina dzinēju darba strāvai, un tāpēc tiem ir lieli izmēri.

Ja mehānismu piedzen vairāki viena tipa dzinēji, to rotācijas frekvenci var regu­lēt, mainot slēguma shēmu (2.64. att., b).

Tā, saslēdzot divus dzinējus paralēli, katrs no tiem saņem pilnu tīkla spriegumu, bet, slēdzot virknē, — divreiz mazāku spriegumu. Ja kopā darbojas daudz dzinēju, 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.

Dzinēja rotācijas frekvences regulēšanu, mainot plūsmu, realizē šādos veidos: šuntējot ierosmes vai enkura tinumu un samazinot ieslēgto ierosmes tinuma vijumu skaitu. Samazinot reostata Rfš pretestību (2.64. att., c), ierosmes strāva un plūsma samazinās, un tāpēc rotācijas frekvence pieaug. Šīs metodes novērtēšanai izmanto regulēšanas koeficientu

 (2.52)

Parasti *Rfš* izvēlas tā, lai *kreg* > 50 %.

|  |  |
| --- | --- |
| **a)** | **b)** |
|  | **d)** |

2.64. att. Virknes ierosmes dzinēja frekvences regulēšana

Tā kā reostata Rfā pretestība ir maza, jo arī ierosmes tinuma pretestība ir maza, tad šis regulēšanas paņēmiens ir ekonomisks.

Samazinot ierosmes tinuma vijumu skaitu (2.64. att., d), dzinēja rotācijas frek­vence palielinās.

Šuntējot enkura tinumu (2.64. att., c), ierosmes strāva palielinās un rotācijas frekvence samazinās. Šis paņēmiens ir neekonomisks, un to izmanto reti.

***1.14. piemērs.*** Virknes ierosmes dzinējs pieslēgts tīklam ar spriegumu *UN* = 220 V. Dzinēja enkura rotācijas frekvence *nN* = 2040 min-1, griezes moments uz vārpstas *MN* = 147,2 N·m, lietderības koeficients *ηN* = 88 %, enkura tinuma pretestība *Re* = 0,08 Ω, ierosmes tinuma pretestība *Rie* = 0,7 Ω. Aprēķināt dzinēja nominālo jaudu, patērēto jaudu, patērēto strāvu no tīkla, jaudu zudumus enkurā un ierosmes tinumā, palaišanas reostata pretestību, ar kuru palaišanas strāvu samazina līdz 2,5∙*IeN* un palaišanas strāvu.

Atrisinājums.

1. Dzinēja nominālais moments



2. Dzinēja no tīkla patērētā jauda



3. No tīkla patērētā strāva (virknes ierosmes dzinējā: *Ie = Iie = I*)



4. Jaudas zudumi enkurā un ierosmes tinumā





5. Nepieciešamā palaišanas reostata pretestība



kur *Re = Re + Rie* – virknes ierosmes dzinēja enkura ķēdes pretestība, Ω.

6. Enkura palaišanas strāva

*Iep* = 2,5∙*IeN* = 2,5∙*IeN* = 2,5∙162,3 = 405,75 A

**2.10.8. Jauktās ierosmes dzinējs**

Jauktās ierosmes dzinējā ir apvienotas virknes ierosmes un paralēlās ierosmes dzinēju priekšrocības: dzinējam ir ievērojami liels palaišanas moments, un to var darbināt arī ar mazām slo­dzēm un tukšgaitā, jo griešanās ātrumu ierobežo paralēlās ieros­mes magnētiskā plūsma ΦP.

Jauktās ierosmes dzinēja slēguma shēma parādīta 2.65. at­tēla.

Jauktās ierosmes dzinējiem uz katras galvenā pola serdes ir novietotas divas — paralēlās ierosmes tinuma un virknes ierosmes tinuma — spoles.

Abu ierosmes tinumu magnetizējošo spēku attiecība var būt dažāda. Tomēr parasti viens ierosmes tinums ir galvenais (tas dod vismaz 70% no mašīnas kopīgā magnetizējošā spēka), bet otrs — palīgtinums.

Paralēlās un virknes ierosmes tinumus slēdz gan līdzslēgumā (tad dzinēja pola abas plūsmas Φp un Φv summējas: Φ = Φp + Φv) gan pretslēgumā (Φ = Φp - Φv).

Jauktās ierosmes dzinējam ar līdzslēgumā ( + ) vai pretslē­gumā ( —) saslēgtiem ierosmes tinumiem elektromagnētiskais mo­ments

*M = cMIe*(Φp ± Φv). (2.53)

Jauktās ierosmes dzinēju palaiž tāpat kā paralēlās ierosmes dzinēju, izmantojot enkura ķēdē ieslēgto palaišanas reostatu *Rp* (2.65. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 2.65. att. Jauktas ierosmes dzinēja slēguma shēma. | 2.66. att. Jauktās ieros­mes dzinēju mehāniskās raksturlīknes līdzslēgumam (1) un  pretslēgumam (2). |

Ierosmes tinumu līdzslēgumā, pieaugot slodzei, pola magnē­tiskā plūsma Φ = Φp + Φv palielinās, un saskaņā ar izteiksmi (2.49) dzinēja griešanās ātrums *n* samazinās, bet pretslēgumā, pieaugot slodzei, pieaug virknes ierosmes plūsma ΦV, un tādēļ pola plūsma samazinās: Φ = Φp - Φv un dzinēja griešanās ātrums pieaug:

 (2.54)

Jauktās ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlīknes *n = f*(*M*) forma (2.66. att.) ir atkarīga no abu ierosmes tinumu magneti­zējošo spēku attiecības un no ierosmes tinumu saslēgšanas veida.

Līdzslēgumā (2.66. att. 1) dzinēja raksturlīkne ieņem starp-stāvokli starp paralēlās un virknes ierosmes dzinēju raksturlīknēm *n = f*(*M*).

Jauktas ierosmes dzinēja ideālas tukšgaitas ātrumam *n*0 ir galīga vērtība, kura, ja *U* = const, atkarīga tikai no paralēlās ierosmes plūsmas Φp:



Ierosmes tinumu pretslēgums var, piemēram, nodrošināt da­žāda lieluma slodzēm praktiski nemainīgu griešanās ātrumu (2.66. att. 2).

Griešanas ātruma regulēšanai lieto jau iztirzātos paņēmienus, izmantojot enkura un paralēlās ierosmes ķēdēs ieslēgtos reostatus *Rp* un *Rr*; regulēšanas diapazons ir no 2,25:1 līdz 8:1.

Jauktās ierosmes dzinējus izmanto tur, kur nepieciešams liels palaišanas moments un liels paātrinājums, piemēram, trolejbusos; ēvelmašīnu, sūkņu, kompresoru, velmēšanas stāvu u. c. piedziņai.

**2.10.9. Līdzstrāvas dzinēju darba raksturlīknes**

Darba raksturlīknes attēlo dzinēja griešanās ātruma *n*, slodzes strāvas *I*, vārpstas atdotā (lietderīgā) griezes momenta *M*2 un lietderības koeficienta *η* atkarību no dzinēja atdotās jaudas *P*2, ja dzinējam pievienotais spriegums *U = UN* = const. Darba rakstur­līknes iegūst eksperimentāli.

Uzņemot paralēlās ierosmes dzinēja darba raksturlīknes (2.67. att.), *U = UN* = const, *Rp* = =0, *Iie* = const, ierosmes ķēdē ieregulē tādu pretestību *Rr* = const, lai normāli slogots (*P*2*N*) dzinējs attīstītu nominālo griešanās āt­rumu *nN*.

Paralēlās ierosmes dzinēja ātruma rakstur­līkne *n = f*1(*P*2), ievērojot arī enkura reakcijas ietekmi, ir ne­daudz krītoša, gandrīz taisna līnija; normālai slodzei ātruma samazinājums Δ*n* = 2—8%*nN*.

Dzinēja lietderīgais moments *M*2 ir mazāks nekā tā elektromagnētiskais moments M par tukšgaitas momenta vēr­tību *M*0:

*M*2 = *M – M*0. (2.55)

Bremzējošais tukšgaitas moments M0 dzinējā darbojas jebkurā darba režīmā, un to rada berzes zudumi. Pieņemot, ka dažādām slodzēm *n* ≈ const, arī *M*0 ≈ const, un tā vērtība ir 2—6% no no­minālā lietderīgā griezes momenta *M*2*N*.

Dzinēja lietderīgais moments

 (2.56)

kur P2 — dzinēja vārpstas atdotā jauda, kW,

*ω* — dzinēja enkura leņķiskā rotācijas frekvence, rad/s.

Slodzei pieaugot, griešanās ātrums *n* nedaudz samazinās, tad momenta līkne *M*2 = *f*2(*P*2) nedaudz liecas uz augšu.

Dzinēja strāvas līkne *I = f*3(*P*2) līdzīga momenta *M*2 līknei; *I*0 ir dzinēja tukšgaitas strāva.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.67. att. Paralēlās ierosmes dzinēja darba raksturlīknes. |

Līdzstrāvas dzinēja lietderības koeficients

 (2.57)

kur P1 = UI — dzinēja uzņemta jauda;

ΔP — kopējie jaudas zudumi dzinējā:

(2.58)



Elektriskie zudumi Δ*Pe* sastādās no zudumiem mašīnas tinumos (enkura, ierosmes u. c.) un suku-kolektora pārejas pretes­tības. Paralēlās ierosmes dzinējam

 (2.59)

kur *Rp* un *Rk* — papildu un kompensācijas tinumu pretestības;

Δ*US* — sprieguma kritums sukas-kolektora pārejas pre­testībā; vienam suku pārim parasti Δ*US* = 2 V.

Magnētiskie zudumi Δ*Pm* sastādās no histerēzes un virpuļstrāvu zudumiem mašīnas en­kurā.

Mehāniskos zudumus Δ*Pmeh* rada berze gultņos, rotējošo daļu berze pret gaisu un suku berze pret kolektoru. Te pie­skaita arī ventilācijas zudumus, ja uz enkura vārpstas ir ven­tilācijas spārniņi. Mehāniskie zudumi atkarīgi no mašīnas griešanās ātruma. Mašīnas ar jaudu līdz 100 kW mehāniskie zudumi sastāda Δ*Pmeh* = 2…4% no nominālas jaudas *PN*.

|  |
| --- |
| 2.68. att. Virknes ierosmes dzinēja darba raksturlīknes. |

Papildzudumus Δ*Ppap* sa­stāda zudumi, kurus polu kur­pēs rada enkura zobu izraisītās magnētiskās indukcijas pulsāci­jas, un zudumi, kurus tēraudā rada galvenās magnētiskās plūsmas izkropļojums. Normāli slogotiem dzinējiem bez kompen­sācijas tinuma pieņem, ka Δ*Ppap* ir 1% no uzņemtās jaudas *P*1, bet dzinējiem ar kompensācijas tinumu — 0,5 %*P*1.

Dzinēja lietderības koeficients sasniedz savu maksimālo vēr­tību ar slodzi (75—85) % no *P*2*N* un pēc tam, pieaugot zudumiem, lēni pazeminās.

Mazas jaudas līdzstrāvas dzinēju nominālie lietderības koe­ficienti *ηN* = 75—85%, bet vidējas un lielas jaudas dzinējiem *ηN* = 85—94%.

Virknes ierosmes dzinēja darba raksturlīknes parādītas 2.68. attēlā.

**2.10.10. Līdzstrāvas dzinēju elektriskā bremzēšana**

Līdzstrāvas dzinēju elektriskajai bremzēšanai izmanto trīs pa­ņēmienus: dinamisko bremzēšanu, bremzēšanu ar pretslēgumu un ģeneratorisko bremzēšanu.

Dinamisko bremzēšanu realizē, enkuru atslēdzot no tīkla un pieslēdzot to speciālai bremzēšanas pretestībai *Rd*, bet ierosmes tinumu atstājot pievienotu tīklam. Tā kā ar dzinēja vārp­stu saistīto mehānisma kustošo elementu kinētiskā enerģija tur­pina griezt dzinēja enkuru sākotnējā virzienā, tad dzinējs darbo­jas kā svešierosmes ģenerators. Ražoto elektrisko enerģiju patērē noslēgtajā enkura ķēdē, kurā enkura EDS uztur pretēja (nega­tīva) virziena strāvu (-*Ie*). Tātad dzinējs attīsta negatīvu, t. i., bremzējošu elektromagnētisko momentu *Mbr* un tādēļ dzinēja grie­šanās ātrums samazinās.

Tā kā dinamiskās bremzēšanas režīmā enkura ķēdes strāvas skaitliskā vērtība

 (2.60)

tad, jo mazāka pretestība *Rd*, jo lielāka ir enkura strāva *Ie* ar paš­reizējo dzinēja ātrumu *n* un jo lielāks bremzējošais moments *Mbr*.

Paralēlās ierosmes dzinējs dinamiskās bremzēšanas režīmā darbojas pēc dinamiskās bremzēšanas raksturlīknes 1 (2.69. att. a), kuras vienādojumu dabū, izteiksmē (2.44) ievietojot U=0 un enkura pretestībai re pieskaitot bremzēšanas pretestību rd:

 (2.61)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

2.69. att. Paralēlās ierosmes dzinēja dinamiskā bremzēšana (a) un brem­zēšana ar pretslēgumu (b).

Bremzēšanas raksturlīkne ir taisne, kas iet caur koordinātu sākumpunktu.

Ja dzinējs strādā dabiskās raksturlīknes 0 režīmā ar ātrumu n, attīstot momentu M, tad, dzinēju pārslēdzot dinamiskās brem­zēšanas režīmā, tā darbība noris raksturlīknes 1 režīmā, un grie­šanās ātrums samazinās līdz nullei. Ja piedzenamais mehānisms turpina griezt dzinēja vārpstu, tad enkurs sāk griezties pretējā virzienā un sasniedz nemainīgu ātrumu n1. Šajā režīmā dzinēja bremzējošais moments līdzsvaro momentu, kas griež dzinēja vārpstu.

Virknes un jauktās ierosmes dzinējiem, izmantojot dinamisko bremzēšanu, jāpārslēdz virknes ierosmes tinums, lai ierosmes strāva un plūsma tajā saglabātu sākotnējo virzienu.

Dinamisko bremzēšanu izmanto galvenokārt dažādu darba ma­šīnu elektropiedziņas nobremzēšanai. Paņēmiens ir ekonomisks, jo ierosmes strāva Iie relatīvi niecīga. Trūkums ir tas, ka, sama­zinoties griešanās ātrumam n, bremzējošais moments Mbr sama­zinās.

Bremzēšanu ar pretslēgumu realizē divējādi: ar pārslēdzi izmaina dzinēja enkura strāvas Ie un reizē ar to arī dzinēja elektromagnētiskā momenta M virzienu vai ļauj piedze­namā mehānisma uzkrātajai kinētiskajai vai potenciālajai ener­ģijai griezt tiklam pieslēgtu dzinēju pretēji tā griešanās virzie­nam darba režīmā.

Pirmo paņēmienu bieži izmanto elektropiedziņas ātrai nobrem­zēšanai vai reversijai. Šajā režīmā enkura EDS virziens nemai­nās, bet enkura strāvas

 (2.62)

virziens ir pretējs sākotnējam, tādēļ dzinējs attīsta negatīvu (bremzējošu) elektromagnētisko momentu. Dzinēja ātrums strauji samazinās līdz nullei, un enkurs turpina griezties pretējā virzienā, ja šai mirklī to neatslēdz no tīkla.

Enkura strāvu *Ie* bremzēšanas laikā ierobežo enkura ķēdē ieslēgta papildpretestība *Rp*.

Otro paņēmienu izmanto, piem., nolaižot celtņa kravu (2.69. att. b). Bremzēšanas režīms te iestājas, ja kravas radītais griezes moments pret dzinēja vārpstu, ko sauc par statiskās pretestības momentu Ms, ir lielāks par dzinēja griezes momentu M.

Dzinēja momentu no vērtības My kurai atbilst griešanās ātrums n, samazina līdz kādai vērtībai M1 < M, enkura ķēdē ieslē­dzot lielu papildpretestibu r (raksturlīkne 1). Ja dzinēja bremzē­šanas režīms atbilst mākslīgajai raksturlīknei 1, dzinēja ātrums n samazinās līdz nullei un kravas svara ietekmē enkurs sāk griez­ties pretējā virzienā. Enkura griešanās ātrums pieaug līdz tādai vērtībai n1 = const, ar kuru dzinēja bremzējošais moments vienāds ar kravas radīto griezes momentu Ms.

Ģeneratoriskā bremzēšana, atdodot elektrisko ener­ģiju tīklam, notiek tad, kad tiklam pieslēgta dzinēja griešanās ātrums n pārsniedz ideālās tukšgaitas ātrumu n0 un dzinējs grie­žas tajā pašā virzienā kā darba režīmā.

Ja *n > n*0, tad dzinēja EDS ir lielāks par tīkla spriegumu *U* (*E>U*), un tādēļ enkurā plūst EDS uzturēta pretēja virziena strāva (*-Ie*), un dzinējs attīsta negatīvu (bremzējošu) momentu, kura lielums atkarīgs no ierosmes strāvas. Šo paņēmienu lieto, piemēram, nolaižot celtņa kravu; dzinēju tad ieslēdz griešanās vir­zienam «uz leju».

Vispār noteikumu n > n0 realizē, vai nu ar ārējo griezes mo­mentu paātrinot enkura rotāciju (kravas nolaišana), vai arī ar *U* vai Φ izmaiņu samazinot ideālās tukšgaitas ātrumu .

Ģeneratoriskā bremzēšana ir visekonomiskākā. To izmantojot paralēlās ierosmes dzinējiem, dzinēja slēguma shēma nav jāiz­maina, bet virknes ierosmes dzinējiem — ierosmes tinums caur atbilstoša lieluma pretestību jāpieslēdz paralēli enkura tinumam.

**2.11. Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas**

Līdzstrāvas mašīnas izgatavo sērijās – rindas pieaugošo jaudu, kurām ir viena tipa konstrukcija. Bez šīs sērijas ražo arī citas, galvenokārt specializētas, piemēram, vilces, celtņu, kuģu u.c. elektriskās mašīnas.

Sērijveidā ražotās mašīnas nevar apmierināt visas specifiskās prasības. Tāpēc izgatavo speciālas līdzstrāvas mašīnas: tahoģeneratorus, metināšanas ģeneratorus, elektromašīnu pastiprinātājus u. c.

**2.11.1. Tahoģeneratori**

Tahoģeneratori ir mazjaudas līdzstrāvas ģeneratori, kuru izejas spriegumi ir proporcionāli enkura rotācijas frekvencei. Tahoģeneratorus izmanto:

* rotējošu vārpstu rotācijas frekvences tiešai mērīšanai, pievadot tā izejas spriegumu voltmetram, kura skala graduēta rotācijas frekvences mērvienībās (tahometram);
* elektrisko signālu (sprieguma, strāvas) ģenerēšanai, kuri ir pro­porcionāli enkura rotācijas frekvencei un kurus izmanto par ieejas lielumiem automātiskās vadības un regulēšanas sistēmās.

Tahoģeneratorus izveido ar neatkarīgu elektromagnētisko ierosmi (2.70. att. a) vai ar ierosmi no pastāvīgā magnēta.

Ja ierosmes strāva Iie = const, tad magnētisko plūsmu praktiski neietekmē slodze (Ф = const) un EDS E~n (*E = cE·n·*Ф).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.70. att. Līdzstrāvas tahoģeneratora shēma (a) un raksturlīknes (b): 1 - tahometrs. |

Tahoģeneratora darbī­bas precizitāti raksturo tā izejas raksturlīkne U = *f*(*n*), kurai ir jābūt lineārai (2.70. att. b raksturlīkne 1), ja mēraparāta iekšējā pre­testība ir nemainīga. Praktiski raksturlīknei ir līnijas 2 veids, tomēr kļūda nav liela un to var samazināt, lietojot mērapa­rātus ar lielu iekšējo pretestību.

**2.11.2. Metināšanas ģeneratori**

Metināšanas ģeneratori ir zema sprieguma mašīnas ar stāvu ārējo raksturlīkni U = f(I), lai varētu izturēt īsslēguma strāvu un uzturēt sta­bilu elektrisko loku. Lai elektriskais loks būtu stabils un īsslēguma strāvas vērtība nebūtu pārāk liela, nepieciešama strauji krītoša ārējā raksturlīkne (2.71. att.). tikai tādā gadījumā metināšanas strāva, loka pretestībai mainoties, vairāk vai mazāk pastāvīga.

Aplūkosim darbības principu metināšanas ģeneratoram ar šķel­tiem poliem, kura vienkāršotā shēma attēlota 2.72. attēlā a. Mašī­nas četri poli novietoti tā, lai vienāda nosaukuma poli atrastos bla­kus, izveidojot it kā divus sašķeltus polus N1—N2 un S1—S2.,Meti­nāšanas ķēde pieslēgta galvenajām sukām A un B. Ierosmes tinuma spoles savienotas virknē un pieslēgtas sukām B un C.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 2.71. att. Metināšanas ģe­neratora ārējā rakstur­līkne. |

|  |
| --- |
| ***a*** |
| ***b*** |
| ***c*** |

2.72. att. Metināšanas ģenerators ar šķeltiem poliem: a – konstrukcijas principiālā shēma;

b – vienkāršota elektriskā shēma; c – magnētiskās plūsmas un metināšanas strāvas, mainoties

attālumam starp elektrodu un detaļu.

Mašīnas galvenie poli N1 un S1 kas rada magnētisko plūsmu Φ1, ir nepiesātināti. Papildpoliem N2 un S2 ir mazāks šķērsgriezums un īpaši izgriezumi. Šo polu tērauds ir piesātināts, tāpēc magnētisko plūsmu Φ2, ko rada papildpoli, un tātad arī EDS starp sukām B un C var uzskatīt par relatīvi pastāvīgiem. Tādēļ arī strāva ierosmes tinumos un tās izraisītā magnētiskā plūsma Φ1 ir tādā pašā mērā pastāvīga.

Metināšanas laikā enkura tinumā plūst metināšanas strāva, kas ierosina enkura magnētisko plūsmu Φe (2.72. att. b). Sadalām enkura magnētiskās plūsmas vektoru divās komponentēs — horizontālajā Φe2 un vertikālajā Φe1. Horizontālā komponente Φe2 neietekmē ma­šīnas darbu, jo polu N2 un S2 tērauds ir piesātināts un magnētiskās plūsmas Φ2 vērtība nemainās. Bet vertikālā komponente Φe1, kā re­dzams 2.72. attēlā b, vērsta pretī galvenajai magnētiskajai plūs­mai Φ1, t. i., tā darbojas atmagnetizējoši un samazina plūsmu Φ1.

No magnētisko plūsmu Φ1 un Φe1 rezultējošās magnētiskās plūs­mas Фrez vērtības ir atkarīgs mašīnas spaiļu spriegums U. Tādējādi magnētiskās plūsmas Φ1. un enkura vertikālās atmagnetizējošās garenkomponentes Φe1 mijiedarbības dēļ ģene­ratora ārējā raksturlīkne ir strauji krītoša.

Pieņemsim, ka metinātājs novietojis elek­trodu kaut kādā attālumā no detaļas, kuram atbilst metināšanas loka pretestība R1 (2.72. attēlā c stāvoklis 1). Metināšanas strā­vas vērtība I = =U1/R1. Tālāk pieņemsim, ka, turpinot metināšanu, metinātājs pietuvinājis elektrodu detaļai (stāvoklis 2). Metināšanas loka pretestība samazinās (R2 *< R1),* metinā­šanas strāvas stiprums pieaug, bet enkura magnētiskā plūsma un tās komponente Φe1 līdz ar to palielinās.

Tā kā magnētiskās plūsmas Φ1 vērtība ir pastāvīga, tad, palie­linoties komponentei Ф*el* samazinās rezultējošā magnētiska plūsma Φrez Tāpēc samazinās ģeneratora spaiļu spriegums (U2 < U1), bet, tā kā samazinājusies arī loka pretestība, tad metināšanas strāvas *I* stiprums gandrīz nemainās.

|  |
| --- |
| 2.73. att. Metināšanas strāvas regulēšana, pārvietojot suku tra­versu:  a - vidējais stāvoklis; b — sukas nobīdītas enkura griešanās vir­zienā; c — sukas nobīdītas  pretēji enkura griešanās virzienam. |

Attālinot elektrodu no detaļas (stāvoklis 5), loka pretestība palie­linās (R3 > R1 > R2), bet

tas izraisa metināšanas strāvas un attiecīgi arī enkura magnētiskās plūsmas atmagnetizējošas komponentes Φe1 samazināšanos. Magnētiskā plūsma Φrez sāk pieaugt, un tā rezultāta spriegums palielinās un metināšanas strāva tiek uzturēta gandrīz nemainīga.

Elektroda un detaļas savstarpējiem stāvokļiem 1, 2, 3 atbilst punkti 1, 2, 3 uz ārējās raksturlīknes (sk. 2.72. att.).

Pirms metināšanas sākuma ieregulē metināšanas strāvas stip­rumu, pārvietojot suku traversu no neitrālā stāvokļa (2.73. att. a). Ja sukas pārvieto enkura griešanās virzienā (2.73. att. b), enkura magnētiskās plūsmas Φe vektors pagriežas pulksteņa radītāju kus­tības virzienā. Pie tam vertikālā komponente Φe1 palielinās, tāpēc enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pieaug. Rezultējošā mag­nētiskā plūsma Φrez samazinās, un samazinās arī spriegums starp sukām A un B un metināšanas strāvas stiprums. Ja sukas pārvieto pretī enkura griešanās virzienam, t. i., pretī pulksteņa radītāju kus­tības virzienam (2.73. att. c), metināšanas strāvas stiprums palie­linās, jo enkura reakcijas atmagnetizējoša darbība samazinās, bet spriegums starp sukām A un B palielinās.

Šī regulēšanas paņēmiena trūkums ir pastiprināta dzirksteļošana zem sukām, tās nobīdot no neitrāles. Metināšanas strāvas regulē­šana, pārvietojot sukas, ir pakāpjveidīga. Plūstošu metināšanas strā­vas regulēšanu realizē, mainot pretestību regulēšanas reostatam Rreg (sk. 2.72. att. a un b), kas ieslēgts ierosmes tinumu ķēdē. Pie tam palielinās vai samazinās spriegums starp sukām A un B un attiecīgi arī metināšanas strāvas stiprums.

**3. TRANSFORMATORI**

**3.1. TRANSFORMATORU NOZĪME**

Mūsu dienās elektrisko enerģiju ražo centralizēti lieljaudas elektrostacijās, kuras parasti novietotas tur, kur ir lieli enerģijas krājumi, — pie lielām upēm, kūdras, akmeņogļu atradnēm u. tml. Vienīgi termoelektrocentrāles (TEC), kurās ražo elektrisko ener­ģiju un siltumu, būvē lielās pilsētās, lai pēdējās apgādātu arī ar siltumu.

Tātad elektrostacijas gandrīz vienmēr atrodas loti tālu (sim­tiem kilometru) no lielām elektriskās enerģijas patēriņa vietām — rūpniecības centriem vai pilsētām. Elektrisko enerģiju no elektro­stacijām patēriņa centriem pievada pa gaisa vadu līnijām.

Tā kā enerģijas zudumi, kas siltuma veidā izdalās pārvades līnijā, proporcionāli līnijas strāvas kvadrātam, tad, lai elektriskās enerģijas pārvade būtu ekonomiska, līnijas strāvai jābūt mazai, bet pārvades līnijas spriegumam, lai nodrošinātu nepieciešamo līnijas caurlaides spēju, pietiekami augstam.

Elektrostacijās uzstādīto trīsfāzu maiņstrāvas ģe­neratoru nominālie spriegumi — 3,15; 6,3; 10,5 vai 15,75 kV — tomēr ir par zemiem ekonomiskai elektriskās enerģijas pārvadīšanai (augstāka sprieguma ģeneratoru būve saistīta ar konstruk­tīvām grūtībām).

Tādēļ elektrostacijās ģeneratoru spriegums ir jāpaaugstina līdz 35, 110, 220, 330, 500 vai pat 750 kV: jo garāka pārvades līnija un jo lielāka pārvadāma jauda, jo augstākam jābūt sprie­gumam.

Bet elektriskās enerģijas patērētāji parasti pa­redzēti spriegumiem līdz 1000 V: 127, 220, 380 vai 660 V.

Tikai lieljaudas elektrodzinējus būvē 3, 6 un 10 kV spriegu­miem.

No iepriekšējā secināms, ka ekonomiskai elektriskās enerģijas pārvadei un sadalei elektroenerģētiskajā sistēmā starp ģenera­toru un patērētājiem sprieguma skaitliskā vērtība vairākas reizes (3—6 reizes) jāmaina, t. i., spriegums vairākkārt jātransformē.

Šo uzdevumu veic transformatori, kuri, izmainot sprie­guma skaitlisko vērtību, reizē izmaina arī strāvas vērtību. Maiņ­strāvas frekvenci transformācijas process neietekmē.

Vienkāršota elektriskās enerģijas pārvades vienlīnijas shēma parādīta 3.1. attēlā,

Elektrostacijā transformatori spriegumu paaugstina, un elek­triskās enerģijas patēriņa vietā transformatori spriegumu pakā­peniski pazemina. Tādējādi transformators ir viena no elektroap­gādes sistēmas galvenajām sastāvdaļām.

Transformatori parādījās pagājušā gadsimta 70. gados. Transformatorus, ko izmanto elektriskās enerģijas pārvades un sadales tīklos, sauc par spēka transformatoriem. To nominālās jaudas — no dažiem kVA līdz dažiem 100 000 kVA.

|  |
| --- |
|  |

3.1. att. Vienkāršota elektroapgādes vienlīnijas shēma.

Elektriskajās ietaisēs svarīga loma ir mērtransformatoriem, ar kuru starpniecību elektriskajai ietaisei pievieno maiņ­strāvas elektriskos mēraparātus.

Metināšanai ar maiņstrāvas elektrisko loku kā maiņstrāvas avotus izmanto speciālus metināšanas transformatorus (sprieguma pazeminātājus).

Tēraudkausēšanas elektriskās krāsnis baro krāšņu trans­formatori, kuru sekundārā strāva sasniedz pat 100 000 A un vairāk.

Mazjaudas transformatorus (nominālās jaudas no voltampēra daļas līdz 1000 VA) visai plaši lieto radiotehnikā, sa­karu tehnikā, automātikā un telemehānikā u. c.

Pēc tinumu skaita izšķir vientinuma, divtinumu un vairāktinumu transformatorus. Praksē plaši izmanto vienfāzes un trīsfāzu transformatorus.

Tomēr, neskatoties uz transformatoru izveidojumu un izmanto­šanas daudzveidību, elektromagnētiskie procesi transformatoros būtībā ir vienādi. Tādēļ tālākajā iztirzājumā kā raksturīgākajiem vispirms pievērsīsimies spēka transformatoriem, kurus izmanto ne tikai elektriskās enerģijas pārvades un sadales tīklos, bet arī katrā rūpniecības uzņēmumā, būvobjektos un citur.

Transformatora nominālie lielumi — nominālā jauda SN (kVA), līnijas spriegumi (kV), līnijas strāvas normāli slogotam transformatoram (A), frekvence (Hz), fāzu skaits (m), tinumu slēgumu shēmas un savienojumu grupa u. c. — doti trans­formatoram piestiprinātā uzrakstu plāksnītē.

**3.2. TRANSFORMATORU UZDEVUMS. PAMATDEFINĪCIJAS**

Par transformatoru sauc statisku elektromagnētisku ierīci, kuras uzdevums ir pārveidot maiņstrāvas spriegumu.

Transformatorus lieto ļoti plaši, galvenokārt tur, kur nepiecie­šams pārvadīt elektrisko enerģiju lielos attālumos.

Ir zināms, ka vienu un to pašu elektrisko jaudu izdevīgāk pār­vadīt ar augstāku spriegumu un attiecīgi mazāku strāvu. Tādā gadī­jumā samazinās jaudas zudumi vadu silšanas dēļ, — šie zudumi ir proporcionāli strāvai otrajā pakāpē (ΔP = I2R). Rodas arī iespēja lietot vadus ar mazāku šķērsgriezumu un izgatavot tos no lētāka materiāla nekā varš (piemēram, no tērauda vai no tērauda un alu­mīnija).

Elektrostacijās iegūto spriegumu ar transformatoriem paaugstina līdz 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 400, 500 vai 750 kV (atkarībā no pārvadāmās jaudas un pārvadīšanas attāluma), bet vieta, kur enerģiju patērē, spriegumu ar transformatoriem pazemina līdz vaja­dzīgajam līmenim. Transformatorus, kuru uzdevums paaugstināt spriegumu, sauc par paaugstinošiem, bet tos, kas pazemina spriegumu, — par pazeminošiem.

Pēc fāzu skaita transformatorus iedala vienfāzes un trīsfāzu transformatoros.

Pēc uzdevuma izšķir šādus transformatorus:

1. jaudas transformatorus — spēka un apgaismes iekārtu barošanai;
2. speciālos transformatorus— speciāla uzdevuma patērētāju (elektrokrāšņu, elektrisko metināšanas aparātu u. c.) barošanai;
3. mērtransformatorus — mēraparātu pieslēgšanai;
4. autotransformatorus — sprieguma pārveidošanai nelielās robežās.

To tinumu, kuram pievada maiņstrāvas enerģiju no tīkla, sauc par primāro, bet to, no kura enerģiju aizvada, — par sekundāro. Atkarībā no tā, kādam spriegumam tinumi aprēķināti, izšķir aug­stākā un zemākā sprieguma tinumus. Visus lielumus, kas attiecas uz primāro vai sekundāro tinumu, sauc par primārajiem vai sekun­dārajiem un apzīmē ar indeksu 1 vai 2.

**3.3**. **TRANSFORMATORU NOMINĀLIE LIELUMI**

Transformatora nominālos datus, kuriem tas aprēķināts izgatavotājrūpnīcā visam ekspluatācijas laikam, uzrāda piestiprinātajā plāksnītē — pasē. Tie ir:

* nominālā pilnā jauda SN, kV·A;
* nominālais līnijas primārais spriegums U1lN, V vai kV;
* nominālais līnijas sekundārais spriegums U2*lN,* V vai kV;
* nominālā līnijas primārā strāva I1lN, A;
* nominālā līnijas sekundārā strāva I2*lN*, A;
* nominālā frekvence f, *Hz;*
* fāžu skaits;
* tinumu savienojumu shēma un grupa;
* īsslēguma spriegums uk, %;
* darba režīms un dzesēšanas veids;
* transformatora pilnā masa, kg;
* eļļas masa, kg;
* aktīvās daļas masa, kg.

Transformatora nominālos spriegumus (primāro un sekundāro) nosaka tukšgaitas režīmā. Primārā un sekundārā tinuma nominālās strāvas atbilst transformatora nominālajai jaudai un nominālajiem spriegumiem.

Par transformatora *nominālo jaudu* *SN* sauc jaudu, ko transformators atdod no sekundārā tinuma spailēm. To izsaka voltampēros (V∙A) vai kilovoltampēros (kV∙A).

Vienfāzes transformatora nominālo jaudu aprēķina kā

SN = U1lN·I1lN, (3.1)

bet trīsfāžu transformatoram

SN = U11N ·I11N = 3UlfN ·IlfN, (3.2)

kur UlfN, IlfN — primārā tinuma nominālais fāzes spriegums un fāzes strāva.

Par *primāro nominālo spriegumu* *U*1*N* sauc tīkla spriegumu, kuram transformators aprēķināts (paredzēts).

Par *sekundāro nominālo spriegumu* *U*2*N* sauc sprie­gumu starp transformatora sekundārā tinuma spailēm tukšgaitas režīmā pie nominālā primārā sprieguma *U*I*N*.

Par nominālajām strāvām — primāro *I*1*N* un sekundāro *I*2*N* — sauc strāvas, kas atbilst sprieguma un jaudas nominālajām vērtī­bām.

Trīsfāžu transformatora nominālās strāvas

.

Vienfāzes transformatora nominālās strāvas

.

Pie tam, tā kā transformatora lietderības koeficients ir pietie­kami liels, pieņem, ka primārā un sekundārā tinuma jaudas ir vie­nādas. Jāpiezīmē, ka tehniskajā pasē arvien uzrāda līnijas strāvas un līnijas sprieguma vērtības.

***Piemērs* 3.1**. Noteikt vienfāzu transformatora nominālās strāvas, ja tā pilnā jauda *SN* = 250 V∙A, primārais nominālais spriegums *U*1*N* = 220 V un sekundārais nominālais spriegums *U*2*N* = 12 V.

Atrisinājums. Primārā nominālā strāva

A;

Sekundārā nominālā strāva

A.

***Piemērs* 3.2**. Noteikt trīsfāzu transformatora nominālās strāvas, ja tā jauda 180 kV∙A un spriegums 10 /0,4 kV.

Atrisinājums. Primārā nominālā strāva

A.

Sekundārā nominālā strāva

A.

**3.4. VIENFĀZES TRANSFORMATORA DARBĪBAS PRINCIPS**

Vienfāzes divtinumu transformatora ar tērauda serdi (3.2. att.) darbības process un elektromagnētiskās sakarības ir raksturīgas visu veidu transformatoriem.

Transformatora galvenās sastāvdaļas ir no elektrotehniskā tē­rauda skārda izgatavota noslēgta serde un divi elek­triski izolēti, uz serdes novietoti tinumi.

Tinumu, ko pieslēdz maiņsprieguma avotam, sauc par pri­māro tinumu, bet tinumu, no kura elektrisko enerģiju pie­vada patērētājiem, sauc par sekundāro. Primārā tinuma spailes (A un X) pievieno maiņsprieguma (barošanas) tīklam, bet sekundārā tinuma spailēm (a un x) pieslēdz patērētāju (slodzes pretestība Zsl).

|  |
| --- |
| 3.2. att. Vienfāzes transformatora principiālā shēma. |

Visus lielumus (spriegumus, strāvas, jaudas u.c.), kas attie­cas uz šiem abiem tinumiem, sauc par primārajiem vai sekundā­rajiem, un to burtu apzīmējumiem pievieno indeksus 1 vai 2.

Ja primārajam tinumam pievada sinusoidālu spriegumu *u*1 tad primārajā tinumā plūst periodiska nesinusoidāla strāva *i*1.

Tāpat kā spolē ar tērauda serdi, primārā strāva *i*1 transforma­tora serdē ar savu magnetizējošo spēku *F*1 = *i*1·*w*1 uztur sinusoidālu magnētisko plūsmu Ф, kura saķēdēta ar abiem transformatora tinumiem (izkliedes plūsmu neievērojam).

Periodiski mainīgā plūsma Ф abos tinumos inducē EDS:

 (3.3)

kur w1 un w2 — primārā un sekundārā tinuma vijumu skaits.

Pievienojot sekundārajam tinumam patērētāju — slodzes pretestību *Zsl*, šajā tinumā inducētais elektrodzinējspēks *e*2 no­slēgtajā ķēdē uztur sekundāro strāvu *i*2, bet uz tā spailēm a un x ir spriegums *u*2, t. i., patērētājs no sekun­dārā tinuma saņem elektrisko enerģiju. Tātad, serdes magnētisko plūsmu Ф slogotā transformatorā rada abu tinumu strāva (*i*1 – *i*2) vai magnetizējošo spēku (*F*1 un *F*2) darbība.

Transformatora darbības fizikālajā norisē izšķiroša loma ir serdes magnētiskajai plūsmai Ф, kura magnētiski saista primāro un sekun­dāro tinumu un primārajam tinumam pievadīto elektrisko enerģiju nodod sekundāra­jam tinumam: primārais ti­nums tam pievadīto elektrisko enerģiju pārvērš magnētiskajā (plūsma Ф), bet sekundā­rajā tinumā magnētiskās plūsmas magnētiskā enerģija pārvēr­šas atkal elektriskajā enerģijā, ko raksturojam ar lielumiem u2 un i2.

Transformators ir maiņstrāvas aparāts: ja primāro tinumu pie­vienotu līdzstrāvas avotam, tad magnētiskā plūsma Ф serdē būtu nemainīga un tādēļ EDS tinumos neinducētos, izņemot primārā tinuma pieslēgšanas un atslēgšanas momentu.

Transformatora tinumos inducēto EDS efektīvās vērtības *E*1 un *E*2 nosakām saskaņā ar izteiksmi (3.3), pēc kuras aprēķina spolē ar tērauda serdi inducēto EDS:

E1 = 4,44fw1Фm,

E2 = 4,44fw2Фm, (3.4)

kur E1 – primāra tinuma pašindukcijas EDS, V;

E2 – sekundārā tinuma inducētais savstarpējas indukcijas EDS, V;

f – maiņstrāvas tīkla frekvence, Hz;

Фm – magnētiskas plūsmas amplitūdas (maksimāla) vērtība, Wb.

Abos tinumos inducētie elektrodzinējspēki E1 un E2 sakrīt fāzē, jo tos rada viena un tā pati periodiski mainīgā magnētiskā plūsma Ф.

Primārajā un sekundārajā tinumā inducēto EDS attiecību

 (3.5)

sauc par transformatora transformācijas koefi­cientu.

Transformācijas process transformatora saistīts ar visai ma­ziem enerģijas zudumiem, tādēļ transformatoru lietderības koefi­cienti ir loti augsti: normāli slogotiem lieljaudas transformato­riem līdz 99%.

To ievērojot, varam pieņemt, ka primāra tinuma uzņemtās jau­das momentānā vērtība p1 aptuveni vienāda ar sekundāra tinuma atdotās jaudas momentāno vērtību p2.

p1 ≈ p2 vai u1i1 ≈ u2i2.

Pārejot uz efektīvajām vērtībām, iegūstam, ka

U1I1 ≈ U2I2

vai

 (3.6.)

t. i., transformatorā ar slodzi, kas tuva nominālajai, strāvas tinu­mos ir apgriezti proporcionālas spriegumiem.

Aptuveni var pieņemt, ka transformatora tinumos inducētie elektrodzinējspēki E1 un E2 vienādi ar primāro un sekundāro spriegumu U1 un U2, kā to redzēsim tālāk. Tad



vai

 (3.7)

t. i., strāvas transformatora tinumos praktiski ir apgriezti propor­cionālas tinumu vijumu skaitam.

Kā redzam, nepieciešamo sprieguma skaitliskas vērtības iz­maiņu panāk, attiecīgi izvēloties transformatora tinumu vijumu skaitu.

Ja w2 > w1 tad transformators spriegumu paaugstina (U2 > U1), ja w2 < w1 tad spriegumu pazemina (U2 < U1).

Transformatori ar w2 = w1 tikai elektriski atdala divas maiņ­strāvas ķēdes, — tās tad saistītas tikai magnētiski, un U2 = Ul.

Tātad transformatora transformācijas koeficientu neievērojot jaudas zudumus transformatorā aprēķina pēc formulas



Ja k < 1, tad transformators ir spriegumu paaugstinošs, bet, ja k > 1, tad - sprieguma pazeminošs. Transformatoru koeficientu pieraksta, piemēram, šādi: 10/0,4, kur 10 kV – primārā tinuma spriegums, bet 0,4 kV – sekundārā tinuma spriegums.

Transformatora lietderīgo jaudu, kas atdota pie jebkuras noslodzes nosaka pēc formulas



kur kn – transformatora noslodzes koeficients;

S2 – transformatora sekundārā tinuma pilnā jauda;

φ2 – fāžu nobīdes leņķis starp spriegumu un strāvu sekundārajā tinumā.

Transformatora noslodzes koeficientu aprēķina pēc izteiksmes



kur I2 – sekundārā tinuma strāva pie dotās slodzes.

Transformatora lietderības koeficientu vispārīgā gadījuma pie dažādām slodzēm aprēķina šādi



kur P1 – transformatoram pievadītā (uzņemtā) aktīvā jauda;

P2 – transformatora atdotā aktīvā jauda;

ΔP = ΔPm + ΔPe – summārie zudumi transformatorā;

ΔPm ≈ P0 – magnētiskie zudumi transformatora serdē tukšgaitas mēģinājumā;

ΔPe = kn2·Pk – elektriskie zudumi transformatora tinumos īsslēguma mēģinājumā;

SN – transformatora nominālā (sekundārā) pilnā jauda;

cosφ2 – slodzes jaudas koeficients, kas atkarīgs no slodzes rakstura.

Transformatora maksimālais lietderības koeficients atbilst optimālajam slodzes (noslodzes) koeficientam



kur P0 un PK – tukšgaitas un īsslēguma zudumi.

Spēka transformatoru nominālie lietderības koeficienti ir ļoti augsti – lieljaudas transformatoriem pārsniedz 99%, un to maksimālās vērtības atbilst slodzēm ar Kn = 0,5-0,7. Raksturīgi, ka transformatora lietderības koeficients samērā maz mainās slodzes robežās no 0,25 līdz 1.25 no nominālās.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.3. att. Transformatora lietderības koeficienta un jaudas zudumu atkarība no slodzes |

***3.3. piemērs.*** Transformatoram ar jaudu *SN* = 560 kVA, spriegumiem 35/10,5 kV, strādājot ar nominālo spriegumu, tukšgaitas zudumi ir 3350 W, bet īsslēguma mēģinājumā, ja strāvas ir nominālas, zudumi ir 9400 W. Aprēķināt maksimālajam lietderības koeficientam atbilstošo noslodzes koeficientu.



***3.4. piemērs.*** Aprēķināt inducēto EDS transformatora primārajā un sekundārajā tinumā, ja primārā tinuma vijumu skaits *ω*1 = 1000 un sekundārā - *ω*2 = 55. Transformators pieslēgts tīklam ar frekvenci *f* = 400 Hz un magnētiskā plūsma serdē ir Ф*m* = 1,25·10-4 Wb.

Atrisinājums.





***3.5. piemērs.*** Vienfāzes sausā apgaismošanas transformatora jauda *SN* = 250 VA, nominālais primārais spriegums *U*1*N* = 220 V, primārā tinuma vijumu skaits *ω*1 = 843, bet sekundārā *ω*2 = 46. Aprēķināt transformatora transformācijas koeficientu, sekundāro spriegumu, nominālo primāro un sekundāro strāvu.

Atrisinājums.

1. Transformatora transformācijas koeficients



2. Sekundāro spriegumu izsaka no formulas



Atrod, ka



3. Transformatora nominālā primārā strāva



4. Transformatora nominālā sekundārā strāva



***3.6. piemērs.*** Vienfāzes eļļas transformatora pases dati: *SN* = 6667 kVA, *U*1*N* = 35 kV, *U*2*N* = 10 kV, *P*0 = 17 kW, *PK* = 53,5 kW, *I*0 = 3 % un *UK* = 8 %.

Aprēķināt transformatora transformācijas koeficientu, lietderības koeficientu pie noslodzes *kn* = 50 % un cos*φ*2 = 0,8, tukšgaitas strāvu un īsslēguma spriegumu.

Atrisinājums.

1. Transformatora transformācijas koeficients



2. Transformatora nominālā primārā strāva



3. Transformatora nominālā sekundārā strāva



4. Transformatora primārā un sekundārā strāva pie *kn* = 50 %





5. Transformatora lietderīga jauda



6. Transformatora lietderības koeficients



7. Tukšgaitas strāvu izsaka no formulas



Atrod, ka



8. Īsslēguma spriegumu izsaka no formulas



Atrod, ka



***3.7. piemērs.*** Transformatora sekundārajam tinumam pieslēgta slodze, kuras aktīva pretestība *R*2 = 3 Ω un induktīvā pretestība *XL*2 = 4 Ω. Aprēķināt transformatora aktīvo jaudu, kādu tas patērē no tīkla, ja transformatora lietderības koeficients *η* = 93 %, bet sekundārā tinuma spriegums *U*2 = 36 V.

Atrisinājums.

1. Slodzes pilnā pretestība



2. Jaudas koeficients



3. Transformatora pilnā jauda



4. Transformatora lietderīga jauda

*P*2 = *S*2·cos*φ*2 = 259,2·0,6 = 155,52 W.

5. Transformatora uzņemtā jauda



**3.5. TRANSFORMATORA TUKŠGAITA**

Transformators darbojas *tukšgaita* tad, kad tā primārajam tinumam pievada spriegumu *U*1 bet sekundāra ķēde ir pārtraukta, t. i., sekundārajam tinumam nav pieslēgti patērētāji (*I*2 = 0).

Šajā režīmā (3.4. att.) transformators būtībā ir spole ar no­slēgtu tērauda serdi, uz kuras novietots vel otrs tinums.

Primārais spriegums *U*1 primārajā tinumā uztur tukšgai­tas strāvu *I*0. Transformatora uzrakstu plāksnītē un katalo­gos tukšgaitas strāvu *I*0 uzdod procentos no nominālas primārās strāvas *I*1*n*, ko saņem normāli (nomināli) slogots transformators, ja *U*1 = *U*l*n*. Spēka transformatoru tukšgaitas strā­vas ir relatīvi visai mazas:

*I*0 = (2,5-10)% *I*1*n*,

pie tam, jo lielāka transformatora jauda, jo relatīvi mazāka *I*0. Pēc sava rakstura *I*0 ir gandrīz tīri induktīva (magnetizēšanas) strāva.

|  |
| --- |
| 3.4. att. Transformators tukšgaitas re­žīmā. |

Primārajā tinumā plūsto­šās tukšgaitas strāvas *I*0 magnetizējošais spēks *I*0*w*1 rada magnētisko plūsmu, kas, kā jau zinām, sastāv no di­vām komponentēm: no gal­venās magnētiskās plūsmas Ф, kura noslē­dzas tērauda serdē un tātad caurtver abus tinumus, un no relatīvi nelielas izkliedes plūsmas Фσ1; tā pilnīgi vai daļēji noslēdzas gaisa ap primāra tinuma vijumiem, neskarot sekundāro tinumu.

Ja primārais spriegums ir sinusoidāls, tad arī galvenā plūsma Ф ir sinusoidālu, bet tukšgaitas strāva I0 ir nesinusoidāla, kā tas tika konstatēts spolei ar tērauda serdi. Tomēr sakarību vienkār­šošanai nesinusoidālo strāvu *I*0 aizstāj ar ekvivalentu sinusoi­dālu strāvu. Galvenā plūsma Ф tinumos inducē elektrodzinējspēkus *E*1 un *E*2, kuri atpaliek fāze no plūsmas Ф par 90°.

Primārā tinuma izkliedes plūsma Φσ1 inducē primārajā tinumā izkliedes elektrodzinēj spēku Eσ1, kam ir pašindukcijas EDS raksturs un kas atpaliek fāzē no izkliedes plūsmas Фσ1 par 90°:

 (3.8)

Magnētisko pretestību izkliedes plūsmai Фσ1 praktiski rada tikai neferomagnētiska vide ar konstantu magnētisko caurlaidību (gaiss, varš u. c). Tādēļ var pieņemt, ka plūsma Фσ1 proporcio­nāla primārajai strāvai un sakrīt ar to fāzē.

Tā kā transformatora tukšgaitā *I*2 = 0, tad sekundārajā tinumā inducētais *E*2 vienāds ar sekundāro tukšgaitas spriegumu *U*20:

*U*20 = *E*2.

Tukšgaitas strāvu *I*0 rada primārā sprieguma *U*1 un primārajā tinumā inducēto E1 un Eσ1 kopēja darbība.

Uzrakstām otrā Kirhofa likuma izteiksmi transformatora pri­mārajai ķēdei, uzskatot, ka U1 ir tāda primārajam tinumam pie­slēgta maiņstrāvas ģeneratora EDS, kuram iekšējā pretestība vie­nāda ar nulli:



kur r1 — primārā tinuma aktīvā pretestība. No pēdējās izteiksmes primārais spriegums



Primārā sprieguma  komponenti , kura kompensē izkliedes EDS primārajā tinumā, apzīmē par induktīvo s p r i e g u m a k r i t u m u  primārā tinuma izkliedes induktīvajā pretestībā *x*1.

 (3.9)

Tad elektriska līdzsvara vienādojums transforma­tora primārajai pusei ir šāds:

 (3.10)

Tas izsaka, ka primārais spriegums kompensē primārajā tinumā.

**3.6*.* TRĪSFĀZU TRANSFORMATORI**

Trīsfāzu maiņsprieguma transformēšanu var realizēt divējādi: izmantojot trīs vienādus saslēgtus vienfāzes transformatorus (3.5. att.), kurā transformatoru abas puses saslēgtas zvaigznē) vai lietojot speciālu trīsfāzu transformatoru.

|  |  |
| --- | --- |
| 3.5. att. Vienfāzes transformatoru grupas slēguma shēma trīsfāzu sistē­mai. | 3.6. att. Trīsfāzu transformatora principiālā shēma. |

Energosistēmās pa lielākai daļai izmanto trīsfāzu trans­formatorus, jo tie ir lētāki, ar augstāku lietderības koeficientu un aizņem mazāk vietas nekā trīs vienfāzes transformatori tai pašai nominālajai jaudai SN.

Taču triju vienfāzes transformatoru grupas viena atsevišķa transformatora («vienas fāzes») svars un gabarīti ir mazāki nekā atbilstošam trīsfāzu transformatoram, tie vieglāk transportējami pa dzelzceļu un vieglāk uzstādāmi. Bez tam, iz­mantojot vienfāzes transformatoru grupas, iztiek ar mazāku jau­das rezervi, piem., 3 vienfāzes transformatoru grupai pa lielākajai daļai rezervē ir tikai viens vienfāzes transformators, tātad rezervē ir tikai viena trešdaļa jaudas; izmantojot trīsfāzu transformatoru, rezervē jābūt otram trīsfāzu transformatoram ar tādu pašu jaudu.

Tādēļ vienfāzes transformatorus izmanto ļoti lielām jaudām, bet trīsfāzu transformatorus — vidējām un mazām jaudām.

Tādēļ vienfāzes transformatorus izmanto ļoti lielām jaudām, bet trīsfāzu transformatorus — vidējām un mazām jaudām.

Trīsfāzu transformatorā kopējā sistēmā apvienoti trīs vienfāzes transformatori ar visām trim fāzēm kopēju magnētisko ķēdi. Transformatora serde sastāv no trim vertikāliem stieņiem, kuru augšgalus un apakšgalus savstarpēji saista j u g i (3.6. att.). Uz katra stieņa visā tā garumā koncentriski viens virs otra novietoti vienas fāzes abi tinumi — primārais un sekundārais.

Trīsfāzu transformatoru spailēm pieņemti šādi burtu apzīmē­jumi: augstākā sprieguma (AS) pusē: A, B, C — tinumu sākumi, X, Y, Z — tinumu beigas; zemākā sprieguma (ZS) pusē attiecīgi a, b, c un x, y, z. Apzīmējumi «sākums» un «beigas» ir nepieciešami pareizai fāzu tinumu saslēgšanai.

Trīsfāzu transformatoru primāros un sekundāros tinumus var saslēgt zvaigznē (Y) vai trīsstūri (Δ). Mazas un vidējas jaudas transformatoriem zemākā sprieguma tinumu var saslēgt arī zigzagzvaigznē (): katru šī tinuma fāzi sadala divās vienādās daļās, kuras novieto uz serdes diviem dažādiem stieņiem.

Pieņemtajos tinumu slēgumu shēmu apzīmējumos vispirms pa­rāda augstākā sprieguma (AS) tinumu saslēgšanas shēmu, bet aiz slīpās svītras — zemākā sprieguma (ZS) tinumu saslēgšanas shēmu.

Saskaņā ar standartu praksē izmanto šādas trīsfāzu transformatoru tinumu slēgumu shēmas:

Ү/Ү0 — zvaigzne-zvaigzne ar nullpunkta izvadu;

Ү/Δ — zvaigzne-trīsstūris;

Ү0/Δ — zvaigzne ar nullpunkta izvadu-trīsstūris;

Δ/ Ү0 — trīsstūris-zvaigzne ar nullpunkta izvadu;

Ү/ — zvaigzne-zigzagzvaigzne ar nullpunkta izvadu.

Abu tinumu slēgums zvaigznē izdevīgs tajā ziņā, ka šajā ga­dījumā tinumu izolācijai jāatbilst tikai attiecīgas fāzes spriegu­mam, un tinumu vijumu skaits, kas proporcionāls spriegumam, tad ir mazāks. Tinumi gan jādimensionē līnijas strāvām. Slē­gumu Ү/Ү0 plaši izmanto nelielas un vidējas jaudas transforma­toriem (līdz 1800 kVA) ar augstāko spriegumu līdz 35 kV, kuru zemākie spriegumi ir 400 V vai 230 V.

Slēgums zvaigznē sevišķi izdevīgs augstam spriegumam, jo izolācijas biezumu fāzu tinumiem tad nosaka fāzu spriegums, kas ir reizes mazāks par līnijas spriegumu.

Slēgums trīsstūrī ir izdevīgs lielām līnijas strāvām, jo tinu­mos plūst tikai fāzu strāvas, un tāpēc tinumiem var izman­tot vadus ar mazāku šķērsgrie­zumu, nekā slēdzot zvaigznē. Slēgumu Ү/Δ izmanto vidējas un lielas jaudas transformato­riem tajos gadījumos, kad ze­māka sprieguma pusē nav vaja­dzīgs nullvads.

Magnētiskās plūsmas ФA, ФB un ФC trīsfāzu transforma­tora serdes stieņos ir proporcionālas primārās puses fāzu spriegumiem *UA*, *UB* un *UC*.

Tā kā , tad jebkurā mirklī fāzu sinusoidālo magnētisko plūsmu summa vienāda ar nulli:

 (3.11)

un serdei nav vajadzīgs ceturtais stienis, kurā it kā varētu no­slēgties visu triju plūsmu ģeometriskā summa.

Fāzu magnētisko plūsmu virzieni serdē parādīti 3.7. attēlā raksturīgiem laika momentiem *tA*, *tB* un *tC*. Šajā attēlā plūsmas pozitīvais virziens stienī pieņemts uz augšu.

Jāuzsver, ka transformācija notiek katrā fāzē. Ja slodze simet­riska, tad vektoru diagrammas un ekvivalentās shēmas visām trim fāzēm ir vienādas un tādas pašas kā vienfāzes transforma­toriem. Tāpēc visas vienfāzes transformatora formulas derīgas arī trīsfāžu transformatora vienai fāzei, formulās ievietojot fāzes spriegumu, strāvu vai jaudu.

**3.7. TINUMU SAVIENOJUMU GRUPAS**

Transformatoru apakšstacijās parasti divi, trīs vai vairāki transformatori darbojas paralēli, tā ne tikai nodrošinot pietiekami lielu transformatoru noslogojumu resp. to ekonomisku eksplua­tāciju (atkarība no tīkla slodzes atsevišķus transformatorus at­slēdz vai pieslēdz darbam), bet arī nodrošinot nepārtrauktu elek­troapgādi, radot profilaktiskā remonta iespējas utt.

Transformatoru paralēlajā darbā ļoti svarīga nozīme ir fāzu nobīdes leņķim starp transformatora primāro un sekundāro līni­jas spriegumu.

Vispār līnijas spriegumi AS un ZS puse var sakrist vai ne­sakrist fāzē, — tas vispirms atkarīgs no abu tinumu tīšanas vir­zieniem un no tinumu galu apzīmējumiem («sākums», «beigas»).

3.8. attēlā *a* parādīta transformatora viena fāze ar vienā virzienā tītu primāro (AS) un sekundāro (ZS) tinumu. Tā kā abus tinu­mus caurtver viena un tā pati magnētiskā plūsma ФA, tad abos tinumos inducētie EDS sakrīt fāzē, t. i., katrā mirklī tiem ir viens un tas pats virziens attiecībā pret tinumu spailēm, piem., no beigām X uz sākumu A un no x uz *a* (pieņemtais pozi­tīvais virziens). Tad arī fāzu spriegumu *UA* un *Ua* pozitīvie vir­zieni sakrīt (no sākuma *A* vai *a* uz beigām X vai x), t. i., sprie­gumi  un  sakrīt fāzē.

Apmainot vietām apzīmējumus sekundārā tinuma spailēm (3.8. att. b),  un , ir pretējās fāzēs, jo, ja AS tinumā EDS virzīts, piem., no X uz A, tad ZS tinuma tai paša mirklī — no *a* uz *x*.

Pieņemsim, ka trīsfāzu transformatora AS un ZS tinumi tīti vienā virzienā, to gali apzīmēti saskaņā ar 3.8. attēlu a un abi tinumi saslēgti zvaigznē (3.9. att. a). Tāpat kā iepriekš, AS tinums pieņemts par primāro un ZS — par sekundāro. Tad AS un ZS tinumu attiecīgie fāzu spriegumi sakrīt fāzē un arī attie­cīgie līnijas spriegumi sakrīt fāze (3.9. att. b).

Fāzu nobīdes leņķi starp transformatora abu pušu līniju sprie­gumiem pieņemts izteikt nevis grādos, bet ar pulksteņa minūšu un stundu radītāju savstarpējo stāvokli (3.9. att. c). Pieņem, ka minušu radītājs (garākais) sakrīt ar augstākā līnijas sprie­guma vektora virzienu un vienmēr atrodas virs ciparnīcas skaitļa 12, bet stundu radītājs sakrīt ar zemākā līnijas sprieguma vektora virzienu. Tad stundu rādītāja stāvoklis uz ciparnīcas parāda transformatora tinumu savienojumu grupas skaitli (sk. tālāk), bet fāzu nobīdes leņķis starp līnijas spriegumiem ir leņķis no AS sprieguma vektora līdz ZS sprieguma vektoram, skaitot to pulksteņa radītajā kustības virzienā.

|  |
| --- |
| 3.7. att. Magnētiskas plūsmas trīs­fāzu transformatora serdē. |

|  |
| --- |
| 3.8. att. Fāzu nobīdes leņķis starp  un . |

|  |
| --- |
| 3.9. att. Ү/Ү0 — 0 savienojumu grupas shēma (a), vektoru diagrammas (b) un pulksteņa ciparnīca (c) |

Tātad, ja abu pušu spriegumi sakrīt fāzē, tad arī pulksteņa stundu radītājs atrodas virs skaitļa 12 (pulkstenis rāda «12» resp. «0»). Tādēļ 3.9. attēla a parādīto tinumu savienojumu grupu sauc par nulles grupu un apzīmē šādi: Ү/Ү0 — 0 (fāzu nobīdes leņķis starp  un  ir 0°).

Trīsfāzu transformatorus visbiežāk izgatavo tikai ar divām savienojumu grupām — ar nulles un ar vienpadsmito grupu: Ү/Ү0 – 0, Ү/Δ - 11, Ү0/ Δ – 11, Δ/ Ү0 – 11 un Y/ - 11.

Ү/Δ — 11 grupai atbilstošā tinumu savienojumu shēma dota 3.10. attēla. Attiecīgie fāzu spriegumi abām pusēm sakrīt fāzē.

|  |
| --- |
| 3.10. att. Ү/Δ — 11 savienojumu grupas shēma un vektoru diagrammas. |

Starp spailēm A un B līnijas spriegums  un starp spailēm *a* un *b* līnijas spriegums  (3.10. att.).

Tātad starp augstākā un zemākā līnijas sprieguma vektoriem ir 330° nobīdes leņķis. Pulksteņa ciparnīcas stundu rādītājs tad at­rodas virs 11, tātad tā ir 11. savienojumu grupa.

**3.8. TRĪSFĀZU TRANSFORMATORA TRANSFORMĀCIJAS**

**KOEFICIENTS**

Trīsfāzu transformatoru sekundārā sprieguma vērtība ir at­karīga ne tikai no primārā un sekundārā tinuma vijumu skaita attiecības *kf*, bet arī no tinumu slēguma shēmas un savienojumu grupas: ja līniju spriegumu transformācijas koe­ficients (augstākā sprieguma attiecība pret zemāko)

 (3.12)

un fāzu spriegumu transformācijas koeficients

 (3.13)

tad transformācijas koeficientus transformatoru standarta savie­nojumu grupām aprēķina pēc šādām izteiksmēm:







kur *ω*1 un *ω*2 – augstākā un zemākā sprieguma tinuma vijumu skaits;

*Uf*1 un *Uf*2 – augstākais un zemākais fāžu spriegums;

*Ul*1 un *Ul*2 - augstākais un zemākais līnijas spriegums

***2.8. piemērs.*** Trīsfāžu transformatoru raksturo sekojošie dati: nomināla jauda *SN* = 63 kVA, augstākais nominālais līnijas spriegums *U*1*Nl* = 20 kV, zemākais nominālais līnijas spriegums *U*2*Nl* = 400 V, primārais un sekundārais tinums saslēgti zvaigznē, serdes šķērsgriezums *SS* = 100 cm2, magnētiskas indukcijas maksimālā vērtība *Bm* = 1,5 T.

Aprēķināt tinumu nominālas strāvas, katras fāzes tinumu vijumu skaitu, ja maiņstrāvas frekvence *f* = 50 Hz.

Atrisinājums.

1. Augstāka un zemākā sprieguma tinumu nominālās līnijas strāvas





2. Augstākā un zemākā sprieguma tinumos inducēto EDS lielumi neievērojot augstākā sprieguma tinumu zudumus tukšgaitā





3. Augstākā un zemākā sprieguma tinumu katras fāzes vijumu skaitu izsaka no formulas

.

Atrod, ka





***2.9. piemērs.*** Trīsfāžu transformatora katras fāzes augstākā sprieguma tinuma (primāro) vijumu skaits *ω*1 = 1000, bet zemākā (sekundārā) - *ω*2 = 200 un augstākā sprieguma (primāro) tinumu fāzes spriegums *Uf*1 = 1000 V. Aprēķināt zemākā sprieguma (sekundārā) tinumu fāzes spriegumu, fāžu un līnijas spriegumu transformācijas koeficientus, ja transformatora tinumus saslēdz šādās slēgumu shēmas: zvaigzne-zvaigzne ar neitrālo izvadu (Y/Ұ), zvaigzne-trīsstūris (Y/Δ) un trīsstūris-zvaigzne ar neitrālo izvadu (Δ/Ұ).

Atrisinājums.

1. Sekundāro tinumu fāžu spriegumi



2. Fāžu spriegumu transformācijas koeficients



3. Līnijas spriegumu transformācijas koeficients, ja slēgumu shēma zvaigzne-zvaigzne ar neitrālo izvadu (Y/Ұ)



Tātad 

4. Līnijas spriegumu transformācijas koeficients, ja slēgumu shēma zvaigzne-trīsstūris (Y/Δ)



Tātad 

5. Līnijas spriegumu transformācijas koeficients, ja slēgumu shēma trīsstūris-zvaigzne ar neitrālo izvadu (Δ /Ұ)



Tātad 

***2.10. piemērs.*** Trīsfāžu transformatora nominālie dati: *SN* = 100 kVA, *U*1*N* = 20 kV, *U*2*N* = 400 V, *P*0 = 900 W, *PK* = 6 kW. Primārais tinums savienots trīsstūrī, sekundārais - zvaigznē. Aprēķināt tinumos inducētos fāžu EDS, tinumu nominālas strāvas un slodžu strāvas, transformatoru lietderības koeficientu pie dažādām slodzēm, ja transformatoram pieslēgta slodze *P*2 = 63 kW un cos*φ*2 = 0,9.

Atrisinājums.

1. Tinumos inducētie fāžu EDS, ja Δ/Y

*Ef*1 ≈ *U*1*N* = 20 kV.



2. Nominālās strāvas līnijā





3. Tinumu nominālās (fāzes) strāvas, ja Δ/Y



*I*2*Nf* = *I*2*Nl* = 144,5 A.

4. Nominālais lietderības koeficients, ja *kn* = 1



5. Transformatora noslodzes koeficients



6. Līnijas strāvas pie *kn* = 0,7





7. Strāvas tinumos, ja *kn* = 0,7 un Δ/Y



*I*2*f* = *I*2*l* = 101 A.

8. Lietderības koeficients pie dotas slodzes (*kn* = 0,7)



9. Optimālais noslodzes koeficients



10. Maksimālais lietderības koeficients



***2.11. piemērs***. Trīsfāžu transformatoru TCM raksturo sekojošie dati: *SN* = 60 kVA, *U*1*N* = 35 kV, *U*2*N* = 400 V, *I*0% = 11,1 %, *UK%* = 4,55 %, *P*0 = 501 W, *PK* = 1208 W, tinuma slēguma grupa Y/Δ – 11. Atrast nominālo strāvu, tukšgaitas strāvu, fāzes spriegumus un fāzes strāvas.

Atrisinājums.

1. Transformatora nominālās strāvas līnijā





2. Tukšgaitas strāva (primārajā pusē)



3. Transformatora primārais tinums saslēgts zvaigznē, bet sekundārais - trīsstūrī, tāpēc fāzu spriegumi





4. Transformatora fāzes strāvas





***2.12. piemērs.*** Atrast trīsfāzu transformatoram TCM-320/35 slodzes koeficientu *kn*, kurš atbilst maksimālajam lietderības koeficientam un maksimālo lietderības koeficienta vērtību, ja cos*φsl* = 0,7.

Transformatora tehniskie dati: *SN* = 320 kVA, *U*1*N* = 35 kV, *U*2*N* = 6,3 kV, *UK%* = 4,8 %, *P*0 = 1,75 kW, *PK* = 4,793 kW.

Atrisinājums.

Lietderības koeficients



sasniedz maksimālo vērtību, ja



Tad



**3.9. TRANSFORMATORU PARALĒLĀ DARBĪBA**

Divi vai vairāki transformatori darbojas paralēli, ja to primārie tinumi pieslēgti kopējam primārajam tīklam, bet sekundārie tinumi — kopējam sekundārajam tīklam.

**Noteikumi par transformatoru saslēgšanu paralēlai darbībai.** Trīsfāzu transformatorus var saslēgt paralēlai darbībai, ja ievē­roti šādi noteikumi:

|  |
| --- |
| 3.11. att. Divi para­lēli saslēgti transfor­matori (vienlīnijas shēma). |

a) līniju spriegumu transformācijas koeficienti tukšgaitas re­žīmā ir vienādi (trans­formācijas koeficientu k pieļaujamā atšķirība ±0,5%):

kI = kII = kIII = ∙∙∙ = kn;

b) transformatoru īsslēguma spriegumi ir vienādi (pieļaujama novirze līdz ±10% no īsslēguma sprie­gumu vidējās vērtības):

UkI = UkII = UkIII = ∙∙∙ = Ukn;

1. transformatoru tinumu savienojumu grupas ir vienādas (sekundārie spriegumi tad sakrīt fāzē).

Vēlams, lai transformatoru nominālo jaudu attiecība nepārsniegtu 3:1.

Ja nav izpildīts 1. vai 3. noteikums, tad tukšgaitā transfor­matoru tinumos plūst izlīdzinošas strāvas, kuras var vairākkārt pārsniegt strāvu nominālas vērtības.

Ja paralēli darbojas transformatori ar dažādiem īsslēguma spriegumiem, tad transformators ar mazāko īsslēguma sprieguma vērtību tiek pārslogots.

Slodzes sadalījumu starp paralēli strādājošiem transformatoriem nosaka pēc formulas



kur *SX* – dotā transformatora slodze, kVA;

*S* – visas paralēlās grupas kopēja slodze, kVA;

*UKX* – dotā transformatora īsslēguma spriegums, %;

*SNX* - dotā transformatora nominālā jauda, kVA.

Ja transformatoru transformācijas koeficienti ir dažādi, tad transformatoru tinumos plūst izlīdzinošā strāva, kas pārslogo to transformatoru, kuram mazāks transformācijas koeficients. Izlīdzinošo strāvu var aprēķināt, lietojot formulu



kur *a* – sekundāro spriegumu starpība, %;

 - otrā transformatora (ar lielāko jaudu) nominālās strāvas *IN*2 attiecība pret pirmā transformatora (ar mazāko jaudu) nominālo strāvu *IN*1;

*UK*1 un *UK*2 – transformatoru īsslēguma spriegumi.

Pirms transformatoru saslēgšanas paralēlai darbībai tie jāfāzē, t. i., jāpārbauda, vai transformatoriem, kas primārajā pusē pieslēgti pie viena tīkla, sekundāro tinumu spriegumi sakrīt fāzē. Fāzēšanu vienmēr izdara pie zema sprieguma, lietojot voltmetru. Augsta sprieguma gadījumā voltmetru ieslēdz caur spriegummaini.

Ja fāzē transformatorus ar izolētu neitrāli, ar palīgvadu savieno divus vienāda nosaukuma izvadus, piemēram, *a*1un *a*2(3.12. zīm. *a).* Pievienojot voltmetru jebkuriem diviem abu transformatoru vienāda nosaukuma izvadiem, izveidojas noslēgta elektriskā ķēde, kurā plūst voltmetra strāva. Transformatoriem ar sazemētu neitrāli tādu savienojumu izdarīt nedrīkst, jo, savienojot divas dažāda nosau­kuma fāzes, notiks īssavienojums.

Fāzējot mēra spriegumu starp transformatora tinumu fāzēm. Ja spriegumi starp vienāda nosaukuma fāzēm *b*1un *b*2, *c*1un *c*2vienādi ar nulli, bet starp dažāda nosaukuma fāzēm vienādi ar līniju spriegumiem (*Ub*1*c*2 *= Ul* un *UC*l*b*2 = *Ul*), tad transformatoru var ieslēgt paralēlai darbībai.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

3.12. zīm. Transformatoru fāzēšana:

*a* — transformatoriem ar izolētu neitrāli; *b* — transformatoriem ar sazemētu neitrāli. .

Ja fāzē transformatorus ar sazemētu neitrāli, spriegumiem starp fāzēm *a*1un *a*2, *b*1un *b*2, *c*1 un *c*2jābūt vienādiem ar nulli, bet starp dažāda nosaukuma fāzēm — vienādiem ar līnijas spriegumu (3.12. zīm. *b).*

***2.13. piemērs.*** Pārbaudīt, vai var saslēgt paralēlai darbībai divus transformatorus, kuriem ir šādi pases dati:

1. *SN*1 = 400 kVA, *UN*1 = 10,5/0,4 kV, *UK*1 = 4,5 %, Y/Ұ – 0;

2. *SN*2 = 630 kVA, *UN*2 = 10/0,38 kV, *UK*2 = 5,5 %, Y/Ұ – 0.

Kā kopēja slodze 1000 kVA sadalās starp transformatoriem ?

Atrisinājums.

1. Transformatoru transformācijas koeficienti



Koeficientu vidējā ģeometriskā vērtība



Koeficientu starpība



t.i., 

Saskaņā ar pirmo noteikumu paralēlā darbība ir pieļaujama.

2. Īsslēguma spriegumu vidējā aritmētiskā vērtība



Īsslēguma spriegumu starpība (novirze)



Saskaņā ar otro noteikumu paralēlā darbība nav pieļaujama, jo sprieguma novirze Δ*UK*% > 10 %.

3. Saskaņā ar trešo noteikumu paralēlā darbība ir pieļaujama, jo tinumu savienojumu grupas ir vienādas.

4. Aprēķināsim, kā sadalās kopēja slodze 1000 kVA starp abiem transformatoriem, ja tos saslēdz paralēlai darbībai.

Pirmā transformatora slodze



Otrā transformatora slodze



Kā redzams, pirmais transformators tiek pārslogots, bet otrais – nepietiekami noslogots.

***2.14. piemērs.*** Aprēķināt izlīdzinošo strāvu nominālās strāvas daļās, ja paralēli saslēgti divi vienādas jaudas transformatori (*IN*1 = *IN*2) – viens ar tinumu savienojumu grupu Y/Ұ – 0, otrs – ar grupu Y/Δ – 11. *UK*1 = *UK*2 = 5,5 %. Līniju vektoru leņķiskā nobīde α = 300.

Atrisinājums.

Ja transformācijas koeficienti un īsslēguma spriegumi vienādi, izlīdzinošo strāvu var aprēķināt pēc formulas



kur *α* – leņķis starp transformatoru līniju spriegumu vektoriem;

*UK*1 un *UK*2 – transformatoru īsslēguma spriegumi, %;

*IN*1 un *IN*2 – transformatoru nominālās strāvas, A.

Izlīdzinoša strāva



Izlīdzinoša strāva ir 4,7 reizes lielāka par nominālo strāvu.

**3.10. SLOGOTA TRANSFORMATORA SPRIEGUMA IZMAIŅA**

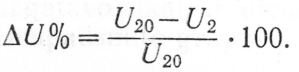
Slogota transformatora vektoru diagrammā (14-10. att.), kura atbilst transformatora ekvivalentajai shēmai, redzam, ka trans­formatora tukšgaitā (= 0 resp. = 0 un ) sprieguma kritums sekundārajā tinumā  = 0 un primārajā tinumā . Šajā režīmā transformatora reducētais sekundārais spriegums vienāds ar primāro ("), bet sekundārā sprieguma patiesa vērtība atbilst savai nominālajai vērtībai *U*20.

Transformatoru slogojot (*I*2 > 0), transformatora abos tinumos rodas spriegumu kritumi  un  tādēļ sekundārais reducētais spriegums  resp. *U*2 pazeminās — jo vairāk, jo lielāka slodzes strāva *I*2. Tātad, mainot transformatora slodzi, mainās *U*2 vērtība.

Starpību starp sekundāro spriegumu tukšgaitā *U*20 un sekun­dāro spriegumu *U*2, kas atbilst slodzes strāvai *I*2, sauc par se­kundārā sprieguma izmaiņu un apzīmē ar Δ*U*:

 (3.14)

To parasti izsaka procentos no nominālā sekundārā sprieguma U20 un nosauc par transformatora sprieguma pro­centuālo izmainu:

 (3.15)

Izmantojot transformatora vienkāršoto ekvivalento shēmu un tai atbilstošo vektoru diagrammu, dabū izteiksmi ΔU% aprēķinā­šanai (slodzei, kas tuva nominālajai, kļūda nepārsniedz 0,1%):

 (3.16)

kuru pārveidojot, iegūst visai vienkāršu sakarību:

 (3.17)

Redzam, ka sprieguma procentuālā izmaiņa ir proporcionāla transformatora slodzes koeficientam p, atkarīga no slodzes jau­das koeficienta cosφ2 un no slodzes rakstura (induktīva vai ka­pacitīva).

Sakarības *U*2 = *f*(*β*) grafisko attēlu noteiktai cosφ2 vērtībai (*φ*2 = const), ja *U*1 = *U*1*n* = const, sauc par transformatora ārējo raksturlīkni. 3.13. attēlā parādītas ārējas raksturlīknes aktīvai slodzei un induktīva un kapacitīva rakstura slo­dzēm ar dažādām *φ*2 vērtībām. Redzam, ka, jo mazāks cosφ2 induktīva rakstura slodzei, jo straujāk samazinās *U*2. Palielinot kapacitīva rakstura slodzi, *U*2 pieaug (*U*2 > *U*20)

Normāli slogotiem transformatoriem (*β* = 1) ar cos*φ*2 = 0,8 (ind.) parasti  = 5—8%, pie tam lielākās vērtības attiecas uz lieljaudas augsta sprieguma transformatoriem, kuriem liela izkliedes induktīvā pretestība. Ar aktīvu slodzi  ir vismazākā.

|  |  |
| --- | --- |
| 3.13. att. Transformatora arējās raksturlīknes dažāda rakstura slodzēm. | °  3.14. att. Transformatora leņķa raksturlīkne. |

3.14. attēlā parādīta transformatora  atkarība no cosφ2 skaitliskās vērtības nemainīgai slodzei (leņķa raksturlīkne): jo lielāks cosφ2, jo mazāka sprieguma procentuāla iz­maiņa 

**3.11. VIENFĀZES UN TRĪSFĀŽU TRANSFORMATORU UZBŪVES**

**PAMATELEMENTI**

Transformatora uzbūves pamatelementi (3.15. att. a) ir

* serde (magnētvads) 1;
* tinumi 2, ***3;***
* dzesēšanas sistēma (eļļas transformatoriem);
* caurvadi 5, 6;
* palīgierīces.
* Serde salikta no elektrotehniskā karsti vai auksti velmēta tērauda loksnēm. Tās savstarpēji visbiežāk izolētas ar laku, retāk ar papīru virpuļstrāvu zudumu samazināšanai. Magnētvada tipu nosaka tā forma. Tas var būt stieņu, apvalka, toroīda tipa vai citas formas.
* Stieņu tipa magnētvads parādīts 3.16. *a* attēlā.
* To magnētvada daļu, uz kuras novietoti tinumi, sauc par stieni, bet stieņu savienojošo daļu - par jūgu. Trīsfāžu transformatorā uz katra stieņa novietoti vienas fāzes augstākā sprieguma *AS* un zemākā sprieguma *ZS* tinumi.
* Apvalka tipa magnētvads parādīts 3.16. b attēlā. Lai nodrošinātu vienādu magnētisko indukciju stienī un jūgā, parasti stie­nim ir divreiz lielāks šķērsgriezuma laukums nekā jūgam.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a***)  ***b***)  3.15.att. Trīsfāžu spēka transformators:  a): 1- magnētvads; 2 - augstāka sprieguma tinums; 3 - zemākā sprieguma tinums; 4 - tvertne; 5,6 - zemākā un augstāko sprieguma caurvadi ar izolatoriem; 7- augstākā sprieguma tinuma vijumu skaita pārslēgs; 8 - eļļas dzesēšanas caurules; 9 - konservators; 10 - eļļas līmeņrādis; 11- tapskrūve eļļas iepildīšanai;  b): 1 – sija ar skrituļiem; 2 – plakne domkrata uzstādīšanai; 3 – sadales kārba; 4 – eļļas izlaišanas krāns; 6 – elektriskais ventilators; 7 – transformatora tvertne; 8 – dzesēšanas radiators; 9 – āķis pilnīgi samontēta transformatora pacelšanai; 10 – pārejas atloks adapters ar strāvmaiņiem;  11- 110 kV izvads; 12 – 35 kV izvads; 13 – pārslēgšanas ierīces piedziņa; 14 – 10 kV izvads; 15 – drošības caurule; 16 – konservators; 17 – eļļas līmeņa rādītājs; 18 – gāzes relejs;  19 – 110 kV izvada papīra – bakelita cilindrs; 20 – gaisa žāvētājs; 21 – pārslēdzošā ierīce;  22 – augstākā sprieguma tinums | |
| ***a*** | ***b*** | |

3.16. att. Vienfāzes transformatora stieņu tipa *(a)* un apvalka tipa *(b)* magnētvads:

ZS, *AS -* zemākā un augstākā sprieguma linumi; Ф - magnētiskā plūsma.

Toroīda u. c. veida magnētvadi parādīti 3.17. attēlā.

Serdi var salikt divējādi: no plāksnīšu atsevišķām paketēm (3.18. *a* att.) vai liekot loksnes pamīšus (3.18. *b* att.). Pēdējā gadījumā serdes salikšana ir sarežģītāka, bet samazinās magnētvada magnētiskā pretes­tība, un tas ir mehāniski izturīgāks. Vēl jo vairāk šīs magnētvada pozitīvās īpašības izpaužas mazas jaudas transformatoros, tos izgatavojot no lentes (3.17. *d, e,f, g* att.).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a)*** | ***b)*** | ***c)*** |
| ***d)*** | ***e)*** | ***f)*** |
| ***g)*** | 3.17. att. Mazas jaudas vienfāzes transformatora magnētvadi no E-veida plāksnītēm (a), U-veida plāksnītēm *(b),* toroīda serde no plāksnītēm (c) un lentes (f), lentes serde *(d, e, f, g).* | |

Stieņu šķērsgriezumam mazas jaudas transformatoros ir kvadrāta (3.19. *a* att.) vai taisnstūra forma, vidējas un lielas jaudas transforma­toros - daudzstūra (3.19. *b* un *c* att.). Jo vairāk daudzstūra perimetrs tuvojas apvilktas riņķa līnijas perimetram, jo pilnīgāk tiek izmantots riņķa laukums. Tā kā stienī pieļaujamā indukcija ir ierobežota (karsti velmētam tēraudam - 1, 4 T, auksti velmētam - 1,7 T), tad, pilnīgāk aizpildot riņķa laukumu, transformatora izmēri samazinās. Stieņa izgatavošana ir sarežģītāka, ja tajā ir vairāk dažāda platuma pakešu. Lielas jaudas transfor­matoru stieņiem starp paketēm var būt spraugas dzesējošās eļļas cirkulācijai.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a)*** | ***b)*** |

3.18. att. Serdes salikšana no atsevišķam paketēm (a) un pamīšus *(b).*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a)*** | ***b)*** | ***c)*** |

3.19. att. Mazas (*a),* vidējas un lielas *(b, c)* jaudas transformatoru stieņu šķērsgriezuma formas.

Jūga šķērsgriezuma lauku­mu izvēlas par 10-15% lielāku nekā stienim (samazinās jaudas zudumi serdē) un forma ir vienkāršāka (3.20. att.).

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| ***a)*** | ***b)*** | ***c)*** | ***d)*** |

3.20. att. Jūga šķērsgriezuma forma mazas (a), vidējas *(b,* c) un lielas *(d)* jaudas transformatoros.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a)***  3.21. att. Stieņa plākšņu presējums ar koka  ķīļiem: 1 - tinuma izolējošais cilindrs; 2 - koka ķīļi; 3 *-* koka līstes | ***b)***  3.22. att. Stieņa plākšņu presējums ar savelkošām bultskrūvēm: 1 - savelkošā bultskrūve;  2 - uzgrieznis; 3- tērauda paplāksne: 4 *–* elektrokartona paplāksne; 5 - bakelizēta papīra caurulīte; 6 - stienis. |

Ja stieņiem ir dzesēšanas spraugas, tām ir jāsakrīt ar spraugām jūgā. Stieņa plāksnes nostiprina, presējot tinumā ar koka ķīļiem (3.21. att.) vai ar savelkošām bultskrūvēm (3.22. att.), jūga plāksnes - ar jūga sijām (3.23. att.).

Tinumi izgatavoti no vara vai alumīnija apaļa vai taisnstūra (vidējas un lielas jaudas transformatoros) izolētiem (emalja, kokvilna, kabeļa papīrs) vadiem. Zemākā *ZS* un augstākā *AS* sprieguma tinumi var būt novietoti koncentriski (3.24. *a* att.) vai pamīšus (3.24. *b* att.).

Galvenokārt lieto koncentrisku tinumu. Zemākā sprieguma *ZS* tinumu novieto tuvāk stienim vai jūgam.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a)*** | ***b)*** |

3.23. att. Vienfāzes vilces (a) un spēka *(b)* trīsfāžu transformatora magnētvada presējums:

1 - stienis; 2 -jūga sijas; 3 - savelkošās bultskrūves; 4 - tinumu spoļu pamatne; 5 - jūgs.

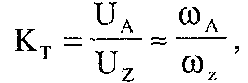
Dzesēšanas sistēma ir atkarīga no transformatora jaudas. Mazas jaudas transformatorus dzesē apkārtējais gaiss. Vidējas jaudas trans­formatoros tinumi ar serdi novietoti tvertnē 5 ar transformatoru eļļu (3.15. att.). Siltumatdeves virsmas palielināšanai tvertnei var būt piemetinātas caurules *14.* Transformatoram ir eļļas izplešanās tvertne - konservators *12* ar līmeņrādi *13.* Lielas jaudas transformatoriem var būt eļļas piespiedu cirkulācijas sistēma.

**3. 12. SPRIEGUMA REGULĒŠANA**

Elektriskās enerģijas pārvades līnijās rodas sprieguma kritums. Tādēļ, ja neveic īpašus pasākumus, tālāk no elektrostacijas esošie patērētāji saņem elektroenerģiju ar pazeminātu spriegumu. Lai visiem patērētājiem nodrošinātu elektroenerģiju ar nominālo sprie­gumu, transformatoru augstākā sprieguma tinumos paredzēti atza­rojumi, ar kuru palīdzību spriegumu regulē ±5% *UN* robežās.

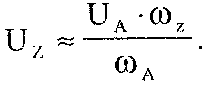
Pārslēdzot atzarojumus, var palielināt vai samazināt augstākā sprieguma tinuma vijumu skaitu, tādējādi mainot transformatora transformācijas koeficientu. Pazeminošo transformatoru transformācijas koeficientus var izmainīt, mainot vijumu skaitu transformatora primārajā tinumā, kur ir izveidoti regulēšanas nozarojumi.

Ja transformatora tinumi slēgti  slēgumā, tad var uzrakstīt šādu attiecību:



kur KT - transformācijas koeficients; UA, UZ - atbilstoši transformatora augstākais un zemākais spriegums; ωA, ωz - vijumu skaits atbilstoši augstākā un zemākā sprieguma tinumos.

Izmainot vijumu skaitu augstākā sprieguma pusē (ωA = var), var panākt vajadzīgo spriegumu transformatora zemākā sprieguma pusē:

 (3.18)

Ja spriegums ir jāpaaugstina transformatora ZS pusē, tad saskaņā ar (3.18) ir jāsamazina vijumu skaits AS tinumā ωA.

Sadales tīklā izmanto transformatorus ar nozarojumu pakāpju pārslēgšanu neierosinātā stāvoklī (PBI). Ir divi sprieguma regulēšanas paņē­mieni.

Pirmais paņēmiens — sprieguma regulēšanu izdara, mainot se­kundārā tinuma vijumu skaitu (3.24. zīm. *a).* Šo paņēmienu lieto, ja transformatoru izmanto kā *paaugstinošo*. Zemākā sprieguma tinu­mam (bez atzarojumiem) pievada tīkla spriegumu. Ja tīkla sprie­gums un frekvence ir nemainīgi, arī magnētiskā plūsma transfor­matorā ir nemainīga, bet EDS *E2* ir tieši proporcionāls sekundārā tinuma vijumu skaitam saskaņā ar formulu *E2* = 4,44/w2Фmax (V). Tātad, lai paaugstinātu EDS, vijumu skaits jāpalielina, bet, lai pazeminātu EDS, — jāsamazina.

Otru paņēmienu — sprieguma regulēšanu, mainot primārā tinuma vijumu skaitu (3.24. zīm. *b*),— sauc par sprieguma regulēšanu ar magnētiskās plūsmas izmaiņu. Ja neņem vērā sprieguma kritumu transformatora tinumos (*U*1 *~ E*1)un pieņem, ka tīkla spriegums un frekvence ir nemainīgi, tad saskaņā ar formulu (51) *E*1 *=* 4,44fw1Фmax = const. Tādā gadījumā reizinājums Фmaxw1 = const, t. i., ja samazina primārā tinuma vijumu skaitu, magnētiskā plūsma pieaug, — un otrādi. Lai palielinātu sekundārā tinuma spaiļu sprie­gumu par 5%, par 5% jāsamazina primārā tinuma vijumu skaits, t. i., pārslēga rokturis jāpārvieto uz leju no stāvokļa «Hom.» līdz atzīmei « — 5%».

Šo regulēšanas paņēmienu trūkums ir tas, ka atzarojumu pār­slēgšanai transformators vispirms jāatslēdz no tīkla. Tas rada pār­traukumus patērētāju apgādē ar elektroenerģiju. Jaunākās konstruk­cijas transformatoriem spriegumu regulē, nepārtraucot enerģijas piegādi, t. i., slodzes režīmā.

|  |
| --- |
|  |

***a b***

3.24. zīm. Sprieguma regulēšana:

*a* — izmainot sekundārā tinuma vijumu skaitu; *b* — izmainot magnētisko plūsmu.

Pašreiz transformatorus ar nozarojumu pakāpju pārslēgšanu neierosinātā stāvoklī (PBI) izgatavo ar vienu galveno un četrām papildu nozarojumu pakāpēm (± 2 x 2,5%). Transformatoru tinumu shēma ar 5 regulēšanas pakāpēm vienfāzes izpildījumā parādīta 3.25. attēlā.

|  |
| --- |
| 3.25. att. Sprieguma regulēšana transformatora ar PBI shēma; |

Lai pārslēgtu transformatoru nozarojumu pakāpes, tos atslēdz no tīkla. Šādus transformatoru atslēgumus izdara reti, tikai gada sezonu slodžu izmaiņas gadījumā, t.i., vienu reizi sezonā. Tādēļ sezonas diennakts maksimālo un minimālo slodžu režīmos šie transformatori strādā ar vienu nozarojumu pakāpi, tātad ar nemainīgu transformācijas koeficientu. No šejienes cēlies nosaukums neregulējamie transfor­matori.

Pazeminošajiem transformatoriem augstākā sprieguma puses nominālais spriegums (UAnom) ir atbilstošā tīkla nominālais spriegums (6, 10, 20 kV). Ja transformators pieslēgts galvenajam izvadam, tad transformatoram ir nominālais transformācijas koeficients (3. poz. pak.). Ja izmanto 4 papildu transformatora nozarojumus, tad transformācijas koeficients izmainās par +5%; +2,5%; -2,5%; -5% no nominālā.

Transformatora sekundārā tinuma nominālais spriegums ir par +5% augstāks nekā tīkla nominālais spriegums transformatoriem ar salīdzinoši nelielu jaudu un +10% - pārējiem transformatoriem.

Pieņemsim, ka transformatora primārajam tinumam, izmantojot galveno nozarojuma pakāpi, ir pievadīts spriegums, kurš vienāds ar tīkla nominālo spriegumu Unom, bet transformatora ZS pusē tukšgaitā ir spriegums l,05·Uznom. Šajā gadījumā sprieguma pieaugums ir 5% (sprieguma papildinājums ΔEP).

Ja transformatora nozarojuma pakāpi izmainām (PBI), tad var iegūt sprieguma papildinājumus ΔEP (3.1. tab.).

3.1. tabula

Sadales transformatoru ar PBI sprieguma papildinājums, ΔEP

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Nozarojumu pakāpes Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Primārā tinuma sprieguma novirze δV1, % | +5 | +2,5 | 0 | -2,5 | -5 |
| Sekundārā tinuma sprieguma novirze δV2, % | +5 | +5 | +5 | +5 | +5 |
| Sprieguma papildinājums ΔEP, % | 0 | +2,5 | +5 | +7,5 | +10 |

Transformatoru sprieguma papildinājumu nosaka pēc šādas izteiksmes:

 (3.19)

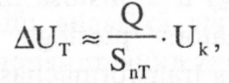
Saskaņā ar EIN sprieguma novirze visattālākajiem patērētājiem nedrīkst būt zemāka par (-5%).

Sprieguma novirzi uz sadales transformatora zemsprieguma izvadiem nosaka pēc šādas formulas:

 (3.20)

kur VBC - sprieguma novirze uz BC kopnēm; ΔU2 - summārie sprieguma zudumi sadales līnijās un transformatorā; ΔEP- sadales transformatora sprieguma papildinājums (sk. 3.1. tabulu).

Sprieguma zudumus sadales transformatorā, %, nosaka pēc šādas izteiksmes:

 (3.21)

kur Q - reaktīvās jaudas plūsma caur sadales transformatoru;

SnT -transformatora nominālā jauda;

Uk- transformatora īsslēguma spriegums, %.

Maksimālās slodzes režīmā sprieguma zudumi sadales transformatorā ir aptuveni ΔUTmaks ~ 2,5%, bet minimālās slodzes režīmā ar vāju transformatoru noslodzi - ΔUTmin ~ 0% \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Ievērojot, ka sadales transformatoriem Uk = 5% un maksimālo slodžu režīma attiecība Q/ST = 0,3-0,5, saskaņā ar (4.15) sprieguma zudums transformatorā ir ΔUTmaks = (0,3...0,5) · 5,0% = 1,5%...2,5%. 190

**3.13. SPRIEGUMA REGULĒŠANA SLODZES REŽĪMĀ**

Elektrisko sadales tīklu barošanas centros ir jāuzstāda transformatori, kuri ir nodrošināti ar nozarojumu pakāpju automātisku pārslēgšanu zem slodzes (RZS). Šī tipa transformatoros ir iebūvētas speciālas automātiskās nozarojumu pārslēgšanas iekārtas, kā arī tie ir nodrošināti ar lielāku skaitu regulēšanas pakāpju - tātad ar plašāku regulēšanas diapazonu nekā transformatori ar PBI. Tādi, piemēram, ir agrāk ražotie transformatori TCMH ar jaudu 20, 35, 60 un 100 kVA spriegumam 10/0,4 kV ar vienpakāpes (±5%) sprieguma regulēšanu augstākā sprieguma tinuma. Pār­slēdzošā ierīce ieslēgta starp atzarojumiem «Hom.» un « + 5%» (3.26. zīm. *a*). Tā sastāv no pārslēga ar kustīgu kontaktu *4* un elek­tromagnēta *3,* kas pārslēdz šo kontaktu.

|  |
| --- |
| 3.26. zīm. Sprieguma regulēšana slodzes režīma:  *a* — pārslēdzošās ierīces shēma transformatora TCMH sprieguma regulēšanai slodzes režīmā: 1 — strāvu ierobežojošais rezistors; *2* — pārslēga nekustīgie kontakti; *3* — pārslēga elektro­magnēts; *4* — pārslēga kustīgais kontakts; , *b* — transformatora TMH sprieguma pakāpjveida regulēšanas shēma: 1 —galvenais tinums; *2* — regulēšanas tinums; *3*— strāvu ierobežojošais reaktors; *4* un *5* — kustīgie kontakti; *6— I, 6— II, 6— III* — nekustīgie kontakti. |

Ja transformators strādā kā pazeminošais un kustīgais kontakts *4* saslēgts ar kontaktu, kurš savienots ar atzarojumu «+ 5%», tad, lai spriegumu palielinātu par 5%, kustīgais kontakts 4jāpārslēdz uz kontaktu, kas savienots ar atzarojumu «Hom.». Kustīgais kontakts vispirms pāriet uz vidējo kontaktu, un slodzes strāva plūst uz tinumu caur strāvu ierobežojošo rezistoru 1. Pēc tam kustīgais kontakts *4* saslēdz augšējo un vidējo nekustīgo kontaktu, bet, tā kā tinuma daļa starp šiem kontaktiem noslēdzas īsi caur rezistoru 1, tad īsslēguma strāva ir ierobežota. Kad kustīgais kontakts *4* pāriet uz augšējo ne­kustīgo kontaktu, pārslēgšanas process beidzas. Ja slodze samazi­nās, ar šo pašu ierīci kontaktu *4* var pārslēgt Uz atzarojumu « + 5%» un pazemināt spriegumu par 5%. Elektromagnēta konstrukcija pa­redz pārslēga iedarbības aizturi līdz 30 s, lai izvairītos no nevajadzī­gas pārslēgšanas īslaicīgu sprieguma svārstību gadījumos, kura saīsina pārslēga darbmūžu.

Pārslēgšana no viena atzarojuma uz otru notiek automātiski. Pārslēdzošā ierīce novietota tvertnes iekšpusē virs transformatora magnētvada.

Ražo arī regulējamos transformatorus ar ievērojami lielākām jau­dām 1000...6300 kVA. Transformatoriem ar spriegumu 20 un 35 kV spriegumu var regulēt ±6 x 1,5% robežās, transformatoriem ar spriegumu 6 un 10 kV — ±8 x 1,25% robežās. Slogota jaudas transformatora TMH pakāpj­veida regulēšanas principiālā shēma parādīta 3.26. zīmējumā *b.* Pie­mēram, ja pārslēgs jāpārslēdz no nekustīgā kontakta *6*— II uz *6*—I, vispirms no kontakta *6*— II uz *6*— I pārslēdzas kustīgais kontakts *5.* Tinuma daļa starp kontaktiem *6*—II un *6*—I noslēdzas caur reak­toru *3,* kurš ierobežo strāvu šajā tinuma daļā. Pēc tam no kontakta *6*— II uz kontaktu *6*—I pārslēdzas kustīgais kontakts *4,* un pārslēg­šanas process beidzas. Kustīgie kontakti *4* un 5 ir savstarpēji izo­lēti.

Pārslēgs ievietots atsevišķā ar eļļu pildītā tvertne. To darbina elektriski. Pārslēgšana notiek automātiski atkarībā no tīkla sprie­guma izmaiņas.

Tātad, augstākā sprieguma tinums transformatoriem ar RZS sastāv no divām daļām: neregulējamās un regulējamās daļas. Tinuma regulējamā daļa var sastāvēt no vairākām nozarojumu regulēšanas pakāpēm. Atkarībā no transformatoru tipa regulēšanas tinumu izveido ar šādām regulēšanas pakāpēm: ±12 x 1%; ±10 x 1,5%; ±8 x 1,78%; ±8 x 1,25%; ±8 x 1,5%; ±8 x 2%; ±6 x 2%.

Pieņemsim, ka tinuma regulējošajā daļā ir 12 nozarojumu pakāpes, kuru vijumi pievienoti galvenajam tinumam saskaņotā slēgumā (sk. strāvu virzienus tinumos 3.27. att.). Ja pieslēdzam nozarojumu pakāpes (1...6), tad kopējais vijumu skaits pieaug un transformācijas koeficients palielinās. Pārējās sešas nozarojumu pakāpes (7... 12) pievienotas galvenajam tinumam p r e t s 1 ē g u m ā, un tie kompensē daļu AS tinuma. Šai gadījumā kopējais vijumu skaits samazinās un samazinās ari transformācijas koeficients.

Automātiskā pārslēgšanas iekārta 3.27. att. sastāv no diviem kustīgajiem kontaktiem M un N, no kontaktoriem K1 un K2, un no reaktora R. Reaktora tinuma viduspunkts savienots ar transformatora tinuma neregulējamo daļu. Normāli strādājot, slodzes strāva sadalās vienmērīgi starp reaktora abām daļām (pusēm), tādēļ magnētiskā plūsma reaktorā ir maza un reaktora pretestība niecīga, rezultātā arī sprieguma zudumi reaktorā ir nelieli.

|  |
| --- |
|  |

3.27. att. Transformatora ar RZS shēma

Pārslēdzot transformatora pakāpes, piem., no 2 uz 1, atslēdz kontaktoru K1 un kustīgo kontaktu M pārvieto uz nozarojuma izvadu 1. Pēc tam ieslēdz kontaktam K1 darbā. Šajā momentā tinuma sekcija 1-2 ir noslogota caur reaktora R pretestību un tajā plūst izlīdzinošā strāva 

Ievērojama reaktora induktīvā pretestība XR ierobežo izlīdzinošo strāvu , kura rodas tinuma sekcijas 1 -2 sprieguma klātbūtnē. Reaktora pretestība šai gadījumā ir liela tādēļ, ka strāvas virziens abās reaktora dalās ir vienāds. Rezultātā kopējā magnētiskā plūsma reaktorā ir liela un reaktora pretestību palielina. Šādi tiek ierobežota izlīdzinošā strāva ilzl un netiek pārslogoti nozarojuma pakāpes tinumi. Pēc tam atslēdz kontaktora K2, pārvieto kustīgo kontaktu N uz nozarojuma izvadu 1 un ieslēdz atpakaļ kontaktoru K2.

RZS izmantošana dod iespēju pārslēgt automātiski nozarojumu pakāpes, izmainīt transformācijas koeficientu zem slodzes diennakts laikā un rezultātā nodrošināt saskaņoto sprieguma regulēšanu elektriskā sadales tīkla barošanas centrā.

**3.14. AUTOTRANSFORMATORS**

Autotransformators atšķiras no parasta divtinumu transformatora ar to, ka tam ir tikai viens tinums, t.i., primārais un sekundārais tinums veido vienu kopīgu elektrisko ķēdi, un zemākā sprieguma tinums ir daļa no augstākā sprieguma tinuma (3.28. att.). Tādējādi autotransformatora primārā un sekundārā ķēde ir saistītas ne tikai magnētiski, bet arī elektriski.

Transformācijas koeficientu autotransformatoram nosaka, tāpat ka divtinumu transformatoram



|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

3.28. att. Vienfāzes pazeminošā autotransformatora shēma (a) un laboratorijas autotransformators TDGC2 (b).

Tinumu kopīgā daļā plūstošā strāva *I*12 pazeminoša autotransformatorā ir vienāda ar slodzes strāvas *I*2 un primārās strāvas *I*1 starpību

*I*12 = *I*2 – *I*1.

Sekundārā tinuma jaudu aprēķina



kur *Sm* – jauda, kuru sekundārajai ķēdei no primārās ķēdes nodod ar elektromagnētisko lauku (elektromagnētiskā jauda);

*Se* – jauda, kuru sekundārais tinums saņem tieši no tīkla (bez magnētiskā lauka līdzdalības).

Autotransformatoram salīdzinājumā ar parasto divtinumu transformatoru ir šādas priekšrocības un trūkumi.

Priekšrocības: mazāks aktīvo materiāla (vara, elektrotehniska tērauda) patēriņš, mazāki gabarīti, augstāks lietderības koeficients (pat līdz 99,7%), ekonomiskāks.

Trūkums: tā kā starp primāro un sekundāro tinumu pastāv elektriskā saite, tad augstākais spriegums var nokļūt zemākā sprieguma tīklā.

***2.15. piemērs.*** Vienfāzes pazeminošā autotransformatora nomināla jauda SN = 1760 VA, primārā strāva *I*1 = 8 A un sekundārais spriegums *U*2 = 100 V. Aprēķināt autotransformatora primāro spriegumu, transformācijas koeficientu, slodzes strāvu, strāvu kopējā tinumu daļā un sekundāro tinumu jaudu.

Atrisinājums.

1. Primārais spriegums



2. Transformācijas koeficients



3. Slodzes strāva



4. Strāva kopēja tinumu daļā



5. Sekundāra tinuma jauda



**3.15. TRANSFORMATORI TAISNGRIEŽU IERĪČU BAROŠANAI**

Apskatīsim vienfāzes (3.29. a un b att.) un trīsfāžu transformatoru (3.29. c att.) darbību pēc vienpusperioda taisngrieža shēmas.

Strāva sekundārajā tinumā i2 ir pulsējoša (3.29. b att.) un tai ir divas komponentes: nemainīgā Id un mainīgā i:



Neievērojot tukšgaitas strāvu, transformatora magnetizējošo spēku vienādojums ir

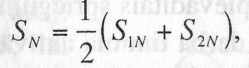


Nemainīgā komponente Id primārajā tinumā netransformējas, un magnetizējošais spēks MS Idw2 paliek nelīdzsvarots, radot piespied-magnetizēšanas plūsmu Lai magnētvads nepārsātinātos, nepie­ciešams palielināt tā šķērsgriezuma laukumu. Līdz ar to palielinās transformatora izmēri, masa, zudumi utt.

|  |
| --- |
|  |

3.29. att. Transformatori vienpusperioda taisngrieža shēmās: vienfāzes transformatora elektriskā shēma (a),tā strāvu un spriegumu izmaiņas diagrammas (b)un trīsfāžu zvaigznes slēguma ar nullvadu (c) transformatora shēma.

Mainīgā komponente i = i2 - Id darbojas kā parastā transformatorā. Tā kā tinumos strāva nav sinusoidāla, pasliktinās transformatora ekspluatācijas raksturojumi, tajā skaitā arī lietderības koeficients. Arī tinumos plūstošo strāvu i, un i2 efektīvās vērtības nav vienādas, un tāpēc šo tinumu jaudas S1N ≠ S2N. Par aprēķina jaudu pieņem jaudu



un tā vienmēr ir mazāka par sekundārā tinuma nominālo jaudu



Komponentes Id un strāvu nesinusoidalitātes kvantitatīvā ietekme ir atkarīga no taisngriešanas shēmas, gludinātājfiltra un slodzes rakstura.

**3.16. MAGNĒTISKIE PASTIPRINĀTĀJI (MP)**

Magnētiskais pastiprinātājs ir statiska elektromagnētiska ierīce pakāpeniskai maiņstrāvas I1 (sprieguma U1) regulēšanai, izmainot spoles ar feromagnētisko serdi (droseles) induktīvo pretestību, to mag­netizējot ar līdzstrāvu I2 (3.30. a att.).

Darba tinumam pievada maiņstrāvu, vadības tinumam - līdzstrāvu.

Pēc Oma likuma strāva darba tinumā:

(3.21)

kur Ul - darba tinumam pievadītais spriegums;

R = Rd.t + Rsl (Rd.t - darba tinuma aktīvā pretestība; Rsl - slodzes aktīvā pretestība) - ķēdes, pa kuru plūst darba strāva, aktīvā pretestība;

X = ωL - darba tinuma induktīvā pretestība;

(ω = 2πf = const - sprieguma leņķiskā frekvence;

 - darba tinuma induktivitāte;

μ - serdes magnētiskā caurlaidība, darbojoties maiņstrāvai;

S = const - serdes šķērsgriezuma laukums; .

wd.t - const - darba tinuma vijumu skaits;

*l* = const - magnētiskā spēka līnijas vidējais garums.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

3.30. att. Vienkāršākais magnētiskais pastiprinātājs (a), ar pretslēgumā savienotiem vadības tinumiem (b) un kopēju vadības tinumu (c): w1 - darba tinuma un w2 - vadības tinuma vijumu skaits.

Kā redzams pēc formulas (3.21), strāva darba tinumā I1 ir atkarīga no serdes magnētiskās caurlaidības I = f(μ). Savukārt, magnētiskā caurlaidība ir atkarīga no magnetizējošās līdzstrāvas μ = f(I2), kā parādīts 3.31. a attēlā, kur H2 - vadības tinuma magnētiskā lauka intensitāte.

Ja U = const, tad magnētiskā pastiprinātāja darba raksturlīkne I1 = f(I2) parādīta 3.31. b attēlā, kur I0 - magnētiskā pastiprinātāja tukšgaitas strāva. Jācenšas, lai tā būtu pēc iespējas mazāka (palielinās darba strāvas I, regulēšanas asums), izgatavojot serdi ar iespējami mazāku magnētisko pretestību.

|  |
| --- |
|  |

3.31. att. Magnētiskā pastiprinātāja magnētiskās caurlaidības izmaiņa, mag­netizējot serdi (a), strāvas darba tinumā izmaiņa, magnetizējot serdi (h), un magnētiskās plūsmas un strāvas darba tinumā izmaiņa vienkāršākajā magnētiskajā pastiprinātājā (c).

Apskatīsim, kā izmainās magnētiskā plūsma Φ serdē un strāva I1, darba tinumā, darbojoties magnētiskajam pastiprinātājam (3.31. c att.). Attēlā redzam, ka vienkāršākajā magnētiskajā pastiprinātājā strāva I1 darba tinumā nav simetriska un vadības tinumā inducējas mainīgs EDS (kā parastā transformatorā), kas pasliktina magnētiskā pastiprinātāja darbību. Tāpēc tādus magnētiskos pastiprinātājus praksē nelieto.

Šo trūkumu novēršanai magnētiskajā pastiprinātājā lieto virknē ar vadības tinumu ieslēgtu droseli L (3.30. a att.) vai vadības un darba tinumu sadala divās daļās ar vienādu vijumu skaitu (3.30. b att.). Tinumu daļas saslēdz tā, lai EDS darba tinumā summētos, bet EDS vadības tinumos sav­starpēji kompensētos.

Abos gadījumos vadības tinumos inducējas maiņspriegums, kurš var būt bīstams izolācijai. To var novērst, novie­tojot darba tinumus uz divām serdēm, bet vadības tinumu — uz kopējas serdes (3.30. c att.). Tad kopējā serdē rezultējošā magnētiskā plūsma

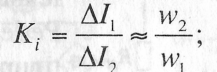


un maiņspriegums vadības tinumā neinducējas.

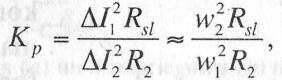
Vadības tinumi var būt vairāki, kā tas ir magnētiskajos pastiprinātājos dīzeļlokomotīvēs u.c.

Magnētisko pastiprinātāju darbību raksturo:

- strāvas pastiprinājuma koeficients:

 un

-jaudas pastiprinājuma koeficients:



kur Rsl un R2 - slodzes un vadības tinuma aktīvā pretestība.

Strāvas pastiprinājuma koeficients *Ki* ≈ 5-20, un to var paaugstināt, palielinot vadības tinuma vijumu skaitu.

Lai magnētiskais pastiprinātājs reaģētu uz vadības strāvas I2 virziena izmaiņu, lieto priekšmagnetizēšanas tinumu wpr (3.32. a att.). Tad magnētiskā pastiprinātāja darba raksturlīkne novirzās pa labi vai pa kreisi par Ipr (3.32. b att.). Novirzes skaitliskā vērtība atkarīga no priekš­magnetizešanas un vadības tinuma vijumu attiecības.

Nepieciešamības ga­dījumā magnētiskajos pastiprinātājos lieto at­griezenisko saiti, kad darba strāva I1 magnetizē vai atmagnetizē serdi. Atgriezeniskā saite var būt ārējā, izmantojot tinumu wa.s (3.33. a att.), vai iekšējā (3.33. b att.). Pēdējā gadījumā darba tinumos w, plūst pulsējoša strāva kuras nemainīgā komponente papildus magnetizē serdi (sk. trans­formatorus taisngriežu ierīču barošanai).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

3.32. att. Magnētiskais pastiprinātājs ar priekšmagnetizēšanas tinumu (a) un tā darba

raksturlīkne (b).

Atgriezeniskā saite var būt pozitīva, t.i., magnetizēt serdi, palielinot pastiprinājuma koeficientu, un negatīva, atmagnetizējot serdi.

Magnētisko pastiprinātāju ar iekšējo pozitīvu atgriezenisko saiti sauc par amplistatu. Lieto dīzeļlokomotīvēs vilces ģeneratora jaudas automātiskas regulēšanas sistēmās (ARS) u.c.

|  |
| --- |
|  |

3.33. att. Magnētiskais pastiprinātājs ar ārējo (a) un iekšējo (b) atgriezenisko saiti.

**3.17. LĪDZSTRĀVAS UN LĪDZSPRIEGUMA TRANSFORMATORI**

Tie ir vienkārši magnētiskie pastiprinātāji. Lieto dīzeļlokomotīvēs vilces ģeneratora jaudas automātiskas regulēšanas sistēmā u.c.

***Līdzstrāvas transformatoram*** (3.34. a att.) ir divas droseles LI un L2, kuru darba tinumi 1 savienoti virknes slēgumā, vadības tinumi - virknē un pretslēgumā, vai to lomu pilda kabelis 2, kurš caurtvērts abām serdēm (piemēram, dīzeļlokomotīvei60).

|  |
| --- |
|  |

3.34. att. Līdzstrāvas (a) un līdzsprieguma (b) transformatora shēma: 1 - darba tinumi; 2 - vadības tinums (kabelis); 3 - taisngriezis; 4 - papildrezistors.

Izmainoties līdzstrāvai I1 izmainās seržu magnētiskā piesātinātība. Tātad maiņstrāva darba tinumos I2 un līdzstrāva I2´ slodzē izmainās proporcionāli vadības strāvas I1 izmaiņai.

***Līdzsprieguma transformatora*** (3.34. b att.) darbība ir līdzīga. Vadības tinumu 2 ķēdē ieslēgts papildrezistors 4, un tie pievienoti pastāvīgam spriegumam U1, (piemēram, vilces ģeneratora spriegu­mam). Darba tinumi 1 var būt saslēgti paralēli.

Izmainoties spriegumam U1, proporcionāli izmainās vadības strāva I1, strāva darba tinumos I2 un spriegums U2´.

**3.18. MĒRTRANSFORMATORI**

Mērtransformatorus (spriegummaiņus un strāvmaiņus) lieto, lai pieslēgtu dažādus kontroles un mērīšanas aparātus maiņstrāvas tīklam, kad tieša pieslēgšana nav iespējama vai vēlama. Bez tam mērtransformatori palielina augstsprieguma ietaišu apkalpošanas drošību.

Mērtransformatori paplašina mērapjomu, un līdz ar to rodas iespēja ar vieniem un tiem pašiem mēraparātiem mērīt dažādus spriegumus un strāvas.

Sprieguma transformatorus — spriegummaiņus (3.35. zīm.) lieto voltmetru, hercmetru, kā arī dažu mēraparātu (skaitītāju, vatmetru, releju u. c.) sprieguma spoļu pieslēgšanai. Ar spriegummaiņiem (trīsfāzu vai vienfāzes) pazemina mēraparātiem pievadāmo spriegumu. Praktiski spriegummaiņa darba režīms ir tuvs tukšgaitas režīmam.

Strāvas transformatorus — *strāvmaiņus* (3.36. zīm.) lieto ampērmetru, kā arī dažādu mērīšanas ierīču un releju strāvas spoļu pieslēgšanai.

Strāvmaiņa primāro tinumu ieslēdz līnija virknē ar patērētāju, bet sekundārā tinuma ķēdē ieslēdz mēraparātu.

Tā kā mēraparātu strāvas spoļu pretestība ir relatīvi maza (ma­zāka par 1 Ω), tad var uzskatīt, ka strāvmainis praktiski darbojas īsslēguma režīmā.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | ***b*** |
| 3.35. att. Spriegummaiņa shēma: a — principiālā; b — pieņemtais apzīmējums. | | 3.36. att. Strāvmaiņa shēma: a — principiālā; b — pieņemtais apzīmējums. | |

Strāvmaiņa primārajā tinumā plūstošā strāva radā magnētisko plūsmu Ф1, kuras vērtība atkarīga no slodzes strāvas. Strāvmaiņa sekundārā strāva rada magnētisko plūsmu Ф2 kura atmagnetizē transformatora serdi. Summārā magnētiska plūsma ir neliela. Ja slogota strāvmaiņa sekundāro ķēdi atstāj nesaslēgtu, tad sekundāra strāva un magnētiskā plūsma Ф2 ir vienāda ar nulli. Tā ka atmagnetizējošā plūsma vienāda ar nulli, tad summārā magnētiskā plūsma ir vienāda ar primārā tinuma magnētisko plūsmu Ф1.Ši plūsma, kas atkarīga no slodzes, ir relatīvi liela. Tā inducē strāvmaiņa se­kundārajā tinumā EDS, kas var būt bīstams apkalpojošam personā­lam. Bez tam, ja magnētiskās plūsmas Ф1 vērtība ir liela, ievēro­jami pieaug zudumi tēraudā. Tā rezultātā tērauds pārkarst, bet tas var izraisīt strāvmaiņa sabojāšanos.

Tātad tīklā ieslēgtam strāvmainim sekundāro ķēdi nedrīkst at­stāt nesaslēgtu. Ja mēraparātus atvieno, strāvmaiņa sekundāra ķēde jāsaslēdz īsi.

Apkalpojošā personāla drošībai spriegummaiņiem un strāvmaiņiem vienu no sekundārā tinuma spailēm un tērauda tvertni sazemē.

**4. ASINHRONĀS MAŠĪNAS**

**4.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi**

Izšķir trīs galvenos maiņstrāvas mašīnu pamattipus: sinhronas, asinhronas mašīnas un maiņstrāvas kolektormašīnas.

Visvairāk izplatītas ir trīsfāzu maiņstrāvas mašīnas. Vienfāzes mašīnas lieto reti, galvenokārt ļoti mazām jaudām (PN < 1 kW). Atsevišķos gadījumos izmanto arī divfāzu un sešfāzu maiņstrāvas mašīnas.

Maiņstrāvas mašīnu teorijā ir virkne kopīgu jautājumu, tāpat mašīnām ir vairāki līdzīgi konstruktīvi elementi. Tāpēc lietderīgi tos aplūkot pirms konkrētu tipu mašīnu teorētisko un praktisko jautājumu iztirzāšanas.

Visu daudzfāzu maiņstrāvas mašīnu darbības pamatā ir rotējošs magnētiskais lauks.

Sinhronajās mašīnās rotora un rotējošā magnētiskā lauka rotā­cijas frekvences ir vienādas, t. i., rotors un magnētiskais lauks rotē sinhroni. Sinhronās mašīnas galvenokārt izmanto par ģeneratoriem, un ar nelieliem izņēmumiem visi elektrostacijās strādājošie ģeneratori ir sinhronie ģeneratori. Tomēr arvien lielāku nozīmi iegūst sinhronie dzinēji, kuru tehniski ekonomiskie rādītāji noteiktos apstākļos ir ievē­rojami labāki nekā citu tipu elektrodzinējiem. Sinhronās mašīnas iz­manto arī par sinhronajiem kompensatoriem energosistēmās reaktīvās jaudas ģenerēšanai (elektrisko tīklu jaudas koeficienta paaugstinā­šanai) .

Asinhronajās mašīnās rotora rotācijas frekvence atšķiras no rotē­jošā magnētiskā lauka rotācijas frekvences, t. i., rotors un magnētis­kais lauks rotē asinhroni. Asinhronās mašīnas izmanto gandrīz tikai par dzinējiem, jo asinhronajiem ģeneratoriem salīdzinājumā ar sin­hronajiem ģeneratoriem ir būtiski trūkumi. Asinhronie dzinēji to vien­kāršās konstrukcijas un apkalpošanas, kā arī darbības drošuma dēļ ir visizplatītākie elektrodzinēji dažādās tautas saimniecības nozarēs.

Maiņstrāvas kolektormašīnām arī ir raksturīga rotora asinhrona griešanās attiecībā pret rotējošo magnētisko lauku, un tāpēc no šī viedokļa tās var uzskatīt par asinhronajām mašīnām. Tomēr sakarā ar to, ka maiņstrāvas kolektormašīnām ir kolektors un ar to saistītās īpatnības, šīs mašīnas lietderīgi izdalīt atsevišķā grupā. Maiņstrāvas kolektormašīnas izmanto gandrīz tikai par dzinējiem. Šo dzinēju teh­niski ekonomiskie radītāji ir ievērojami sliktāki nekā līdzstrāvas un, it sevišķi, asinhronajiem dzinējiem, tāpēc maiņstrāvas kolektordzinējus lieto ļoti reti.

**4.2. Asinhrono mašīnu uzbūve**

Asinhronās mašīnas galvenās sastāvdaļas ir stators un rotors. At­karībā no rotora konstruktīvā izveidojuma izšķir divus asinhrono ma­šīnu pamattipus: asinhronās mašīnas ar īsslēgtu rotoru (4.1. att.) un asinhronās mašīnas ar fāzu rotoru (kontaktgredzenu rotoru) (4.2. att.).

Asinhronās mašīnas stators sastāv no tērauda serdes 2, kurai ir doba cilindra veids. Serde salikta no 0,5 mm (retāk no 0,35 mm) bieziem savstarpēji izolētiem elektrotehniskā tērauda skārdiem. Statora serdes iekšējā virsmā izveidotas rievas, kurās ievietots statora tinums 3 (parasti trīsfāzu).

Asinhronās mašīnas rotors sastāv no cilindriskas serdes 2, kura, tāpat kā statora serde, salikta no elektrotehniskā tērauda skārdiem un nostiprināta uz vārpstas 5. Rotora serdes ārējā virsmā izveidotas rievas rotora tinuma 6 ievietošanai.

|  |
| --- |
|  |

4.1. att. Asin­hronā dzinēja ar īsslēgtu ro­toru uzbūve: 1 - statora korpuss, 2 - statora serde,

3 - statora tinums, 4 - rotora serde, 5 - vārpsta, 6 - ro­tora (īsslēgtais) tinums,

7 - 2— gultņu vairogs, 8 - ventilatora ap­valks, 9 – ventilators.

|  |
| --- |
|  |

4.2. att. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru uzbūve: 1 - statora korpuss, 2 - statora tinums,

3 - rotora serde, 4 - kontaktgredzeni, 5 – sukas, 6 - rotora (fāzu) tinums, 7 - apvalks, 8 - gultņu vairogs, 9 - vārpsta, 10 — izvadu kārba.

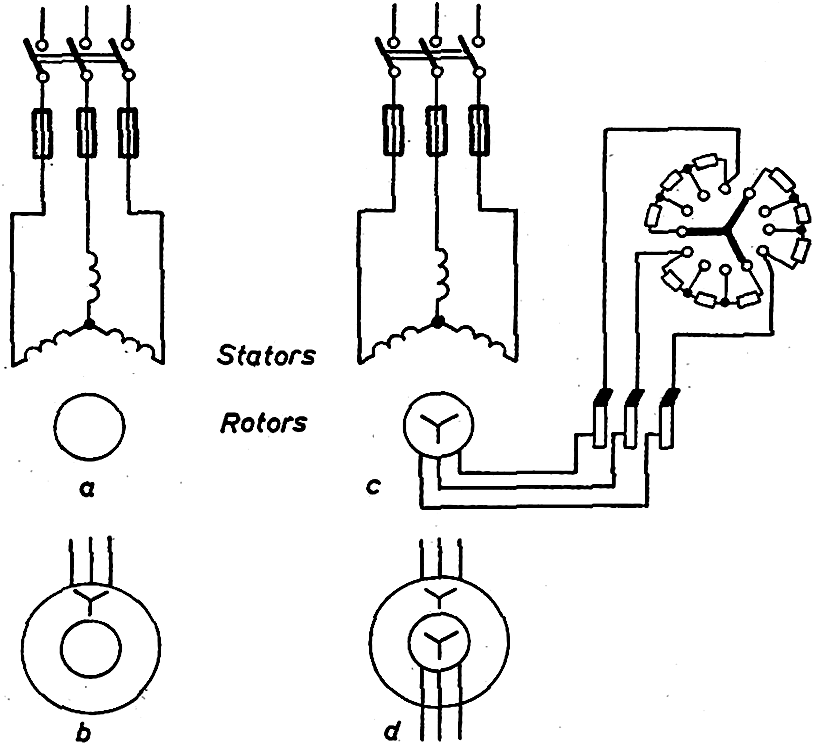
Mašīnas vārpsta balstās divos gultņu vairogos iestiprinātos gultņos. Rotora rievās ievietoti vara vai alumīnija stieņi, kuri abos galos savienoti ar gredzeniem. Stieņi un gredzeni veido īsi slēgtu rotora tinumu. Rotora tinumam nav nekādas saites ar ārējo elektrisko tīklu.

Statora tinumu pieslēdzot trīsfāzu strāvas tīklam (rotors nekustīgs), rotējošās magnētiskās plūsmas līnijas šķeļ rotora īsi slēgtā kontūra stieņus un inducē tajos elektrodzinējspēku *E*2, kas uztur indukcijas strāvu *I*2. Inducētā *E*2 resp. *I*2 virzienu rotora kontūrā nosaka pēc labās rokas likuma, pieņemot, ka plūsma ir nekustīga, bet rotors rotē pretī plūsmas griešanās virzienam ar kādu relatīvo ātrumu, jo EDS indukciju izraisa magnētiskās plūsmas un vadītāja relatīvā kustība. Starp magnētisko lauku un rotora strāvu pastāv savstarpēja mijiedarbība: magnētiskais lauks darbojas ar elektromagnētisku spēku uz katru rotora stieni ar strāvu, radot elektromagnētisko griezes momentu. Rotors sāk paātrināti griezties rotējošā magnētiskā lauka griešanās virzienā.

Kad iestājas līdzsvars starp dzinēja elektromagnētisko spēku radīto griezes momentu un bremzējošo momentu, ko rada piedzenamā darba mašīna un berzes spēki dzinējā, rotora ātrums vairs nemainās.

Tātad, asinhronā dzinēja rotējošais magnētiskais lauks un rotors rotē vienā virzienā ar dažādiem ātrumiem, turklāt rotora ātrums vienmēr mazāks par magnētiskā lauka sinhrono griešanās ātrumu, jo EDS rotora kontūrā inducējas tikai tad, kad ir relatīva kustība starp rotējošo magnētisko plūsmu un rotoru.

Pieņemtie grafiskie apzīmējumi asinhroniem dzinējiem ar īsslēgto un fāzu rotoru paradīti 4.3. attēlā.



4.3. Trīsfāzu asinhrono dzinēju shēmas: *a* — ar īsslēgto rotoru (izvērstā shēma); *b* — vienkāršota principiālā shēma; *c —* ar fāzu rotoru (izvērstā shēma); *d —* vienkāršota principiālā shēma.

Īsslēgtā rotora rievās ievietots «vāveres rata» tipa tinums (4.4. att. a). Tas izveidots no vara vai alumīnija stieņiem (3), kuri no rotora serdes nav izolēti. Stieņu gali rotora abās pusēs savienoti ar diviem tāda paša materiāla gredzeniem (4). Mašīnām ar jaudu līdz 100 kW rotora rievas zem spiediena pielej ar izkausētu alumīniju, reizē atlejot arī abus gredzenus rotora galos kopā ar ventilācijas spārniņiem (4.4. att. b). Asinhronie dzinēji ar īsslēgtu rotoru ir visizplatītākie dzinēji. To galvenā priekšrocība ir ļoti vienkāršā rotora konstrukcija, tie ir darbā droši un lētāki par dzinējiem ar fāzu ro­toru.

Fāzu rotora rievās (4.5. att.) ievie­tots trīsfāzu linums, kura konstruktīvais izveidojums līdzīgs statora trīsfāzu tinu­mam. Rotora tinuma fāzes saslēgtas zvaig­znē un izvadi pievienoti uz vārpstas ne­kustīgi nostiprinātiem kontaktgredzeniem (sk. 4.2. att.). Pa kontaktgredzeniem slīd sukas, ar kuru starpniecību rotora ķēdē var ieslēgt trīsfāzu reostatu vai arī rotora tinumu saslēgt īsi. Lai samazinātu mehāniskos zudumus un kontaktgredzenu un suku nodilumu, dzinē­jiem ar fāzu rotoru parasti ir iekārtots mehānisms, ar kuru, kontaktgredzenus saslēdzot īsi, paceļ sukas.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

4.4. att. Asinhrono mašīnu īsslēgto rotoru iz­veidojums: a — «vāveres rats», b — īsslēgtais rotors ar lietu alumīnija tinumu: 1 - vārpsta, 2 - rotora serde, 3 – rotora stieņi, 4 – rotora gredzeni ar ventilācijas spārniņiem.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

4.5. att. Asinhrono mašīnu fāzu rotoru iz­veidojums: 1 - vārpsta, 2 - rotora (fāzu) tinums,

3 - rotora serde, 4 - kontaktgredzeni.

Asinhronās mašīnas statora trīsfāzu tinuma gali pievienoti izvadu kārbas 10 spaiļu plāksnītei. Statora tinuma fāzu sākumus apzīmē ar C1, C2, C3 un attiecīgo fāzu tinumu beigas ar C4, C5, C6. Statora tinuma fāzes saslēdz zvaigznē vai trīsstūrī, attiecīgi savienojot iz­vadu galus (4.6. att.). Tā kā fāzu tinumi aprēķināti noteiktam no­minālajam

|  |
| --- |
| ***a c*** |

4.6. att. Asinhrona dzinēja statora tinumu slēguma shēmas: *a* - izvadu izvietojums uz spaiļu plāksnītes; *b* — tinumu zvaigznes slēgums; *c* — tinumu trīsstūra slēgums.

spriegumam, tad statora tinuma saslēgšanas veids atka­rīgs no tīkla sprieguma un no statora tinuma fāzes nominālā sprie­guma vērtībām. Tā, piemēram, ja dzinēja pasē uzrādīts spriegums 220/380 V un dots apzīmējums Δ/Y, tad dzinēja pieslēgšana jāveic šādi: ja tīkla spriegums ir 220 V, tinums jāsaslēdz trīsstūrī, bet, ja tīkla spriegums ir 380 V, — zvaigznē. Rotora tinuma izvadus apzīmē ar *P*1, *P*2, *P*3.

Dzinēja statora fāžu tinumu slēguma shēmas noteikšanai atkarībā no barošanas tīkla sprieguma lieluma var izmantot 4.1. tabulu.

4.1. tabula

**Dzinēja statora fāžu tinumu slēguma shēmas**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Dzinēja uzrakstu plāksnītē  uzradītais spriegums, V | Barošanas trīsfāžu tīkla līnijas spriegums, V | | | |
| 127 | 220 | 380 | 660 |
| 127/220 | Δ | Y | — | — |
| 220/380 | — | Δ | Y | — |
| 380/660 | — | — | Δ | Y |

**4.3. Rotējošais magnētiskais lauks**

Trīsfāzu strāvas visvērtīgākā īpašība izpaužas relatīvi vienkāršā iespējā radīt telpā rotējošu magnētisko lauku. To izmanto maiņstrāvas mašīnās, mēraparātos u.c. aparātos.

Priekšstatu par šo īpatnējo fizikālo parādību – rotējošo (skrejošo) magnētisko lauku – var iegūt izmantojot grafisko iztirzājumu.

Trīs vienādas spoles statorā novieto tā, ka to plaknes viena ar otru veido 1200. Spoļu beigas *X*, *Y* un *Z* savieno kopā, t.i., saslēdz zvaigznē (4.7. att. a). Spoles ass pozitīvais virziens no A uz X , no B uz Y un no C uz Z (4.7. att. *a*).

Spoļu sākumus *A*, *B* un *C* pievienojot simetriskai trīsfāzu spriegumu sistēmai, spolēs plūdīs simetriskas sinusoidālas strāvas *iA*, *iB* un *iC* (4.7. att. *b*)

*iA = Im*sin*ωt*,

*iB = Im*sin(*ωt*-120°), (4.1)

*iC = Im*sin(*ωt*-240°),

kur *ω* = 2π*f*1 , а *f*1 – tīkla frekvence.

Katra strāva rada pulsējošu magnētisko plūsmu Ф*A*, Ф*B* un Ф*C*.

Katras spoles magnētiskās plūsmas ass ir perpendikulāra attiecīgās spoles plaknei un sakrīt ar šīs spoles ģeometrisko asi.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

4.7. att. Trīsfāzu strāvas rotējošā magnētiskā lauka iegūšanas shēma (a) un spolēs plūstošo

strāvu grafiki (b): 1– stators, 2 – statora tinumi, 3 – rotors, 4 – rotora tinumi.

Spoļu strāvu maksimālās vērtības ir vienādas, t.i., *IAm= IBm= ICm = Im*, tāpēc vienādas ir arī spoļu plūsmu maksimālās vērtības: Ф*Am=* Ф*Bm=* Ф*Cm=* Ф*m*.

Spoļu ietvertajā telpā katrā mirklī pastāv noteikta virziena un lieluma rezultējošā magnētiskā plūsma kā triju spoļu plūsmu momentāno vērtību ģeometriskā summa:

 (3.2)

Izrādās, ka jebkurā mirklī rezultējošās plūsmas skaitliskā vērtība ir viena un tā pati (Ф *= const*), bet rezultējošās plūsmas virziens telpā nepārtraukti mainās.

Noteiksim grafiski rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitlisko vērtību un virzienu patvaļīgi izvēlētos laika momentos *t*1, *t*2, *t*3, *t*4, *t*5 un *t*6 (4.7. att. b).

Laika momentā *t*1 strāva *iA* ir pozitīva *iA = Im*, tāpēc Ф*A =* Ф*m*, strāvas *iB* un *iC* ir negatīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = - Im/*2unФ*B =* Ф*C =* Ф*m/*2.

Iezīmējot attēlā mērogā visu triju plūsmu vektorus un tos ģeometriski summējot, dabū rezultējošo plūsmas vektoru Ф laika momentam *t*1 (3.8. att. poz.1.). Rezultējošā plūsma skaitliski vienāda ar 3/2 no vienas spoles plūsmas maksimālās vērtības Ф*m* (Ф *=* 3 Ф*m /*2).

Laika momentā *t*2 *= t*1*+T/*6 strāva *iC* ir negatīva *iC = - Im* un Ф*C =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iB* ir pozitīvas un skaitliski vienādas *iA = iB = Im/*2, tādēļ Ф*A =* Ф*B =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība Ф *=* 3·Ф*m/*2, bet šīs plūsmas vektors laika sprīdī *t*2 *- t*1 *= T*/6 ir pagriezies telpā par 600 fāzu secības virzienā.

Laika momentā *t*3 *= t*1 *+ T/*3 strāva *iB* ir pozitīva *iB = Im* un Ф*B =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iC* ir negatīvas un skaitliski vienādas: *iA = iC = - Im/*2 un Ф*A=* Ф*Bc=* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*3 *- t*1 *= T/*3 pagriezies par 1200.

|  |
| --- |
|  |

4.8. att. Rotējoša magnētiskā lauka iegūšanas princips.

Laika momentā *t*4 *= t*1 *+ T/*2 strāva *iA* ir negatīva *iA = - Im* un Ф*A =* Ф*m*, strāvas *iB* un *iC* ir pozitīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = Im/*2, tādēļ Ф*B =* Ф*C =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*4 *- t*1 *= T/*2 pagriezies par 1800.

Laika momentā *t*5 *= t*1 *+* 2*T/*3 strāva *iC* ir pozitīva *iC = - Im* un Ф*C =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iB* ir negatīvas un skaitliski vienādas *iA = iB = -Im/*2, tādēļ Ф*A =* Ф*B =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*5 *- t*1 *=* 2*T/*3 pagriezies par 2400.

Laika momentā *t*6 *= t*1 *+ T* strāva *iB* ir negatīva *iB = - Im* un Ф*B =* Ф*m*, strāvas *iA* un *iC* ir pozitīvas un skaitliski vienādas *iB = iC = Im/*2, tādēļ Ф*A =* Ф*C =* Ф*m/*2. Rezultējošās magnētiskās plūsmas skaitliskā vērtība ir 3·Ф*m/*2, bet plūsmas vektors Ф laika sprīdī *t*6 *- t*1 *= T* pagriezies par 3600.

No iztirzātā secinām, ka rezultējošās magnētiskās plūsmas Ф skaitliskā vērtība nemainās: Ф *=* 3·Ф*m/*2= const, bet nepārtraukti mainās tās stāvoklis telpā, t.i., rezultējošās plūsmas vektors Ф telpā rotē ar nemainīgu rotācijas frekvenci fāzu secības virzienā: *A-B-C-A*....

Tā kā laika sprīdī *T* plūsmas vektors Ф pagriežas par 3600, tad viena perioda laikā rezultējošā plūsma Фizdara vienu pilnu apgriezienu.

Tātad ar trīsfāzu strāvu barotu triju spoļu ietvertajā telpā iegūstam rotējošu magnētisko lauku, kas šajā gadījumā ir divpolīgs.

Plūsmas Ф griešanās virzienu var mainīt, izmainot strāvu pozitīvo maksimumu *Im* secību spolēs. To realizē, apmainot vietām divus spoļu sākumiem pievienotos tīkla vadus.

Maiņstrāvas ar frekvenci *f*1*=50 Hz* radītā rotējošā magnētiskā plūsma Ф izdara 50 apgriezienus sekundē, bet vienā minūtē *n*1 *=* 60*·f*1 *=* 60·50 = 3000 apgr./min.

Rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvenci, kas ar doto maiņstrāvas frekvenci *f*1 ir nemainīga, sauc par *sinhrono rotācijas frekvenci* un apzīmē ar *n*1.

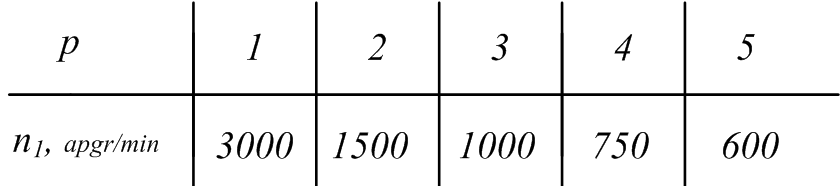
Triju spoļu trīsfāzu strāvu radītajam rotējošam magnētiskajam laukam ir divi poli (2*p* = 2) jeb viens polu pāris (*p* = 1), un lauka sinhronā rotācijas frekvence *n*1 = 3000 apgr./min, ja maiņstrāvas frekvence *f*1 = 50 Hz. Lai ar to pašu maiņstrāvas frekvenci iegūtu rotējošo magnētisko lauku ar mazāku rotācijas frekvenci n1, tad 3 spoļu vietā jāizmanto 6 vai 9, vai 12 utt. spoles; tas nozīmē, ka katrā fāzē jāieslēdz 2, 3 vai vairākas virknē savienotas spoles. Četrpolu (2*p =* 4) rotējošo magnētisko lauku iegūst ar 6 spolēm, katrā fāzē ieslēdzot 2 virknē savienotas spoles. Veidojas divas spoļu grupas pa trīs spolēm katrā. Katra grupa aizņem sektoru, atbilstošu 1800 leņķim

Tas nozīmē, ka viena maiņstrāvas perioda *T* laikā magnētiskās plūsmas Фvektors izdarīs pusapgriezienu, t.i., divas reizes mazāk nekā 3 spoļu gadījumā (2*p =* 2).

Vispārīgā gadījumā rotējošā magnētiskā lauka ar *p* polu pāriem rotācijas frekvence

*n*1*=*60*·f*1*/p*. (3.3)

Rotējošā magnētiskā lauka sinhronās rotācijas frekvences *n1* dažiem polu pāru skaitiem *p*, ja *f*1*=50 Hz*, ir šādi:



Statora tinumu pieslēdzot trīsfāzu strāvas tīklam (rotors nekustīgs), rotējošās magnētiskās plūsmas līnijas šķeļ rotora īsi slēgtā kontūra stieņus un inducē tajos elektrodzinējspēku *E*2, kas uztur indukcijas strāvu *I*2. Inducētā *E*2 resp. *I*2 virzienu rotora kontūrā nosaka pēc labās rokas likuma, pieņemot, ka plūsma ir nekustīga, bet rotors rotē pretī plūsmas griešanās virzienam ar kādu relatīvo ātrumu, jo EDS indukciju izraisa magnētiskās plūsmas un vadītāja relatīvā kustība. Starp magnētisko lauku un rotora strāvu pastāv savstarpēja mijiedarbība: magnētiskais lauks darbojas ar elektromagnētisku spēku uz katru rotora stieni ar strāvu, radot elektromagnētisko griezes momentu. Rotors sāk paātrināti griezties rotējošā magnētiskā lauka griešanās virzienā.

Kad iestājas līdzsvars starp dzinēja elektromagnētisko spēku radīto griezes momentu un bremzējošo momentu, ko rada piedzenamā darba mašīna un berzes spēki dzinējā, rotora ātrums vairs nemainās.

Tātad, asinhronā dzinēja rotējošais magnētiskais lauks un rotors rotē vienā virzienā ar dažādiem ātrumiem, turklāt rotora ātrums vienmēr mazāks par magnētiskā lauka sinhrono griešanās ātrumu, jo EDS rotora kontūrā inducējas tikai tad, kad ir relatīva kustība starp rotējošo magnētisko plūsmu un rotoru.

**4.4. Rotora slīde**

Asinhronā dzinēja raksturīga īpatnība ir tā, ka statora un rotora strāvām ir dažādas frekvences: statora strāvai ir tīkla frekvence *f*1 bet rotora strāvas un EDS frekvence *f*2 ir atkarīga no rotora griešanās ātruma *n*2.

Asinhronās mašīnas rotējošā magnētiskā lauka relatīvās rotācijas frekvences pret rotoru *ns = n*1 *- n*2 attiecību pret rotējošā lauka sinhrono frekvenci *n*1 sauc par rotora slīdi

 (3.4)

*Dzinēja režīmā* slīde vienmēr ir pozitīva *(s > 0)*, jo *n*2 *< n*1.

*Ģeneratora režīmā* rotors, ko griež kāds primārs dzinējs, griežas ātrāk nekā rotējošais magnētiskais lauks, t.i., *n*2 *> n*1, un tādēļ slīde negatīva (s < 0). Asinhronā dzinēja palaišanas momentā *n*2 *= 0* un slīde *s =* 1. Rotoram iegriežoties, slīde samazinās. Slīde *s =* 0 tad, kad *n*2 *= n*1, ko asinhronā mašīna dzinēja režīmā nevar sasniegt.

Ja asinhronās mašīnas rotoru ar ārēju mehānisku spēku griež rotējošā magnētiskā lauka virzienā ar rotācijas frekvenci, kas lie­lāka par sinhrono rotācijas frekvenci (n > n1), tad rotors apsteidz magnētisko lauku. Šajā gadījumā rotora relatīvais ātrums maina vir­zienu. Tāpēc arī rotora EDS un strāva saskaņā ar labās rokas likumu maina virzienu. Reizē ar to maina virzienu arī mašīnas elek­tromagnētiskais moments: tas kļūst par bremzējošu momentu, kas darbojas pretī ārējam mehāniskajam momentam. Asinhronā mašīna šajā gadījumā darbojas ģeneratora režīmā, un tās statora tinums atdod tīklā aktīvo jaudu.

Ja asinhronās mašīnas rotoru griež virzienā, kas pretējs magnē­tiskā lauka rotācijas virzienam (n < 0), tad rotora EDS un strāvas virzieni saglabājas tādi paši kā dzinēja režīmā. Arī elektromagnētis­kais moments, tāpat kā dzinēja režīmā, darbojas lauka griešanās vir­zienā, bet uz rotoru tas darbojas bremzējoši. Šādu asinhronās ma­šīnas darba režīmu sauc par elektromagnētiskās bremzes režīmu. Elektromagnētiskās bremzes režīmu plaši izmanto elektropiedziņā, lai nodrošinātu mehānismu ātru apturēšanu un reversu. Šo režīmu iz­manto arī tad, ja mehānisma bremzēšana ir jānodrošina ilgāku laiku, piemēram, nolaižot celtņa kravu.

Šeit minētos trīs asinhronās mašīnas darba režīmus viennozīmīgi var raksturot ar slīdes skaitlisko vērtību un zīmi, kā tas parādīts 4.9. attēlā. Šajā zīmējumā uz s un n skalas parādīti raksturīgie punkti: 1) s = 0 (n = n1) — rotors griežas ar sinhrono rotācijas frek­venci; 2) s =1 (n = 0) — rotors nekustīgs (šis punkts atbilst dzinēja palaišanas sākumam).

Asinhronā dzinēja fāzu rotora tinuma izvadus saslēdzot īsi (4.10. att.), rotorā inducētais EDS *E*2 rotora fāzēs uztur strāvu *I*2 un tādēļ rotors sāk griezties.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.9. att. Asinhronās mašīnas darba režīmi. |

Rotora rotācijas frekvence

** (4.5)

Normāli slogotu asinhrono dzinēju nominālā slīde *s=* 2…6 %.

Rotora inducēta EDS un strāvas frekvence

 (4.6)

t. i., asinhronā dzinēja rotējošā rotora strāvas frekvence propor­cionāla slīdei (4.11. att.).

Dzinēja palaišanas momentā *n*2 = 0, *s* = l un *f*2 = *f*1 = 50 Hz, bet tukšgaitā slīde *s* → 0, *n*2 ≈ *n*1 un *f*2 < 0,5 Hz.

Normāli slogotam dzinējam parasti *f*2 = 1—3 Hz.

**4.1. piemērs.** Noteikt asinhronā dzinēja rotora strāvas frekvenci, ja *s* = 4 % un *f*1 = 50 Hz.

Atrisinājums. Rotora strāvas frekvence

*f*2 = *s·f*1 = 0,04·50 = 2 Hz.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.10. att. Īsi sa­slēgta fāzu rotora shēma. | 4.11. att. Rotora strāvas frekvences f2 atkarība no slīdes. |

***4.2. piemērs.*** Aprēķināt slīdi sešpolu 2*p* = 6 trīsfāžu asinhronajam dzinējam, ja tā rotācijas frekvence *n*2 = 960 min-1 un maiņstrāvas tīkla frekvence *f*1 = 50 Hz.

Atrisinājums.

1. Sinhronā rotācijas frekvence



2. Slīde



**4.5. Asinhronā dzinēja enerģētiskā bilance un lietderības koeficients**

Asinhronajā dzinējā elektriskā enerģija pārveidojas mehāniskajā enerģijā. Šis process dzinējā saistīts ar enerģijas zudumiem, kuri sastāv no elektriskajiem, magnētiskajiem un mehāniskajiem zudumiem.

*Elektriskos zudumus* Δ*Pel* statora un rotora tinumos rada tajos plūstošās strāvas *I*1 un *I*2. Trīsfāzu asinhronajā dzinējā ar īsi saslēgtu fāzu rotoru elektriskie jaudas zudumi statora tinumā  un rotora tinumā , kur r1 un r2 — statora un rotora fāzu aktīvās pretestības. Tātad elektriskie jau­das zudumi asinhronajā dzinējā

 (4.7)

ir atkarīgi no dzinēja slodzes: slodzei pieaugot, elektriskie zudumi strauji palielinās. Dzinēju ilgstoši pārslogojot, to izdalītais sil­tums pārogļo tinumu izolāciju, un mašīna iziet no ierindas.

*Magnētiskie zudumi* Δ*Pm* saistīti ar nepārtrauktu statora un rotora tēraudu pārmagnetizēšanu un sastāv no histerēzes un virpuļstrāvu zudumiem. Ja *U*1*=* const un *f*1 *= const*, tad magnētiskie zudumi praktiski ir nemainīgi. Tā kā rotora frekvence *f*2 ir niecīga (1-3 Hz), tad magnētiskie zudumi rotorā ir neievērojami mazi, t. i., Δ*Pm*2 = 0, un mag­nētiskie zudumi mašīnā praktiski vienādi ar magnētiskajiem zu­dumiem statora tēraudā Δ*Pm*1:

Δ*Pm* = Δ*Pm*1 = const.

*Mehāniskos zudumus* Δ*Pmeh* mašīnā rada berze gultņos, berze starp sukām un kontaktgredzeniem, rotora berze pret gaisu un ventilācija. Mehāniskie zudumi proporcionāli rotora grie­šanās ātrumam. Bet, tā kā asinhrono dzinēju griešanās ātrums, dzinējam pārejot no tukšgaitas uz nominālo režīmu, izmainās maz, tad mehāniskie zudumi praktiski nav atkarīgi no dzinēja slodzes (Δ*Pmeh* = const).

Saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu dzinēja aktīvo jaudu bilances vienādojums ir

*P*1*=P*2*+*Δ*Pe*1*+*Δ*Pm*1*+*Δ*Pe*2*+*Δ*Pmeh*, (4.8)

kur *P*1 - dzinēja statora no tīkla uzņemtā jauda,

*P*2- ar dzinēja vārpstu nodotā lietderīgā mehāniskā jauda.

Jaudu bilances vienādojumu uzskatāmi attēlo enerģētiska dia­gramma (4.12. att.).

Jaudu, ko mašīnas rotē­jošais magnētiskais lauks at­dod rotoram, sauc par dzi­nēja elektromagnē­tisko jaudu:

*Pem* = *P*1 – (Δ*Pe*1 + Δ*Pm*1). (4.9)

Elektromagnētiskā jauda rotorā pārveidojas mehā­niskajā jaudā. Tā kā daļu elektromagnētiskas jaudas izlieto elektrisko zudumu segšanai rotora, tad rotējoša ro­tora attīstītā mehāniskā jauda

*Pmeh* = *Pem* – Δ*Pe*2. (4.10)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

4.12. att. Asinhronā dzinēja enerģētiskā diagramma: *1* — stators; *2* — rotors.

Elektrisko zudumu jauda rotora Δ*Pe*2 ir pro­porcionāla slīdei:

Δ*Pe*2 = *sPem*. (4.11)

Tad

*Pmeh* = *Pem*(1 - *s*), (4.12)

t. i., rotora mehāniskā jauda mainās reizē ar rotora slīdi.

Ar dzinēja vārpstu atdotā lietderīgā mehā­niskā jauda P2 ir par Δ*Pmeh* mazāka nekā rotora mehāniskā jauda *Pmeh* :

*P*2 *= Pmeh* - Δ*Pmeh*. (4.13)

Dzinēja uzrakstu plāksnītē un katalogos vienmēr dota dzi­nēja nominālā lietderīgā jauda *Pn* = *P*2*n*, nevis no tīkla uzņemtā nominālā aktīvā jauda *P*1*n*.

Dzinēja lietderības koeficients ir ar vārpstu atdotās lietderīgās jaudas *P*2 attiecība pret dzinēja uzņemto aktīvo jaudu *P*1 :

 (4.14)

vai

** (4.15)

kur Δ*P* – dzinēja summārie jaudas zudumi.

Nomināli slogotu asinhrono dzinēju lietderības koeficienti *η* = 75 – 95%, pie tam, jo mazāka dzinēja nominālā jauda, jo mazāks tā nomi­nālais lietderības koeficients. Dzinēja reālā tukšgaitā, kad dzinējs darbojas (*I*2 > 0 rotors rotē) bez mehāniskas slodzes (*P*2 = 0), dzinēja lietderības koeficients *η* = 0.

**4.6. Asinhrono dzinēju EDS**

Elektromagnētiskie procesi asinhronā dzinēja ir līdzīgi procesiem transformatorā: statora (primārais) tinums rada magnētisko lauku, kas pārvada enerģiju rotora (sekundārajā) tinumā.

Atšķirības ir saistītas ar magnētiska lauka, rotora griešanas un elektroenerģijas pārvēršanas mehāniskajā darbība.

Ja dzinēja rotora tinums ir nesaslēgts (*I*2 = 0) un nekustīgs (*n*2 = 0), bet statora tinums pieslēgts pie trīsfāžu maiņstrāvas tīkla ar frekvenci *f*1, tad statora rotējošais magnētiskais lauks šķeļ nekustīgos statora un rotora tinumos un inducē to fāzes EDS, kuru efektīvās vērtības ir





kur *E*1 – statora tinuma vienā fāzē inducētā EDS (pretelektrodzinējspēks), V;

*E*2 – rotora tinuma viena fāzē inducētā EDS efektīvā vērtība pie nekustīga rotora, V;

*ω*1 un *ω*2 – statora un rotora tinuma vienas fāzes vijumu skaits;

*k*1 un *k*2 - statora un rotora tinuma vienas fāzes koeficients (k = 0,92…0,96);

Ф*m* – dzinēja galvenās magnētiskās plūsmas amplitūdas vērtība, Wb;

*f*1 – tīkla strāvas frekvence, Hz.

Par asinhronā dzinēja EDS transformācijas koeficientu (vienai fāzei) ar nesaslēgtu fāžu rotoru, sauc statora un rotora EDS attiecību

 (4.16)

Tādējādi asinhronais dzinējs ar nesaslēgtu fāžu rotoru darbojas kā transformators tukšgaitā.

Asinhronā dzinēja fāžu rotora tinumus saslēdz īsi vai īsi slēgta rotorā inducētais EDS *E*2 rotora fāzēs uztur strāvu *I*2 un tādēļ rotors sāk griezties.

Rotējoša rotora vienā fāzē inducētais EDS

 (4.17.)

t.i., rotoram griežoties, tā EDS *E*2*s* ir vienāds ar nekustīga rotora EDS *E*2 u slīdes *s* reizinājumu.

Tādējādi asinhronā dzinēja rotora EDS ir proporcionāls slīdei un palaišanas momentā (*s* = 1) tam ir maksimālā vērtība (*E*2).

Normāli slogotam dzinējam *E*2*s* = (2-6)% no *E*2.

**4.7. ROTORA STRĀVA**

Rotora strāva *I*2 ir atkarīga kā no rotora fāzē inducētā *E*2, tā arī no rotora fāzes pretestībām *R*2 un *X*2. Rotora aktīvā pretes­tība *R*2 ir visai maza un praktiski nemainīga, bet induktīvās pre­testības *X*2 skaitliskā vērtība mainās ļoti plašās robežās atkarībā no rotora griešanās ātruma *n*2 resp. atkarībā no slīdes *s*.

Nekustīga (nobremzēta) rotora vienas fāzes induktīvā pre­testība

*X*2*n = ω*1*Lσ*2 = 2*πf*1*Lσ*2, (4.18)

kur *Lσ*2— rotora tinuma vienas fāzes izkliedes indukti­vitāte, kas praktiski nav atkarīga no rotora frek­vences.

|  |  |
| --- | --- |
| Rotējoša rotora fāzes induktīvā pretestība  *X*2 = *ω*2*Lσ*2 = 2π*f*2*Lσ*2, = 2π*f*2*Lσ*2*s*  vai  *X*2 = *sX*2*n*, (4.19)  t. i., rotējoša rotora induktīvā pretestība proporcionāla rotora slī­dei (4.13. att.).  Dzinēja palaišanas momentā, kad n2 = 0 un s = 1, rotora induktīvā pretestība ir vis­lielākā: X2 = X2n, tā kā X2n >> R2 tad nekustīga rotora fāzes pilnā pretestība Z2n ≈ X2n. Ja s = 0, tad | 4.13. att. Rotora induktīvas pretestī­bas  atkarība no slī­des. |

arī X2 = 0 un Z2 = R2.

Rotējoša īsi saslēgta fāzu rotora fāzes strāva

 (4.20)

kur *R*2 – rotora tinuma aktīvā pretestība, Ω;

*X*2 – nekustīga rotora tinuma induktīvā pretestība, Ω;

*X*2s – rotējoša rotora tinuma induktīvā pretestība, Ω.

Tādējādi, jo lielāka slīde s (lielāka dzinēja slodze), jo lielākā ir rotora strāva *I*2.

No pēdējās izteiksmes secinām: jo lielāka slīde resp. jo lie­lāka dzinēja slodze, jo lielāka ir rotora strāva *I*2. Bet tas nozīme, ka rotora strāva *I*2 no dzinēja palaišanas momenta līdz slodzei atbilstoša griešanās ātruma sasniegšanai mainās plašās robežās.

Dzinēja palaišanas momentā, kad slīde *s* = 1, rotora strāva ir vislielākā:

 (4.21)

bet, ja slīde *s* = 0, tad arī *I*2 = 0, jo *E*2 = 0.

Redzam, ka asinhronajam dzinējam palaišanas strāva rotorā *I*2*p* nav atkarīga no dzinēja slodzes, jo R2, X2*n* un *E*2*n* ir nemainīgi dzinēja lielumi.

Rotora strāvas atkarība no slīdes parādīta 4.14. attēla. Rotora strāva *I*2 atpaliek fāzē no rotora EDS E2 par leņķi ψ2 kura

 (4.22)

Sakarība cosψ2 = *f*(*s*) grafiski parādīta 4.14. attēlā. Dzinēja nominālās slodzes apstākļos leņķis ψ2 ir samērā mazs, jo *sn* = 2 - 6%.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.14. att. Rotora strāvas I2 un cosψ2 atkarība no slīdes. |

***4.3. piemērs.*** Trīsfāžu asinhronā dzinēja ar fāžu rotoru, rotora fāzes tinuma aktīvā pretestība *R*2 = 0,2 Ω, bet nekustīga rotora indukltīvā pretestība *X*2 = 1 Ω. Aprēķināt rotora fāzes strāvu un inducēto EDS, un strāvas frekvenci dzinēja palaišanas un darba laikā, ja pie slīdes *s* = 0,03 rotora tinumā inducējas *E*2*s* = 4,5 V.

Atrisinājums.

1. Rotējoša rotora induktīvā pretestība



2. Rotējoša fāžu rotora fāzes strāvas



3. Nekustīga rotora fāzē inducētais EDS ( palaišanas laikā)



4. Rotora fāzes strāva palaišanas laikā



5. Rotora tinuma inducētā EDS un strāvas frekvence darba laikā



***4.4. piemērs.*** Noteikt asinhronā īsslēgtā dzinēja statora un rotora fāzes EDS nekustīga un rotējoša rotora gadījumā, ja Ф*max* = 0,011 Wb; *s* = 0,03; *w*1 = 96; 2*p* = 6; *k*1 = 0,91; *f*1 = 50 Hz. Dzinēja rotora fāzes vijumu skaits *w*2 = 0,5*p*; tinuma koeficients *k*2 = 1.

Atrisinājums. Statora fāzes EDS

*E*1 = 4,44·*k*1·*f*1·*w*1·Фmax = 4,44·0,91·50·96·0,011 ≈ 213 V.

Rotora fāzes vijumu skaits

*w*2 = 0,5*p* = 0,5·3 = 1,5.

Rotora fāzes EDS nekustīga rotora gadījumā

*E*2 = 4,44·*k*2· *w*2·*f*1·Фmax = 4,44·1·1,5·50·0,011 ≈ 3,65 V.

Fāzes EDS, rotoram griežoties,

*E*2*s* = *s·E*2 = 0,03·3,65 = 0,11 V.

**4.8. Asinhronā dzinēja griezes moments**

Elektromagnētiskais griezes moments, kas rodas rotējošā magnētiskā lauka mijiedarbībā ar rotora strāvu *I*2 un kas ar rotācijas frekvenci *n*2 griež rotoru magnētiskā lauka rotācijas virzienā, nosaka dzinēja spēju pārvarēt pretestības momentu uz tā vārpstas, kas rodas, veicot mehānisku darbu (piemēram, paceļot krāvu), un, sekojoši, dzinēja spēju strādāt ar slodzi.

Vispārīgā gadījumā, ievērojot elektromagnētiskā spēka sakarību *F = B·i·l*, griezes momentu aprēķina pēc formulas

 (4.23)

kur *cm* – dzinēja konstruktīvais koeficients;

*φ*2 – fāžu nobīdes leņķis starp rotora strāvu un EDS.

Tā kā magnētiskā plūsma Ф proporcionāla spriegumam uz statora spailēm, bet strāva *I*2 – rotora EDS, tad var uzskatīt, ka griezes moments ir proporcionāls statora fāzei pievadītā sprieguma kvadrātam



Tātad asinhronie dzinēji ir ļoti jutīgi pret sprieguma svārstībām: spriegumam pazeminoties, krasi samazinās dzinēja griezes moments.

Tā, piemēram, ja spriegums *U*1 pazeminās par 20%, tad dzinēja griezes moments ar jebkuru slīdes vērtību samazinās par 30% (1 – 0,82 = 1 – 0,64 = 0,36).

Asinhronā dzinēja *nominālais* griezes moments

 (4.24)

kur *PN* – dzinēja nominālā jauda uz vārpstas, kW;

 - rotora nominālais leņķiskais ātrums, rad/s;

*nN* – rotora (vārpstas) nominālā rotācijas frekvence, min-1.

Asinhronā dzinēja maksimālais griezes moments

*Mmax = km·MN*,

kur *km* – koeficients, kas raksturo dzinēja pārslodzes spēju.

Asinhronā dzinēja *palaišanas* moments

*Mp = kp·MN*,

kur *kp* – koeficients, kas raksturo dzinēja *palaišanas* spēju.

Asinhronā dzinēja *nominālā* strāva

 (4.25)

kur *UN* – nominālais līnijas spriegums, V;

cos*φN* – nominālais jaudas koeficients;

*ηN* – nominālais lietderības koeficients.

Asinhronā dzinēja *palaišanas* strāva

*Ip = kI·IN*, (4.26)

kur *kI* – koeficients, kas raksturo dzinēja palaišanas apstākļus.

Asinhrono dzinēju raksturo mehāniskā raksturlīkne (4.15. att.), kas attēlo rotora rotācijas frekvences *n*2 atkarību no griezes momenta *M*

*n*2 = *f*(*M*), ja *U*1 = *U*1*N* = const un *f*1 = const.

|  |
| --- |
|  |

4.15. att. Asinhronā dzinēja mehāniska raksturlīkne: 1 – tukšgaitas režīms; 2 – nominālais

režīms; 3 – kritiskais režīms; 4 – palaišanas režīms

Momenta atkarību no slīdes jebkura mehāniskas raksturlīknes punktā izsaka vienkāršota Klosa formula

 (4.27)

kur  - kritiskā slīde.

Magnētiskā lauka rotācijas ātrumu *n*1 var atrast, zinot dzinēja polu pāru skaitu *p* un maiņstrāvas tīkla frekvenci *f*1 (parasti *f*1 = 50 Hz)



Ja polu pāru skaits nebūtu zināms, *n*1 varētu ņemt no sinhrono ātrumu rindas: 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 utt. Izvēlēties to ātrumu, kas ir vistuvāk nominālā ātruma *nN* vērtībai un nedaudz lielāks par to. Piemēram, ja *nN* = 1425 apgr./min, tad *n*1 = 1500 apgr./min.

Zinot *n*1 un *nN* var atrast nominālo slīdi



***4.5. piemērs***. Trīsfāžu asinhronā dzinēja rotora rotācijas frekvence *n*2 = 2940 min-1, dzinējam pievadīta jauda *P*1 = 20 kW, bet summārie jaudas zudumi dzinējā Δ*P* = 3 kW. Aprēķināt dzinēja slīdi un lietderības koeficientu, ja tas ir divpolu dzinējs.

Atrisinājums.

1. Magnētiska lauka sinhrona rotācijas frekvence



2. Asinhronā dzinēja slīde



3. Dzinēja lietderības koeficients



***4.6. piemērs***. Trīsfāžu īsslēgtā asinhronā dzinēja tehniskie dati: PN = 16 kW, UN = 380 V, nN = 1440 min-1, ηN = 86 %, cosφN = 0,85, polu pāru skaits 2p = 4, km = 2, kp = 1,4, kI = 7. Aprēķināt summāros jaudas zudumos dzinējā, maksimālo un palaišanas momentu, slīdi, inducētā EDS un strāvas frekvenci, palaišanas strāvu un spēku, ar kādu dzinējs notur uz tā vārpstas nostiprinātu skriemeli ar diametru d = 0,4 m.

Atrisinājums.

1. Dzinējam pievadītā jauda



2. Summārie jaudas zudumi dzinējā



3. Dzinēja nominālais griezes moments



4. Dzinēja maksimālais (kritiskais) griezes moments

*Mmax = km·MN* = 2·106 = 212 Nm.

5. Dzinēja palaišanas moments

*Mp = kp·MN* = 1,4·106 = 148,4 Nm.

6. Spēks uz skriemeli



7. Dzinēja nominālā strāva



8. Palaišanas strāva

*Ip = kI·IN =* 7·33,2 = 232,4 A.

9. Sinhronā rotācijas frekvence



10. Nominālā slīde



11. Indicētā EDS un strāvas frekvence

*f*2 = *s·f*1 = 0,04·50 = 2 Hz.

**4.9. ASINHRONO DZINĒJU DARBA RAKSTURLĪKNES**

Asinhronā dzinēja darba raksturlīknes attēlo rotora griešanās ātruma *n*2 (vai slīdes *s*), dzinēja lietderības koeficienta *η*, elek­tromagnētiskā griezes momenta *M*, statora strāvas *I*1 un dzinēja jaudas koeficienta cos*φ* atkarību no dzinēja lietderīgās, ar vārp­stu atdotās jaudas *P*2, ja *U*1 = *U*1*n* = const, *f*1 = *f*1n = const un fāzu rotora ķēdē nav ieslēgta papildpretestība (*Rp* = 0).

Darba raksturlīknes var iegūt eksperimentāli, pakāpeniski mainot dzinēja mehānisko slodzi *P*2 resp. mainot dzinēja slo­dzes koeficientu

 (4.28)

kur *P*2*n* = *Pn* — dzinēja nominālā jauda.

Vidējas jaudas īsi slēgtā asinhronā dzinēja darba raksturlīknes parādī­tas 4.16. attēlā.

***n*2 = *f*1(*β*)**. Palielinot asin­hronā dzinēja slodzi, rotora slīde s pieaug un griešanās ātrums *n*2 = *n*1(1 – s) samazinās. Ātruma raksturlīkne *n*2 = *f*1(*β*) tikai nedaudz no­virzās uz leju, jo ar nor­mālo slodzi (*β* = 1) rotora griešanās ātrums ir tikai par 2—6% mazāks nekā tukšgaitā (*β* = 0). Tātad slodzes maiņa asinhronā dzinēja griešanās ātrumu ietekmē visai maz, un ātruma raksturlīkni sauc par «cietu».

***η* = *f*2(*β*)**. Lietderības koeficients maksimālo vērtību sasniedz parasti ar β = 0,75—0,85. Vēl tālāk palielinot slodzi, η samazi­nās, jo strauji pieaug elektriskie zudumi. Mazslogots dzinējs dar­bojas loti neekonomiski.

|  |  |
| --- | --- |
| **M = *f*3(*β*)**. Dzinēja elektromagnētiskā griezes momenta *M = M*0 + *M*2 raksturlīkne sākas nedaudz virs koordinātu nullpunkta, jo tukšgaitā (*M*2 = 0) rotora attīstītais griezes moments pārvar mehāniskās berzes pretestības dzinējā (*M = M*0). Griezes momenta *M* raksturlīkne praktiski ir taisne, kas, slodzi palielinot līdz nomi­nālajai, nedaudz paliecas uz augšu, jo rotora griešanās ātrums *n*2, slodzei pieaugot, samazinās maz (ja slodze neizmainītu | 4.16. att. Asinhrona dzinēja darba rak­sturlīknes. |

*n*2 lie­lumu, tad *M ~ P*2 un *M* = =*f*3(*β*)būtu taisne).

***I*1 = *f*4(*β*)** . Statora strāvas *I*1 raksturlīknei ir tā īpatnība, ka reālās tukšgaitas strāva I0 ir relatīvi liela, turklāt, jo lielāka ir gaisa sprauga starp statoru un rotoru, jo relatīvi lielāka ir arī *I*0.

**4.10. ASINHRONO DZINĒJU JAUDAS KOEFICIENTS**

Asinhronais dzinējs no tīkla uzņem ne tikai aktīvo jaudu P1, bet ari reaktīvo jaudu Q1, un dzinēja jaudas koeficients ir atka­rīgs no abu šo jaudu skaitlisko vērtību savstarpējās attiecības:

 (4.29)

Samazinot asinhronā dzinēja slodzi no nominālās vērtības līdz tukšgaitai, dzinēja uzņemtā aktīvā jauda P1 daudzkārt sama­zinās (no P1n līdz P10), bet uzņemtā reaktīvā jauda Q1 tajā pašā laikā samazinās samērā maz (4.17. att.).

Tādēļ, samazinot dzinēja slodzi, tā cosφ samazinās un visma­zāko skaitlisko vērtību sasniedz tukšgaitā, kad cosφ0 = 0,08—0,18.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.17. att. Asinhronā dzinēja uzņemtās aktīvās jaudas P1 un reaktīvās jaudas Q1 izmaiņas,  slodzei mainoties no P2 = P2n līdz P2 = 0. | 4.18. att. Asinhronā dzinēja cosφ at­karība no  slodzes. |

Asinhronajā dzinējā ievērojami lielā reaktīvās jaudas *Q*1 patē­riņa cēlonis ir gaisa sprauga starp statoru un rotoru.

Normāli slogotu asinhrono dzinēju nominālie jaudas koeficienti cos*φn* = 0,75—0,93, pie tam, jo lielāka dzinēja nominālā jauda P2n, jo augstāks tā cos*φn*. Tas izskaidrojams ar to, ka mazas jau­das dzinējam gaisa spraugas platums relatīvi vairāk ietekmē uz­ņemtās reaktīvās jaudas *Q*1 lielumu nekā lielas jaudas dzinējam. Ātri rotējošiem dzinējiem cosφ ir augstāks nekā tādas pašas jau­das lēni rotējošiem dzinējiem, jo pēdējiem statora strāvas *I*1 reak­tīvā (magnetizēšanas) komponente ir lielāka.

Asinhronā dzinēja tipiska jaudas koeficienta līkne cosφ = *f*(β) parādīta 4.18. attēlā. Kā redzam, dzinēja cosφ vērtība ir pietie­kami augsta tikai tad, ja dzinēja slodze tuva nominālajai.

Tāpēc, ja rūpniecības uzņēmumā daudzi asinhronie dzinēji strādā ar nelielu slodzi vai relatīvi ilgi darbojas tukšgaitā, uzņē­muma elektriskās ietaises dabiskais vidējais jaudas koeficients cosφdab noteiktam laika posmam (piem., vienam mēnesim) ir ne­pieļaujami zems. Bet saskaņā ar elektrisko ietaišu ekspluatācijas noteikumiem rūpniecības uzņēmumu cosφ vidējā vērtība noteiktā laika posmā nedrīkst būt mazāka par 0,92—0,95. Tādēļ uzņēmu­mos, lai jaudas koeficienta vidējo vērtību cos*φvid* paaugstinātu līdz pieprasītajai vērtībai, izmanto gan dabiskos, gan mākslīgos cosφ uzlabošanas paņēmienus.

Jaudas koeficienta dabisko uzlabošanu elektriskajā ietaisē realizē, racionalizējot galveno reaktīvās jaudas patērē­tāju — asinhrono dzinēju — darbināšanu:

- asinhronos dzinējus, kuru vidējā slodze *P*2vid ≤ 0,45*P*2*n*, ap­maina pret mazākas jaudas asinhronajiem dzinējiem;

- darba mašīnu asinhronajiem dzinējiem pierīko tukšgaitas ierobežotājus, ja tukšgaitas ilgums lielāks par 10 s;

- mazslogotiem asinhronajiem dzinējiem samazina pieva­dāmo spriegumu U1. Ja statora tinums darba režīmā slēgts trīs­stūrī un dzinēja slodze *P*2 ≤ 0,40*P*2*n*, tad statoram pievadāmo spriegumu samazina, statora tinumu pārslēdzot no trīsstūra slē­guma zvaigznes slēgumā: ar to ievērojami paaugstina dzinēja cosφ. Ja dzinēju palaiž tukšgaitā, tad pārslēgšanu izdara pie dzinēja spailēm; ja dzinēju palaiž ar slodzi, tad izmanto trīs­stūra - zvaigznes pārslēdzi, ar kuru dzinēju palaiž trīs­stūra slēgumā, bet pēc rotora iegriešanās statora tinumu pārslēdz zvaigznes slēgumā.

Tikai jāatceras, ka, statora tinumu pārslēdzot no trīsstūra slē­guma zvaigznē, *U*1 samazinās reizes, bet dzinēja griezes mo­ments — reizes (jo *M* ~).

Protams, ar dabiskajiem cosφ uzlabošanas pasākumiem vien elektriskajai ietaisei nevar sasniegt cos*φvid* = 0,92—0,95. Tāpēc izmanto vēl mākslīgu rūpniecības uzņēmuma elektriskās ietaises cos*φ* uzlabošanu. Šim nolūkam izmanto galve­nokārt kondensatoru baterijas, kuras novieto uzņēmumu transfor­matoru apakšstacijās.

**4.11. Īsslēgto asinhrono dzinēju palaišana, reversēšana un regulēšana**

Palaišanas procesam asinhrono dzinēju ekspluatācijā ir liela nozīme, jo no šī procesa norises atkarīga ne tikai paša dzinēja, bet arī darbināmā mehānisma un barošanas tīkla darbības apstākļi.

Par asinhronā dzinēja palaišanu sauc statora tinuma pieslēgšanu barošanas tīklam ar nominālo spriegumu *UN* un rotora iegriešanos no *n*2 = 0 līdz rotācijas frekvencei, kas atbilst dzinēja slodzei.

Statora strāvu *Ip* un dzinēja griezes momentu *Mp* palaišanas sākuma momentā (*n*2 = 0), sauc par palaišanas strāvu un palaišanas momentu.

Asinhronā dzinēja palaišanas procesa novērtēšanai svarīgi ir šādi rādītāji:

1. palaišanas momenta attiecība pret nominālo momentu



2. palaišanas strāvas attiecība pret nominālo strāvu



3. palaišanas ilgums;

4. enerģijas zudumi palaišanas laikā;

5. palaišanas vienkāršība;

6. palaišanas iekārtas izmaksas.

Īsslēgtos asinhronos dzinējus palaiž galvenokārt tieši, retāk – ar pazeminātu spriegumu.

***Tiešā palaišana***. Īsslēgtos asinhronos dzinējus parasti palaiž, statora tinumu ar slēdzi *S* (paketslēdzi, svirslēdzi, kontaktoru u.c.) tieši pieslēdzot pilnam tīkla spriegumam (4.19. att).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.19. Īsslēgtā asinhronā dzinēja tiešās palaišanas shēma |

Asinhronā dzinēja tiešā palaišana ir visvienkāršākais, ekonomiskākais un tādēļ izplatītākais šo dzinēju palaišanas paņēmiens, pie tam šādu palaišanu var viegli automatizēt.

Tiešās palaišanas trūkums ir dzinēja liela palaišanas strāva. Palaišanas strāva nav bīstama pašam dzinējam, jo palaišana noris ļoti ātri, tā tikai ierobežo dzinēja palaišanas biežumu un tā tīklā rada sprieguma kritumu, un tāpēc visi tīklam pievienotie patērētāji īslaicīgi saņem pazeminātu spriegumu.

Tādējādi nominālā jauda īsslēgtam asinhronam dzinējam, kuru var pieslēgt tīklam, ir atkarīga no tīkla, proti, transformatoru apakšstacijas jaudas: jo tā ir lielāka, jo lielākas jaudas drīkst pieslēgt tīklam tieši, neizraisot tajā lielu sprieguma pazemināšanas.

Tiešo palaišanas paņēmienu izmanto mazas jaudas dzinējiem (līdz 20…30 kW).

***Palaišana ar pazeminātu spriegumu***. Vidējas un lielas jaudas dzinējiem, kurus nevar pieslēgt tieši tīklam, ir jāsamazina palaišanas strāvas, ko panāk ar dažādām statora tinuma ķēdē ieslēgtām strāvu ierobežojošām ierīcēm: reaktoru (spoli ar tērauda serdi – 4.20. att. *a*), autotransformatoru (4.20. att. b), kā arī ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu (4.20. att. c).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** | ***c*** |

4.20. Īsslēgtā asinhronā dzinēja palaišana ar pazeminātu spriegumu: *a* – ar reaktoru;

*b* – ar autotransformatoru; *c* – ar pārslēgu „zvaigzne-trīsstūris”.

Reaktora induktīvo pretestību, asinhronā motora palaišanai, aprēķina

 (4.30)

kur *Uf* – statora tinuma fāzes spriegums, V;

*kr*– koeficients, kas raksturo palaišanas strāvu attiecību ar un bez reaktora (parasti pieņem *kr* = 0,65).

Autotransformatora jaudu, palaižot trīsfāžu asinhrono dzinēju, aprēķina

 (4.31)

kur *na* – autotransformatora transformācijas koeficients.

***4.7. piemērs***. Aprēķināt reaktora induktīvo pretestību asinhronā dzinēja palaišanai, ja tā dati ir: *PN* = 60 kW, *kI* = 6, cos*φN* = 0,85, *ηN* = 0,86. Dzinējam ir īsslēgts rotors, tā statora tinums saslēgts zvaigznē un tīkla nominālais līnijas spriegums *UN* = 380 V.

Atrisinājums.

1. Dzinēja nominālā strāva



2. Palaišanas strāva

*Ip = kI·IN =* 6·124,4 = 764,4 A.

3. Fāžu spriegums



4. Reaktora induktīvā pretestība



***4.8. piemērs***. Aprēķināt autotransformatora jaudu trīsfāžu īsslēgtā asinhronā dzinēja palaišanai, ja tā dati: *PN* = 40 kW, *IN* = 75 A, *nN* = 2940 min-1, *kI* = 7, cos*φN* = 0,91, *ηN* = 0,89, samazinot tīkla spriegumu no 380 V līdz 220 V.

Atrisinājums.

1. Dzinēja palaišanas strāva

*Ip = kI·IN =* 7·75 = 525 A.

2. Nominālais griezes moments



3. Dzinēja palaišanas moments

*Mp = kp·MN* = 1·130 = 130 Nm.

4. Autotransformatora transformācijas koeficients



5. Palaišanas strāva, palaižot dzinēju ar autotransformatoru



6. Palaišanas moments, palaižot dzinēju ar autotransformatoru



7. Autotransformatora nepieciešamā jauda



***4.9. piemērs***. Aprēķināt, kā izmainās asinhronā dzinēja maksimālais griezes moments un pārslodzes spēja, tīkla spriegumam *U*1 samazinoties par 30% salīdzinājumā ar tā nominālo spriegumu *U*1*N*, ja dzinēja pārslodzes spēja *kp* = 2.

Atrisinājums.

1. Dzinējam pievadītais tīkla spriegums



2. Maksimālais moments sprieguma samazināšanās gadījumā



3. Pārslodzes spēja sprieguma samazināšanās gadījumā



t.i., šajā gadījumā dzinējs pat nespēs darboties ar nominālo slodzi.

Palaišana ar zvaigznes-trīsstūra pārslēgu var izmantot tikai tādu dzinēju palaišanai, kuriem normālā darba režīmā statora tinums slēgts trīsstūrī, piemēram, ja 220/380 V dzinējs ar tinuma slēguma shēmu Δ/Y darbojas no 220 V sprieguma tīkla.

Ar reversiju saprot asinhronā dzinēja rotora griešanās virziena maiņa.

Rotora griešanās virziena mainīt (reversēt), apmainot vietām jebkurus divus līnijas vadus, kas savieno asinhronā dzinēja statora tinumu ar maiņstrāvas tīklu (piemēram, fāžu secību ABC mainot uz BAC), līdz ar to mainās statora rotējošā magnētiskā lauka griešanās virziens un rotors griežas uz pretējo pusi.

Dzinēju reversiju realizē ar trīspolu pārslēgu, reversīvo magnētisko palaidēju u.c.

Asinhronajiem dzinējiem bez daudzām priekšrocībām piemīt arī ļoti būtisks trūkums - ierobežotas rotācijas frekvences regulēšanas iespējas salīdzinājumā ar līdzstrāvas dzinējiem.

No asinhronā dzinēja rotora griešanās izteiksmes:



Secinām, ka asinhronajiem dzinējiem griešanās ātrumu vispār var regulēt trejādi:

* mainot rotora slīdi *s* (ieslēdzot aktīvo pretestību rotora ķēdē),
* mainot statoram pievadāmās maiņstrāvas frekvenci *f*1,
* mainot statora polu pāru skaitu *p*.

Griešanās ātrumu regulēšana, mainot statora polu pāru skaitu *p*, iespējama asinhronajiem dzinējiem ar sekcionētu statora tinumu. Šī tipa dzinējiem statora tinums izveidots no atsevišķām sastāvdaļām, kurus ar apvalkam piemontētu pārslēdzi saslēdzot virknē vai paralēli. Polu pārslēgšana dod iespēju mainīt asinhrono dzinēju apgriezienus pakāpieniem 1:1,5 vai 1:2, piemēram, 1000 apgr./min. uz 1500. Tāda samērā rupja regulēšana var apmierināt dažas vajadzības. Retāk lieto trīs regulēšanas pakāpes. Dzinēji ar pārslēdzamiem poliem ir pusotras reizes dārgāki, un tiem ir par 6% zemāks lietderības koeficients. Tas mazina enerģijas ekonomiju, ko iegūst, regulējot apgriezienus.

Asinhronos dzinējus ar pārslēdzamu polu pāru skaitu sauc par vairākātrumu dzinējiem, un tos izgatavo 2 vai 3, vai 4 dažādiem ātrumiem. Divu ātrumu asinhronā dzinēja statora tinuma polu pāru skaita izmainīšanas princips vienai fāzei parādīts 4.6. attēlā. Tāda statora fāzes tinums sastāv no diviem pilnīgi vienādām daļām, kurus saslēdzot virknē (4.21. att. *a*), izveidojas 4 polu (*p* = 2) un rotējošā lauka sinhronais ātrums ir *n*1. Abas tinumu sastāvdaļas saslēdzot paralēli (4.21. att. *b*), vienā no tām mainās strāvas virziens, un tāpēc iegūstam divas reizes mazāku polu skaitu, t. i., 2 polus (*p* = 1), bet dzinēja sinhronais ātrums tagad divas reizes lielāks, t.i., 2*n*1 (sinhrono ātrumu attiecība ir 1:2).

|  |
| --- |
|  |

4.21. att. Statora tinuma pārslēgšana no *p* = 2 uz *p* = 1.

Lai regulētu rotācijas ātrumu plūstoši, nepieciešams izveidot regulējamu frekvences pārveidotāju. Tāds pārveidotājs var darboties pēc 4.22. att. paradītas shēmas, kas sastāv no divām daļām: tīkla 50 Hz maiņsprieguma pārveidotāja līdzspriegumā – parasti, neregulējama taisngrieža, un līdzsprieguma pārveidotāja maiņspriegumā – invertora. Modernos pārveidotājos invertoru veido no 6 tranzistoru slēdžiem VT1 – VT6, katrs no kuriem tiek aktivēts izejas sprieguma pusperioda T2/2 laikā, taču ar nobīdi starp katru nākamo slēdzi vienādu ar T2/6 , kur T2 ir izejas maiņsprieguma periods (T2=1/f2 , kur f2 ir izejas sprieguma frekvence).

Tādā veida no līdzsprieguma var izveidot trīsfāzu maiņspriegumu ar nemainīgu formu un amplitūdu, kas vienāda ar pārveidotāja pirmās pakāpes taisngrieztā līdzsprieguma vērtību (4.22. att.). Taču, jo mazāka izejas sprieguma frekvence un mazāks arī pievienotā asinhronā elektrodzinēja rotācijas ātrums, jo mazākam jābūt arī motora statoram pievadītajam spriegumam, t.i., pārveidotāja izejas spriegumam. Ja ieejas taisngriezis ir neregulējams, kas ir vēlams, tad jāmeklē citi izejas sprieguma regulēšanas veidi. Pēdējā laikā plaši tiek pielietots tranzistoru modulācijas princips (PWM – Pulse Width Modulation – angliski, impulsu platuma modulācija). Pēc šī principa katrs tranzistors netiek viss ieslēgts pastāvīgi uz 1/6 daļu no perioda, bet gan šīs sestdaļas laikā pārslēgts, pie tam ar mainīgu relatīvo ilgumu modulācijas periodā Tm , kas atbilst relatīvi augstai frekvencei fm (daži kHz). Tranzistora ieslēgšanas relatīvais ilgums T2 laikā tiek veidots tā, lai izejas sprieguma efektīvā līkne mainītos pēc sinusa likuma (4.23. att.), kas ir visatbilstošākais elektromotora barošanai.

|  |
| --- |
|  |
|  |

4.22. att. Frekvenču pārveidotāja shēma, vadības diagrammas un spriegumu līknes

( bez modulācijas)

|  |
| --- |
|  |

4.23. att. Tranzistora VT1 modulācijas diagramma un fāzes A spriegums pret slodzes nullpunktu zvaigznes slēgumā

Tomēr asinhronā elektrodzinēja sprieguma regulēšana nav nemaz tik vienkārša, jo faktiski modulējamo sprieguma vērtību ir jāaprēķina, izejot no motora slodzes režīma un motora aizvietošanas shēmas parametriem. Pie tam aprēķini nav viss algebriski, bet vektoriāli, t.i., faktiski ģeometriski. Šādus aprēķinus var veikt tikai dators, un tāpēc moderno asinhrono elektrodzinēju vadības sistēmas ir datorizētas, ar diezgan sarežģītu aprēķinu algoritmu.

Elektromotoru modernās piedziņas parasti ir automatizētas. Vienkāršākais automatizācijas uzdevums ir stabilizēt motora uzdoto rotācijas ātrumu. To realizē, aprēķinot starpību starp uzdoto motora ātrumu un reālo, un attiecīgi iedarbojoties uz pārveidotāju. Tā līdzstrāvas piedziņā, ja motora ātrums ir mazāks par uzdoto, palielina pārveidotāja izejas spriegumu. Asinhronajā piedziņā šai gadījumā dažos gadījumos, ja motora magnētiskā lauka rotācijas frekvence atbilst uzdotajai, cenšas palielināt motora spriegumu. Ja magnētiskā lauka rotācijas frekvence ir zemāka par uzdoto – tad palielina gan frekvenci, gan arī spriegumu. Pie tam informāciju par rotācijas ātrumu aizvien biežāk nosaka pastarpināti, veicot datorizētus aprēķinus par darba režīmu.

Bieži jānodrošina motora rotācijas ātruma un virziena izmaiņu noteiktos laika brīžos, pie tam nodrošinot nepieciešamo paātrinājumu (palēninājumu). Tā 4.24. att. paradītajā ciklā motora ātrums ir gan jāpalielina, gan jāsamazina, gan jāmaina rotācijas virziens, un viss tas jāveic pēc uzdotiem laika intervāliem ar uzdoto paātrinājumu. Šāds darba cikls tiek plaši pielietots dažādos ražošanas mehānismos.

|  |
| --- |
|  |

4.24. att. Cikliska piedziņas rotācijas kustības izmaiņa

Šādu vadību veic ar programmējamu mikroprocesoru kontrolleru palīdzību, ar kuriem var ieprogrammēt nepieciešamos rotācijas momenta izmaiņas laikus, uzdotos ātrumu līmeņus attiecīgajos laika intervālos un kustības virziena izmaiņas komandas.

Vēl sarežģītāki piedziņas automatizācijas uzdevumi ir saistīti ar ražošanas mehānismu kustības trajektorijas vadību, ko jāveic, piemēram, robotu sistēmās un darbgaldos. Šādu kustības trajektoriju izmaiņu telpā panāk ar triju elektromotoru vienlaicīgu vadību, plaknē – ar divu elektromotoru vadību, katrs no kuriem pārvieto mehānismu pa divām savstarpēji perpendikulārām koordinātēm. Kustība var būt lineāra, apļveida un nelineāra. Parasti nelineāro kustību sadala lineāros mikroposmos, t.i., veic tā saucamo interpolāciju. Pielieto gan sensoru atgriezeniskās saites signālus, gan bezsensoru trajektorijas aprēķina sistēmas. Šādas automatizācijas sistēmas ir visai sarežģītas, un parasti ir apgādātas ar datoriem.

**4.12. Asinhrono dzinēju darbība no vienfāzes tīkla**

Vienfāzes asinhrono dzinēju galvenā priekšrocība ir iespēja tos darbināt (barot) no vienfāzes maiņstrāvas tīkla un tāpēc tos plaši izmanto mazjaudas mehānismu elektropiedziņai sadzīvē, medicīnā, automātikā (piem., ventilatoros, ūdens sūkņos, urbj­mašīnās u.c.) u.tml.

Vienfāzes asinhronā dzinēja statorā ir ievietots vienfāzes tinums (C1-C2), bet rotorā - īsslēgts tinums (tāds pats kā trīsfāžu dzinējiem) (4.25. att.).

|  |
| --- |
|  |

4.25. att. Vienkārša vienfāzes asinhronā dzinēja slēguma shēma bez palaišanas momenta.

Tā kā vienfāzes maiņstrāva nerada rotējo­šu magnētisko lauku, tad šāds dzinējs ne­attīsta palaišanas momentu. Tomēr pēc ārējās mehāniskas iegriešanas vienā vai otrā virziena, rotors turpina griezties pastāvīgi un dzinēju var slogot.

Lai šāds dzinējs bez ārējās mehāniskās iegriešanas pats varētu griezties, tad palaišanas laika dzinēja statora pulsējo­ša magnētiska lauka vietā jārada rotējošs lauks (tāpat kā trīsfāžu dzinējiem), t.i., jāattīsta palaišanas moments.

Atkarība no tā, kā­da veida iegūst pa­laišanas momentu, izšķir divus vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipus, t.i., vienfāzes asinhronie dzinēji ar palaišanas tinumu un asinhronie konden­satoru dzinēji.

**Vienfāzes asinhro­nais dzinējs ar pa­laišanas tinumu.**

Lai iegūtu palaišanas momentu, statorā bez darba tinuma (C1-C2) novieto palaišanas (palīgtinumu) tinumu (P1- P2), kura ass no darba tinuma ass telpā nobīdīta par 90 elektriskajiem grādiem (4.26. att.). Lai izmainītu rotora griešanās virzienu, ir jāsamaina vietām palaišanas vai darba tinuma izvadi.

|  |  |
| --- | --- |
| 4.26. att. Vienfāzes asinhronā dzinēja ar palaišanas tinumu slēguma shēma. | 4.27. att. Kondensatoru dzinēja slē­guma shēma. |

Palaišanas laikā dzinēja abus tinumus pieslēdz pilnam tikla spriegumam. Pēc tam, kad rotora rotācijas frekvence ir tuvu no­minālajai (apmēram pēc 3 sekundēm), palai­šanas tinumu ar slēdzi *S*l atslēdz (parasti automātiski) no tikla, jo šis tinums pare­dzēts tikai īslaicīgam darba režīmam: tas izgatavots no tieva vada ar daudziem viju­miem.

Dzinējiem ar palaišanas tinumu ir samērs neliels palaišanas moments, maza pārslodzes spēja, zems lietderības koeficients un mazs jaudas koeficients.

**Asinhronais konden­satoru dzinējs**.

Šajā dzinējā statora rievās ievietoti divi darba tinumi, kuru asis telpā nobīdītas par 90 elektriskajiem grādiem, turklāt katrs tinums aizņem pusi no statora rievām un viena tinuma ķēdē ir ieslēgts kondensa­tors C (4.27. att.).

Atšķirībā no vienfāzes asinhronā dzinēja ar palaišanas tinumu kondensatoru dzinējā pēc palaišanas un darba laikā abi statora tinumi ir pieslēgti vienfāzes maiņstrāvas tiklam.

Kondensatoru dzinējiem ir augstāks liet­derības koeficients un cos*φ* nekā vien­fāzes dzinējiem, turpretī tiem ir maza palaišanas moments: *MP* = (0,4…0,5)·*MN*.

lai palielinātu palaišanas momentu, para­lēli darba kondensatoram uz palaišanas laiku pieslēdz palaišanas kondensatora *CP*. Šādu elektrodzinēju sauc par kondensatoru dzinēju ar palaišanas kondensatoru.

Ja nav pieejams trīsfāžu tīkls, tad trīsfāžu asinhrono dzinē­ju var pieslēgt arī vienfāzes maiņstrāvas tīklam un darbināt kā kondensatoru, dzinēju ar palaišanas kondensatoru, pie tam, darba kondensators ir ieslēgts pastāvīgi visu dzinēja darbības laiku, bet palaišanas kondensatora - tikai dzinēja palaišanas laikā.

Ja vienfāzes maiņ­strāvas tīkla sprie­gums ir 220 V un iz­manto trīsfāžu īs­slēgto asinhrono dzinēju (220/380 V un Δ/Y), tad tā statora tinums jāsaslēdz tā, ka paradīts 4.28. attēlā.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 4.28. att. Trīsfāzu asinhrona dzinēja pieslēgšana vienfāzes tiklam, ja statora tinumi savienoti trīsstūri. |

Darba kondensatora kapacitāti aprēķina pēc formulas



kur *IN* - dzinēja nominālā fāzes strāva, A;

*U*1 — tikla spriegums, V.

Palaišanas kondensatora kapacitāte: *CP* = (2 ... 3)·*C*.

Darba un palaišanas kondensatora darba spriegums: *UC* = 1,5·*U*1.

Ja dzinēju iespējams palaist tukšgaitā vai nedaudz slogotu, tad palaišanas kondensa­tors nav vajadzīgs.

Jāatceras, ka, trīsfāžu dzinējam darbojo­ties vienfāzes režīmā ar atvienotu vienas fāzes tinumu, tas var attīstīt tikai 40...60 % no tā nominālās jaudas, bet vienfāzes kondensatoru režīmā (4.28. att.) līdz 70...80 %.

**4.10. piemērs.** Aprēķināt darba kondensatora un palaišanas konden­satora kapacitāti un dzinēja attīstīto jaudu vienfāzes kondensa­tora režīmā, ja tiek izmantots trīsfāžu īsslēgtais asinhronais dzinējs, kura dati: *PN* = 3,0 kW; *ηN* = 0,82; cos*φN* = 0,85; 220/380 V; Δ/Y. Vienfāzes maiņstrāvas tīkla sprieguma *U*1 = 220 V.

1. Dzinēja nominālā strāva trīsstūra slēgumā



2. Darba kondensatora kapacitāte



3. Palaišanas kondensatora kapacitāte (palaižot ar slodzi)

*CP* = 3·C = 3·247 = 741 μF.

4. Jauda, ko attīsta trīsfāžu dzinējs kondensatoru režīmā

*P*2 = 0,75·*PN* = 0,75·3,0 = 2,25 kW.

***Kontroles jautājumi***

1. Kāda asinhronā dzinēja darbības īpatnība ir tā, ka, pie­slēdzot statora tinumu vienfāzes barošanas tīklam, rodas nevis rotējošs, bet gan pulsējošs magnētiskais lauks?

2. Kāda ir palaišanas momenta vērtība vienfāzes asinhrona­jam dzinējam, kuru var iedomāties kā trīsfāžu dzinēju ar vienu pārtrauktu fāzi?

3. Kāds magnētiskais lauks ir jārada, lai vienfāzes asin­hronā dzinēja rotors varētu pats sākt griezties?

4. Kā sauc vienfāzes asinhrono dzinēju, kura statorā bez darba (galvenā) tinuma ievietots vēl palaišanas tinums (palīgtinums), kas parasti aizņem 1/3 no statora rievām?

5. Pēc kāda tipa dzinēja shēmas darbojas vienfāzes asinhro­nais dzinējs ar palaišanas tinumu palaišanas brīdī?

6. Kā rīkojas ar palaišanas tinumu, ja vienfāzes asinhronā dzinēja ar palaišanas tinumu rotora rotācijas frekvence ir sasniegusi 70...80 % no nominālās?

7. Kurš no vienfāzes asinhronajiem dzinējiem gan palaiša­nas bridi, gan normālā darba režīmā darbojas ar rotējo­šu magnētisko lauku un tie pēc savām īpašībām ir tuvi trīsfāžu asinhronajiem dzinējiem?

8. Kā izmainās kondensatoru dzinēja palaišanas moments, ja palaišanas momentā paralēli darba kondensatoram pieslēdz palaišanas kondensatoru?

9. Kādu palaišanas apstākļu gadījumā izmanto kondensatoru dzinējus ar palaišanas kondensatoru dažādu mehānismu elektropiedziņai?

10. Kā var regulēt kondensatoru dzinēju rotācijas frekven­ci?

11. Kas ir jārada trīsfāžu asinhronajā dzinējā starp statora tinumos plūstošam strāvām, lai kondensatoru va­rētu palaist no vienfāzes maiņstrāvas tīkla?

12. Vai drīkst atļaut trīsfāžu asinhroniem dzinējiem dar­boties vienfāzes režīmā, ja slodze uz to vārpstas pār­sniedz 60 % no nominālās un dzinēja darba laikā rodas pārtraukums vienā no trim līnijas vadiem (piemēram, pārdeg drošinātājs)?

13. Kuru kondensatoru neizmanto, ja trīsfāžu asinhrono dzinēju darbina no vienfāzes tīkla un ja to ir iespē­jams palaist tukšgaitā?

14. Cik lielu jaudu var attīstīt trīsfāžu asinhronais dzi­nējs, kura jauda *PN* = 1 kW, ja tas darbojas vienfāzes kondensatoru režīmā?

15. Kurš fāžu nobīdes elements darbojas vislabāk, t.i., no­drošina optimālos apstākļus palaišanas laikā, tomēr to lietošana ir ierobežota, jo tiem ir lieli gabarīti un uz katriem dzinēja jaudas 100 W vajadzīga apmēram 10 μF liela kapacitāte?

16. Par cik procentiem samazinās maksimālais moments, ja trīsfāžu dzinējam pievadītais spriegums samazinās par 30 %?

17. Kādus asinhronos dzinējus lieto tādu mehānismu piedzi­ņai, kurus var palaist mazslogotus vai pat tukšgaitā?

18. Kā izmainās rotora griešanās virziens, apmainot vietām jebkurus trīs vadus, kas savieno asinhronā dzinēja statora tinumu ar barošanas tīklu (piemēram, fāžu secību ABC mainot uz CAB)?

18. Ko nosaka barošanas trīsfāžu maiņstrāvas tīkla fāžu secība asinhronajam dzinējam?

20. Kuri asinhronie dzinēji praktiski nodrošina vienu pas­tāvīgu rotācijas frekvenci, t.i., izmainoties to slodzei no nulles līdz nominālai, rotora rotācijas frekvence samazinās tikai par 1 līdz 6 %?

21. Ar kādu rotoru izgatavo daudzātrumu dzinējus?

22. Kādi asinhronie dzinēji ir dārgāki, tiem ir komplicētā­ka vadības aparatūra un lielāki izmēri nekā parastajiem īsslēgtajiem asinhroniem dzinējiem, pie tam rotācijas frekvenci var regulēt tikai lēcienveidā?

**5. SINHRONĀS MAŠĪNAS**

**5.1. SINHRONĀS MAŠĪNAS UZBŪVE**

Par sinhrono mašīnu sauc tādu maiņstrāvas mašīnu, kuras rotors darba režīmā griežas vienādā ātrumā, t.i., sinhroni ar statora tinumā plūstošo strāvu radīto rotējošo magnētisko plūsmu.

Tātad sinhronās mašīnas rotora griešanās ātrums *n* atkarīgs tikai no mašīnas polu pāru skaitu *p* un tīkla maiņstrāvas frekvences *f*:

 (5.1)

Ar frekvenci *f* = 50 Hz = const arī rotora griešanās ātrums *n* = const, kas ir šo mašīnu raksturīgākā iezīme:

 utt.

Sinhronajai mašīnai, tāpat, ka citām elektriskām mašīnām, pie­mīt apgriežamība, t. i., to var darbināt gan kā ģeneratoru, gan, ka dzinēju.

Sinhronās mašīnas izmanto visai plaši:

1. galvenokārt kā trīsfāzu sinhronos ģeneratorus (ar nominālajam jaudām no dažiem desmitiem tūkstošu līdz vairākiem simtiem tūkstošu kVA) termiskajās un hidroelektrostacijas elektriskās enerģijas ražošanai;

2. kā sinhronos dzinējus ar visai dažādām jaudām tādu mehānismu elektropiedziņai, kuru, griešanās ātrumu neregulē (*n* = const);

3. kā sinhronos kompensatorus energosistēmās reaktīvas jaudas ģenerēšanai, t. i., elektrisko tiklu jaudas koeficienta paaugstināšanai.

Praksē izmanto gandrīz tikai trīsfāzu sinhronās ma­šīnas, jo vienfāzes sinhronajām mašīnām ir daudz trūkumu — lielāki izmēri, dārgākas vienai un tai pašai jaudai u. c.

Sinhronajā mašīnā atšķirībā no asinhronās mašīnas ierosmes plūsmu, kas inducē EDS, rada mašīnas ierosmes tinumā plūstošā līdzstrāva, ko pievada no atsevišķa avota. Vienīgi mazjaudas sin­hronajās mašīnas ierosmes plūsmu rada pastāvīgie magnēti.

Sinhronais ģenerators sastāv no nekustīgās daļas — statora, kura rievās ievietots trīsfāzu maiņ­strāvas tinums, un rotējošās da­ļas — rotora, kas būtībā ir elektro­magnēts (5.1. att.).

Rotora ierosmes tinumā plūst līdzstrāva, kuru caur sukām un kontaktgredzeniem pievada no ierosinātāja — līdzstrāvas mašī­nas vai taisngrieža.

Sinhronā ģeneratora rotoru, kas atrodas statora iekšienē, griež primārais dzinējs. Rotora magnētiskais lauks šķeļ statora trīsfāzu tinuma vijumus un inducē tajos maiņstrāvas EDS.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.1. att. Trīsfāzu sinhronā ģeneratora uzbūves shēma. |

Dažās sinhrono ģeneratoru konstrukcijās polu tinumi ir nekus­tīgi un piestiprināti pie statora, bet griežas trīsfāzu maiņstrāvas tinums, kas ievietots no elektrotehniskā tērauda skārdiem salikta cilindriska rotora rievās. Būtiskais trūkums, kas ierobežo šādu ģeneratoru lietošanu, ir tas, maiņstrāvas aizvadīšanai nepieciešams slīdošais kontakts.

Sinhronas mašīnas galvenās sastāvdaļas ir stators un rotors (5.2. un 5.3. att.).

|  |  |
| --- | --- |
| 5.2. att. Sinhronās mašīnas ar izvirzīto polu rotoru izveido­juma shēma: 1 – stators; 2 – tinums; 3 - tērauda ķermenis; 4 - ierosmes spole; 5 - ierosmes poli;  6 - vārpsta | 5.3. att. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas rotors:  a — kopskats; b — pola serde; 1 — vārpsta;  2 — rotora spieķi; 3 — pola jūgs; 4 — ierosmes  tinumi; 5 — pola uzgalis |

Stators 1 ir dobs cilindrisks ķermenis, kas salikts no 0,5 vai 0,35 mm bieza elektrotehniskā skārda gredzeniem. Statora iekšēja cilindriskajā virsmā izveidotajās aksiāla virziena vaļējās vai pusslēgtas taisnstūrveida rievās ievietots trīsfāzu tinums 2, kuru pievieno trīsfāzu strāvas tīklam. Sinhronās mašīnas stators nostiprināts čuguna vai tērauda apvalkā (5.2. un 5.3. attēlā nav parā­dīts) un būtība neatšķiras no asinhronās mašīnas statora.

Sinhrono mašīnu rotoru konstruktīvais izveidojums ir divējāds: ar izvirzītajiem poliem un ar neiz­virzītajiem poliem.

Rotors ar izvirzītajiem poliem (5.2. att.) sastāv no da­žiem vai daudziem elektromagnē­tiem — ierosmes poliem 5, kuru serdes ar «bezdelīgas astes» veidojumu piestiprinātas uz mašī­nas vārpstas 6 cieši nostiprinātam masīvam tērauda ķermenim 3. Šis ķermenis nav jāsaliek no elektroteh­niska skārda, jo rotors griežas sin­hroni ar statora rotējošo magnētisko lauku.

Katrs rotora pols ir salikts no 1—1,5 mm bieza elektrotehniskā tē­rauda skārda (izgatavo arī masīvas polu serdes), pie tam pola serde statora puse nobeidzas ar papla­šinātu uzgali — pola kurpi.

Uz katra pola serdes ir novietota ierosmes spole 4. Uz polu serdēm novietotās, virknē saslēgtās ierosmes spoles veido sin­hronās mašīnas ierosmes tinumu. Šī tinuma abi brīvie gali pievienoti diviem uz mašīnas vārpstas cieši nostiprinātiem izolētiem vara kontaktgredzēniem 7, kuru cilindriskajai virsmai īpaši nekustīgi suku turētāji piespiež sukas.

Ar šo slīdošo kontaktu — suku un kontaktgredzenu — starp­niecību mašīnas ierosmes tinumam no atsevišķa avota pievada līdzstrāvu, ko sauc par ierosmes strāvu un apzīmē ar *Iie*. Lai ar nelielu ierosmes strāvu iegūtu pietiekami lielu magnetizē­jošo spēku, tad no izolēta vara vada izgatavotajām polu ierosmes spolēm ir daudz vijumu.

Ierosmes tinuma plūstoša ierosmes strāva *Iie* rada rotora jeb ierosmes plūsmu Ф*ie* (viena pola plūsma).

Rotori ar izvirzītajiem poliem ir tikai lēni rotējošam sinhro­najām mašīnām, kuru griešanās ātrums *n* < 1500 apgr./min: hidroģeneratoriem (tos darbina hidroturbīnas), dīzelģeneratoriem un sinhronajiem dzinējiem.

Lai ar nelielu griešanas ātrumu (sakot pat ar 60 apgr./min) iegūtu 50 Hz maiņstrāvu, hidroģeneratoriem nepieciešami vairāki desmiti polu. Reizē ar to ievērojami palielinās rotora ārējais diametrs, sasniedzot pat 10 m un vairāk. Hidroģeneratoru rotori ir samērā īsi (to garums nepārsniedz 3,5 m), ar lielu diametru (līdz 15 m) (5.4. att.).

Ātri rotējošām sinhronajam mašīnām izvirzīto polu konstruk­cija nenodrošina pietiekamu rotora mehānisko izturību. Tāpēc griešanās ātrumiem n >1500 apgr./min izmanto rotorus ar neizvir­zītajiem poliem.

Rotors ar neizvirzītajiem poliem (5.5. att.) ir masīvs tērauda cilindrs, kura virsma izfrēzētajās aksiāla virziena rievās ievietots ierosmes tinums. Pēdējo parasti veido no izolētas vara lentas, kuru rotora vaļējās rievas nostiprina ar neferomagnētiska me­tāla ķīļiem. Rotora tinuma frontālos savienojumus sastiprina ar neferomag­nētiska tērauda stieples bandāžu. Tādai rotora konstrukcijai ir liela me­hāniskā izturība. Ierosmes tinuma abus galus pievieno diviem uz mašīnas vārpstas nostiprinātiem kontaktgredzeniem.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.4. att. Hidroģenerators: a – samontēts hidroģenerators; b - hidroģeneratora statora montāža

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.5. att. Sinhronās mašīnas rotora ar neizvirzītiem po­liem uzbūve (a) un izveidojuma shēma (b): 1 — stators, 2 — statora ti­nums, 3 — tērauda cilindrs ar rievām, 4 — ierosmes tinums, 5 — rotora vārpsta, 6 — kontaktgredzeni.

Rotori ar neizvirzītajiem poliem ir sinhronajām mašīnām ar sinhrono āt­rumu *n* = 3000 apgr./min. Ātri rotējošos sinhronos ģeneratorus (ar *p* = l) termoelektrostacijās darbina tvaika turbīnas, un tos sauc par turboģeneratoriem. Turboģeneratoru rotori ir samērā gari (līdz 6 m), ar mazu diametru (ap 1 m).

Sinhronajiem dzinējiem pa lielākai daļai ir izvirzīto polu rotori.

Sinhronās mašīnas statora tinuma polu skaits vienmēr vienāds ar rotora polu skaitu.

Sinhronā ģeneratora darbības pamatā ir elektromagnētiskā indukcija. Ja ģeneratora vārpstu griež kāds primārais dzinējs (parasti turbīna) un ja ierosmes (rotora) tinumā plūst ierosmes strāva *Ii*, tad, ģeneratora rotoram rotējot, rotora ierosmes plūsma šķeļ statora tinuma vadus, un tādēļ katrā statora fāzē inducējas periodiski mainīgs EDS: *EA = EB = EC = EN*. Šie EDS nobīdīti fāzē viens pret otru par 120°, tātad veido simetrisku trīsfāzu EDS sistēmu.

Ģeneratora slodzes režīmā statora tinumā inducētie EDS uz­tur strāvu statoram pievienoto patērētāju trīsfāzu ķēdē.

Sinhronās mašīnas statoru sauc arī par enkuru, jo, ma­šīnai darbojoties ģeneratora vai dzinēja režīmā, statora tinumā inducējas EDS.

Sinhronās mašīnas konstrukciju ar rotējošiem poliem galvenās priekš­rocības: statora ievietotā maiņstrāvas tinuma izolācija ir droša pret mehāniskiem bojājumiem; šī tinuma savienojums ar maiņ­strāvas tīklu ir vienkāršs, bez slīdošajiem kontaktiem. Šie faktori sevišķi nozīmīgi lielas jaudas un augsta sprieguma ģeneratoriem. Mazas jaudas (līdz 15 kVA) un zema sprieguma (līdz 380 V) ģeneratoriem dažreiz polus novieto statora, bet maiņstrāvas tinumu — rotorā.

**5.2. SINHRONO MAŠĪNU IEROSMES TINUMA BAROŠANA**

Sinhronās mašīnas ierosmes tinumu parasti baro neliels līdz­strāvas ģenerators (ierosinātājs), kas novietots uz sinhronās mašīnas vārpstas (svešierosme). Mazas jaudas lēni rotējošiem ģeneratoriem izmanto atsevišķu ierosinātāju, ko pārvads sajūdz ar ģeneratora vārpstu (lai kā ierosinātāju varētu lietot līdzstrāvas ģeneratoru ar normālu ātrumu). Ierosinātāja jauda ir 0,3—3% no sinhronās mašīnas nominālās jaudas, sprie­gums līdz 450 V.

Kā ierosinātāju lieto līdzstrāvas paralēlās ierosmes ģenera­toru. Sinhronā ģeneratora ierosmes strāvu *Ii* var mainīt ar ierosi­nātāja ierosmes ķēdē ieslēgtu regulēšanas reostatu *rr* (5.6. att.). Ierosinātāja enkura spailes ar nekustīgu suku un divu kontaktgredzenu palīdzību savienotas ar sinhronās mašīnas ierosmes tinumu.

Mazas un vidējas jaudas sinhronajiem ģeneratoriem izveido pašierosmi, t. i., ierosmes tinumu baro pusvadītāju taisngriezis *Tg* (5.7. att.), kas maiņstrāvu saņem caur vienfāzes trans­formatoru *Tr* no sinhronā ģeneratora statora.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 5.6. att. Sinhronas mašīnas ar svešierosmi  elektriskā shēma. | 5.7. att. Sinhronā ģenera­tora ar pašierosmi elektriskā shēma. |

**5.3. SINHRONĀ ĢENERATORA TUKŠGAITA**

Sinhronais ģenerators pārveido elektriskajā enerģijā mehā­nisko enerģiju, ko ģeneratora vārpstai atdod primārais dzinējs — tvaika turbīna vai hidroturbīna.

Ģeneratora tukšgaitā statora ķēde ir pārtraukta, t. i., patērē­tāji ir atslēgti un statora tinumā strāva neplūst (*I* = 0). Ģenera­torā tad pastāv tikai ierosmes strāvas *Ii* radītā ierosmes plūsma Φ*i*, kura inducē statora tinuma katrā fāzē tukšgaitas elektrodzinējspēku *E*0.

Ģeneratoriem izvirza prasību, lai statora inducētais EDS būtu iespējami tuvs sinusoidālam EDS. Tā kā nesinusoidāls EDS sa­tur augstākās harmoniskās, tad novirzīšanās no sinusoidālās EDS līknes formas ir saistīta ar papildu zudumiem ģeneratoros, tā sekmē pārspriegumu rašanos pārvades līnijās, nevēlami ietekme tuvumā esošās sakaru līnijas utt.

Lai statora tinumā iegūtu sinusoidālu EDS, tad magnētiskajai indukcijai *B*0 gaisa spraugā starp rotoru un statoru (pa statora iekšējo aploci) jāmainās pēc līknes, kas iespējami tuva sinusoīdai.

Mašīnās ar izvirzītajiem poliem sinusoīdai tuvu indukcijas Ф līkni (5.8. att. *a*) nodrošina īpašas formas polu kurpes (pola kurpes malās gaisa sprauga apm. 1,5 reizes lielāka nekā tās vidusdaļā).

Mašīnās ar neizvirzītajiem poliem to pašu sasniedz, izvēloties tādu attiecību starp rotora aploces daļu, ko neaizņem rievas («poli»), un aploces daļu, ko aizņem rievas, lai indukcijas B0 trapecveida līkne (5.8. att. *b*) saturētu iespējami mazāk aug­stāko harmonisko. Tad statorā inducēto EDS var uzskatīt par sinusoidālu kā ģeneratora tukšgaitas, tā arī darba režīmā.

|  |  |
| --- | --- |
| 5.8. att. Magnētiskās indukcijas *B0* sadalījums gar statora iekšējo aploci sinhronajās mašīnās ar izvirzīto polu*(a)* un neizvirzīto polu (*b*) rotoriem. | 5.9. att. Sinhronā ģeneratora tukšgaitas raksturlīkne E0 = *f*(*Ii*)· |

Tukšgaitas režīmā statora tinuma vienā fāzē inducētā EDS efektīvo vērtību *E*0 aprēķina pēc tādas pašas izteiksmes kā trans­formatora vai asinhronās mašīnas statora fāzē inducēto EDS:

*E*0 = 4,44*wf*Φ*ik*, (5.2)

kur *w* — vijumu skaits ģeneratora statora vienā fāzē;

Φ*i* — rotora viena pola magnētiskā plūsma;

*k* — statora tinuma koeficients.

Ievērojot izteiksmi (16-1),



vai, apzīmējot 

*E*0 = *cn*Φ*i*. (5.3)

Tātad tukšgaitā sinhronā ģeneratora elektrodzinēj spēks *E*0 proporcionāls rotora pola plūsmai, t. i., EDS ir atkarīgs tikai no ierosmes strāvas *Ii*, jo *n* = const.

Sakarības *E*0 = *f*(*Ii*) grafisko attēlu, ja *n = nn* = const un *I* = 0, sauc par ģeneratora tukšgaitas raksturlīkni (5.9. att.). To parasti iegūst eksperimentāli. Tā kā *I* = 0, tad ģe­neratora EDS *E*0 var izmērīt ar ģeneratora statora fāzes spailēm pievienotu voltmetru.

Uzņemot tukšgaitas raksturlīkni, ar ierosinātāja ierosmes re­gulēšanas reostatu *rr* (5.6 att.) pakāpeniski maina ierosmes strāvu *Ii* no nulles līdz kādai maksimālajai vērtībai un no tās atkal atpakaļ līdz nullei, nolasot atbilstošās *E*0 vērtības.

Histerēzes dēļ iegūst līknes divus — kāpjošo un lejupejošo — zarus. Tomēr sinhronajām mašīnām šie zari ir tik tuvu viens otram, ka par tukšgaitas raksturlīkni pieņem vidējo starp abiem zariem.

Tukšgaitas raksturlīkne ir līdzīga magnetizēšanas līknei un citā mērogā attēlo ierosmes plūsmas Φi atkarību no ierosmes strāvas, t. i., Φ*i* = *f*(*Ii*).

Tā kā sinhronajām mašīnām starp statoru un rotoru ir liela gaisa sprauga, kas lieljaudas mašīnās sasniedz pat dažus cen­timetrus, tad līknes Φ*i* = *f*(*Ii*) resp. tukšgaitas raksturlīknes *E*0 = =*f*(*Ii*) sākuma posms ir taisne (Φ*i* ~ *Ii*), jo, kamēr mašīnas magnētiskā sistēma nav magnētiski piesātināta, praktiski viss ierosmes tinuma magnetizējošais spēks nepieciešams gaisa spraugu pārvarēšanai. Vēl tālāk palielinot *Ii*, sākas mašīnas tē­rauda magnētiskā piesātināšanās, magnētiskā pretestība strauji palielinās, un tādēļ raksturlīkne noliecas uz abscisas pusi (nav proporcionalitātes starp Φ*i* un *Ii*).

Visā tālākajā sinhrono mašīnu iztirzājumā vienkāršības dēļ pieņemam, ka mašīnas magnētiskā sistēma ir nepiesātināta un ka mašīnai ir divpolu cilindrisks rotors.

**5.4. ENKURA REAKCIJA**

Ja sinhronajam ģeneratoram pievieno nemainīgu simetrisku slodzi, tad statora trīsfāzu tinumā plūst slodzes strāvas *I*. Ģeneratora rezultējošo magnētisko plūsmu Φ tad rada rotora ierosmes tinuma un statora tinuma magnetizējošo spēku kopīga darbība.

Tomēr sakarību vieglākai izpratnei ir lietderīgi izmantot priekšstatu par atsevišķām magnētiskajām plūsmām, t. i., par rotora ierosmes plūsmu Φ*i* un statora (enkura) plūsmu Φ*e*, kuru rada statora trīsfāzu tinumā plūstošās strāvas.

Ja sinhronā ģeneratora rotora ierosmes tinumu pievieno līdz­strāvas avotam un rotoru griež (ar primāro dzinēju) ar ātrumu *n*2, tad rotora polu magnētiskā plūsma Φ*i*, kas rotē ar to pašu ātrumu *n*2, šķeļ statora tinuma vadus un inducē tajos EDS ar frekvenci



kur *p* — ģeneratora polu pāru skaits.

Slogotā ģeneratorā statora trīsfāzu strāva rada statora rotē­jošo plūsmu Φe, kuras rotācijas ātrums pret statoru



Redzam, ka *n*1 = *n*2 = *n*, t. i., rotora un statora magnētiskās plūsmas telpā rotē ar vienu un to pašu ātrumu (sinhroni), citiem vārdiem, šīs plūsmas telpā viena pret otru ir nekustīgas un veido mašīnas rezultējošo magnētisko plūsmu Φ, kas saķēdēta ar statora un rotora tinumiem:

 (5.4)

un kura inducē slogota ģeneratora statora tinuma katrā fāzē EDS

*E* = 4,44*wf*Φ*k.* (5.5)

Mainot mašīnas slodzi, mainās slodzes strāva *I* un statora plūsmas Φe skaitliskā vērtība. Statora plūsmas ass virziens pret ierosmes plūsmas ass virzienu, kā redzēsim, ir atkarīgs no slo­dzes rakstura (aktīva, induktīva, kapacitīva, jaukta).

Tā kā Φ*i* un Φe summējas ģeometriski, tad statora plūsmas resp. mašīnas slodzes lielums ietekmē rezultējošās plūsmas Φ vērtību un tās telpisko novietojumu pret plūsmu Φ*i* (Φ*i* = const, ja *Ii* = const).

Saskaņā ar izteiksmi (5.5) sinhronās mašīnas slodzes lie­lums un raksturs nosaka arī mašīnas elektrodzinējspēka Ε skait­lisko vērtību un fāzi.

Statora (enkura) magnetizējošā spēka ietekmi uz mašīnas magnētisko plūsmu sauc par enkura reakciju.

Iztirzāsim enkura reakciju, mašīnai strādājot ģeneratora režīmā. Vienkāršības dēļ pieņemam, ka ģenerators ir divpolīgs un tā statora tinumam ir tikai trīs spoles (A—Χ, Β—Υ, C—Ζ), kuru plaknes nobīdītas viena pret otru par 120° (5.10. att.); rotors griežas pulksteņa rādītāju kustības virzienā.

Enkura reakcijas izpausme ir dažāda atkarībā no slodzes rak­stura.

Lai izsekotu statora plūsmas ietekmei uz ierosmes plūsmu, jānosaka šo plūsmu savstarpējais stāvoklis telpā katram rak­sturīgajam slodzes režīmam. Te jāatceras, ka statora fāzē indu­cētais EDS E0 sasniedz maksimālo vērtību momentā, kad šis fā­zes vadi atrodas pret rotora pola vidu. Statora plūsmas Φe ass sakrīt ar tās fāzes spoles asi, kurā pašreiz ir strāvas *I* maksi­mums.

Turpmākajā iztirzājumā visiem apskatāmajiem gadījumiem (5.10. att.) izvēlēti momenti, kad strāvas maksimums ir Α fāzē (*iA = Im*), tādēļ apskatāmajos gadījumos plūsmas Φe ass ir hori­zontāla un šī plūsma virzās pa kreisi. Rezultējošās plūsmas Φ parādītas tikai vektoru diagrammās.

Aktīva (*r*) slodze (5.10. att. *a*). Šajā režīmā statora tinuma fāzes strāva *I* sakrīt fāzē ar statora fāzē inducēto EDS *E*0 (ψ = 0), t. i., statora strāva *I* un EDS *E*0 vienlaicīgi sasniedz maksimālās vērtības.

|  |
| --- |
|  |

5.10. att. Enkura reakcija sinhronajā ģeneratora ar dažāda rakstura slodzēm (*p* = l).

Bet, tā kā Α fāzē EDS E0 sasniedz maksimālo vērtību mo­mentā, kad rotora polu ass sakrīt ar A—X spoles plakni, tad ierosmes plūsmas Φi ass ir perpendikulāra statora plūsmas Φe asij, t. i., ja ψ = 0, tad statora plūsma ir šķērsplūsma. Tā­dēļ rezultējošās plūsmas Φ ass ir pagriezta pretēji ģeneratora griešanās virzienam.

Induktīva (L) slodze (5.10. att. *b*). Šajā režīmā sta­tora strāva I atpaliek fāzē no statora EDS E0 par 90° (ψ = +90°). Tādēļ Α fāzē strāva *iA = Im* momentā, kad rotora polu ass pagrie­zusies uz priekšu par 90° pret spoles A—X plakni. Plūsmu Φi un Φe virzieni tad ir pretēji, t. i., statora strāva rada atmagnetizējošu garenplūsmu, kas vājina ierosmes plūsmu. Tādēļ rezultējošā plūsma Φ un ģeneratora elektrodzinējspēks Ε ir ma­zāki.

Kapacitīva (C) slodze (5.10. att. *c*). Statora strāva apsteidz fāzē statora EDS E0 par 90° (ψ = - 90°). Tādēļ Α fāzē strāva *iA = Im* momentā, kad rotora polu ass atrodas 90° pirms šīs ass 16-7. attēlā a parādītā stāvokļa. Plūsmas Φe un Φi tad ir vienvirziena, t. i., statora strāva rada magnetizējošu ga­renplūsmu, kas pastiprina ierosmes plūsmu. Tādēļ rezultējošā plūsma Φ un ģeneratora EDS *Ε* ir lielāki.

Induktīva rakstura (*r*, *L*) slodze (5.10. att. *d*). Strāva *I* atpaliek fāzē no EDS *E*0 par leņķi ψ < 90°. Šajā gadī­jumā statora plūsmu var sadalīt divās savstarpēji perpendikulā­rās komponentēs: garenplūsmā Φ*eg*, kuras virziens ir pre­tējs Φi virzienam, un šķērsplūsmā Φe šķ. Rezultējošā plūsma Φ ir mazāka par ierosmes plūsmu Φ*i*. Tātad, palielinot ģenera­tora slodzi, samazinās statora EDS *Ε*.

Kapacitīva rakstura (*r, C*) slodze. Strāva *I* ap­steidz fāzē EDS *E*0 par leņķi ψ < 0°. Rezultējošā plūsma Φ ir lielākā par ierosmes plūsmu Φ*i*. Tādēļ, palielinot ģeneratora slodzi, pieaug statora EDS *Ε*.

Tādējādi enkura reakcija, kam pakļauti ne tikai slogoti ģene­ratori, bet ari dzinēji, neatkarīgi no rotora tipa izmaina mašīnas magnētisko plūsmu un reizē ar to arī statora EDS *Ε*.

Lai enkura reakciju samazinātu līdz minimumam, iespējami jāsamazina statora plūsma Φe, ko panāk, palielinot mašīnas mag­nētisko ķēžu pretestību. Pēdējo uzdevumu visvienkāršāk realizē, palielinot gaisa spraugu starp statoru un rotoru līdz dažiem cen­timetriem. Protams, reizē ar to jāpalielina ierosmes plūsmas magnetizējošais spēks *Iiwi* t. i., jāpalielina ierosmes strāva un ierosmes tinuma vijumu skaits. Bet tas saistīts ar lielāku vara patēriņu rotora tinumam un ar lielākiem mašīnas izmēriem, tādēļ gaisa spraugas palielināšana tomēr ir ierobežota (gaisa sprau­gas platums atkarībā no sinhronās mašīnas jaudas parasti ir 1 — 10 cm).

**5.5. SINHRONĀ ĢENERATORA ĀRĒJĀS RAKSTURLĪKNES**

Par sinhronā ģeneratora ārējām raksturlīknēm sauc līknes, kas grafiski attēlo ģeneratora spaiļu sprieguma atkarību no slodzes strāvas, ja ierosmes strāva, frekvence un jaudas koeficients ir ne­mainīgi.

Arējās raksturlīknes uzņem pie jaudas koeficienta vērtībām cos*φ* = 1 (aktīva slodze) un cos*φ* = 0,8 (induktīva un kapacitīva slodze), slodzes strāvu samazinot un palielinot.

Ja ārējās raksturlīknes uzņem, slodzes strāvu samazinot, ģenera­tora nominālo spriegumu ieregulē pie nominālās strāvas. Uzturot griešanās ātrumu, ierosmes strāvu un jaudas koeficientu nemainī­gus, pakāpeniski atslogo ģeneratoru un pieraksta mēraparātu rādī­jumus.

Samazinoties ģeneratora aktīvajai slodzei (cos*φ* = 1), ģeneratora spaiļu spriegums pieaug, jo samazinās sprieguma kritums statora tinumu aktīvajā un induktīvajā pretestībā (5.11. att. *a*).

Samazinoties aktīvi induktīvai slodzei, ģeneratora spriegums pieaug vēl straujāk, jo vienlaikus ar sprieguma krituma samazinā­šanos pavājinās arī enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība, kuru rada slodzes strāvas induktīvā komponente.

Samazinoties aktīvi kapacitīvai slo­dzei, ģeneratora spriegums krīt, jo pa­vājinās enkura reakcijas magnetizējošā darbība, kuru rada slodzes strāvas ka­pacitīvai komponente.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.11. att. Sinhronā ģeneratora ārējās raksturlīknes: *a* — spriegumu paaugstinot;

*b* — spriegumu pazeminot.

No ārējām raksturlīknēm, kas uzņem­tas, slodzes strāvu samazinot, var no­teikt ģeneratora sprieguma .pieaugumu, atslēdzot nominālo slodzi. Valsts stan­darts nosaka, ka sprieguma pieaugums šajā gadījumā nedrīkst pārsniegt 50% no nomināla sprieguma.

Ja ārējās raksturlīknes uzņem, slo­dzes strāvu palielinot, ģeneratora nomi­nālo spriegumu ieregulē tukšgaitā. Pa­kāpeniski ģeneratora slodzi palielina līdz nominālajai vērtībai un pieraksta mēraparātu rādījumus.

Aktīvās slodzes palielināšanās izraisa ģeneratora sprieguma pazemināšanos (5.11. att. *b*).

Palielinoties aktīvi induktīvai slodzei, ģeneratora spriegums samazinās vēl straujāk, jo pastiprinās enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība.

Pieaugot aktīvi kapacitīvai slodzei, ģeneratora spriegums palielinās. Tas izskaidrojams ar enkura reakcijas magnetizējošo darbību.

No ārējām raksturlīknēm var noteikt ģeneratora sprieguma izmaiņu, mainoties slodzei:

Δ*U = UN – U*,



Ierosmes strāvu regulē ar regulēšanas reostatu mašierosinātāja ierosmes tinuma ķēdē. Ja lieto automātisko sprieguma regulatoru, tad ierosmes strāva mainās automātiski atkarībā no ģeneratora slodzes izmaiņām.

**5.6. SINHRONĀ ĢENERATORA REGULĒŠANAS RAKSTURLĪKNES**

Par sinhronā ģeneratora regulēšanas raksturlīknēm sauc līknes, kas grafiski attēlo ierosmes strāvas atkarību no slodzes strāvas, ja frekvence, spaiļu spriegums un jaudas koeficients ir nemainīgi.

Regulēšanas raksturlīkne rāda, kā jāmaina ierosmes strāva, lai, mainoties slodzei, nodrošinātu nemainīgu ģeneratora spaiļu sprie­gumu.

Palielinoties aktīvai slodzei, jāpa­lielina arī ierosmes strāva (5.12. att.), jo pieaug sprieguma kritums un tā kompensācijai vajadzīgs lielāks ģene­ratora EDS.

Palielinoties aktīvi induktīvai slo­dzei, ierosmes strāva jāpalielina vēl vairāk, jo jākompensē arī enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība. Turpretī, palielinoties aktīvi kapacitīvai slodzei, ierosmes strāva jāsama­zina, jo enkura reakcija magnetizē mašīnu.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.12. att. Sinhronā ģeneratora regu­lēšanas raksturlīknes. |

Ierosmes strāvu regulē ar regulēšanas reostatu mašīnierosinātāja ierosmes tinuma ķēdē. Ja lieto automātisko sprieguma regulatoru, tad ierosmes strāva mainās automātiski atkarība no ģeneratora slodzes izmaiņām.

**5.1. Piemērs.** Noteikt sinhronā ģeneratora fāzes EDS vērtību un rotora sinhrono griešanās ātrumu, ja doti šādi sinhronā ģeneratora parametri: fāzes vijumu skaits w = 60; ģeneratora strāvas frekvence f = 50 Hz; tinuma koeficients kw = 0.93; magnētiskā plūsma Φ = 0.02 Wb un polu pāru skaits 2p = 4.

Atrisinājums.

1. Sinhronā ģeneratora fāzes EDS vērtība:



2. Rotors sinhronais griešanās ātrums:



**5.7. SINHRONĀS MAŠĪNAS LIETDERĪBAS KOEFICIENTS UN ZUDUMI**

Kā zināms, viena enerģijas veida pārveidošana citā ir saistīta ar zudumiem. Sinhronajās mašīnās izšķir:

a) mehāniskos zudumus, ko izraisa berze gultņos, rotora berze gaisā, suku berze pret kontaktgredzeniem un ventilācijas zudumi;

b) magnētiskos zudumus statora tēraudā ΔPt (histerēzes un virpulstrāvu zudumus);

c) ierosmes zu­dumus, ko veido ierosmes jauda Pie = IieUie un zudumi ierosinātājā;

1. elektriskos zudumus statora tinumos jeb zudumus varā ΔPV:

ΔPV = ΔPel = mI12re75, W,

kur m — fāzu skaits;

I1 — statora tinuma fāzes strāva (A);

re75 — statora vienas fāzes tinuma aktīvā pretestība 75°C tem­peratūrā (Ω);

1. papildzudumus, ko veido virpuļstrāvu zudumi statora tinuma vados, zudumi rotora tēraudā, kurus izraisa magnētiskā lauka pul­sācijas utt. Papildzudumus mašīnām ar jaudu līdz 100 kV·A pieņem 0,5% no to nominālās jaudas.

Enerģētiskā diagramma sinhronajam dzinējam paradīta 5.13. attēlā a, bet sinhronajam ģeneratoram — 5.13. attēlā b.

|  |  |
| --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |

5.13. att. Sinhronas mašīnas enerģētiskas diagrammas: *a* — dzinējam; *b* — ģeneratoram.

Sinhronās mašīnas lietderības koeficientu var noteikt pēc formu­las η = , tomēr parasti to nosaka netieši pēc šādām formulām: ģeneratoram

 (5.6)

kur P2 — ģeneratora lietderīgā jauda ();

— kopējie zudumi mašīnā:

 (5.7)

Dzinējam

 (5.8)

kur *P*1 — dzinējam pievadītā jauda ().

Sinhronās mašīnas lietderības koeficients parasti ir 0,85... 0,99. Lielākās *η* vērtības ir ļoti lielas jaudas mašīnām. Jaudas koeficientam samazinoties, pazeminās arī lietderības koeficients.

***5.2. piemērs***. Noteikt sinhronā ģeneratora lietderības koeficientu nomi­nālās slodzes režīmā, ja SN = 500 kV · A; *Ul =* 6,3 kV; cos*φN* =0,9; *Iie* = 90 Α; *Uie* = 20 V; ierosinātāja ηie = 0,9; ΔΡt = 5,2 kW; ΔPpap = 0,5% PN; ΔPmeh = l% ΡN; Re75 = 1,6 Ω.

Atrisinājums.

Ģeneratora nominālā jauda

PN = P2 = SN cos φΝ = 500 · 0,9 = 450 kW.

Statora fāzes strāva



Elektriskie zudumi statora tinumā



Papildzudumi

ΔPpap = 0,005 · 450 = 2,25 kW.

Mehāniskie zudumi

Δ*P*meh = 0,01 · 450 = 4,5 kW.

Ierosmes zudumi



Ģeneratora lietderības koeficients



**5.8. SINHRONĀ DZINĒJA DARBĪBAS PRINCIPS**

Tā kā sinhronā mašīna ir apgriezeniska, tad sinhronā dzinēja konstruktīvais izveidojums tāds pats kā sinhronajam ģenera­toram.

Sinhronā dzinēja statora tinumu pieslēdzot trīsfāzu strāvas tīklam, statora tinuma plūstošā trīsfāzu strāva rada statora mag­nētisko lauku, kas rotē ar sinhrono ātrumu *n* = 60·*f*/*p*. Rotora ieros­mes tinumu pievienojot līdzstrāvas avotam, izveidojas rotora mag­nētiskais lauks. Bet, kaut arī mijiedarbība starp statora rotējošo magnētisko lauku un rotora magnētisko lauku rada elektromag­nētisko griezes momentu M, kas iedarbojas uz rotoru, dzinēja rotors tomēr nesāk griezties. Kādēļ?

Pieņemsim, ka statora tinuma pieslēgšanas momentā rotora polu un statora rotējošā magnētiskā lauka savstarpējais stāvoklis atbilst 5.14. attēlā *a* parādītajam; statora lauks te aizstāts ar izvirzītajiem poliem.

Tā kā pretēja nosaukuma magnēta poli pievelkas un tiecas no­stāties viens pret otru, tad uz rotoru darbojas griezes moments M (pulksteņa rādītāju kustības virzienā).

Pusperioda laikā statora magnētiskais lauks pagriežas par t. s. polu dalījumu *τ*, t. i., statora poli apmainās vietām, un uz rotoru darbojas pretēja virziena griezes moments (5.14. att. b).

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

5.14. att. Sinhronā dzi­nēja polu savstarpējā dar­bība.

Vēl pēc pusperioda iestājas iepriekšējā situācija. Tādējādi uz rotoru darbojošais elektromagnētiskais griezes moments savu virzienu maina 2·50 =100 reizes sekundē, ja *f* = 50 Hz, un tādēļ rotors, kura iner­ces moments visai liels, nevar sākt griez­ties un paliek nekustīgs (palaišanas mo­ments *MP* = 0).

Statora rotējošais lauks var «vilkt līdz» rotoru tikai tad, kad rotora slīde ne­pārsniedz 5%. Tādēļ pirms ierosmes strā­vas pieslēgšanas sinhronā dzinēja rotors tā vai citādi jāiegriež līdz ātrumam, kas tuvs sinhronajam griešanās ātrumam *n*.

Sinhronajā dzinējā rezultējošās plūsmas ass vienmēr, apsteidz rotora plūsmas Ф*i* asi par leņķi θ < 0.

Statora magnētisko sistēmu vienkāršoti var attēlot kā apļveida serdi ar izvirzītiem poliem, kura rotē ar ātrumu n1, apgr./min. Mag­nētiskās spēka līnijas saista šos polus ar pretējas polaritātes rotora poliem (5.15. zīm. a).

Rotējošais magnētiskais lauks «velk līdzi» rotora polus, un rotors rotē ar tādu pašu ātrumu. Rotora griešanās ātrumu, kas vie­nāds ar statora magnētiskā lauka rotācijas ātrumu, sauc par sin­hrono. Sinhrono dzinēju slogojot, tā rotors atpaliek par zināmu leņķi θ no rotējošā magnētiskā lauka, pie tam, slodzei pieaugot, leņ­ķis θ palielinās (5.15. zīm. b).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***a*** | ***b*** |  |
| 5.15. zīm. Sinhronā dzinēja darbības princips:  a — tukšgaitas režīmā; b — slodzes re­žīmā. | | 5.16. zīm. Sinhronā dzinēja  leņķiskā raksturlīkne. |

Sinhronā dzinēja griezes momenta atkarība no leņķa θ attēlota 5.16. zīmējumā. Līkne ir sinusoidāla. Dzinēja nominālās slodzes gadījumā leņķis θ = 20...30°. Šāda leņķa θ vērtība nodrošina dzi­nēja pārslodzes spējuSinhronā dzinēja griezes moments ir proporcionāls spaiļu spriegumam. Rotors griežas ar sin­hrono ātrumu, kas nav atkarīgs no slodzes.

Rotoram griežoties, tā polu magnētiskā plūsma Ф0 šķeļ statora tinuma vijumus un inducē tajos EDS E0. Saskaņā ar elektrodzinējspēku līdzsvara vienādojumu dzinējam pievadīto tīkla spriegumu Ut līdzsvaro dzinēja EDS summa  Pamatojoties uz šo vienādojumu, konstruēsim sinhronā dzinēja vektoru diagrammu (5.17. zīm.). Strāvas I vektoru zīmējam vertikāli. Tīkla sprieguma Ut vektoru zīmējam leņķī  no strāvas vektora apstei­dzošā virzienā. Enkura magnētiskās plūsmas Фe un izkliedes plūsmas Фσ vektori sakrīt fāzē ar strāvas vektoru. Šo plūsmu inducētie EDS Ee un Eσ atpaliek fāzē no atbilstošas plūsmas par 90°, un to summa ir vienāda ar sprieguma kritumu dzi­nēja induktīvajā sinhronajā pre­testībā: Ee + Eσ = *Ix*sh. Zinot Xsh, varam noteikt arī abu EDS summu.

Tā kā, pēc EDS līdzsvara vie­nādojuma, tīkla spriegums Ut līdz­svarojas ar dzinēja EDS summu, tad vektoru diagrammā zīmējam vektoru OA, kas vienāds pēc lie­luma ar tīkla sprieguma vektoru un vērsts tam pretēji. Šis vektors attēlo dzinēja EDS Edz. Zinot trīs­stūra OAB malas OA un OB, va­ram atrast tā trešo malu BA, kura attēlo dzinēja pret-EDS E0 vek­toru. No vektoru diagrammas re­dzams, ka



Tīkla sprieguma Ut vektoru sadalām divās komponentēs, no ku­rām katra līdzsvaro atbilstošo EDS. Diagrammā komponente —E0 līdzsvaro EDS E0, bet komponente Ixsh līdzsvaro EDS Ee un Eσ.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.17. zīm. Sinhronā dzinēja vektoru diagramma. |

Ja sinhronais dzinējs pieslēgts lielas jaudas tīklam (*Ut* = const, *ft* = const), tad magnētiskā saite starp statoru un rotoru nodro­šina konstantu, no slodzes neatkarīgu rotora griešanās ātrumu (*n* = const), kas ir šo dzinēju raksturīgākā īpatnība.

Ja dzinēja slodze ir nemainīga, tad dzinēja griezes moments līdzsvaro dzinēja vārpstu bremzējošo momentu un leņķis θ = const. Slodzi palielinot, leņķa θ skaitliskā vērtība pieaug, un dzinējs attīsta lielāku griezes momentu.

Vislielāko griezes momentu *Mmax* sinhronais dzinējs attīsta, ja |θ|=90°.

Ja dzinēja slodze pārsniedz *Mmax*, tad dzinējs «izkrīt» no sinhronisma un rotors apstājas.

Sinhronā dzinēja maksimālo momentu *Mmax* var palielināt, sa­mazinot tā sinhrono pretestību X; to realizē, palielinot gaisa spraugu starp statoru un rotoru.

**5.9. SINHRONO DZINĒJU ĪPATNĪBAS**

Sinhronajiem dzinējiem ir ievērojamas priekšrocības salīdzi­nājuma ar asinhronajiem.

Visvērtīgākā sinhrono dzinēju īpašība ir tā, ka pārierosināts sinhronais dzinējs atdod tiklam reaktīvo jaudu un uzlabo elek­triskās ietaises jaudas koeficientu. Tādēļ elektropiedziņai, kur vien to atļauj piedziņas režīms un pieprasītā jauda, iespējami jāiz­manto sinhronie dzinēji.

Sinhronie dzinēji ir mazāk ju­tīgi pret tikla sprieguma svārstī­bām, jo to griezes moments M proporcionāls sprieguma pirmajai pakāpei, turpretim asin­hronajiem dzinējiem *M ~ U*2.

Bez tam sinhronā dzinēja grie­šanās ātrums nav atkarīgs no slo­dzes (*n* = const). Sinhronā dzi­nēja mehāniskā rakstur­līkne *n = f*(*M*), kura parādīta 5.18. attēla, pēc sava rakstura ir «absolūti cieta». Lietderības koe­ficients sinhronajiem dzinējiem ir par 1—3% lielāks nekā tās pašas jaudas asinhronajiem dzinējiem.

|  |
| --- |
|  |

5.18. att. Sinhronā dzinēja mehāniskā raksturlīkne n = f(M).

Tomēr sinhrono dzinēju rotoru konstrukcija ir komplicētāka nekā īsi slēgtajiem rotoriem, tādēļ sinhronie dzinēji dārgāki nekā asinhronie (cenu starpība relatīvi vislielākā ir mazas jaudas dzi­nējiem). Bez tam sinhronajam dzinējam nepieciešama līdzstrāva, tā palaišana komplicētāka.

Tā kā *n* = const, tad sinhronie dzinēji izmantojami tikai nere­gulējamai elektropiedziņai, piem., sūkņiem, ventilatoriem, velmē­šanas stāviem, kompresoriem, akmens drupinātajiem u. tml.

Ja nemaina sinhronā dzinēja ierosmi (*Ii*= const), tad dzinēja cos*φ* vērtība atkarīga no slodzes lieluma.

Ražoto sinhrono dzinēju nominālās jaudas ir no 40 līdz 10 000 kW un vairāk, bet nominālais griešanās ātrums *n = nN* = 125—3000 apgr./min.

Dzinējus ar jaudām 40—500 kW izgatavo standartspriegumiem 220; 380 un 500 V, bet ar jaudām virs 500 kW — tikai spriegu­miem 3; 6 un 10 kV.

Sinhrono dzinēju nominālais lietderības koeficients ir 85— 97%.

**5.10. SINHRONĀ DZINĒJA DARBA RAKSTURLĪKNES**

Par sinhronā dzinēja darba raksturlīknēm sauc rotora griešanās ātruma *n*2, statora strāvas *I*, pievadītās jaudas *P*1 lietderīgā grie­zes momenta *M*2, jaudas koeficienta cosφ un lietderības koeficienta *η*) atkarību no dzinēja atdotās jaudas *P*2, ja tīkla spriegums *Ut* tīkla frekvence *f*1 un ierosmes strāva *Iie* ir nemainīgi (5.19. att.).

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.19. att. Sinhrona dzinēja darba raksturlīknes. |

Tā, ka rotora griešanas ātrums n2 nav atkarīgs no slodzes un vienāds ar magnētiska lauka rotācijas ātrumu, tad nemainīgas frek­vences *f*1 gadījumā raksturlīkne *n*2 = *f* (*P*2) ir abscisu asij paralēla taisne. Dzinēja vārpstas lietderīgais moments *M*2 = *P*2/*ω*2, un, tā kā rotora leņķiskais ātrums *ω*2 = const, raksturlīkne *M*2 = *f*(*P*2) ir taisne, kas sākas koordinātu nullpunktā.

Jāatzīmē, ka atšķirībā no asinhronā dzi­nēja griezes momenta sinhronā dzinēja grie­zes moments ir proporcionāls tīkla spriegu­mam: *M*2 ≡ *Ut*.

Dzinējam pievadītā aktīvā jauda ir vie­nāda ar lietderīgās jaudas *P*2 un jaudas zu­dumu summu. Tā kā jaudas zudumi tinumu varā ir proporcionāli strāvas kvadrātam, tad raksturlīkne *P*1 = *f*(*P*2) ir nedaudz izliekta uz augšu, jo *P*1 pieaug ātrāk nekā *P*2. Slodzei palielinoties, jaudas koeficients pazeminās, tāpēc līkne cos*φ* = *f*(*P*2) ir nedaudz noliekta uz leju.

Strāva *I*, slodzei *P*2 palielinoties, pieaug vairāk nekā jauda *P*1. Tas izskaidrojams ar cosφ pazemināšanos. Lietderības koeficienta *η* maksimālā vērtība atbilst slodzei (0,5...0,75)*P*2*N*.

**5.11. SINHRONAIS KOMPENSATORS**

Par sinhrono kompensatoru sauc sinhrono dzinēju, kuru, ievē­rojami pārierosinātu, darbina tukšgaitā tikai reaktīvās jaudas ra­žošanai, t. i., sistēmas jaudas koeficienta uzlabošanai.

Tā kā sinhronais kompensators nepārtraukti darbojas bez slo­dzes, tad tā mehāniskā konstrukcija ir atvieglota. Lai samazinātu ierosmes magnetizējošo spēku un ietaupītu krāsaino metālu, gaisa sprauga starp statoru un rotoru mazāka nekā parastajiem sin­hronajiem dzinējiem.

Sinhronā kompensatora strāva apsteidz tīkla spriegumu par leņķi φ, kas tuvs 90°, jo aktīvās jaudas zudumi mašīna ir nelieli — tikai 2—3% no mašīnas nominālās jaudas.

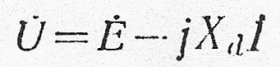
Sinhronos kompensatorus novieto lielas rajonu transformatoru apakšstacijās enerģijas pārvades līniju beigas, lai garās līnijas daļēji atbrīvotu no reaktīvās strāvas pārvadīšanas, reizē ar to radot iespēju pilnīgāk izmantot ģeneratorus un transformatorus.

Ražo sinhronos kompensatorus nomināla­jiem spriegumiem 6 un 11 kV ar nominālajām jaudām no 10 000 līdz 100 000 kVA. Tās ir izvirzīto polu mašīnas ar 750 vai 1000 apgr./min.

**5.12. SLODZES RAKSTURLĪKNE**

Slodzes raksturlīkne attēlo sakarību *U=f*(*If*), ja *I* = const un cos*φ* = const. No dažādām sinhronā ģeneratora slodzes raksturlīknēm praktiska nozīme ir induktīvās slodzes raksturlīknei, kura at­bilst tīri induktīvai slodzei (cos*φ* = 0). Parasti šādu raksturlīkni uz­ņem gadījumam, kad strāva *I* = *IN*.

Ja neievēro enkura tinuma aktīvo pretestību, tad induktīvas slodzes gadī­jumā ψ = φ = 90°, *Iq* = 0, *Id* = I un

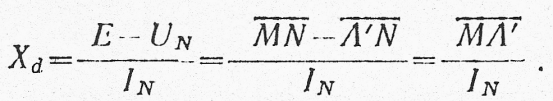
 (5.9)

jeb

 (5.10)

Tas nozīmē, ka induktīvās slodzes raksturlīkne (5.20. zīrn. līkne2) atro­das zem tukšgaitas raksturlīknes (līkne 1). Punkts Α atbilst simetriskam trīs­fāžu īsslēgumam, kad *I=In* un *U=*0.

Izmantojot eksperimentāli noteiktas tukšgaitas un induktīvās slodzes raksturlīknes, var atrast garenlauka sinhrono induktīvo pretes­tību *Xd.* Šim nolūkam uz induktīvās slodzes raksturlīknes atliek no­minālo spriegumu , atrod ierosmes strāvu  un no tukšgaitas raksturlīknes šai ierosmes strāvai atbilstošo . Tad saskaņā ar izteiksmi (5.10) var atrast, ka

 (5.11)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 5.20. zīm. Sinhronā ģeneratora slodzes raksturlīkne un reak­tīvais trīsstūris. |

**5.13. SINHRONO DZINĒJU PALAIŠANA**

Pazīstami divi sinhrono dzinēju palaišanas (rotora iegrieša­nas) paņēmieni: palaišana ar palīgdzinēju un asinhrona palai­šana.

Palaišana ar palīgdzinēju ir vecākais paņēmiens: ar sinhronā dzinēja vārpstu sajūgts palīgdzinējs iegriež sinhrona dzinēja rotoru gandrīz līdz sinhronajam griešanas ātrumam. Pēc tam sinhrono dzinēju pieslēdz tīklam, pievieno ierosmes strāvu un atslēdz palīgdzinēju.

Kā palīgdzinēju izmanto asinhrono dzinēju, kura polu skaits vienāds ar sinhronā dzinēja polu skaitu un jauda nepārsniedz 10% sinhronā dzinēja jaudas.

Ar šo paņēmienu sinhronos dzinējus var palaist tikai tukšgaita, jo ekonomiski un tehniski nav izdevīgi izmantot relatīvi lielas jaudas palīgdzinēju. Tāpēc šo metodi lieto tikai lieljaudas sinhrono kompensatoru palaišanai.

Asinhrono palaišanu izmanto praktiski visiem sin­hronajiem dzinējiem, t. i., tos palaiž kā īsi slēgtos asinhronos dzi­nējus.

Tā realizēšanai sinhrono dzinēju rotoriem ar izvirzītajiem po­liem 1 polu kurpēs 2 ievietots «vāveres ratam» līdzīgs palaiša­nas tinums — neizolēti aksiāla virziena misiņa vai bronzas stieņi 3, kuru gali abpus rotoram savienoti īsi ar vara lentu, kas izveido noslēgtus gredzenus 4 (5.21. att. b).

Tāda sinhronā dzinēja statoru pieslēdzot trīsfāzu tīklam, sta­tora rotējošā plūsma šķeļ palaišanas tinuma stieņus un inducē tajos EDS. Tā kā stieņi saslēgti īsi, tad inducētie EDS uztur stie­ņos strāvas, kuru mijiedarbē ar rotējošo statora plūsmu rodas vienvirziena (palaišanas) griezes moments, kas rotoru iegriež līdz sinhronajam ātrumam n tuvai vērtībai.

|  |
| --- |
|  |

5.21. att. Shēma sinhronā dzinēja asinhronajai palaišanai (*a*) un pa­laišanas tinuma izvietojums sinhronā dzinēja rotorā (b): 1 – polu kurpes; 2 - palaiša­nas tinums; 3 – stieņi; 4 - noslēgtie gredzeni

Sinhronā dzinēja asinhronās palaišanas shēma dota 5.21. at­tēla a. Pirms statora tinuma pieslēgšanas tīklam rotora ierosmes tinumu ar pārslēdzi *P* atslēdz no līdzstrāvas avota un noslēdz ar aktīvu izlādes pretestību *r*, kura 10—12 reizes lielāka par ierosmes tinuma pretestību n. Tad statoru pieslēdz tīklam un, kad rotora ātrums vairs nepieaug, ierosmes tinumu ar pārslēdzi atvieno no izlādes pretestības *r* un pievieno līdzstrāvas avotam (parasti — maiņstrāvas taisngriezim). Reizē ar to rodas ierosmes plūsma un sinhronais elektromagnētiskais griezes mo­ments, kas palielina rotora ātrumu līdz sinhronajam, t. i., «ievelk» rotoru sinhronismā. Palaišana parasti auto­matizēta.

Dzinēja palaišanas laikā tā Ierosmes tinumu, kam ir liels vi­jumu skaits, nedrīkst atstāt nesaslēgtu, tādēļ ka palaišanas sā­kumā statora rotējošā plūsma inducē ierosmes tinumā lielu EDS, kas 20—30 reizes pārsniedz tinuma normālo spriegumu un tādēļ ir bīstams ierosmes tinuma izolācijai un apkalpes personālam. Tāpat, dzinēju palaižot, nav lietderīgi ierosmes tinumu saslēgt īsi, jo tinumā plūstošā vienfāzes strāva radītu ievērojamu brem­zējošo momentu, kas sevišķi nevēlams, dzinēju palaižot ar slodzi. Izlādes pretestība r ievērojami samazina ķēdes strāvu un Ieros­mes tinuma spriegumu.

Svarīgi, ka palaišanas tinums (stieņi) dzinēja darbā nepie­dalās, jo rotē sinhroni ar statora plūsmu, un tādēļ stieņos neinducējas EDS. Vienīgi, ja dzinēja slodze strauji mainās, palaiša­nas tinums rada papildu griezes momentu, kas tiecas rotoru uzturēt sinhronismā, un tādēļ šo tinumu sauc arī par slāpē­jošo. To izveido, vadoties no dzinēja palaišanas prasību viedokļa, piem., lai iegūtu lielu palaišanas momentu, palielina palaišanas tinuma aktīvo pretestību, t. i., palaišanas tinuma stieņus izgatavo no materiāla ar lielāku īpatnējo pretestību (misiņš, bronza), ne­ietekmējot mašīnas lietderības koeficientu.

Tādējādi ar asinhrono palaišanu var laist darbā slogotus (pat nomināli slogotus) sinhronos dzinējus, turklāt pati palaišana vienkārša un lēta.

Sinhronajiem dzinējiem ar masīviem izvirzītajiem poliem nav vajadzīgs īpašs palaišanas tinums, tikai polu kurpju pieres da­ļas savstarpēji jāsavieno ar vara lentu.

Sinhronos dzinējus ar neizvirzītajiem poliem (n = 3000 apgr./min) izmanto samērā reti. Palaišanas tinumu tiem aizstāj masīvais rotora ķermenis un neferomagnētiska tērauda ķīļi, ar kuriem tinumu nostiprina rotora rievās.

Mazākas jaudas (līdz dažiem simtiem kilovatu) sinhronos dzi­nējus ar izvirzītajiem poliem palaiž, statora tinumu tieši pieslē­dzot tīkla pilnajam spriegumam, ja vien to pieļauj tīkla jauda, jo šo dzinēju palaišanas strāva *IP* = (4—5)·*IN*. Dzinējiem ar *n* = 3000 apgr./min palaišanas strāva *IP* = (5—7) ·*IN*.

Lai ierobežotu palaišanas strāvas lieljaudas dzinējiem, tos pa­laiž ar pazeminātu spriegumu, izmantojot autotransformatorus vai reaktorus.

**5.14. SPECIĀLAS NOZĪMES SINHRONĀS MAŠĪNAS**

**5.14.1. Sinhronās mašīnas ar pastāvīgiem 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 · 103 J/m), pastāvīgo magnētu praktiskā pielietošana aprobežojās ar kompasiem, telefoniem, magnetoelektriskajiem mēraparātiem u.c.

Pēc tam, kad sāka ražot kobaltu saturošus tēraudus ar magnētisko enerģiju 3,5 • 103 J/m3*,* 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 kJ/m *.* Apgūstot lētos alumīnija - niķeļa sakausējumus, pastāvīgo magnētu pielietošanas 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 kJ/m3*.*

Sinhronajām mašīnām ar pastāvīgajiem magnētiem nav ierosmes tinuma uz rotora, bet to statoriem ir parastā konstrukcija ar divfāžu vai trīsfāžu tinumiem. Šīm mašīnām ir vienkārša un droša konstrukcija, jo tām nav rotējošu tinumu un suku kontaktu.

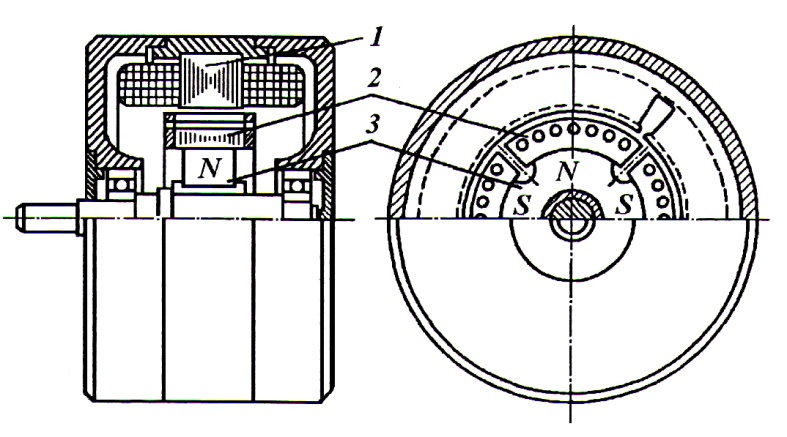
Pastāvīgos magnētus parasti pielieto nelielas un vidējas jaudas dzinējos un sinhronajos ģeneratoros, īpaši vēja enerģētiskajās iekārtās.

Sinhronos magnētoelektriskos dzinējus izgatavo divu veidu: ar radiālu un aksiālu pastāvīgo magnētu novietojumu.

Dzinējos ar radiālu magnētu novietojumu dobs šihtēts rotors ar īsslēgtu palaišanas tinumu novietojas uz pastāvīgo magnētu poliem (5.22. att). Doba cilindra iekšpusē starp poliem izveido spraugas, kas neļauj magnētu plūsmai noslēgties šajā cilindrā.

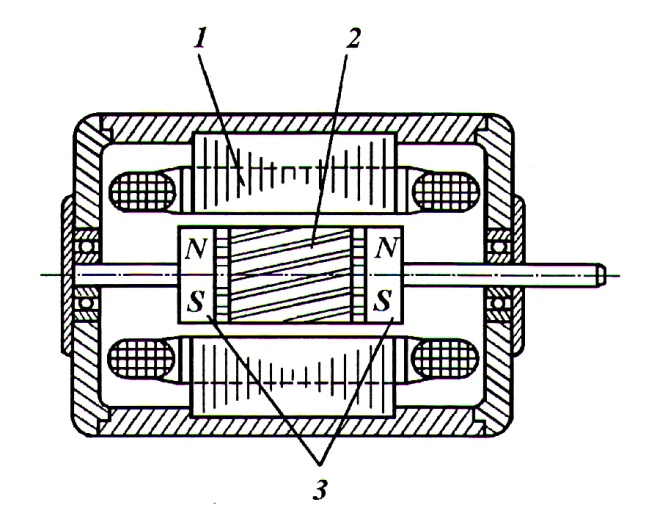
Dzinējos ar aksiālu magnētu novietojumu rotors ir salikts - vidū atrodas parasts īsslēgts tinums, bet galos diskveida pastāvīgie magnēti (5.23. att.).

Palaižot sinhronos dzinējus ar pastāvīgajiem magnetiem, jāņem vēra tas apstāklis, ka rotors arī asinhronajā palaišanas režīmā rada ierosmes lauku. Šajā gadījumā uz rotoru bez asinhronā un slodzes statiskā momenta darbojas arī bremzējošs griezes moments, kas rodas pastāvīgo magnētu lauka un statora tinumā inducēto 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 bremzējošs griezes moments, kas rodas pastāvīgo magnētu lauka un statora tinumā inducēto strāvu mijiedarbības rezultātā. Minētais bremzējošais moments pasliktina palaišanas raksturlīknes. Turklāt pastāvīgie magnēti šādos dzinējos pakļauti enkura reakcijas atmagnetizējošai darbībai.



5.22. att. Sinhronais dzinējs ar radiālu magnētu novietojumu:

1 – stators; 2 – īsslēgtais rotors; 3 – pastāvīgie magnēti.



5.23. att. Sinhronais dzinējs ar aksiālu magnētu novietojumu:

1 – stators; 2 – īsslēgtais rotors; 3 – pastāvīgie magnēti.

Sinhrono dzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem galvenās priekšrocības ir stabila darbība sinhronajos režīmos ar mainīgu slodzi un samērā augstie enerģētiskie rādītāji. Pie trūkumiem jāpieskaita sliktākas palaišanas raksturlīknes 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, kurš 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 jaudu diapazons sinhronajiem ģeneratoriem ar pastāvīgajiem magnētiem. Mūsdienās pastāvīgos magnētus izmanto VEI ar jaudu no dažiem vatiem līdz 2-3 megavatiem. Turklāt jaudu diapazonā no 20 līdz 30 kWšādiem ģeneratoriem ir dominējoša 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.

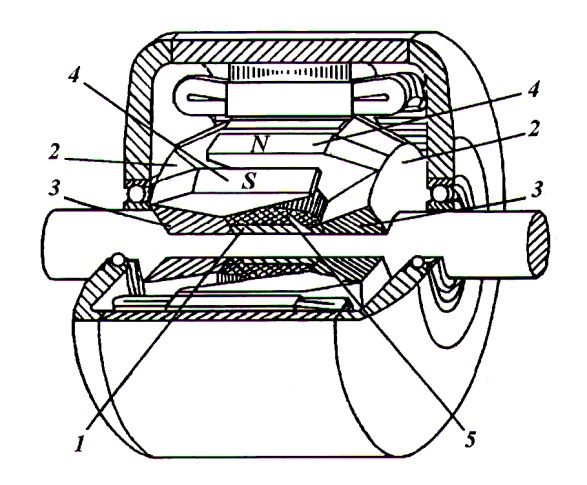
Bez minētajām vēl jāpiemin šādas priekšrocības, kas piemīt sinhronajiem ģeneratoriem ar pastāvīgajiem magnētiem: augsts lietderības koeficients un nenozīmīga rotora silšana sakarā ar to, ka nav zudumi ierosmes tinumā un slīdošajos kontaktos; mazāki traucējumi radio un citai aparatūrai, jo nav slīdošo kontaktu ar dzirksteļošanu; 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.

**5.14.2**. **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 (5.24. att.).

Rotora magnētiskā sistēma sastāv no ieliktņa 1, kurš 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 starp-niecību (5.24. attēlā gredzeni nav parādīti).



5.24. att. Sinhronā mašīna ar ķetnveida poliem:

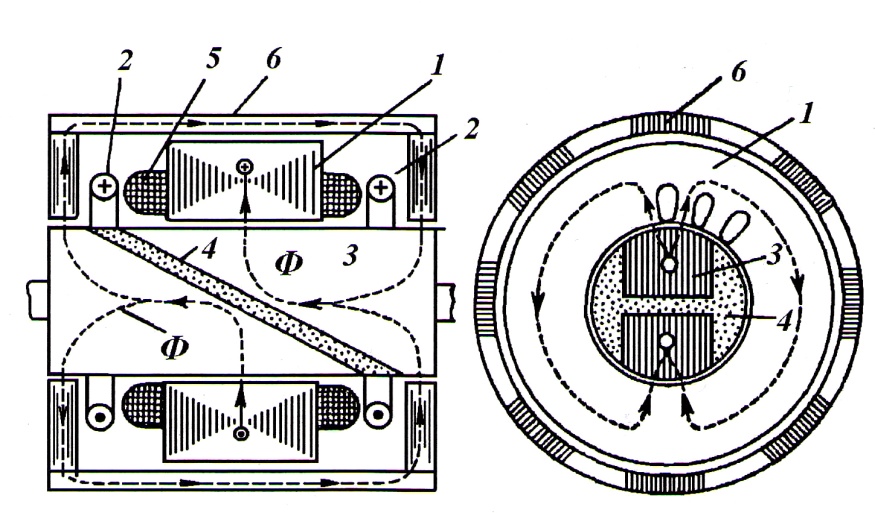
1 – ieliktnis; 2 – polu sistēmas; 3 – polu sistēmas jūgi; 4 – polu izciļņi; 5 - ierosmes tinums.

Ķetnveida rotora priekšrocība salīdzinājumā ar parastās konstrukcijas izvirzīto polu rotoru ir tā vienkāršā konstrukcija un izgatavošana, jo katru polu sistēmu var izveidot kā viengabala lējumu. Tādējādi nav vajadzīgs atsevišķi izgatavot un nostiprināt tajā 2ppolus un tikpat daudz ierosmes tinuma spoles. Tāpēc vara patēriņš un jaudas zudumi ierosmes tinumā ir mazāki nekā parastās konstrukcijas izvirzīto polu sinhronajās mašīnās.

Vēl viena priekšrocība, kas piemīt sinhronajām mašīnām ar ķetnveida poliem, ir iespēja izveidot tās ar nekustīgu ierosmes tinumu statorā, tātad bez slīdošiem kontaktiem.

5.25. attēlā parādīts izveidojuma princips bezkontaktu 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, kura atdala polus vienu no otra. Magnētiskā plūsma 0noslēdzas caur statorā serdi, papildus gaisa spraugām 7, gultņu vairogiem un ārējo magnētvadu (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.



5.25. att. Bezkontaktu sinhronā mašīna ar ķetnveida poliem: 1 – stators; 2 – ierosmes tinums;

3 – rotors ar ķetnveida poliem; 4 – nemagnētiska starplika; 5 – enkura tinums; 6 – ārējais magnētvads.

Sinhronos ģeneratorus ar ķetnveida poliem samērā plaši izmanto automobiļu, traktoru un citu transportlīdzekļu elektroapgādes sistēmās. Bezkontaktu sinhronie dzinēji ar ķetnveida poliem atsevišķos gadījumos var aizstāt īsslēgtos asinhronos dzinējus. Šiem dzinējiem izmanto asinhrono palaišanu, turklāt palaišanas tinuma lomu šeit veic rotora masīvie ķetnveida poli.

Jāatzīmē, ka bezkontaktu sinhrono mašīnu ķetnveida rotora priekšrocības nav tik izteiktas, jo šajās mašīnās sakarā ar palielinātu magnētiskās ķēdes garumu un divām papildus gaisa spraugām nepieciešams lielāks ierosmes tinuma MS. Turklāt šādu mašīnu korpuss un gultņu vairogi jāizgatavo no magnētiska materiāla.

**5.14.3. 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 magnētiskas plūsmas pulsācija enkura tinumā.

Induktormašīnām ir vienkārša uzbūve un augsta drošuma pakāpe. Tām ir virkne priekšrocību, salīdzinot ar parastās konstrukcijas sinhronajiem ģeneratoriem.

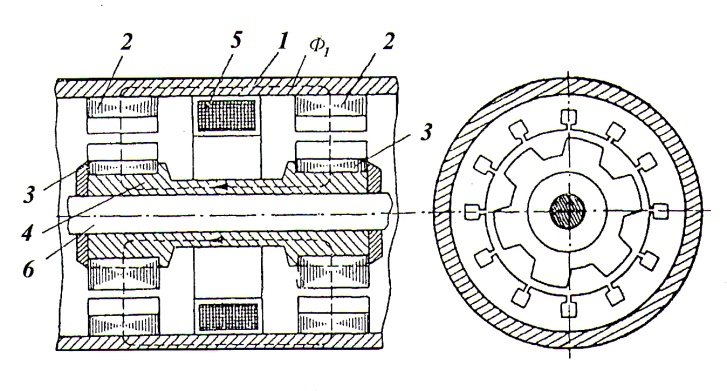
Induktormašīnas galvenokārt izmanto kā ģeneratorus vēja enerģētikā, dažādu rūpniecisko iekārtu, kā arī lidmašīnu, kuģu u.c. elektrisko sistēmu barošanai.

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 savu lielumu, gan virzienu.

Tādus ģeneratorus sauc par heteropolāriem. No unipolārajām mašīnām plašāku pielietojumu ir radis divpakešu induktorģenerators, kura konstruktīvā shēma parādīta 5.26. attēlā.



5.26. att.Divpakešu unipolāra induktorģeneratora konstruktīvā shēma:

1 - korpuss; 2 - enkura paketes ar tinumiem; 3 - rotora paketes; 4 - rotora ieliktnis;

5 - ierosmes tinums; 6 — vārpsta

Statora paketes vienmēr izgatavo no elektrotehniskā tērauda loksnēm, 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 ko rada ierosmes tinums. Plūsmas virziens 5.26. 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 τ

τ = (5.12)

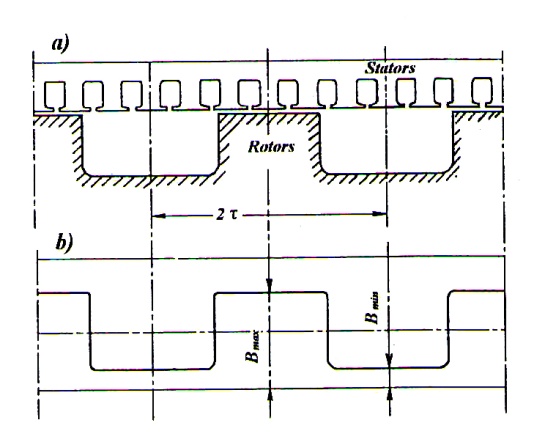
kur  *-* statora iekšējais diametrs;

*)*

Z2 - rotora zobu skaits;

p *-* polu pāru skaits (p = Z2).

Magnētiskas indukcijas sadalījuma līkne gaisa spraugā gar enkura aploci parādīta 5.27. attēlā.



5.27. att. Induktorģenerators:

a – induktorģeneratora zobu suka; b – magnētiskās indukcijas sadalījums.

No šī attēla redzams, ka, rotoram griežoties, indukcija mainās (saglabājot nemainīgu virzienu) no maksimālās Bmaxvirs rotora zoba, līdz Bminvērtībai virs rievas. 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

(5.13)

un periodiskas ar amplitūdu

(5.14)

Enkura tinumā EDS inducē tikai magnētiskās indukcijas periodiskā komponente *Bm,* jo indukcijas nemainīgā komponente B0rada ar statora tinumu laikā un telpā nemainīgu plūsmas saķēdējumu. Turklāt komponente B0papildus noslogo magnētisko sistēmu. Tāpēc magnētiskās ķēdes atsevišķo posmu šķērsgriezumi jāizvēlas pēc maksimālās indukcijas vērtības. Tas, savukārt, palielina mašīnas izmērus un masu.

Enkura tinumā inducētā EDS frekvence (Hz)

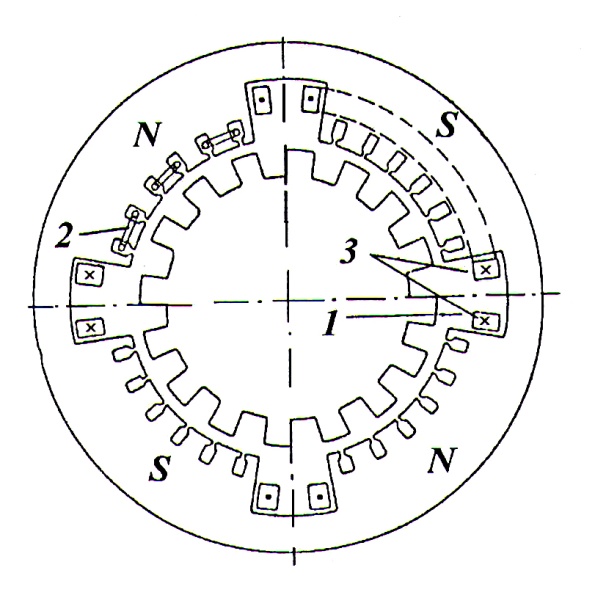
(5.15)

kur *n -* rotora rotācijas frekvence (.

Paaugstinātas frekvences dēļ, induktorģeneratora enkura tinumam ir relatīvi liela induktīvā pretestība, kas izraisa sprieguma ģeneratoru izmaiņu, ģeneratoru slogojot. Tāpēc, lai ģeneratora dažreiz virknē ar enkura tinumu slēdz kondensatorus.

Induktorģeneratorus, tāpat kā parastās sinhronās mašīnas, var izveidot ar vienfāzes vai daudzfažu enkura tinumiem. Divpakešu gadījumā pakešu spoles var savienot savā starpā gan virknē, gan paralēli.

Heteropolārā ģeneratora konstruktīvā shēma parādīta 5.28. attēlā.



5.28. att. Heteropolārā induktorģeneratora šķērsgriezums:

1 – lielās rievas; 2 – enkura tinums; 3 – ierosmes tinums.

Statora un rotora paketes saliek no elektrotehniskā tērauda loksnēm. Enkura paketē izveidotas mazās un lielās rievas. Mazajās rievās tiek novietots vienfāzes vai daudzfažu enkura tinums, bet lielajās - ierosmes tinums.

Ierosmes tinuma spoles, kuras baro ar līdzstrāvu, uz enkura virsmas izveido polus Nun 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 šīm plūsmas pulsācijām enkura tinumā inducējas EDS. Elektromagnētiskie procesi viena pola robežās šajā gadījumā neatšķiras no analoģiskiem procesiem unipolārā induktorģeneratorā. Atšķirība ir tikai tāda, ka rotora zobi pārmaiņus pārvietojas zem ziemeļ un dienvidpoliem. Tāpēc plūsma maina virzienu.

Unipolāriem induktorģeneratoriem salīdzinot ar heteropolāriem ģeneratoriem, piemīt vairākas priekšrocības: lielāks lietderības koeficients, jo nav magnētiskie zudumi rotorā; 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 rievas, kurās novietot ierosmes tinumu.

No otras puses unipolāriem ģeneratoriem, salīdzinot ar heteropolāriem, piemīt vairāki trūkumi: lielāks mašīnas garums; masīvais rotors un garāka vārpsta rada smagākus darba apstākļus gultņiem; biezāks jūgs, jo tas kalpo par magnetvadu; mašīnā eksistējošās plūsmas var noslēgties caur gultņiem un piedziņas mehānismu; lielā inerce sakarā ar masīviem elementiem rotorā palielina pārejas procesu laiku.

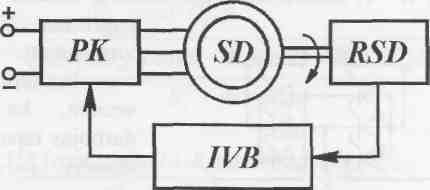
Heteropolāros ģeneratoros visa magnētiskā ķēde tiek veidota no elektrotehniskā tērauda loksnēm. Korpusa un jūga izmērus nosaka, vadoties tikai no mehāniskās stiprības. Mašīnai ir mazs inerces moments. Šī ģeneratora diametrs ir lielāks, salīdzinot ar unipolāro ģeneratoru, bet garums mazāks. Ja rotora zobu skaits ir relatīvi neliels, heteropolārā ģeneratora enkura tinums tiek izmantots sliktāk. Kopumā abu tipu ģeneratoru masas gabarītu rādītāji ir līdzīgi.

**5.14.4. Ventiļdzinēji**

Līdzstrāvas dzinēju lieliskās īpašības - liels palaišanas moments un iespēja regulēt rotācijas frekvenci plašā diapazonā bieži vien nevar īstenot sakarā ar trūkumiem, kas piemīt suku kolektora mezglam. Tāpēc par dabisku var uzskatīt vēlmi aizvietot sukas un kolektoru ar tranzistoru vai tiristoru pusvadītāju komutatoru. Šādi dzinēji pazīstami ar dažādiem nosaukumiem - sākumā tos sauca par bezkolektora līdzstrāvas dzinējiem, bet pēdējā laikā plašāk izplatīts nosaukums "ventiļdzinēji". Ventiļdzinējus zināmā mērā var uzskatīt par līdzstrāvas mašīnas bezkolektora analogiem. Tiem piemīt lieli palaišanas momenti, paaugstināts kalpošanas ilgums, augsti enerģētiskie un drošuma rādītāji.

Lielas jaudas ventiļdzinēji rod pielietojumu tur, kur agrāk izmantoja neregulējamus asinhronos un sinhronos dzinējus. Sevišķi veiksmīga ir izrādījusies ventiļdzinēju izmantošana kosmiskajā elektromehānikā.

Ventiļdzinējos tāpat kā līdzstrāvas kolektordzinējos var izmantot dažādas konstrukcijas un tinumu slēguma shēmas. Visbiežāk izmanto tnsfažu shēmu. Tāds dzinējs sastāv no trīsfažu sinhronās mašīnas un vadāma invertora, kas pārveido līdzstrāvu maiņstrāvā. Pusvadītāju elementus invertora 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. 5.29. attēlā parādīta ventiļdzinēja blokshēma.



5.29. att*.* Ventiļdzinēja 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 invertora.

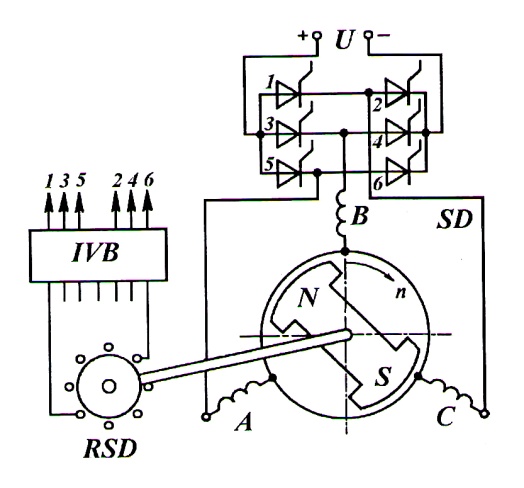
Par rotora stāvokļa devējiem izmanto dažādus elementus, piemēram, induktīvos, transformatortipa, magnetodiodes, Holla devējus un citus.

Gadījumā, ja ventiļdzinēja barošana notiek no maiņstrāvas tīkla 5.29. attēlā parādīto blokshēmu papildina ar taisngriezi un filtru.

5.30. attēlā parādīta ventiļdzinēja funkcionālā shēma. Invertors izveidots no sešiem tiristoriem, kurus caur vadības bloku IVB vada signāli no rotora stāvokļa devēja RSD. Līdzstrāvas barošanas spriegums *U* tiek pieslēgts invertora ieejai.

Kā zināms, tiristori nav pilnīgi vadāmi elementi: ar elektriska signāla palīdzību tos var atvērt, bet lai aizvērtu, jāpārtrauc strāva anoda ķēdē. Tiristori 1, 3 un 5 veido anoda grupu, jo tiem pievienota barošanas avota + spaile, bet tiristori 2, 4 un 6 veido katodgrupu - tiem pievienota - spaile.

Rotoram griežoties, ierosmes lauks inducē statora fāzēs EDS. Šie EDS darbojas pretī barošanas spriegumam līdzīgi kā pretEDS līdzstrāvas dzinējos. Atsevišķos laika momentos statora tinumos inducētie līnijas EDS pārvar barošanas spriegumu, pārtrauc strāvu tiristoru anoda ķēdē un nodrošina to aizvēršanos zināmā secībā.



5.30. att. Ventiļdzinēja funkcionālā shēma.

Tādējādi noteiktā secībā atverot un aizverot tiristorus, izmaina strāvas virzienu un lielumu statora atsevišķos 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 IA = 1/2, IB = - I, Ic = 1/2un magnētiskā lauka ass sakrīt ar Bfāzes asi. Ja atver tiristorus 1, 4 un 6, tad Ia = 1/2, Ib= 1/2, Ic =1*,* statora lauka ass sakrīt ar tinuma *C* asi un rotors pagriežas šī tinuma ass

No iepriekš teiktā var secināt, ka ventiļdzinējs 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 griežlauka rotācijas frekvenci, pateicoties RSD signāliem, nosaka rotora rotācijas frekvence. Tāpēc, mainoties rotācijas ātrumam, ventiļdzinējam izkrišana no sinhronisma nedraud.

Otra ventiļdzinēja īpatnība slēpjas tajā apstāklī, ka aplūkojamā shēmā, ja netiek veikti speciāli pasākumi, mainoties slodzei, tā slodzes leņķis Θ paliek nemainīgs.

Ventiļdzinēji var nodrošināt mehāniskās raksturlīknes, kas līdzīgas paralēlas, virknes un jauktās ierosmes līdzstrāvas dzinēju raksturlīknēm. To rotācijas frekvenci var regulēt, mainot pievadīto spriegumu, ierosmes strāvu un slodzes leņķi Θ*.* Minēto lielumu regulēšana pēc noteiktiem likumiem paver ceļu elektropiedziņu sintēzei ar iepriekš uzdotām rakstur līknēm.

Daudzu valstu zinātnieki ventiļdzinēju izpētē izmanto dažādas pieejas: apskatot tos no līdzstrāvu klasiskās vai automātiskās regulēšanas teorijas pozīcijām, balstoties uz sinhronās mašīnas teorijas pamatprincipiem vai, aprakstot ventiļdzinēja 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 ventiļdzinēju aplūko kā sinhrono mašīnu, kas darbojas specifiskos režīmos. Šādā gadījumā analīze ir relatīvi vienkāršāka un uzskatāmāka.

**5.14.5. Sinhronie reaktīvie dzinēji**

Izvirzīto polu sinhronā mašīna var darboties bez ierosmes tinuma. Tādu mašīnu sauc par sinhrono reaktīvo mašīnu.

Kā izriet no sinhronās mašīnas elemktromagnētiskā momenta aprēķina izteiksmes (5.16)

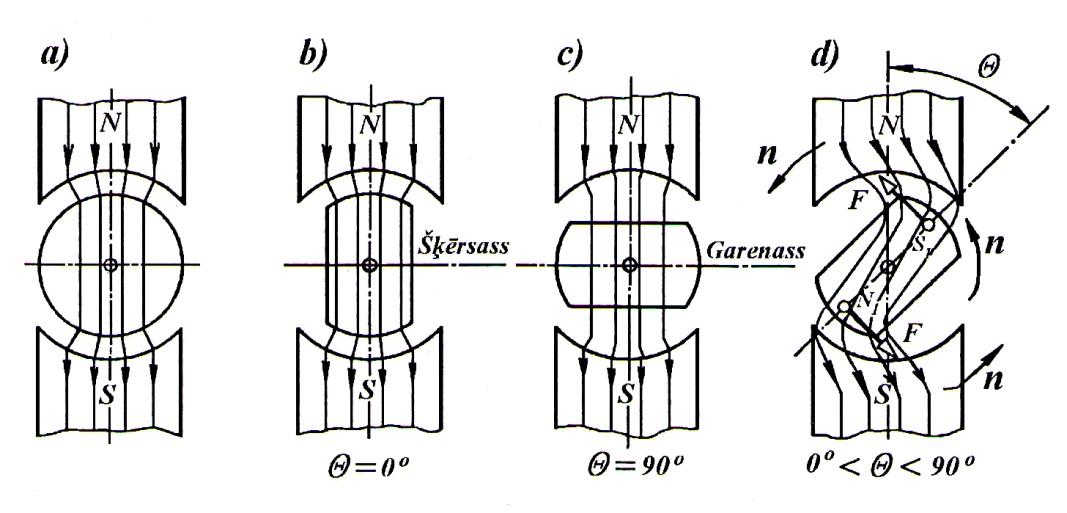
(5.16)

sinhronā reaktīvā dzinēja elektromagnētisko momentu var aprēķināt kā

M = (5.17)

No izteiksmes (5.17) redzams, ka reaktīvā dzinēja moments ir jo lielāks, jo lielāka atšķirība starp induktīvo pretestību un vērtībām, kuras savukārt atkarīgas no magnētiskajām pretestībām rotora garenass dun šķērsass qvirzienā.

Sinhronā reaktīvā dzinēja darbības princips paskaidrots 5.31. attēlā, kur statora tinuma radītais griežlauks uzskatāmības dēļ aizstāts ar *N* un *S* poliem.



5.31. att.Sinhrona reaktīva dzinēja darbības principa izskaidrojums

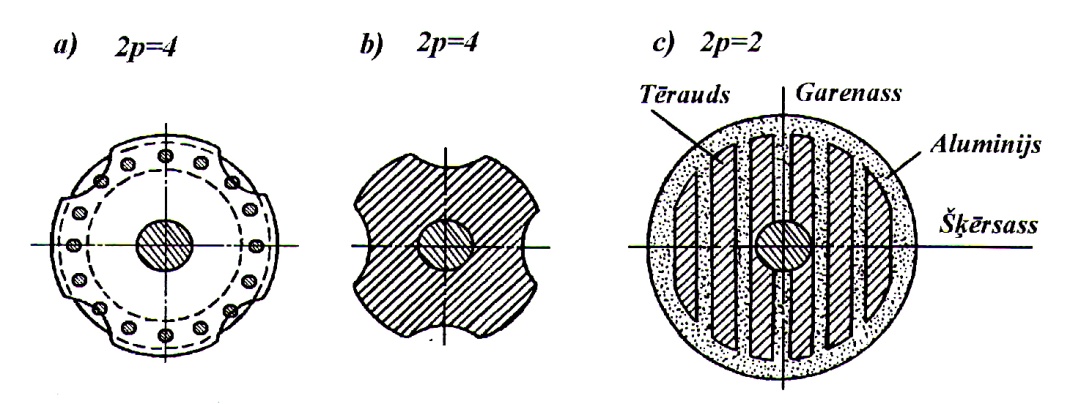
Ja dzinēja rotoram ir cilindriska forma (5.31. a att.) tad ķēdes magnētiskā pretestība nav atkarīga no rotora stāvokļa un tādēļ rotors negriežas. Bet, ja rotoram ir 5.31. b un c attēlā parādītā forma, tad ķēdes magnētiskā pretestība atkarīga no rotora stāvokļa. Turklāt rotors atrodas līdzsvarā tikai divos stāvokļos: tad, kad ķēdes magnētiskā pretestība ir vismazākā (stabils līdzsvars), t.i. kad rotora garenass sakrīt ar N - Spolu asi un leņķis Θ =0° un tad, kad Θ *=* 90° (nestabils līdzsvars).

Ja rotors atrodas kādā starpstāvoklī (0°< Θ*<* 90°), tad savstarpējās iedarbības spēki starp statora un rotora pretējā nosaukuma poliem 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.

Sinhronajos reaktīvajos dzinējos biežāk izmanto rotorus, kuri konstruktīvi atšķiras no asinhronā dzinēja parastā īsi slēgtā rotorā tikai ar cilindriskajā virsmā aksiālā virzienā izveidotiem iedobumiem, kas veido rotora izciļņus (5.32. a att.), kā arī masīvus feromagnētiska materiāla rotorus ar izciļņiem (5.32. b att.). Labākus rezultātus uzrāda dzinēji ar slāņainu rotoru (5.32. c att.), kuriem magnētiskā pretestība garenass virzienā daudzkārt mazāka nekā šķērsass virzienā.

Reaktīvo dzinēju palaišanai izmanto asinhrono palaišanas paņēmienu. Palaišanas tinuma lomu spēlē "vāveres rats", masīvais tērauda rotors vai alumīnija cilindrs.

Sinhrono reaktīvo dzinēju priekšrocības: vienkārša konstrukcija, lēti, darbā droši. Trūkumi: zems cosϕ, jodzinējs no tīkla praktiski uzņem tikai magnetizēšanas strāvu magnētiskā lauka radīšanai, zems lietderības koeficients. Tāpēc sinhronās reaktīvās mašīnas galvenokārt izmanto kā mikrodzinējus.

5.32. att. Sinhrono reaktīvo dzinēju rotori:

a – no elektriskā tērauda loksnēm ar īsslēgtu palaišanas tinumu; b – masīvs feromagnētisks;

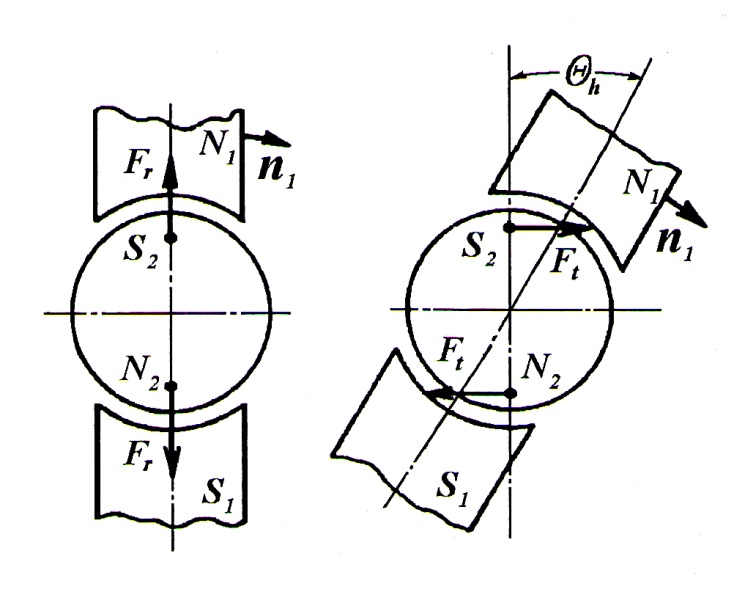
c – slāņains.

**5.14.6. Histerēzes dzinēji**

Histerēzes dzinējs sastāv no statora, kas izveidots līdzīgi asinhronajam dzinējam, un rotora bez tinumiem. Rotors ir cilindrisks ķermenis ar gludu virsmu, kurš izgatavots

no magnētiski cieta materiāla, piemēram, vikaloja. Tas var būt masīvs vai šihtēts.

Sinhronā histerēzes dzinēja darbības princips paskaidrots 5.33. attēlā, kurā statora divpolu rotējošais magnētiskais lauks aizstāts ar rotējošiem poliem un *S;.*



5.33. att. Histerēzes dzinēja darbības principa izskaidrojums

Statora tinumu pieslēdzot tīklam, tā radītais rotējošais magnētiskais lauks magnetizē rotoru. Statora lauka poliem pagriežoties, rotora polu ass pagriešanās aizkavējas, pateicoties histerēzes parādībai, kas magnētiski cietos materiālos ir stipri izteikta. Tādējādi starp rotora poliem  *— N2* un statora poliem izveidojas tā saucamais histerēzes leņķis . Reizē ar to rodas pretēja nosaukuma polu pievilkšanās spēku tangenciālā komponente *Ft,* kura 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 var aprēķināt kā

= (5.18)

kur - zudumi rotorā;

s – slīde.

Zudumi rotorā sastāv no histerēzes zudumiem un virpuļstrāvu zudumiem Δ

ΔΔ (5.19)

Histerēzes zudumi ir proporcionāli rotora frekvencei , bet virpuļstrāvu zudumi proporcionāli . Ņemot vērā, rotora frekvence . tad

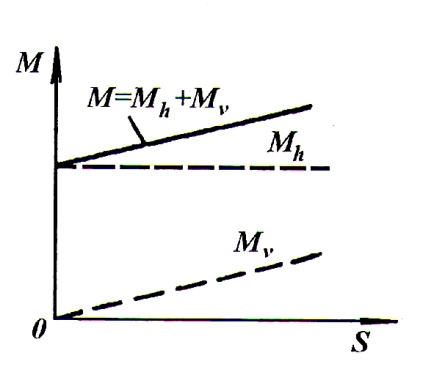
Δ Δ (5.20)

kur un - attiecīgi histerēzes un virpuļstrāvu zudumi rotorā, ja rotors nekustīgs (s = 1).

Ievērojot, ka griezes moments M = , kur - rotējošā magnētiskā lauka leņķiskais ātrums, no izteiksmēm (5.18) – (5.20) iegūstam sakarību

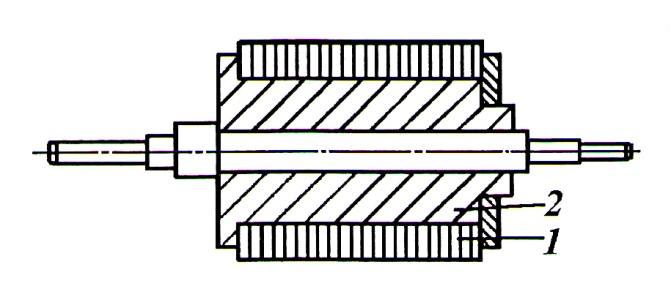
M = = (5.21)

Tādējādi histerēzes moments nav atkarīgs no slīdes, t.i. no rotora rotācijas frekvences (5.34. att.).



5.34. att. Histerēzes dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes

Histerēzes dzinēju rotorus parasti izgatavo no divām daļām (5.35. att.).



5.35. att. Histerēzes dzinēja saliktais rotors:

1 – čaula no magnētiski cieta materiāla; 2 – serde

Ārējā daļa 1 no magnētiski cieta materiāla tiek griezes momenta atkarība no nostiprināta uz cilindrveida serdes 2.

Histerezes dzinējos, kuru rotors ir šihtēts, darbojas tikai histerezes moments (M =*,* bet virpuļstrāvu radītais moments *Mv* = 0. Šādi dzinēji strādā tikai sinhronajā režīmā, bet dzinēji ar masīvo rotoru atkarībā no slodzes momenta lieluma var darboties gan sinhronajā, gan arī asinhronajā režīmā.

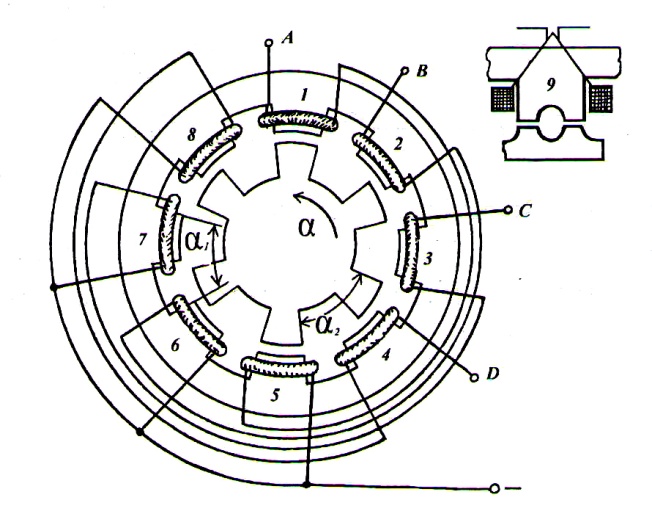
Histerēzes dzinējiem salīdzinājumā ar sinhronajiem reaktīvajiem dzinējiem ir nedaudz labāki tehniski ekonomiskie rādītāji. Tos izgatavo ar jaudu līdz dažiem simtiem vatu.

**5.14.7. Soļu dzinēji**

Mūsdienu diskrētajās piedziņās plaši izmanto sinhronos soļu dzinējus. Tie var būt gan ar ierosmi, gan sinhronie reaktīvie. Soļu dzinēji pārveido elektriskos signālus mehāniskajā kustībā (diskrētos soļos).

Soļu dzinēja uzbūvi un darbības principu var paskaidrot, aplūkojot vienkāršāko sinhrono reaktīvo mašīnu (5.36. att.). Statora un rotora zobu skaits šajā gadījumā ir dažādi. Dažādas ir arī attiecīgās statora un rotora 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 (skat. 5.36. att.).

Aplūkosim soļu dzinēja darbību 5.36. 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) pret pulksteņa rādītāja virzienu tā, lai viņa 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 izsauc rotora diskrētu pagriešanos (soļošanu). Ja izmaina fāžu pieslēgšanas secību uz *A, D, C, B, A,* .., tad rotora diskrētā kustība notiek pulksteņa rādītāja virzienā.



5.36. 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

Lai samazinātu dzinēja soli, tā statora polu izciļņos vēl izveido sīkākus zobus, kā tas parādīts 5.36 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 atpaliek tehnisko raksturojumu un izmantošanas iespēju ziņā no iepriekš aplūkotajiem reaktīvajiem soļu dzinējiem.

**LITERAŪRAS SARAKSTS:**

1. Dirba J., Ketners K. Elektriskās mašīnas. R.: RTU izdevniecība, 2009. 534 lpp.
2. J.Dirba, E.Ketnere, K.Ketners. Enerģētisko sistēmu transformatori. R.:RTU, 2004. 296 lpp.
3. J.Dirba, K.Ketners, N.Levins, V.Pugačevs. Transporta elektriskās mašīnas. R.: Jumava, 2002. 344 lpp.
4. Zolbergs J. Vispārīgā elektrotehnika. – R.: Zvaigzne, 1974.
5. Daņilovs I., Lotockis K. Elektriskas mašīnas. - R.: Zvaigzne, 1975. - 528 lpp.
6. Lielturks A. Elektriskās mašīnas. - R.: Zvaigzne, 1969. - 257 lpp.
7. Zviedris A. Elektriskās mašīnas. - R.: Zvaigzne, 1984. - 367 lpp.
8. Ranka G. Elektriskās mašīnas. - R.: VAS „Latvijas dzelzceļš”, 1996. – 248 lpp.
9. Greivulis J., Raņķis I. Iekārtu vadības elektroniskie elementi un mezgli. – R.: Avots, 1997. 288 lpp.
10. Raņķis I. Energoelektronika. - Rīga: RTU, 2002.
11. Grantmanis A. Automatizētā elektropiedziņa. - Rīga: Zvaigzne, 1973, 224 lpp.
12. Greivulis J., Raņķis I. Modernās elektronikas pamati. - Rīga: Avots, 1992, 165 lpp.
13. Ozoliņš J. Vispārīgā elektrotehnika ar elektronikas pamatiem. 1 daļa. Vispārīgā elektrotehnika. – R.: IZM, 1989. 163 lpp.
14. Cūbergs. I. Regulējama automātiskā elektriskā piedziņa. – R.:RTU, 1998, 67 lpp.
15. Филиппов Б.А., Ильинский Н.Ф. Основы электропривода. М.: МЭИ, 1977.
16. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
17. Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
18. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1989.
19. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
20. Москаленко В.В. Электрический привод. М.: Высшая школа, 1991.