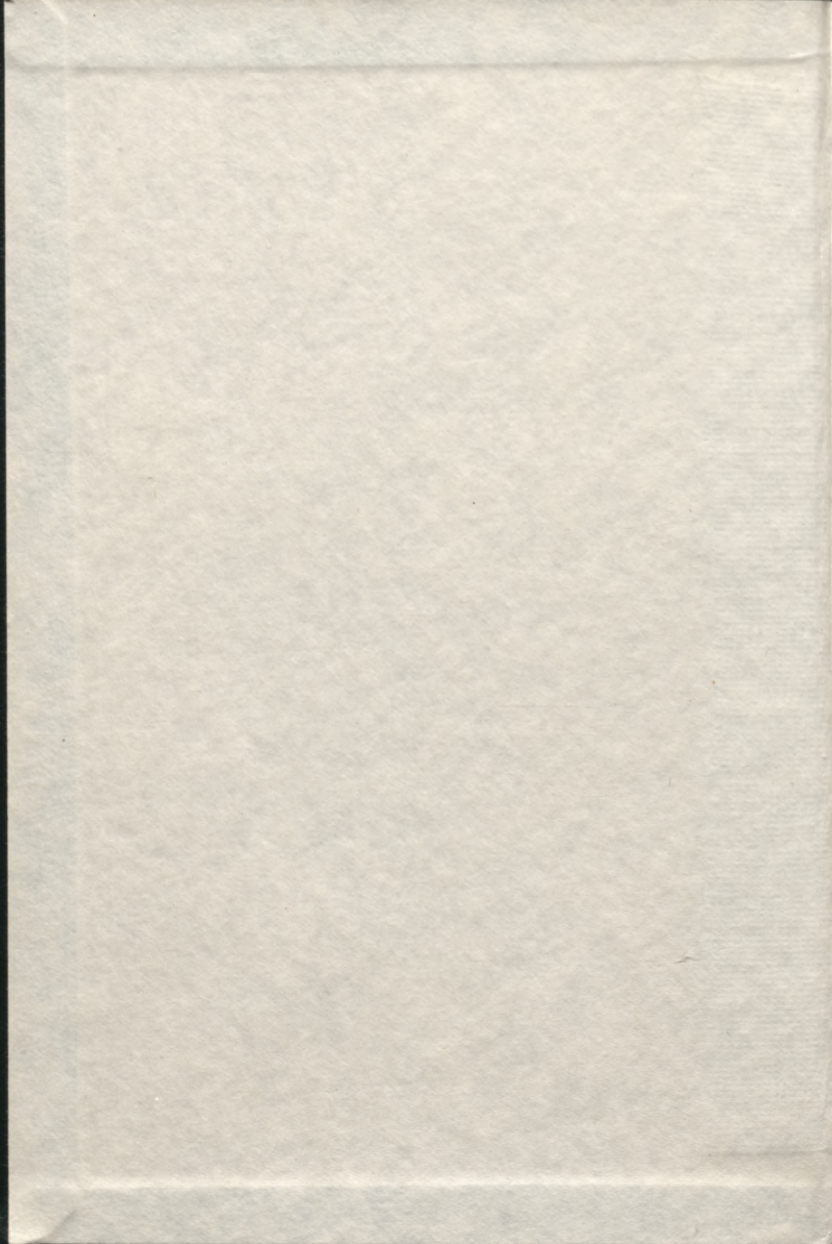


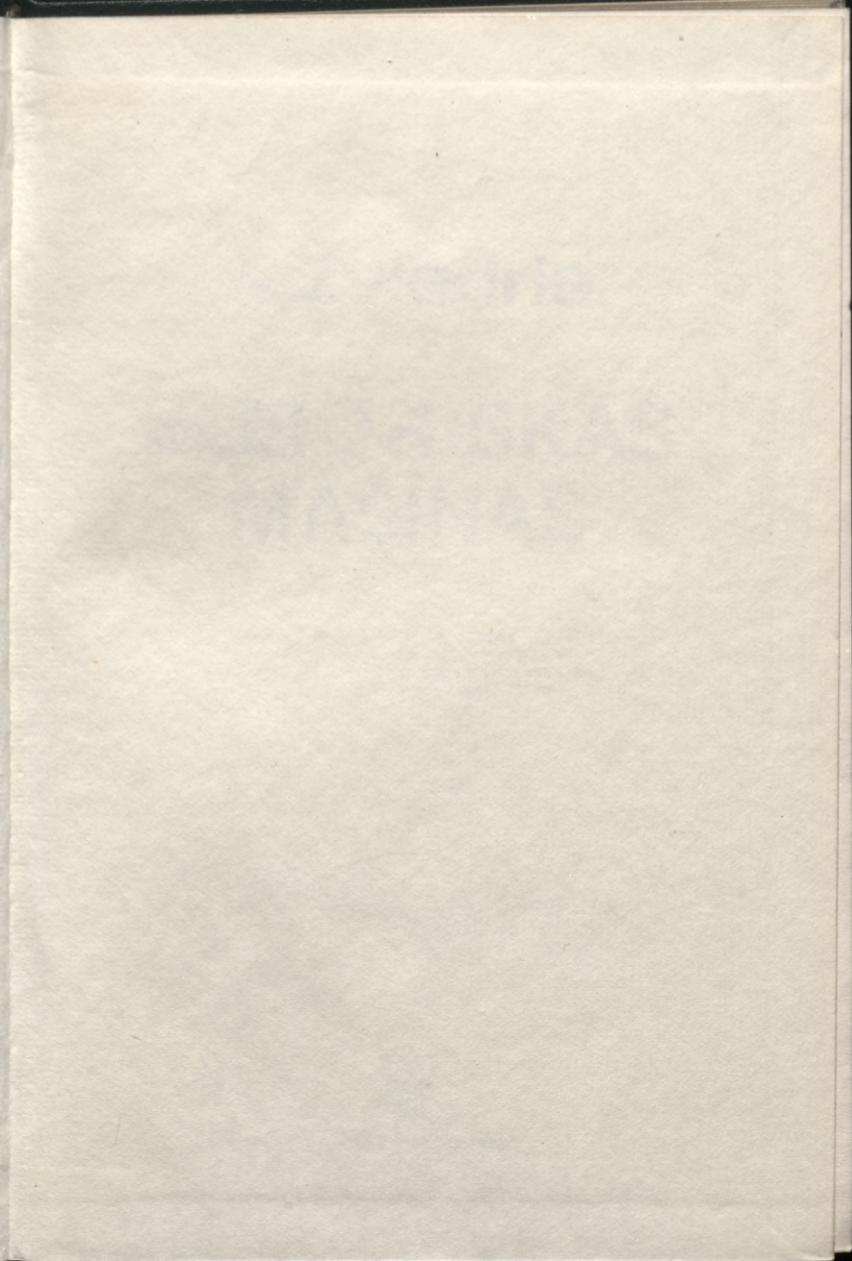
84-4
L 73

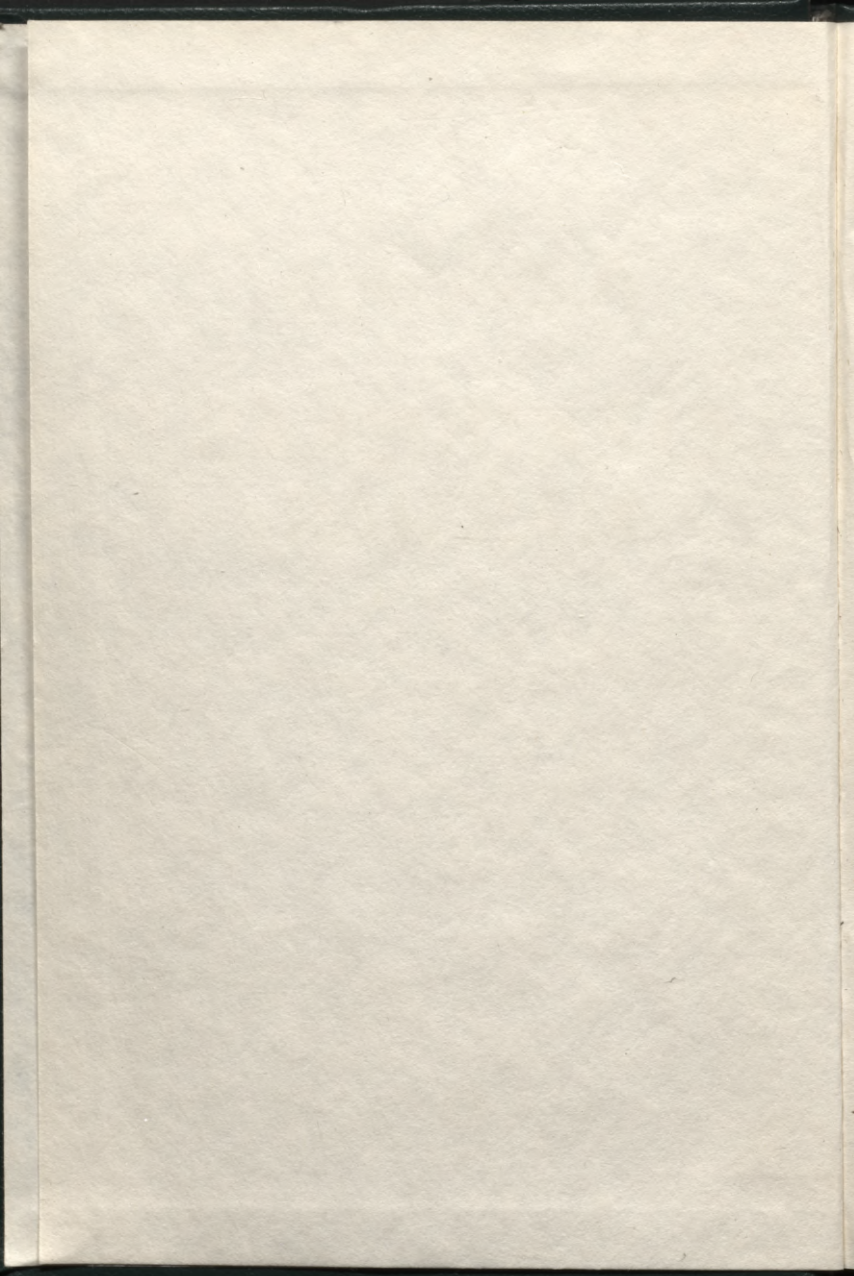
A. Zviedris

ELEKTRISKĀS
MAŠĪNAS









84-4
73

L
624

A.Zviedris

ELEKTRISKĀS MAŠĪNAS

Latvijas PSR Augstākās un vidējās specialās
izglītības ministrija atļāvusi lietot par mācību
līdzekli RPI elektroenerģētisko un elektroteh-
nisko specialitāšu studentiem



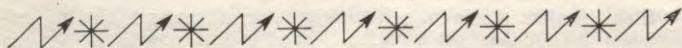
RĪGA «ZVAIGZNE» 1984

В книге рассматриваются принципы устройства электрических машин и трансформаторов, излагаются вопросы их теории, проводится анализ режимов их работы и эксплуатационных свойств.

Книга предназначена для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей Рижского политехнического института. Она может быть также использована инженерами, работающими в области производства, эксплуатации и исследования электрических машин и трансформаторов.

Рис. 297, табл. 11, библиогр. 12.

Recenzenti: *Ļ. Domburs, V. Baumanis.*



1. IEVADS

1.1. 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.

Elektriskās mašīnas, kas mehānisko enerģiju pārveido elektroenerģijā, sauc par elektromašīnu *generatoriem*. 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. 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 generatoros 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 šādās grupās: līdz 0,5 kW — mikromašīnas, 0,5...20 kW — mazjaudas, 20...250 kW — vidējas jaudas un 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.

Elektriskajām mašinām salīdzinājumā ar citiem enerģijas pārveidotājiem ir būtiskas priekšrocības. Tām ir ļoti augsts lietderības koeficients, kura vērtības lieljaudas mašinām sasniedz 98...90%, bet mazjaudas mašinām — 70...80%. Elektriskajām mašinām ir maza īpatnējā masa (masa uz jaudas vienību), tās ir relatīvi lētas, vienkārši regulējamas un apkalpojamās.

1.2. ELEKTRISKO MAŠĪNU VĒSTURE

Elektrisko mašīnu vēstures sākumu var attiecināt uz 1831. gadu, kad angļu zinātnieks M. Faradejs atklāja elektromagnētiskās indukcijas likumu. 1833. gadā krievu zinātnieks E. Lencs vispārināja šo likumu un formulēja apgriežamības principu, proti, ka elektroenerģija var pārveidoties mehāniskajā enerģijā un otrādi. Šajā periodā daudzi zinātnieki un izgudrotāji radīja dažādus elektrisko mašīnu fizikālos modeļus, kuri apstiprināja, ka ir reāla iespēja elektroenerģiju pārveidot mehāniskajā enerģijā un otrādi. Tomēr konstruktīvu nepilnību dēļ praktiskas nozīmes šādām ierīcēm nebija.

Pirmo praktiski lietojamo līdzstrāvas dzinēju 1838. gadā uzbūvēja krievu zinātnieks B. Jakobi un izmantoja to par kučera dzinēju. Elektrisko mašīnu turpmākā attīstība apmēram līdz pagājušā gadsimta astoņdesmitajiem gadiem virzījās pa līdzstrāvas mašīnu pilnveidošanas ceļu, pie tam sākumā generatori un dzinēji attīstījās neatkarīgi. Šajā laikā līdzstrāvas mašīnas ieguva jau visas mūsdienu līdzstrāvas mašīnu konstrukcijām raksturīgās iezīmes.

Krievu izgudrotājs P. Jabločkovs 1876. gadā konstruēja maiņstrāvas generatoru un izveidoja pasaulē pirmo vienfāzes transformatoru ar nenoslēgtu tērauda serdi. Šīs ierīces izmantoja maiņstrāvas loka spuldžu barošanai, un tās ir mūsdienu sinhronās mašīnas un transformatora prototipi. P. Jabločkovs bija pirmais, kas izmantoja maiņstrāvu praktiskajā elektrotehnikā.

1882. gadā krievu izgudrotājs I. Usagins demonstrēja P. Jabločkova transformatora izmantošanu ne tikai apgaismošanā, bet arī iekārtās, kas elektroenerģiju pārveido mehāniskajā un siltuma enerģijā.

1888. gadā itāļu fiziķis G. Ferrariss atklāja rotējoša magnētiskā lauka parādību, uz kuru pamatojas maiņstrāvas mašīnu darbības princips. Vienlaikus ar Ferrarisu arī serbu izgudrotājs N. Tesla atklāja rotējoša magnētiskā lauka parādību un izgatavoja divfāzu asinhrono elektrodzinēju.

Ļoti strauja maiņstrāvas elektrotehnikas attīstība sākās pēc tam, kad izcilais krievu izgudrotājs M. Doļivo-Dobrovoļskis 1889. gadā izgudroja pirmo trīsfāzu asinhrono dzinēju un pirmo trīsfāzu transformatoru. M. Doļivo-Dobrovoļskis ir uzskatāms par trīsfāzu maiņstrāvas tehnikas pamatlicēju.

19. un 20. gadsimtu miju var uzskatīt par elektrisko mašīnu attīstības sākuma perioda nobeigumu. Tad bija radīti jau visi mūsdienu elektrisko mašīnu pamattipi, bija izstrādāti arī elektrisko mašīnu teorijas pamati un to aprēķinu un projektēšanas metodes.

Sakarā ar strauju rūpniecības un transporta attīstību uz elektrifikācijas bāzes 20. gadsimta sākumā un turpmāk paaugstinājās

prasības attiecībā uz elektrisko mašīnu ekonomiskumu. Tāpēc vienlaikus ar elektromašīnbūves attīstību plaši izvēršas zinātniskās pētniecības darbi, kuri virzīti uz elektrisko mašīnu elektromagnētisko un termisko procesu pētīšanu, magnētisko un izolācijas materiālu īpašību uzlabošanu un jaunu materiālu radīšanu.

Pirmsrevolūcijas Krievijā savas elektromašīnbūves rūpniecības praktiski nebija. Nelielas elektrisko mašīnu rūpniecības piederēja ārzemju firmām, un tajās lielākoties veica tikai elektrisko mašīnu montāžu, izmantojot no ārzemēm saņemtos projektus un detaļas. Tikai pēc Lielās Oktobra sociālistiskās revolūcijas pavērs plašas iespējas straujai elektromašīnbūves attīstībai. Pirmajās divās piec-gadēs mūsu zemes elektromašīnbūves rūpniecībai bija jānoiet ceļš, kuru aizrobežu tehnika veica 50 gados. Sākumā elektrisko mašīnu ražošana attīstījās galvenokārt trīs rūpniecās: «Dinamo» — Maskavā, «Elektrosila» — Ļeņingradā un Harkovas elektromehāniskajā rūpnīcā (ХЭМЗ). Sodien šīs rūpniecības ir vienas no lielākajām ražošanas apvienībām Padomju Savienībā, un to produkciju pazīst daudzās pasaules valstīs. Bez minētajām jāatzīmē arī tādas rūpniecības kā Maskavas transformatoru rūpnīca (МТЗ), Jaroslavas elektromehāniskā rūpnīca (ЯЭМЗ), Harkovas «Elektrotjažmaš», Maskavas Vladimira Iljiča vārdā nosauktā elektromehāniskā rūpnīca u. c. Pašreiz gandrīz katrā Padomju Savienības republikā ir savas elektromašīnbūves rūpniecības, kas izgatavo gadā miljoniem dažāda tipa mašīnu.

Mūsdienās ražoto elektrisko mašīnu nomenklatūra ir ļoti plaša. Tās izgatavo ar jaudu no vata daļām līdz vienam miljonam un vairāk kilovatu un rotācijas frekvenci no dažiem apgriezieniem minūtē līdz vairākiem desmitiem tūkstošu apgriezienu minūtē. Jāatzīmē tādi elektromašīnbūves sasniegumi kā ražošanas apvienības «Elektrosila» izgatavotie turboģeneratori ar jaudu 1 200 000 kW un hidroģeneratori ar jaudu 640 000 kW.

Visā elektromašīnbūves attīstības gaitā 20. gadsimtā izšķiroša loma ir bijusi daudzpusīgajiem elektrisko mašīnu elektromagnētisko, termisko, mehānisko un citu procesu teorētiskajiem un eksperimentālajiem pētījumiem. So attīstību ar saviem pētījumiem ir veicinājuši daudzi zinātnieki, no kuriem jāatzīmē E. Arnolds, I. Lakurs, R. Rihters, R. Rīdenbergs, V. Rogovskis (Vācija), A. Blondels (Francija), K. Steinmecs, R. Parks (ASV), L. Dreifuss (Zviedrija), M. Vidmars (Dienvidslāvija), K. Krugs, K. Senfers, V. Tolvinskis, V. Kasjanovs, M. Kostenko, G. Petrovs, A. Voldeks (PSRS).

1.3. ĪSAS ZIŅAS PAR ELEKTROMAŠĪNBŪVES ATTĪSTĪBU LATVIJĀ

Pirmsrevolūcijas periodā elektrotehniskās rūpniecības rašanās un attīstība Latvijā bija cieši saistīta ar Krievijas rūpniecības attīstību. Krievijas pieaugošais pieprasījums pēc elektrotehniskās rūpniecības produkcijas, tai skaitā elektriskajām mašīnām, stimulēja strauju un daudzveidīgu elektrotehniskās rūpniecības attīstību Latvijā jau pagājušā gadsimta beigās. Tomēr lielākā daļa rūpniecības uzņēmumu Latvijā piederēja ārzemju, galvenokārt vācu, kapitālistiem. Tāpēc

arī elektrotehniskās rūpniecības un elektromašīnbūves raksturu un līmeni Latvijā pirmsrevolūcijas periodā būtiski ietekmēja vācu tehnika un vācu inženiertehniskie darbinieki.

1884. gadā Rīgā tika nodibināta H. Detmana Krievu-Baltijas elektrotehniskā rūpnīca. Šīs rūpnīcas tehniskais vadītājs bija E. Arnolds, kurš vēlāk (Vācijā) kļuva par ievērojamu elektrisko mašīnu speciālistu un kurš ir viens no elektrisko mašīnu teorijas pamatlicējiem. Savu praktisko darbību E. Arnolds sāka tieši Rīgā Krievu-Baltijas elektrotehniskajā rūpnīcā un Rīgas Politehniskajā institūtā, kur viņš strādāja par docentu un 1888. gadā noorganizēja elektrotehnisko laboratoriju. Krievu-Baltijas elektrotehniskā rūpnīca 1888. gadā sāka ražot E. Arnolda konstruētās elektriskās mašīnas, sākumā galvenokārt līdzstrāvas ģeneratorus. Šos ģeneratorus uzstādīja un izmantoja lielāko rūpniecības uzņēmumu elektrostacijās. 1900. gadā 15 Rīgas uzņēmumos jau bija savas elektrostacijas ar kopēju jaudu virs 3000 kW. Šajā periodā sakarā ar strauju rūpniecības attīstību pieauga pieprasījums pēc elektroenerģijas un vienlaikus pēc elektriskajām mašīnām. Elektriskās mašīnas bija vajadzīgas ne tikai elektrostacijām, bet arī elektropiedziņai un elektriskajiem ielu dzelzceļiem, kuri šajā laikā daudzās Krievijas pilsētās sāka strauji attīstīties. Krievu-Baltijas elektrotehniskā rūpnīca 19. gadsimta beigās vairs nespēja nodrošināt pieaugošo pieprasījumu pēc elektriskajām mašīnām un citas elektrotehniskās produkcijas. 1898. gadā šo rūpnīcu savā īpašumā nopirka Krievu elektrības sabiedrība «Unions», un faktiski tā kļuva par Vācu elektrības sabiedrības «Unions» Krievijas filiāli. Tam sekoja rūpnīcas pilnīga rekonstrukcija, strauji palielinājās produkcijas apjoms un nomenklatūra, palielinājās rūpnīcas «Unions» loma Krievijas rūpniecības apgādē ar elektriskajām mašīnām un citu elektrotehniskās rūpniecības produkciju. Rūpnīcā šajā laikā ražoja trīsfāzu maiņstrāvas ģeneratorus un dzinējus, līdzstrāvas ģeneratorus un dzinējus ar jaudu līdz 1000 kW un spriegumu līdz 500 V, kā arī vienfāzes un trīsfāzu transformatorus. Visu tehnisko dokumentāciju, lielu daļu no rūpnieciskajām iekārtām, kā arī elektrotehniskos materiālus rūpnīca saņēma no Berlīnes firmas «Unions».

1904. gadā rūpnīcu «Unions» pārņēma starptautiskais koncerns AEG, uz tās bāzes organizējot savu Krievijas filiāli — Krievu sabiedrības «Vispārējā elektrības kompānija» Rīgas rūpnīcu. Reorganizācija veicināja rūpnīcas tālāku attīstību, tās produkcijas apjoma un sortimenta paplašināšanos. Šajā rūpnīcā izveidojās attīstīta elektrisko mašīnu pamattipu ražošana. 1907. gadā Rīgas rūpnīcā tika izgatavotas 2400 elektriskās mašīnas, 1908. gadā — 1424 līdzstrāvas mašīnas ar kopējo jaudu 20 120 kW, 1604 maiņstrāvas mašīnas ar kopējo jaudu 25 130 kW un 76 transformatori. Rūpnīcas produkcijā liels īpatsvars bija tramvaju elektrodzinējiem. 1912. gadā Krievu sabiedrības «Vispārējā elektrības kompānija» Rīgas rūpnīca jau ražoja elektriskās mašīnas ar ļoti plašu jaudas diapazonu — no 25 W (mazjaudas dzinēji galda ventilatoriem) līdz 2650 kW (dzinēji velmēšanas iekārtām). 1912. gadā Rīgas rūpnīca sāka izlaist arī

turbogeneratorus rūpnīcu un pilsētu elektrostācijām. Viena no unikālākajām šāda tipa mašīnām bija turbogenerators ar jaudu 3950 kW, spriegumu 3150 V un rotācijas frekvenci 3000 min⁻¹.

Pirmā pasaules kara laikā (1915. g.) daļa no Rīgas rūpnīcas iekārtas tika evakuēta uz Harkovu, kur uz šīs rūpnīcas bāzes vēlāk izveidojās viena no lielākajām Padomju Savienības elektromašīnbūves rūpnīcām — Harkovas elektromehāniskā rūpnīca (ХЭМЗ).

Padomju varas laikā 1919. gadā Padomju Latvijas valdība sāka atjaunot bijušo Krievu sabiedrības «Vispārējā elektrības kompānija» Rīgas rūpnīcu. Tomēr īsajā Padomju varas pastāvēšanas laikā rūpnīcā paspēja noorganizēt tikai elektrisko mašīnu un dažādu elektrotehnisko iekārtu remontu nelielos apmēros.

Latvijā nākot pie varas buržuāziskajai valdībai, rūpnīcā atkal sāka saimniekot ārzemju kapitālisti (koncerns AEG). Tomēr elektromašīnbūves attīstība Latvijā bija bezperspektīva, tāpēc koncerns AEG šo rūpnīcu 1928. gadā pārdeva buržuāziskās Latvijas valdībai, kur tā izveidoja Valsts elektrotehnisko fabriku (VEF). VEF elektrisko mašīnu ražošana netika atjaunota, ja neskaita izgatavotos dažus simtus nelielas jaudas aerogeneratoru. Bez tam rūpnīca ražoja arī nelielu skaitu spēka transformatoru ar jaudu no 3 kV·A līdz 250 kV·A vietējo rūpnīcu vajadzībām.

Strauja elektromašīnbūves attīstība sākās Padomju Latvijā pēc kara gados. 1946. gadā sāka celt Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcu (RER), kas tagad ir viens no lielākajiem rūpniecības uzņēmumiem republikā. Tai bija jāražo elektriskās mašīnas un aparāti elektrovilcieniem un citam ritošajam sastāvam. Sākumā RER izmantoja Maskavas rūpnīcas «Dinamo» tehnisko dokumentāciju, vēlāk, pieaugot kadru kvalifikācijai, rūpnīca pati projektēja un izgatavoja aizvien pilnīgākas elektroiekārtas un mašīnas, ieviesa ražošanā progresīvu tehnoloģiju. 1948. gadā rūpnīca sāka ražot pirmās elektriskās mašīnas — līdzstrāvas ģeneratorus pasažieru vagonu apgaismošanai un tramvaju elektrodzinējus. Ar 1949. gadu sākās piepilsētas elektrovilcienu vilces dzinēju sērijveida ražošana. RER attīstībā ļoti nozīmīga bija piektā piecgade. Šajā piecgadē rūpnīca, nepārtraukti palielinot ražošanas apjomu, papildināja savu produkciju ar 92 izstrādājumiem, to skaitā arī ar dažāda veida elektriskajām mašīnām. Piecgades beigās (1955. g.) rūpnīcā tika izgatavotas šādas elektriskās mašīnas: vilces dzinēji elektrovilcienu motorvagoniem; tramvaju elektrodzinēji; līdzstrāvas ģeneratori pasažieru vilcienu elektroapgādei; autoiekrāvēju elektrodzinēji; vispārīga lietojuma līdzstrāvas dzinēji un ģeneratori; vienfāzes asinhronie dzinēji veļas mazgāšanas mašīnu piedziņai. 1959. gadā rūpnīcā RER sērijveida ražošanā tika ieviesta dzelzceļa vagonu jauna elektroapgādes sistēma. Reizē ar to tika apgūta speciālas konstrukcijas bezkontakta maiņstrāvas ģeneratoru (induktorgeneratoru) ražošana šai sistēmai. No 1961. gada rūpnīcā RER konstruē un izgatavo vairākas unificētas iekārtas elektroiekrāvējiem, elektrokāriem un citām speciālām ierīcēm iekraušanas un izkraušanas darbu mehānizācijai. Liela daļa no rūpnīcas produkcijas ir šo iekārtu līdzstrāvas elektrodzinēji.

1981. gadā uz Rīgas elektromašīnbūves rūpnīcas bāzes tika izveidota ražošanas apvienība RER, kura šodien ir vadošā Padomju Savienībā piepilsētas elektrovilcienu un iekrāvēju elektroiekārtu ražošanā.

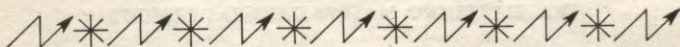
Elektriskās mašīnas nelielā skaitā savas produkcijas komplektēšanai ražo arī citās Latvijas PSR rūpnīcās. Daugavpils rūpnīcā «Elektroinstruments» izgatavo vienfāzes asinhronos dzinējus rokas elektroinstrumentu piedziņai, Elektrisko būvinstrumentu ražošanas apvienībā Rēzeknē — vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējus, Rīgas dīzeļu rūpnīcā — oriģinālas konstrukcijas maiņstrāvas ģeneratorus (dīzeļģeneratorus).

Pēckara gados līdztekus elektromašīnbūves attīstībai Latvijā plaši izvērsās zinātniskās pētniecības darbi elektrisko mašīnu jomā. Par šādu pētniecības centru kļuva Latvijas PSR Zinātņu Akadēmijas Enerģētikas un elektrotehnikas institūts (no 1966. g. Fizikāli enerģētiskais institūts). Šī institūta zinātnieki G. Šturmanis, V. Apsītis, V. Kucevalovs un citi devuši lielu ieguldījumu elektrisko mašīnu teorijā, kā arī jaunu speciālu elektrisko mašīnu radīšanā. Pamatojoties uz sarežģītas konfigurācijas magnētisko lauku teorētiskajiem un eksperimentālajiem pētījumiem, radīta bezkontakta maiņstrāvas mašīnu teorija mašīnām ar ķetnveida poliem un mašīnām ar masīvu rotoru. Izstrādātas oriģinālas bezkontakta elektrisko mašīnu konstrukcijas: mašīnas ar daudzkārtīgu magnētiskās plūsmas izmantošanu, induktormašīnas ar divzobu tinumiem, mašīnas ar kombinētu pastāvīgo magnētu un elektromagnētisko ierosmi, lineārās elektriskās mašīnas u. c. Izstrādāta mazjaudas bezkontakta sinhrono dzinēju sērija. Šīs sērijas dzinēji paredzēti galvenokārt naftas ieguves un metālapstrādes iekārtām. Eksploatācijā pārbaudīti un sākti ieviest ražošanā bezkontakta ģeneratori elektriskajai metināšanai. Fizikāli enerģētiskais institūts ir vadošais Padomju Savienībā jautājumos par bezkontakta elektriskajām mašīnām.

Liela loma specifisku elektrisko mašīnu — magnetohidrodinamisko mašīnu — radīšanā un teorijas izstrādāšanā ir Latvijas PSR Zinātņu Akadēmijas Fizikas institūta zinātniekiem. Seit 50. gados I. Kirko vadībā tika izstrādāti magnetohidrodinamisko ģeneratoru un elektromagnētisko sūkņu projektēšanas zinātniskie pamati. J. Lielpētera un J. Birzvalka vadībā izstrādāta elektromagnētisko indukcijas un kondukcijas tipa sūkņu teorija un aprēķināšanas metodika. Radītas oriģinālas iekārtas šķīdru metāla sūknēšanai un dozešanai. Pēdējā laikā Fizikas institūts pēta problēmas, kas saistītas ar jauna tipa elektrodzinēju — lineāro dzinēju — radīšanu.

Rīgas Politehniskajā institūtā J. Novika vadībā attīstās jauns virziens elektrisko mašīnu pētīšanā — elektromagnētisko lauku un procesu pētīšana ar ESM un šo procesu matemātisko modeļu izstrādāšana. Sāduš modeļus izmanto elektrisko mašīnu automatizētās projektēšanas sistēmās.

Tādējādi Padomju Latvija ieņem redzamu vietu Padomju Savienībā elektromašīnbūves nozarē, kā arī dod samērā lielu ieguldījumu elektrisko mašīnu teorijas attīstīšanā un jaunu, perspektīvu elektrisko mašīnu radīšanā.

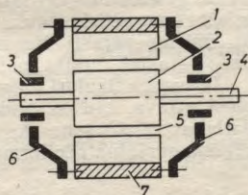


2. ELEKTRISKO MAŠĪNU KOPĪGI JAUTĀJUMI

2.1. VISPĀRĪGI NORĀDĪJUMI

Jebkuras elektriskās mašīnas galvenās sastāvdaļas ir *stators* un *rotors* (2.1. zīm.), kuri viens no otra atdalīti ar gaisa spraugu. Enerģijas pārveidošana elektriskajās mašīnās notiek ar magnētiskā lauka starpniecību, kura pastiprināšanai statorā un rotorā izmanto *magnētiskā materiāla serdes*. Lai ierobežotu virpuļstrāvas, mainīgu magnētisko lauku gadījumā serdes saliek no savstarpēji izolētiem elektrotehniskā tērauda skārdiem. Statora iekšējā un rotora ārējā virsmā izveidotās rievās ievietoti *tinumi*.

Enerģijas pārveidošana elektriskajās mašīnās ir saistīta ar enerģijas zudumiem. Tiem pārvērstoties siltumā, paugstinās elektriskās mašīnas atsevišķu daļu temperatūra. Visjutīgākie silšanas ziņā 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 sloģošanas 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. Sos 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 generatoru un transformatoru sekundārie spriegumi ir par 5...10% lielāki.



2.1. zīm. Elektriskās mašīnas uzbūves shēma:

1 — stators, 2 — rotors, 3 — gultņi, 4 — vārpsta, 5 — gaisa sprauga, 6 — gultņu vairogņi, 7 — korpuss.

2.2. ELEKTRISKO MAŠĪNU DARBĪBAS PRINCIPS

Visdažādāko elektrisko mašīnu darbības princips pamatojas uz elektromagnētiskās indukcijas parādību un elektromagnētisko spēku darbību.

Ja vads pārvietojas magnētiskajā laukā, tad saskaņā ar elektromagnētiskās indukcijas likumu vadā inducējas elektrodzinējspēks (EDS), kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma, bet tā skaitlisko vērtību aprēķina pēc formulas

$$e = Blv, \quad (2.1)$$

kur B — magnētiskā indukcija tajā telpas punktā, kur aplūkojamā laika momentā atrodas vads;

l — vada aktīvais garums;

v — vada kustības relatīvais ātrums attiecībā pret magnētisko lauku perpendikulāri magnētiskā lauka spēka līnijām.

Elektriskajās mašīnās vada relatīvo kustību attiecībā pret magnētisko lauku var panākt, griežot tinumu nekustīgā magnētiskajā laukā, griežot magnētisko lauku attiecībā pret nekustīgu tinumu vai griežot magnētisko lauku un tinumu ar dažādiem ātrumiem. Pirmo paņēmieni parasti izmanto līdzstrāvas, otro — sinhronajās, bet trešo — asinhronajās mašīnās.

Ja perpendikulāri magnētiskā lauka spēka līnijām novietotā vadā plūst strāva, tad uz vada darbojas elektromagnētisks spēks, kura darbības virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma, bet tā skaitlisko vērtību aprēķina pēc formulas

$$F = Bil, \quad (2.2)$$

kur i — strāva vadā.

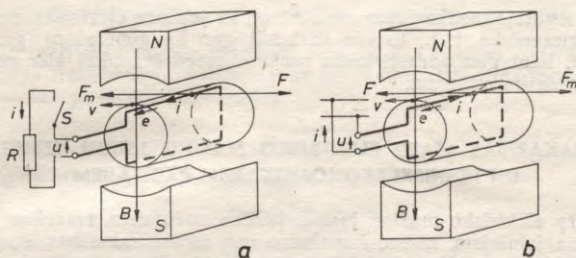
Transformatora tinuma vijumā inducēto EDS nosaka, izmantojot citu elektromagnētiskās indukcijas likuma formulējumu, saskaņā ar kuru

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.3)$$

kur Φ — vijuma kontūru caurtverošā magnētiskā plūsma.

Aplūkosim elektriskās mašīnas darbības principu, izmantojot vienkāršotu elektriskās mašīnas modeli, kas sastāv no statora poliēm N un S un rotora ar tinumu, kuru veido divi vadi (2.2. zīm.).

Elektriskajai mašīnai darbojoties ģenerators režīmā, rotors kopā ar tinumu rotoram pievadītā mehāniskā spēka F_m ietekmē rotē polu magnētiskajā laukā, un tinumā inducējas EDS e , kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma (2.2. zīm. a). Ja tinuma ķēde noslēgta ar slēdzi S , tajā plūst strāva i , kuras virziens sakrīt ar EDS virzienu. Strāvas un magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas bremsējošs elektromagnētiskais spēks F , kura darbības virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma. Ja rotoram pievadītais mehāniskais spēks vienāds ar ģenerators bremsējošo spēku, t. i., $F_m = F$, tad ģene-



2.2. zīm. Elektriskās mašīnas darbības princips ģeneratora (a) un dzinēja (b) režīmā.

rotora rotors griežas ar nemainīgu ātrumu. Pareizinot spēku līdzsvara vienādojuma abas puses ar ātrumu v , iegūstam

$$F_m v = F v. \quad (2.4)$$

Ievietojot šī vienādojuma labajā pusē F no izteiksmes (2.2) un $v = e/(Bl)$ no izteiksmes (2.1), kā arī ievērojot, ka pēc Oma likuma strāvas avotam $e = u + iR$, kur R — tinuma aktīvā pretestība, iegūstam

$$F_m v = ei = ui + i^2 R. \quad (2.5)$$

No šī vienādojuma redzams, ka ģeneratoram pievadītā mehāniskā jauda $F_m v$ pārveidojas elektriskajā jaudā ui un jaudas zudumos tinumā $i^2 R$.

Elektriskajai mašīnai darbojoties dzinēja režīmā, tās rotora tinumam pievadītais spriegums uztur tinumā strāvu i (2.2. zīm. b). Strāvas un magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskais spēks F , kas liek rotoram rotēt šī spēka darbības virzienā un līdzsvaro darbināmā mehānisma pretestības spēku F_m . Rotorā rotējot magnētiskajā laukā, tajā inducējas EDS e , kura virziens saskaņā ar labās rokas likumu ir pretējs strāvas i virzienam. Pēc Oma likuma patērētājam ar pretelektrodzinējspēku $u = e + iR$ vai arī

$$ui = ei + i^2 R = Fv + i^2 R. \quad (2.6)$$

Tātad dzinējam pievadītā elektriskā jauda ui pārveidojas mehāniskajā jaudā Fv un jaudas zudumos tinumā.

Bez elektriskajiem zudumiem tinumos elektriskajās mašīnās pastāv arī magnētiskie un mehāniskie zudumi.

Jaudu

$$P_{em} = ei \quad (2.7)$$

sauc par elektriskās mašīnas *elektromagnētisko* (jeb iekšējo) jaudu. Ja elektriskajā mašīnā nebūtu jaudas zudumu, tad elektromagnētiskā jauda būtu ģenerators atdotā vai dzinēja patērētā elektriskā jauda.

No iegūtajām sakarībām var secināt, ka jebkura elektriskā mašīna ir apgriezeniska, t. i., to var darbināt gan kā generatoru, gan kā dzinēju, kaut gan parasti katra mašīna paredzēta tikai vienam noteiktam darba režīmam.

2.3. SAKARĪBAS STARP ELEKTRISKO MAŠĪNU JAUDU, IZMĒRIEM UN TEHNISKI EKONOMISKAJIEM RĀDĪTĀJIEM

Starp elektrisko mašīnu jaudu, jaudas zudumiem, rotācijas frekvenci un izmēriem, masu, izmaksām var atrast sakarības, kas nosaka elektrisko mašīnu projektēšanas un izveidošanas pamatprincipus. Šo sakarību noskaidrošanai izmantosim iepriekš (sk. 2.2) aplūkoto elektriskās mašīnas vienkāršotu modeli.

Ja šādas mašīnas rotorā ir tinums, kas sastāv no vienas spoles ar ω vijumiem, tad saskaņā ar izteiksmi (2.1) šāda tinuma EDS

$$e = 2\omega B l v. \quad (2.8)$$

Lineārais ātrums

$$v = \pi D n, \quad (2.9)$$

kur D — rotora diametrs;
 n — rotora rotācijas frekvence.

Ievietojot v no izteiksmes (2.9) izteiksmē (2.8), iegūstam

$$e = 2\pi\omega D l B n \text{ jeb } e \sim \omega S_{mg} B n, \quad (2.10)$$

kur $S_{mg} = D l$ — lielums, kas proporcionāls mašīnas magnētiskās sistēmas šķērsriezuma laukumam.

Strāva mašīnas tinumā

$$i = j S_v, \quad (2.11)$$

kur j — strāvas blīvums;
 S_v — vada šķērsriezums.

Saskaņā ar izteiksmēm (2.7), (2.10) un (2.11) mašīnas elektromagnētiskā jauda

$$P_{em} = e i \sim \omega S_v S_{mg} j B n \sim S_e S_{mg} j B n, \quad (2.12)$$

kur $S_e = \omega S_v$ — vijumu kopējais šķērsriezums.

Laukumi S_e un S_{mg} ir proporcionāli jebkura lineārā izmēra L kvadrātam. Tāpēc $S_e S_{mg} \sim L^4$ un izteiksmes (2.12) vietā var rakstīt

$$P_{em} \sim L^4 j B n,$$

no kurienes

$$L \sim \sqrt[4]{\frac{P_{em}}{j B n}}. \quad (2.13)$$

Lielums $j B$ raksturo aktīvo (magnētisko un strāvu vadošo) materiālu elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi.

Analizējot izteiksmi (2.13), var izdarīt vairākus svarīgus secinājumus.

Geometriski līdzīgām mašīnām ar dažādām jaudām, bet vienādām rotācijas frekvencēm ($n = \text{const}$) un vienādām elektromagnētiskā noslogojuma pakāpēm ($jB = \text{const}$)

$$L \sim \sqrt[4]{P_{em}}. \quad (2.14)$$

Tā kā mašīnas aktīvo materiālu masa

$$m \sim L^3 \sim P_{em}^{3/4} \quad (2.15)$$

un jaudas zudumi ΔP , ja $jB = \text{const}$, savukārt ir proporcionāli mašīnas masai, tad

$$\Delta P \sim L^3 \sim P_{em}^{3/4}. \quad (2.16)$$

Arī mašīnas izmaksas C ir proporcionālas aktīvo materiālu masai, un tāpēc

$$C \sim P_{em}^{3/4}. \quad (2.17)$$

Tas nozīmē, ka, palielinoties elektriskās mašīnas jaudai, tās izmēri, masa, jaudas zudumi un izmaksas palielinās lēnāk. Tāpēc ekonomiski izdevīgāk izmantot lieljaudas mašīnas nekā lielāku skaitu mazākas jaudas mašīnas ar tādu pašu kopējo jaudu. Šeit jāievēro vēl arī tas, ka ar mašīnas apkalpošanu saistītie ekspluatācijas izdevumi ir proporcionāli apkalpojamo mašīnu skaitam.

Ja salīdzina ģeometriski līdzīgas mašīnas ar vienādu jaudu ($P_{em} = \text{const}$), tad no izteiksmes (2.13) var secināt, ka

$$L \sim \sqrt[4]{\frac{1}{n}}. \quad (2.18)$$

Tas nozīmē, ka ātrgaitas mašīnu izmēri un tātad arī masa un izmaksas ir mazāki nekā lēngaitas mašīnām ar tādu pašu jaudu. Maiņstrāvas mašīnās rotācijas frekvence ir proporcionāla maiņstrāvas frekvencei. Tāpēc tajos gadījumos, kad jāierobežo elektrisko mašīnu masa un izmēri (lidmašīnu, kuģu, kosmisko aparātu elektroiekārtās, rokas elektroinstrumentos u. tml.), lietderīgi izmantot paugstinātas frekvences, piemēram, 200 Hz vai 400 Hz maiņstrāvu.

No izteiksmes (2.13) vēl var secināt, ka vienādas jaudas un vienāda ātruma elektriskajām mašīnām ar lielāku elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi ir mazāki izmēri, masa un izmaksas. Tomēr, palielinot elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi, pieaug jaudas zudumi, kuri ir proporcionāli j^2 un B^2 . Tas nozīmē, ka mašīnām ar lielāku elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi ir gan mazākas izmaksas, bet ekspluatācijā tās ir mazāk ekonomiskas.

Saskaņā ar izteiksmi (2.16) elektriskās mašīnas jaudas zudumi ir proporcionāli L^3 . Mašīnas dzesējošā virsma ir proporcionāla L^2 . Tas nozīmē, ka lieljaudas mašīnām ir sliktāki dabiskās dzesēšanas apstākļi un tāpēc jāizmanto dažādi dzesēšanas intensifikācijas paņēmieni.

Jāatzīmē, ka aplūkotās sakarības raksturo galvenokārt atsevišķu lielumu kvalitatīvās attiecības. Projektējot un izgatavojot elektriskās mašīnas, šīs sakarības konstruktīvu, tehnoloģisku un citu apsvērumu dēļ precīzi ievērot nav iespējams.

2.4. ELEKTROMAŠĪNBŪVĒ IZMANTOJAMIE MATERIĀLI

2.4.1. Strāvu vadošie materiāli

Materiālus, ko izmanto elektromašīnbūvē, iedala aktīvajos, izolācijas un konstrukciju materiālos. Aktīvie materiāli ir strāvu vadošie un magnētiskie materiāli, un tos izmanto elektrisko mašīnu aktīvo daļu (tinumu un magnētisko seržu) izgatavošanai.

Visbiežāk elektrisko mašīnu tinumus izgatavo no vara, retāk no alumīnija. Strāvu vadošo materiālu elektriskās īpašības raksturo īpatnējā pretestība ρ , kuras atkarību no temperatūras nosaka pretestības temperatūras koeficients α . Varam īpatnējā pretestība 20°C temperatūrā $\rho_{20}=1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ un pretestības temperatūras koeficients $\alpha=4,08 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$, bet alumīnijam — $\rho_{20}=2,82 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, $\alpha=3,77 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$. Īpatnējo pretestību jebkurā temperatūrā θ aprēķina no izteiksmes

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha (\theta - 20)].$$

Atsevišķas elektrisko mašīnu strāvu vadošās daļas (kontaktdzēņus, spaiļes u. c.) izgatavo arī no dažādiem vara vai alumīnija sakausējumiem.

Slīdošo kontaktu starp elektrisko mašīnu rotējošām un nekustīgām daļām realizē ar sukām. Visbiežāk lieto sukas, kas presētas no ogles un grafīta maisījuma, retāk — no metāla (vara, bronzaš) pulvera un ogles maisījuma.

2.4.2. Magnētiskie materiāli

Elektrisko mašīnu magnētvalu izgatavošanai lieto elektrotehnisko lokšņu tēraudu, lietu tēraudu un samērā reti arī čugunu. Visvairāk izplatīti dažādu marku elektrotehniskie tēraudi.

Elektrotehniskais tērauds ir lokšņu materiāls, kas satur ne vairāk par 0,1 % oglekļa un līdz 5 % silīcija. Oglekli tēraudam pievieno, lai uzlabotu tā mehāniskās īpašības — cietību un mehānisko izturību. Silīcija piedeva samazina virpuļstrāvju un histerēzes zudumus, uzlabo tērauda magnētiskās īpašības, bet palielina tā trauslumu un līdz ar to apgrūtina mehānisko apstrādi (štancēšanu). Elektrotehnisko tēraudu velmē 0,05...1 mm biežās loksņēs vai lentēs. Elektriskajās mašīnās ar strāvas frekvenci līdz 100 Hz lieto 0,5 mm, retāk — 0,35 mm biezu tēraudu.

Elektrotehniskā tērauda struktūra un īpašības ir atkarīgas no velmēšanas metodes. Izšķir karstvelmēto un aukstvelmēto elektrotehnisko tēraudu. Aukstvelmētajam tēraudam ir anizotropas magnētisk-

kās īpašības. Loksnes garenvirzienā, kas sakrīt ar velmēšanas virzienu, magnētiskās īpašības šim tēraudam ir ievērojami labākas nekā karstvelmētam tēraudam, bet šķērsvirzienā — sliktākas. Karstvelmētā tērauda magnētiskās īpašības ir izotropas.

Aukstvelmēta elektrotehniskā tērauda izgatavošanas tehnoloģija ir sarežģītāka, tāpēc tas apmēram par 20% dārgāks nekā karstvelmētais tērauds. Tomēr aukstvelmēta tērauda lietošana ekonomiski ataisnojas, jo šī tērauda magnetizēšanai jāpatērē ievērojami mazāka jauda un iespējams iegūt lielāku indukciju nekā karstvelmētā tēraudā. Tāpēc var samazināt magnetizējošo vijumu skaitu tinumā un tādējādi samazināt ne tikai magnētiskos zudumus tēraudā, bet arī elektriskos zudumus tinumos. Lai pilnīgāk izmantotu aukstvelmētā tērauda priekšrocības, konstruktīvi jāpanāk, lai magnētiskās plūsmas virziens sakrītu ar velmēšanas virzienu. Tāpēc aukstvelmēto tēraudu ar anizotropām magnētiskajām īpašībām izdevīgi lietot transformatoru seržu un rotējošo mašīnu polu izgatavošanai. Ar speciālu tehnoloģiju var iegūt aukstvelmētu tēraudu ar praktiski izotropām magnētiskajām īpašībām, kuras ir labākas nekā karstvelmētam tēraudam.

Aukstās velmēšanas procesā uz lokšņu virsmām nerodas pietiekami bieza oksīda kārtiņa. Tāpēc, izgatavojot elektrisko mašīnu magnētiskās serdes, starp skārdiem izveido papildu izolāciju, visbiežāk elektroizolācijas lakas pārklājumu. Karstvelmēta tērauda serdēs papildu izolācija starp skārdiem parasti nav vajadzīga.

Elektrotehniskā tērauda sortimentu un tā magnētiskās īpašības reglamentē Valsts standarts ГOCT 21427.0—75.

2.4.3. Izolācijas materiāli

Elektrisko mašīnu izolācijai iespējami maksimāli jānodrošina šādas īpašības: elektriskā izturība, mehāniskā izturība, siltumizturība, siltumvadāmība, mitrumizturība.

Izšķir gāzveida, šķīdros un cietos izolācijas materiālus. Gāzveida izolācijas materiāli ir gaiss un ūdeņradis, kurus izmanto elektrisko mašīnu atsevišķo daļu dabiskai vai mākslīgai dzesēšanai un kuri vienlaikus izpilda arī elektriskās izolācijas funkcijas. Šķīdrie izolācijas materiāli ir speciālas šķirnes minerāleļļas, kuras lieto galvenokārt transformatoros.

Visvairāk elektriskajās mašīnās izmanto cietos izolācijas materiālus. Pie šādiem materiāliem pieder dabiskās šķiedrvielas (kokvilna, zīds), neorganiskie materiāli (vizla, stikla audums, azbests), dažādi sintētiskie materiāli, kā arī lakas un kompaundi. Pēdējā laikā arvien lielāku nozīmi iegūst sintētiskie izolācijas materiāli. Lakas un kompaundus lieto porainu, neblīvu izolācijas materiālu un to izstrādājumu piesūcināšanai, tādējādi palielinot izolācijas mitrumizturību, kā arī mehānisko un elektrisko izturību.

Viena no svarīgākajām izolācijas materiālu īpašībām ir siltumizturība, kas būtiski ietekmē elektriskās mašīnas darbības drošumu un darbmūžu. Siltumizturība ir izolācijas materiālu spēja ilgstoši

izturēt paaugstinātu temperatūru, materiālam nesabrūkot un praktiski saglabājot sākotnējās īpašības. Siltumizturību skaitliski raksturo ar maksimālo ilgstoši pieļaujamo darba temperatūru. Pēc siltumizturības izolācijas materiālus atbilstoši Valsts standartam GOCT 8865—70 iedala septiņās klasēs.

Siltumizturības klase	Y	A	E	B	F	H	C
Pieļaujamā temperatūra (°C)	90	105	120	130	155	180	>180

2.4.4. Konstrukciju materiāli

Konstrukciju materiāli ir tērauds, čuguns, krāsainie metāli un to sakausējumi, kā arī plastmasas. No tiem izgatavo korpusus, vārpstas, gultņu vairogus, dažādas stiprinājuma detaļas u. c.

2.5. ELEKTRISKO MAŠĪNU SILŠANA UN DZESĒŠANA

2.5.1. 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 dzesēšanas apstākļiem visās vietās.

Pieņemsim, ka laika vienībā mašīnā izdalās siltuma daudzums Q . Tad bezgalīgi mazā laika sprīdī dt izdalītais siltums ir $Q dt$. Daļa šī siltuma daudzuma uzkrājas mašīnā un palielina tās virstemperatūru, bet otra daļa tiek aizvadīta apkārtējā vidē. Ja laika sprīdī dt mašīnas virstemperatūra pieaug par $d\theta$, tad siltuma daudzums, kas uzkrājas mašīnā šajā laika sprīdī, ir $mCd\theta$, 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 $S\lambda\theta dt$, kur S — dzesējošās virsmas laukums un λ — siltuma atdeves koeficients.

Saskaņā ar enerģijas nezūdamības likumu

$$Qdt = mCd\theta + S\lambda\theta dt. \quad (2.19)$$

Pēc pietiekami ilga laika (teorētiski $t = \infty$) mašīnas virstemperatūra sasniedz nemainīgu stacionārā režīma vērtību $\theta = \theta_{\infty} = \text{const}$ un tāpēc $d\theta = 0$. Tad no vienādojuma (2.19) iegūstam

$$Qdt = S\lambda\theta_{\infty} dt,$$

no kurienes

$$\theta_{\infty} = \frac{Q}{S\lambda}. \quad (2.20)$$

No iegūtās izteiksmes redzams, ka stacionārā režīmā virstemperatūra ir atkarīga no izdalītā siltuma daudzuma un no siltuma atdeves apstākļiem.

Izdalot vienādojuma (2.19) abas puses ar lielumu $S\lambda$ un ievērojot izteiksmi (2.20), iegūstam diferenciālvienādojumu

$$\vartheta_{\infty} dt = T d\vartheta + \vartheta dt, \quad (2.21)$$

kur $T = mC/(S\lambda)$, vai, sadalot mainīgos,

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\vartheta}{\vartheta_{\infty} - \vartheta}. \quad (2.22)$$

Lielumam T ir laika dimensija, un to sauc par *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 (2.22), iegūstam

$$\frac{t}{T} = -\ln(\vartheta_{\infty} - \vartheta) + A. \quad (2.23)$$

Integrēšanas konstanti A atrod, izmantojot sākuma noteikumus: ja $t=0$, mašīnai ir noteikta sākuma virstemperatūra $\vartheta = \vartheta_0$. Ievērojot šos noteikumus, no vienādojuma (2.23) var atrast, ka

$$A = \ln(\vartheta_{\infty} - \vartheta_0).$$

Ievietojot atrasto A vērtību izteiksmē (2.23) un izdarot pārveidojumus, iegūstam

$$\ln \frac{\vartheta_{\infty} - \vartheta}{\vartheta_{\infty} - \vartheta_0} = -\frac{t}{T},$$

no kurienes

$$\vartheta = \vartheta_{\infty}(1 - e^{-t/T}) + \vartheta_0 e^{-t/T}. \quad (2.24)$$

2.5.2. Silšanas un atdzišanas raksturlieknes

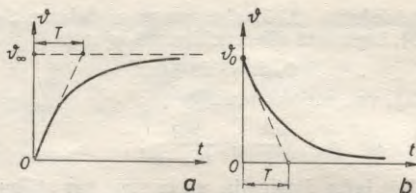
Ja mašīnas sākuma virstemperatūra $\vartheta_0 = 0$, tad saskaņā ar izteiksmi (2.24)

$$\vartheta = \vartheta_{\infty}(1 - e^{-t/T}). \quad (2.25)$$

Tas nozīmē, ka mašīnas virstemperatūra pieaug eksponenciāli, kā parādīts 2.3. zīmējumā *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 (2.3. zīm. *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, tā atdziest. Tad $\vartheta_0 \neq 0$, $Q = 0$ un saskaņā ar izteiksmi (2.20) $\vartheta_{\infty} = 0$. Ievietojot izteiksmē (2.24) $\vartheta_{\infty} = 0$, iegūstam mašīnas atdzišanas vienādojumu:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-t/T}. \quad (2.26)$$

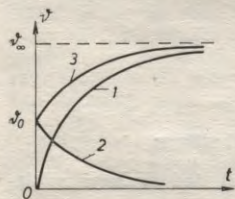


2.3. zim. Elektriskās mašīnas silšanas (a) un atdzišanas (b) raksturlieknes.

Atdzišanas 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 (2.26) mašīnas virstemperatūra samazinās eksponenciāli, kā attēlots 2.3. zīmējumā *b*. Sākumā, kad virstemperatūra un siltuma atdeve ir lielāka, atdzišana notiek strauji, bet pēc tam temperatūra samazinās lēnāk.

Stacionāru temperatūras režīmu ($\theta = \theta_{\infty}$ vai $\theta = 0$) mašīna teorētiski sasniedz bezgalīgi ilgā laikā. Tomēr praktiski var uzskatīt, ka silšanas vai atdzišanas process ir beidzies laikā $t \approx 4T$, jo šajā laikā mašīna sasilst līdz $\theta = 0,982\theta_{\infty}$ vai atdziest līdz $\theta = 0,018\theta_0$.



2.4. zim. Elektriskās mašīnas silšanas raksturliekne, ja $\theta_{\infty} \neq 0$ un $\theta_0 \neq 0$.

Vispārīgā gadījumā, kad $\theta_0 \neq 0$ un $\theta_{\infty} \neq 0$, mašīnas virstemperatūras izmaiņu raksturo izteiksme (2.24). Sakarības $\theta = f(t)$ grafiskais attēls šajā gadījumā ir līkne 3 (2.4. zīm.), kuru var iegūt, summējot līkņu 1 un 2 ordinātas, kas atbilst vienojumiem (2.25) un (2.26).

Jāatzīmē, ka silšanas process elektriskajās mašīnās ir sarežģītāks par šeit aplūkoto, jo īstenībā 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 kopumu, starp kuriem notiek siltumapmaiņa.

2.5.3. Elektrisko mašīnu silšana atkarībā no darba režīma

Elektriskās mašīnas darba temperatūra Θ ir atkarīga no virstemperatūras θ un no apkārtējās vides temperatūras Θ_0 :

$$\Theta = \Theta_0 + \theta, \quad (2.27)$$

pie tam no mašīnas slodzes atkarīga tikai virstemperatūra.

Jebkurā elektriskās mašīnas darba režīmā tās atsevišķo daļu darba temperatūra nedrīkst pārsniegt attiecīgajai izolācijas klasei pieļaujamo vērtību θ_{max} , t. i., $\theta \leq \theta_{max}$ vai, ievērojot izteiksmi (2.27),

$$\theta_{max} \leq \theta_{max} - \theta_0, \quad (2.28)$$

kur θ_{max} — mašīnas pieļaujamā virstemperatūra;

θ_0 — apkārtējās vides temperatūra, kuru saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 183—74 pieņem 40°C .

2.5. zīmējumā parādītas elektriskās mašīnas silšanas līknes dažāda lieluma ilgstošām slodzēm. Ikviena atdotās jaudas vērtība ($P_3 < P_2 = P_N < P_1$) saistīta ar tai atbilstošu jaudas zudumu vērtību un tātad ar citu stacionāro virstemperatūru θ_∞ .

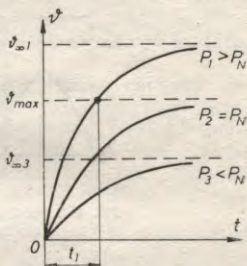
Darbojoties ar jaudu P_3 mašīna nav termiski apdraudēta, jo $\theta_{\infty 3} < \theta_{max}$, bet tā darbojas neekonomiski. Siltuma ziņā mašīna ir pilnīgi izmantota tikai tad, kad tā attīsta nominālo jaudu $P_N = P_2$, jo tad $\theta_\infty = \theta_{max}$. Tādējādi elektriskās mašīnas nominālā jauda P_N , kas dota tās pasē, ir vislielākā jauda, kādu mašīna var atdot, tās tinumu izolācijas temperatūrai nepārsniedzot ilgstoši pieļaujamo temperatūru, ja apkārtējās vides temperatūra ir 40°C . Mašīnu pārslogojot ($P_1 > P_N$), tinumu izolācija netiek termiski apdraudēta tikai tad, ja mašīnu slogo ar jaudu $P_1 > P_N$ īslaicīgi, t. i., laika sprīdi t_1 .

Ja apkārtējās vides temperatūra ir zemāka par 40°C , tad mašīnu var ilgstoši slogot virs nominālās jaudas P_N , bet, ja vides temperatūra ir augstāka par 40°C , tad ilgstošai slodzei jābūt mazākai par P_N .

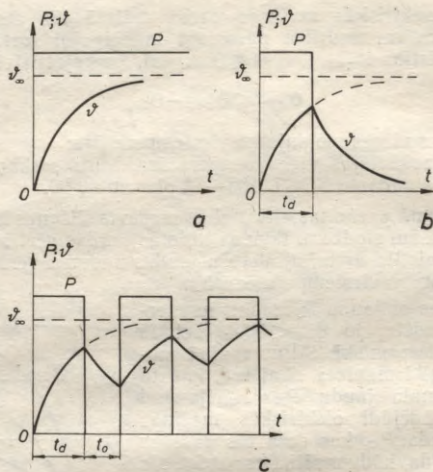
Elektrisko mašīnu darba režīmi ekspluatācijas apstākļos ir ļoti dažādi. Mašīnas var strādāt ilgstoši ar pilnu slodzi (piemēram, ģeneratori elektrostacijās, ventilatoru, sūkņu un konveijeru dzinēji), īslaicīgi (piemēram, celtnu dzinēji) vai arī ar periodiski atkārtotu slodzi (piemēram, metālgriešanas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

Lai vienkāršotu elektriskās mašīnas jaudas izvēli, vadoties no silšanas, visus patērētāju un atbilstoši elektrisko mašīnu darba režīmus iedala trīs raksturīgos režīmos: ilgstošā, īslaicīgā un atkārtoti īslaicīgā darba režīmā.

Ilgstošā darba režīmā mašīnas darbības periods ir tik liels, ka mašīna sasniedz stacionāro virstemperatūru $\theta = \theta_\infty = \text{const}$. Šajā režīmā mašīnas slodzes grafiks $P = f(t)$ ir abscisu asij paralēla taisne. Mašīnas virstemperatūras izmaiņu tad attēlo silšanas līkne 2.6. zīmējumā a.



2.5. zīm. Elektriskās mašīnas silšanas līknes dažādām ilgstošām slodzēm.



2.6. zīm. Elektrisko mašīnu raksturīgo darba režīmu slodzes grafiki un silšanas līknes.

Islaicīgā darba režīmā mašīna strādā relatīvi īsu laika sprīdi t_d , nesasniedzot stacionāro temperatūras režīmu, bet darba pārtraukuma laikā tā pagūst atdzist līdz apkārtējās vides temperatūrai. Šī režīma slodzes grafiks un virstemperatūras izmaiņas līkne parādīta 2.6. zīmējumā b.

Atkārtoti islaicīgā darba režīmā mašīna darba laikā t_d nesasniedz stacionāro temperatūru un pārtraukuma laikā t_o nepagūst atdzist līdz apkārtējās vides temperatūrai. Šī režīma slodzes grafiks un virstemperatūras izmaiņa parādīta 2.6. zīmējumā c.

Atkārtoti islaicīgu darba režīmu raksturo mašīnas relatīvais ieslēgšanas ilgums, ko apzīmē ar ΠB un izsaka procentos:

$$\Pi B = \frac{t_d}{t_d + t_o} 100 = \frac{t_d}{t_c} 100, \quad (2.29)$$

kur t_c — cikla ilgums.

Valsts standarts ГOCT 183—74 paredz izgatavot elektriskās mašīnas šādiem pamatrežīmiem: ilgstošam ar neierobežotu darba ilgumu (pieņemtais apzīmējums S1); islaicīgam ar 15, 30, 60 un 90 minūšu darba ilgumu (S2); atkārtoti islaicīgam ar ΠB 15, 25, 40 un 60% (S3). Var būt arī vēl dažādi atkārtoti islaicīgā režīma paveidi (S4, S5, S6, S7, S8). Režīma apzīmējums, kā arī nominālā jauda doti mašīnu katalogos un uzrakstu plāksnītē — tehniskajā pasē.

2.5.4. Elektrisko mašīnu dzesēšana

Elektrisko mašīnu konstruktīvais izveidojums. Lai mašīnas virs-temperatūra nepārsniegtu pieļaujamās robežas, tā ir jādzesē. Palie-linoties mašīnas jaudai, siltuma atdeves apstākļi pasliktinās (sk. 2.3.), un tāpēc, jo lielāka mašīnas jauda, jo intensīvākai jābūt dzesēšanai. Mašīnas dzesēšanas apstākļi savukārt ir atkarīgi no tās konstruktīvā izveidojuma.

Atkarībā no tā, kā elektriskā mašīna aizsargāta pret apkārtējās vides iedarbību, izšķir vaļējās, aizsargātās, slēgtās un sprādziendro-šās elektriskās mašīnas.

Vaļējām elektriskajām mašīnām nav nekādu speciālu aizsardzības ierīču, kuras novērstu iespēju pieskarties rotējošām un strāvu vadošām daļām. Pa ventilācijas caurumiem gultņu vairogos var iekļūt ne tikai putekļi un mitrums, bet arī sīkāki priekšmeti. Tādas mašīnas uzstāda tikai sausās telpās, kur nav putekļu.

Aizsargātajām elektriskajām mašīnām ventilācijas caurumi ap-valkā nosegti ar speciālām aizsardzības ierīcēm (režģiem, jumtiņiem, žalūzijām u. tml.), kuras aiztur sīkākus priekšmetus un novērš iespēju pieskarties rotējošām un strāvu vadošām daļām. Šī tipa šlakat-drošās mašīnas apvalka sānos izveidotos ventilācijas caurumus no augšas aizsedz pielējumi (jumtiņi). Tāpēc šādas mašīnas var uz-stādīt ne tikai slapjās telpās, bet arī ārpus telpām.

Slēgto elektrisko mašīnu apvalks pilnīgi slēgts, bez jebkādam ventilācijas spraugām. Tāpēc šajās mašīnās nevar iekļūt putekļi, bet tikai mitrums un gāzes. Pie slēgto mašīnu grupas pieder arī hermē-tiski slēgtas mašīnas, kuru apvalkiem ir speciāls blīvējums. Šādas mašīnas izmanto putekļainās un mitrās telpās vai telpās ar kodīgām gāzēm un tvaikiem.

Sprādziendrošo elektrisko mašīnu visiem savienojumiem ir pa-stiprināts blīvējums, tāpēc dzirkstele vai liesma no mašīnas iekšie-nes nevar nokļūt apkārtējā eksplozīvajā vidē. Šādas mašīnas izmanto sprādziembīstamās telpās (lakotavās, naftas pārstrādes ietaisēs, ogļ-raktuvēs u. tml.), un tās var strādāt arī ūdenī.

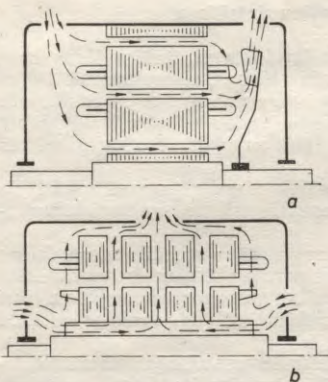
Elektrisko mašīnu ārējā aizsardzība pasliktina dzesēšanas ap-stākļus, tāpēc slēgtajām mašīnām tie ir sliktāki nekā aizsargātajām un vaļējām.

Elektrisko mašīnu dzesēšanas pamatveidi. Izšķir elektrisko mašīnu dzesēšanas trīs pamatveidus: *dabisko dzesēšanu* (mašīnai nav palīg-ierīču dzesēšanas pastiprināšanai), *pašventilāciju* (ventilācijas ierīce nostiprināta uz mašīnas rotējošām daļām) un *neatkarīgo dzesēšanu* (dzesējošo agentu mašīnai pievada no ārienes).

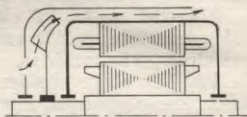
Dabiskā dzesēšana nav efektīva, tāpēc to lieto tikai mazjaudas mašīnās.

Ļoti bieži elektriskajās mašīnās lieto pašventilāciju. Tā var būt gan iekšēja, gan ārēja. *Iekšējās pašventilācijas* gadījumā gaiss plūst gar mašīnas iekšējām daļām aksiālā vai radiālā virzienā (2.7. zīm.).

Aksiālās ventilācijas sistēmā (2.7. zīm. a) ventilators nostiprināts uz mašīnas vārpstas. Caur gultņa vairoga spraugām iesūktais gaiss



2.7. zīm. Elektrisko mašīnu aksiālās (a) un radiālās (b) ventilācijas sistēma.



2.8. zīm. Elektriskās mašīnas ārējās pašventilācijas sistēma.

izplūst caur aksiāliem ventilācijas kanāliem un tiek izpūsts ventilatora pusē. Pretēja virziena gaisa plūsma nav vēlama, jo enerģijas zudumi ventilatorā sasilda gaisu par $3 \dots 7^\circ\text{C}$, tāpēc dzesēšanas efektivitāte samazinās. Aksiālā ventilācijas sistēma ir vienkārša, bet gaisa temperatūra un dzesēšanas apstākļi abos mašīnas galos ir dažādi. Šo sistēmu lieto vidējas jaudas un dažreiz arī mazjaudas mašīnās.

Radiālās ventilācijas sistēmā (2.7. zīm. b) gaiss plūst gar tinumu un pa serdē ierīkoti ventilācijas kanāliem radiālā virzienā. Dzesēšanas apstākļi šeit ir labāki, bet mašīnas aksiālie izmēri ir lielāki nekā mašīnām ar aksiālo ventilācijas sistēmu. Radiālo ventilāciju lieto lieljaudas un vidējas jaudas mašīnās.

Ārējo pašventilāciju lieto aizsargātajās elektriskajās mašīnās. Ventilators šeit pūš gaisu pa noslēgtu kanālu gar mašīnas ārējo virsmu (2.8. zīm.). Siltuma labākai novadišanai šādām mašīnām parasti ierīko arī iekšējo ventilāciju.

Lieljaudas mašīnās ventilācijas zudumi ir relatīvi lieli, tāpēc izdevīgāka ir neatkarīgā ventilācija. To izveido ar vaļēju vai slēgtu ventilācijas ciklu. Slēgta ventilācijas cikla gadījumā gaiss cirkulē no ventilatora uz dzesētāju un pēc tam uz mašīnu pa noslēgtu ceļu.

Ātrgaitas mašīnās ar jaudu virs 30 MW slēgtā ventilācijas sistēmā lieto intensīvāku dzesēšanas līdzekli — ūdeņradi, kura siltumvadītspēja un siltuma atdeves koeficients ir vairākkārt lielāki nekā gaisam. Tā kā ūdeņraža blīvums salīdzinājumā ar gaisa blīvumu ir mazāks, tad ievērojami samazinās arī ventilācijas zudumi.

Mašīnām ar jaudu virs 300 MW slēgtā ventilācijas sistēma ar ūdeņraža dzesēšanu nav pietiekami efektīva. Tāpēc šādās mašīnās tinumu izgatavo no dobiem vadiem, kurus dzesē no iekšpuses ar ūdeņradi vai ūdeni. Šādu sistēmu sauc par *tiešās dzesēšanas sistēmu*. Lietojot šādu sistēmu, var ievērojami palielināt strāvas blīvumu tinumā, tādējādi samazinot mašīnas izmērus un masu.

2.6. RELATĪVO VIENĪBU SISTĒMA

Elektrisko mašīnu teorijā ļoti bieži lieto relatīvo vienību sistēmu, kurā dažādus mašīnas lielumus (jaudu, strāvu, spriegumu, pretestības u. tml.) izsaka kā daļu no bāzes lielumiem. Par bāzes lielumiem parasti pieņem nominālos lielumus. Relatīvajās vienībās izteiktos lielumus apzīmē ar zvaigznīti (*). Relatīvajās vienībās izteikta elektriskās mašīnas strāva

$$I_* = \frac{I}{I_N}, \quad (2.30)$$

spriegums

$$U_* = \frac{U}{U_N}, \quad (2.31)$$

jauda

$$P_* = \frac{P}{P_N}. \quad (2.32)$$

Par bāzes pretestību relatīvo vienību sistēmā pieņem lielumu

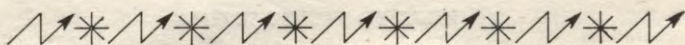
$$R_B = \frac{U_N}{I_N}, \quad (2.33)$$

kas generatoram skaitliski ir vienāda ar slodzes pretestību nominālā darba režīmā. Jebkura pretestība relatīvajās vienībās

$$R_* = \frac{R}{R_B} = R \frac{I_N}{U_N}. \quad (2.34)$$

Viegli pārlicināties, ka Oma, Kirhhofa un citi likumi to matemātiskās izteiksmes formās ir spēkā arī relatīvajās vienībās, piemēram, $I_* = U_*/R_*$ u. tml.

Lietojot relatīvās vienības, var uzskatāmāk spriest par atsevišķu lielumu vērtībām, nekā lietojot fizikālās vienības. Tā, piemēram, ja zināms, ka mašīnu slogo ar jaudu 10 kW, tad šāda informācija vēl nedod iespēju novērtēt mašīnas noslogojuma pakāpi. Ja šajā gadījumā mašīnas nominālā jauda ir 8 kW, tad mašīna ir pārslogota, bet, ja tās nominālā jauda ir 80 kW, tad mašīnas slodze ir niecīga. Tajā pašā laikā jauda, kas izteikta relatīvajās vienībās ($P_* = 1,25$ un $P_* = 0,125$), pavisam noteikti raksturo katras mašīnas noslogojuma pakāpi.



3. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS

3.1. VISPĀRĪGI NORĀDĪJUMI

Kaut gan elektrifikācija mūsu dienās bāzējas uz trīsfāzu maiņstrāvu, tomēr daudzās tautas saimniecības nozarēs sakarā ar tehnoloģisko procesu īpatnībām vai atsevišķām līdzstrāvas mašīnu priekšrocībām nepieciešams izmantot arī līdzstrāvas mašīnas.

Līdzstrāvas ģeneratorus izmanto elektromašīnu agregātos, automatizētās elektropiedziņas sistēmās, elektroķīmijā, sinhrono mašīnu ierosmes tinumu barošanai, elektrometināšanai, akumulatoru uzlādēšanai, automobiļu un traktoru elektroiekārtās u. tml.

Līdzstrāvas dzinēji darbina gandrīz visu elektrificēto transportu (trolejbusus, tramvajus, metro, elektrovilcienus), tos izmanto velmēšanas iekārtās, celtnos un vispār elektropiedziņā tur, kur rotācijas frekvence jāregulē plašākās robežās, nekā tas iespējams ar maiņstrāvas dzinējiem.

Speciālām vajadzībām izmanto arī dažādas līdzstrāvas mikromašīnas.

3.2. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS DARBĪBAS PRINCIPS

Līdzstrāvas mašīnas darbības principu var noskaidrot, izmantojot vienkāršotu elektriskās mašīnas modeli (sk. 2.2. zīm.). Šāds modelis tikai jāpapildina ar kolektoru, kas ir katras līdzstrāvas mašīnas raksturīga sastāvdaļa.

Visvienkāršākais kolektors sastāv no divām savstarpēji izolētām metāla plāksnītēm — pusgredzeniem, kuriem pievienoti kontūra (vijuma) divi gali. Kolektora virsmai pretējās pusēs piespiestas nekustīgas sukas A un B , kurām pievienots rezistors R (3.1. zīm.).

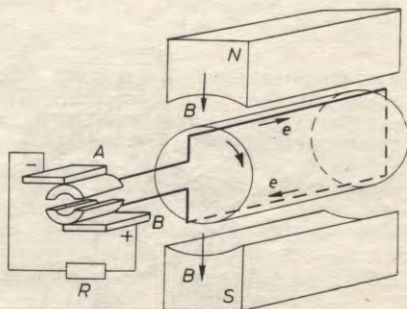
Ģeneratora režīmā līdzstrāvas mašīnas rotoru griež kāds primārais dzinējs. Kontūra vadi šķēļ polu magnētiskā lauka spēka līnijas, un tajos inducējas EDS, kura virzienu nosaka pēc labās rokas likuma. Kontūra vadiem pārvietojoties no viena pola zonas otra pola zonā, vijumā mainās EDS virziens. Sukas novietotas tā, ka momentā, kad vijumā EDS $e=0$, kolektora plāksnītes pārvietojas no vienas polaritātes sukās pie pretējas polaritātes sukās, jo kolektors rotē reizē ar rotoru. Tā rezultātā ārējā ķēde no kolektora sukām

saņem nemainīga virziena spriegumu un ārējā ķēdē plūst nemainīga virziena strāva.

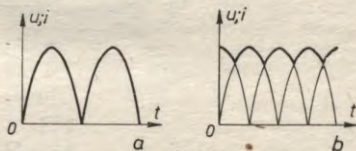
Tādējādi līdzstrāvas ģeneratorā kolektors darbojas kā mehānisks taisngriezis, kas rotora maiņstrāvu pārveido līdzstrāvā.

Taisngrieztajai strāvai un spriegumam uz sukām ir pulsējošs raksturs (3.2. zīm. a), un to vērtības mainās no nulles līdz maksimālajām. Tādas pulsācijas nelabvēlīgi ietekmē līdzstrāvas patērētāju darbību. Sprieguma un strāvas pulsācijas ievērojami samazinās, ja viena vijuma vietā rotorā novietoti divi savstarpēji perpendikulāri vijumi un kolektoram ir četras plāksnītes (3.2. zīm. b). Laj iegūtu praktiski nemainīgu spriegumu un strāvu, līdzstrāvas mašīnas izveido ar pietiekami lielu vijumu skaitu, kurus novieto vienmērīgi pa visu rotora aploci, un atbilstoši palielina arī kolektora plāksniņu skaitu. Tā, piemēram, divpolu mašīnai ar 16 plāksniņu kolektoru sprieguma pulsācijas uz sukām nepārsniedz 1%.

Dzinēja režīmā sukām A un B pievieno līdzspriegumu, kas rotora tinumā uztur strāvu. Strāvas un polu magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskie spēki (spēku darbības virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma), kuri griež rotoru šo spēku darbības virzienā. Lai spēku darbības virziens, tinuma vadiem pārejot pretējas polaritātes polu zonā, nemainītos, jāmaina arī strāvas virziens tinumā. Šo uzdevumu veic kolektors, kas līdzstrāvas dzinējā darbojas kā mehāniskais invertors, t. i., ierīce, kas ārējās ķēdes līdzstrāvu pārveido rotora tinuma maiņstrāvā.



3.1. zīm. Līdzstrāvas ģeneratora darbības princips.

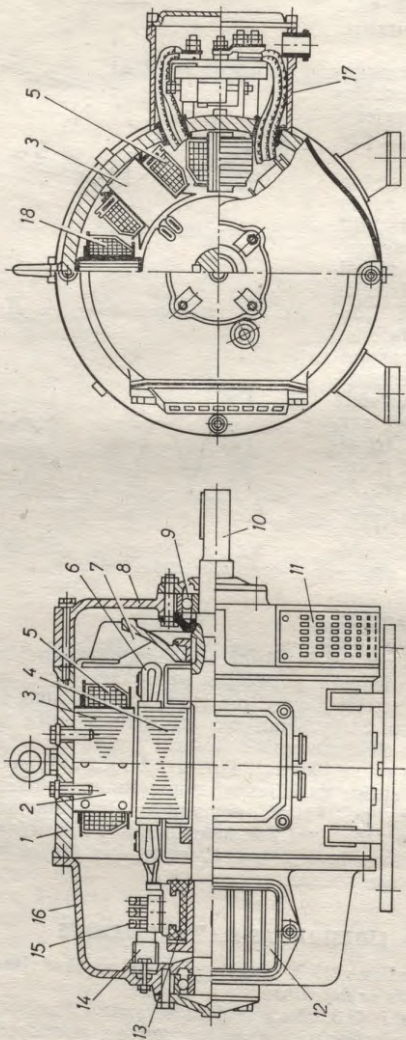


3.2. zīm. Taisngrieztā sprieguma un taisngrieztās strāvas pulsācijas uz kolektora sukām.

3.3. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS UZBŪVE

Līdzstrāvas mašīnas (3.3. zīm.) galvenās sastāvdaļas ir *statne* ar *poliem* un *enkurs* ar *kolektoru*.

Mašīnas statne I (3.3. zīm.) ir dobs tērauda cilindrs, kura iekšpusē ar skrūvēm piestiprināti *galvenie poli* un *papildpoli*. Statnes



3.3. zīm. Līdzstrāvas mašīnas uzbūve:

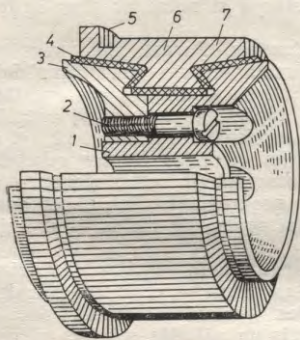
1 — statne, 2 — papildpola serde, 3 — galvenā pola serde, 4 — enkura serde, 5 — ierosmes tinuma spole, 6 — enkura tinums, 7 — ventilators, 8 — pakalējais gultņu vairogs, 9 — gultnis, 10 — vārpsta, 11 — ventilācijas režģis, 12 — skatlūkas vāks, 13 — kolektors, 14 — suku turētāja traversa, 15 — suku turētājs, 16 — suku turētājs, 17 — izvadu kārbā, 18 — papildpola tinums.

apakšdaļā ir ķepas, kuras izmanto mašīnas stiprināšanai pie pamatnes. Statnes galos piestiprināti gultņi vairogi 8 un 16, kuros iebūvēti gultņi.

Galvenie poli sastāv no serdes 3, uz kuras novietota no izolēta vara vada izgatavota spole 5. Visu galveno polu virknē saslēgtās spoles veido mašīnas *ierosmes tinumu*. Pola serdes rotora pusē izveidots paplašinājums — pola uzgalis (pola kurpe), kas nodrošina magnētiskās indukcijas vēlamo sadalījumu gaisa spraugā gar rotora aploci. Lai ierobežotu virpuļstrāvas, ko polos izraisa magnētiskās indukcijas pulsācijas galveno polu korpēs, polu serdes saliek no 0,5... 1 mm bieziem elektrotehniskā tērauda skārdiem. Mašīnas galveno polu uzdevums ir radīt mašīnas galveno magnētisko plūsmu.

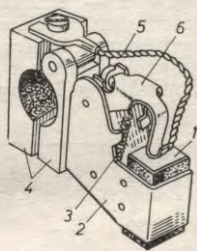
Starp galvenajiem poliēm novietoti papildpoli 2 (sīkāk par papildpolu nozīmi sk. 3.8.4.).

Līdzstrāvas mašīnas enkurs sastāv no serdes 4, tinuma 6 un kolektora 13. Enkura serdi saliek no štancētiem 0,5 mm bieziem elektrotehniskā tērauda skārdiem. To ārējā izštancētas rievas, bet iekšpusē — caurums vārpstai un ventilācijas caurumi. Enkura rievās ievietots izolēts enkura tinums 6, kas sastāv no atsevišķiem elementiem — *sekcijām*. Sekciju galī noteiktā kārtībā pievienoti kolektora plāksnītēm un savienoti savā starpā. Sekciju malas rievās nostiprinātas ar koka, getinaksa vai tekstolīta ķīļiem, vai arī enkura virsmas atsevišķi posmi notīti ar stieples bandāžu.



3.4. zīm. Kolektors:

1 — kolektora korpuss, 2 — savilcējskrūve, 3 — piespiedējgredzens, 4 — mīknanīta izolācija, 5 — izciļnis enkura tinuma pievienošanai, 6 — bezdelīgastes veidojums, 7 — kolektora plāksnīte.



3.5. zīm. Suku turētājs:

1 — sūka, 2 — suku turētāja aptvere, 3 — atspere, 4 — suku turētāja skava, 5 — lokans strāvas pievads, 6 — piespiedējplāksne.

Kolektors (3.4. zīm.) ir salikts no savstarpēji izolētām ķīļveida vara plāksnītēm 7. Katrai plāksnītei tās iekšējā daļā ir bezdelīgastes veidojums 6 plāksnītes nostiprināšanai, bet ārējā malā — izcilnis 5, pie kura pielodē enkura tinuma sekciju galus. Ar koniskiem piespiedējgredzeniem 3 kolektora plāksnītes piestiprina pie kolektora korpusa, izveidojot cilindriskas formas ķermeņi. Plāksnītes izolē no piespiedējgredzeniem un korpusa ar mikanīta starplikām (manšetēm) 4. Mazjaudas mašīnu kolektora plāksnītes kopā ar izolāciju iepresē plastmasā, tā ievērojami vienkāršojot kolektora izgatavošanas procesu.

Slidošo kontaktu starp mašīnas rotējošām un nekustīgajām daļām nodrošina *sukas*, kas nostiprinātas suku turētājos (3.5. zīm.). Suku turētāju ar skavu 4 nostiprina uz suku turētāja traversas pirksta, kas ar izolāciju atdalīts no traversas. Suku turētāja traversu nostiprina gultņu vairoga iekšpusē.

3.4. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU ENKURU TINUMI

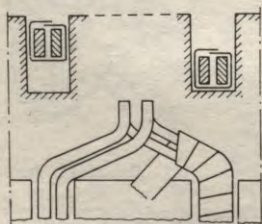
3.4.1. Pamatjēdzieni un tinumu izveidošanas princips

Enkura tinuma pamatelements ir sekcija, ko izgatavo no izolēta vara vada ar apaļu vai taisnstūrveida šķērsriezumu. Sekcija sastāv no viena vai vairākiem vijumiem. Sekcijas aktīvās malas ievietotas enkura rievās (3.6. zīm.) un savā starpā saistītas ar *frontālajiem savienojumiem*.

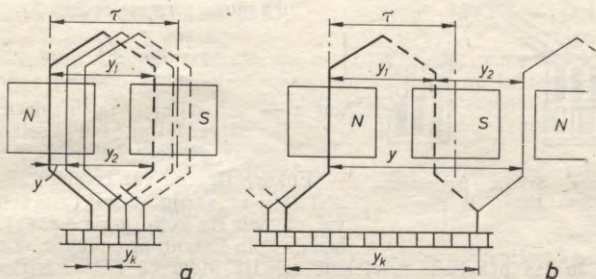
Izšķir *vienslāņa* un *divslāņu tinumus*. Parasti lieto divslāņu tinumu, kurā katras sekcijas viena mala atrodas rievās augšdaļā, bet otra — apakšdaļā (3.6. zīm.). Divslāņu tinumā arī frontālie savienojumi novietoti divos slāņos, tāpēc var samazināt frontālo savienojumu izmērus salīdzinājumā ar vienslāņa tinumu, kā arī izgatavot tinumu no vienāda izmēra un vienādas formas sekcijām. Tinuma shēmās augšējā slānī novietotās sekciju malas pieņemts attēlot ar nepārtrauktu līniju, bet apakšējā slānī novietotās malas — ar svītrlīniju.

Enkura tinuma sekcijas (3.7. zīm.) savienotas virknē — pie katras kolektora plāksnītes pielodēts vienas sekcijas beigu gals un nākošās sekcijas sākuma gals. Tādējādi enkura tinums veido noslēgtu kontūru. Tā kā katrai sekcijai ir divi gali un katrai kolektora plāksnītei arī pievienoti divu sekciju gali, tad kolektora plāksnišu skaits K ir vienāds ar sekciju skaitu S :

$$K = S. \quad (3.1)$$



3.6. zīm. Divslāņu tinuma sekciju novietojums enkura rievās.



3.7. zīm. Cilpas (a) un viļņa (b) tinumu izveidošanas princips.

Bez tam divslāņu tinumā katra rievā satur divu sekciju aktīvās malas un tāpēc

$$K = S = Z, \quad (3.2)$$

kur Z — enkura rievu skaits.

Atkarībā no tā, kādā kārtībā enkura tinuma sekcijas izvietotas rievās un sekciju gali pievienoti kolektora plāksnītēm, izšķir *cilpas* un *viļņa tinumu*. Atsevišķos gadījumos lieto arī *kombinēto tinumu*, kurā pēc noteiktas sistēmas apvienoti cilpas un viļņa tinumi. Cilpas un viļņa tinumu izveidošanas princips parādīts 3.7. zīmējumā.

Tinuma sekciju novietojumu rievās raksturo ar *tinuma soli*. Attālumu starp vienas sekcijas aktīvajām malām y_1 (3.7. zīm.) sauc par *tinuma pirmo soli*. Par *tinuma otro soli* y_2 sauc attālumu starp vienas sekcijas beigu malu un tai sekojošās sekcijas sākuma malu, bet par tinuma *rezultējošo soli* y — attālumu starp pirmās un tai sekojošās sekcijas sākuma malām. *Kolektora solis* y_k ir attālums starp sekcijas sākumu un beigām uz kolektora virsmas. Tinuma solus y_1 , y_2 un y mēra ar rievu skaitu, bet y_k — ar kolektora plāksnīšu skaitu.

Vienas sekcijas aktīvās malas jānovieto zem dažādas polaritātes poliēm, lai sekciju malās inducētais EDS darbotos pa kontūru vienā virzienā. Tāpēc attālumam starp sekcijas malām (y_1) jābūt aptuveni vienādam ar pola iedaļu. Par *pola iedaļu* τ sauc vienam polam atbilstošo enkura aploces garumu:

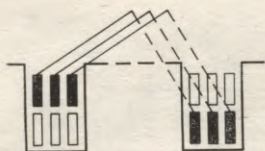
$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (3.3)$$

kur D — enkura diametrs;

p — mašīnas polu pāru skaits.

Pola iedaļu var izteikt arī ar rievu skaitu:

$$\tau = \frac{Z}{2p}. \quad (3.4)$$



3.8. zīm. Sekciju novietojums enkura rievās, ja $n_e=3$.

Tad tinuma pirmais solis

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon, \quad (3.5)$$

kur ϵ — korekcija, kas nepieciešama tāpēc, lai y_1 būtu vesels skaitlis, pie tam $0 \leq \epsilon < 1$.

Enkura tinumu var izveidot ar pilnu soli ($y_1 = \tau$), saīsinātu soli ($y_1 = \tau - \epsilon < \tau$) vai pagarinātu soli ($y_1 = \tau + \epsilon > \tau$). Visbiežāk lieto tinumu ar nedaudz saīsinātu soli, jo tas praktiski neietekmē sekcijā inducētā EDS vērtību, bet uzlabo komutācijas apstākļus (sk. 3.8.4.) un samazina vara patēriņu.

Starp tinuma soļiem pastāv šādas sakarības:

$$y = y_1 \mp y_2, \quad (3.6)$$

$$y = y_k, \quad (3.7)$$

kur mīnusa zīme attiecas uz cilpas tinumu, bet plusa zīme — uz viļņa tinumu.

Lai ierobežotu taisngrieztā sprieguma un strāvas pulsācijas, kā arī sprieguma vērtību starp blakus novietotām kolektora plāksnītēm, kolektora plāksnīšu skaitam (tātad arī sekciju un rievu skaitam) jābūt pietiekami lielam. Šis apstākļis apgrūtina enkura izgatavošanu, jo rievās iznāk mazas un relatīvi daudz vietas tajās aizņem izolācija. Tāpēc parasti katras rievas slānī blakus novieto vairākas sekciju malas (3.8. zīm.), kuras apvieno spolē ar kopīgu izolāciju pret rievu. Sajā gadījumā lieto *elementārās rievās* Z_e jēdzienu:

$$Z_e = n_e Z, \quad (3.8)$$

kur n_e — sekcijas aktīvo malu skaits vienā rievas slānī (sekciju skaits spolē).

Izteiksmes (3.2), (3.4), ..., (3.7) ir spēkā arī tinumam ar $n_e > 1$, ja šajās izteiksmēs rievu skaitu Z aizstāj ar elementāro rievu skaitu Z_e . Tad tinuma soļi y_1 , y_2 un y ir izteikti ar elementāro rievu skaitu.

3.4.2. Cilpas tinums

Izšķir vienkāršu un saliktu (vairākgājienu) cilpas tinumu.

Vienkāršs cilpas tinums. Sakarības (3.5), ..., (3.7) ir spēkā jebkuram tinumam, to skaitā arī vienkāršam cilpas tinumam. Bez tam vienkāršam cilpas tinumam

$$y = y_k = 1. \quad (3.9)$$

Noskaidrosim vienkārša cilpas tinuma izveidošanas principu, aplūkojot konkrētu piemēru. Pieņemsim, ka $2p=4$ un $S=K=Z=Z_e=14$.

Tad saskaņā ar izteiksmēm (3.5), ..., (3.7) un (3.9) $y_1 = (14/4) - (1/2) = 3$, $y = y_k = 1$, $y_2 = 2$.

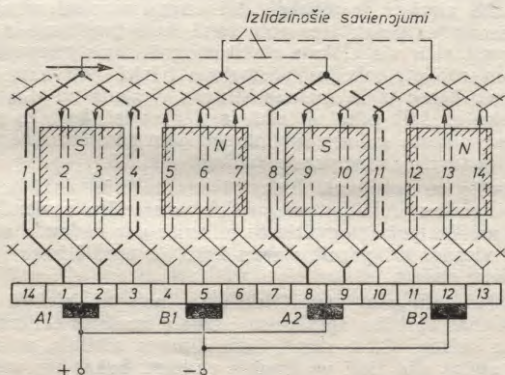
Uzzīmēsim tinuma izvērsto shēmu (3.9. zīm.), kurā kolektora plāksnītes un tām pievienotās sekcijas apzīmēsim ar kārtas numuriem 1, 2, 3 utt. Pie tam kolektora plāksnīti un tai pievienoto sekcijas sākuma malu, kā arī rievu, kurā novietota šī sekcijas mala, apzīmēsim ar vienu un to pašu kārtas numuru.

Tinumu sākam veidot no pirmās kolektora plāksnītes, pēc tam to ievietojam rievā 1. Lai noteiktu numuru rievai, kurā jāievieto sekcijas beigas, tās rievas numuram, kurā atrodas sekcijas sākums, jāpieskaita y_1 : $1 + 3 = 4$. Sekcijas beigas pievienojam kolektora plāksnītei 2, jo $y_k = 1$. Otrā sekciju sākam no otrās kolektora plāksnītes. Lai noteiktu numuru rievai, kurā jāievieto otrās sekcijas sākums, tās rievas numuram, kurā ievietots pirmās sekcijas sākums, jāpieskaita y : $1 + 1 = 2$. Tātad otrās sekcijas sākums atrodas rievā 2, bet beigas — rievā 5; jo $2 + y_1 = 2 + 3 = 5$. Turpmākā tinuma veidošana notiek pēc tāda paša principa. Tinuma veidošanu nobeidzam ar sekciju 14, kuras sākums atrodas rievā 14, bet beigas — rievā 3. Sekcijas beigas pievienojam kolektora plāksnītei 1, t. i., plāksnītei, no kuras sākām tinuma veidošanu.

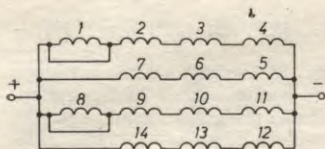
Tinuma izvērstajā shēmā parādīti arī poli un sekciju aktīvajās malās inducētā EDS virziens, kas noteikts pēc labās rokas likuma, pieņemot, ka poli novietoti virs tinuma un tinums pārvietojas pa labi.

Līniju uz enkura virsmas starp diviem dažādas polaritātes poliem sauc par *ģeometrisko neitrāli*, jo uz šīs līnijas magnētiskā indukcija $B = 0$.

Enkura rotējot, sukas tinuma atsevišķas sekcijas saslēdz īsi (3.9. zīm. sekcijas 1 un 8). Lai ierobežotu strāvu išslēgtajās sekcijās,



3.9. zīm. Vienkārša cilpas tinuma izvērstā shēma ($2p = 4$, $S = K = Z = Z_e = 14$, $y_1 = 3$, $y_2 = 2$, $y = y_k = 1$).



3.10. zīm. Vienkārša cilpas tinuma paralēlo zaru shēma.

nojumumi, tad sukas atrodas pret polu asīm (3.9. zīm.). Suku skaits ir vienāds ar polu skaitu.

Tinuma izvērstajai shēmai (3.9. zīm.) var uzzīmēt ekvivalentu shēmu (3.10. zīm.), kurā redzams, ka tinumā izveidojas četri paralēli zari. Vispārīgā gadījumā vienkārša cilpas tinuma paralēlo zaru skaits ir vienāds ar polu skaitu:

$$| \quad 2a = 2p, \quad (3.10)$$

kur a — paralēlo zaru pāru skaits.

Ja līdzstrāvas mašina darbojas generatora režīmā, tad EDS virzieni sakrīt ar strāvu virzieniem. Kopējā enkura strāva I_a aplūkotajā gadījumā sadalās pa četriem paralēliem zariem. Vispārīgā gadījumā enkura paralēlā zara strāva

$$| \quad i_a = \frac{I_a}{2a}. \quad (3.11)$$

No 3.9. zīmējuma var secināt, ka, sukas novietojot uz geometriskās neitrāles, paralēlā zara EDS ir vislielākais, jo paralēlā zara visās sekcijās EDS virzieni ir vienādi. Arī strāvu virzieni visos vados, kas atrodas vienas polaritātes polu zonā, šajā gadījumā ir vienādi, un tāpēc mašīnai ir vislielākais elektromagnētiskais moments.

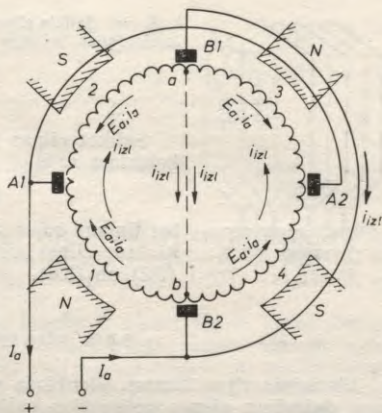
Enkuram rotējot, sekcijas pārmaiņus pāriet no viena paralēlā zara otrā, un tāpēc tajās mainās strāvas virzieni no $+i_a$ uz $-i_a$, pie tam sekcijas šajā pārejas laikā ir slēgtas īsi. Visu to parādību kopumu, kuras noris, enkura tinuma sekcijām pārslēdzoties no viena paralēlā zara uz citu, sauc par *komutāciju* (sk. 3.8.).

Izlīdzinošie savienojumi. Līdzstrāvas mašīnās dažādu iemeslu dēļ (tehnoloģiskas pielaides, magnētisko materiālu neviendabīgums u. tml.) atsevišķu polu magnētiskās plūsmas var nedaudz atšķirties. Tāpēc nav vienādi arī paralēlo zaru EDS, jo paralēlie zari atrodas zem dažādiem poliemi.

Lai noskaidrotu polu magnētiskās nesimetrijas ietekmi uz līdzstrāvas mašīnas darbību, aplūkosim četrpolu mašīnas enkura tinuma vienkāršotu shēmu (3.11. zīm.), kurā tinums attēlots ar noslēgtu spirāli un sukas slīd tieši pa tinuma vadiem. Sukas un savienotāji sadala tinumu četros paralēlos zaros, pie tam suku skaits vienāds ar paralēlo zaru skaitu.

tajās inducētajiem EDS jābūt minimāliem. Tas iespējams, ja īsslēgtās sekcijas malas atrodas uz geometriskās neitrāles vai tuvu šai neitrālei. Tāpēc sukas novieto tā, lai īsslēguma perioda vidū īsslēgto sekciju malas atrastos simetriski attiecībā pret polu asi. Šādu suku stāvokli sauc par suku novietojumu uz geometriskās neitrāles. Ja sekcijām ir simetriski frontālie savienojumi, tad sukas atrodas pret polu asīm (3.9. zīm.). Suku skaits ir vienāds ar polu skaitu.

Pieņemsim, ka apakšējo paralēlo zaru EDS ir lielāks nekā augšējo paralēlo zaru EDS. Tad tinuma kontūrā plūst izlīdzinošās strāvas i_{izl} , kuras noslēdzas caur sukām un savienotājvadiem. Tā kā tinuma kontūru iekšējās pretestības ir mazas, tad izlīdzinošās strāvas pat tukšgaitas režīmā ($I_a=0, i_a=0$) var būt ļoti lielas. Slogotā mašīnā slodzes strāvas caur sukām ($2i_a$) algebriski summējas ar izlīdzinošajām strāvām ($2i_{izl}$). Tas izraisa suku nevienmērīgu noslodzi, kā rezultātā sūka $B2$ salīdzinājumā ar sūku $B1$ ir pārslogota.



3.11. zim. Tinuma vienkāršota shēma.

Lai novērstu suku pārslodzi, ko rada izlīdzinošās strāvas, tinumam izveido iz-

līdzinošos savienojumus. Izlīdzinošie savienojumi tinuma iekšienē savieno punktus, kuru potenciāliem teorētiski jābūt vienādiem. 3.11. zīmējumā parādīts viens no izlīdzinošajiem savienojumiem, kas savieno punktus a un b . Tā kā suku kontaktpretestības ir daudzkārt lielākas par izlīdzinošā savienojuma pretestību, tad izlīdzinošās strāvas noslēdzas galvenokārt pa izlīdzinošā savienojuma vadu, bet nevis caur suku kontaktiem.

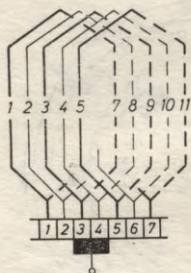
Izlīdzinošos savienojumus izveido vai nu kolektora pusē (savienojot vienāda potenciāla kolektora plāksnītes), vai arī pretējā pusē (savienojot frontālo savienojumu vienādu potenciālu punktus), kā tas parādīts 3.9. zīmējumā.

Lai maksimāli uzlabotu mašīnas darba apstākļus, vēlams izveidot izlīdzinošo savienojumu vislielāko iespējamo skaitu, t. i., K/p . Tomēr tas palielina mašīnas izmaksas, un tāpēc izlīdzinošo savienojumu maksimālo skaitu izveido tikai lieljaudas mašīnās, bet mazjaudas un vidējās jaudas mašīnās to izvēlas 3...6 reizes mazāku.

Salikts cilpas tinums. Salikts cilpas tinums sastāv no vairākiem ($2, 3, \dots, m$) vienkāršiem cilpas tinumiem. Atsevišķu vienkāršo cilpas tinumu sekcijas novietotas blakus rievās un pievienotas pie kolektora blakus plāksnītēm. Suku platumam jābūt tādā, lai katra suku pārklātu vismaz m kolektora plāksnītes. Tādējādi atsevišķie vienkāršie cilpas tinumi ar sukām tiek saslēgti paralēli un salikta cilpas tinuma paralēlo zaru skaits

$$2a = 2pm. \quad (3.12)$$

Salikta cilpas tinuma ar $m=2$ izveidošanas princips parādīts 3.12. zīmējumā.



3.12. zīm. Salikta cilpas tinuma izveidošanas princips ($m=2$).

Salikta cilpas tinuma rezultējošais solis un kolektora solis

$$y = y_k = m, \quad (3.13)$$

bet tinuma soļus y_1 un y_2 nosaka tāpat kā vienkāršam cilpas tinumam, t. i., no izteiksmēm (3.5) un (3.6).

3.4.3. Viļņa tinums

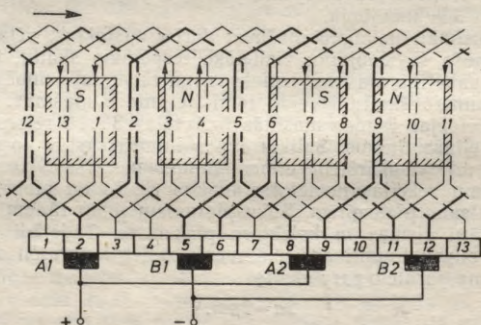
Vienkāršs viļņa tinums. Vienkārša viļņa tinuma sekcijas atrodas zem dažādiem vienas polaritātes poliēm (sk. 3.7. zīm. b). Apejot vienu reizi enkura aploci, t. i., p virknē slēgtas sekcijas, jānonāk pie kolektora plāksnītes, kas atrodas pa kreisi no izejas plāksnītes. To panāk, ja tiek ievērots nosacījums

$$py_k = K - 1,$$

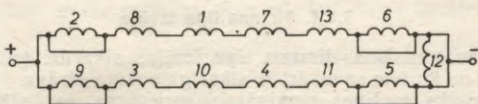
no kurienes vienkārša viļņa tinuma kolektora solis y_k :

$$y_k = \frac{K-1}{p}. \quad (3.14)$$

Tinuma soļus y_1 , y_2 un y aprēķina no izteiksmēm (3.5), ..., (3.7), t. i., tāpat kā vienkāršam cilpas tinumam, pie tam $y_1 \approx y_2 \approx \tau$ un $y \approx 2\tau$.



3.13. zīm. Vienkārša viļņa tinuma izvērsta shēma ($2p=4$, $S=K=Z=Z_e=13$, $y_1=3$, $y_2=3$, $y=y_k=6$).



3.14. zīm. Vienkārša viļņa tinuma paralēlo zaru shēma.

Lai noskaidrotu vienkārša viļņa tinuma izveidošanas principu, aplūkosim piemēru. Pieņemsim, ka $2p=4$ un $S=K=Z=Z_e=13$. Tad saskaņā ar izteiksmēm (3.5), ..., (3.7) $y_1=(13/4)-(1/4)=3$, $y=y_k=(13-1)/2=6$, $y_2=6-3=3$.

Tinumu sākam veidot no kolektora plāksnītes 1, kurai pievieno pirmās sekcijas sākumu (3.13. zīm.). Pirmās sekcijas sākumu ievieto rievā 1, bet tās beigas — rievā 4 ($1+y_1=1+3=4$) un sekcijas beigas pieslēdz kolektora plāksnītei 7 ($1+y_k=1+6=7$). Nākošās sekcijas sākumu ievieto rievā 7 ($1+y=1+6=7$), bet beigas — rievā 10 utt. Tinuma veidošana ir pabeigta tad, kad aizpildītas visas rievās.

Tāpat kā cilpas tinumā, arī šajā gadījumā suku jānovieto uz geometriskās neitrāles, t. i., pret polu asīm. Shēmā parādītajā enkura stāvoklī sekcijas 2, 5, 6, 9 un 12 ir slēgtas īsi ar vadiem, kas savieno vienādas polaritātes suku.

No vienkāršotas tinuma shēmas, kas attēlota 3.14. zīmējumā, redzams, ka tinumā izveidojas divi paralēli zari. Vispārīgā gadījumā neatkarīgi no polu skaita vienkāršam viļņa tinumam vienmēr

$$2a=2. \quad (3.15)$$

Uz kolektora novietoto suku skaitam jābūt vienādam ar paralēlo zaru skaitu. Tāpēc aplūkotajā piemērā varētu būt tikai divas suku. Tomēr parasti mašīnā suku skaitu izvēlas vienādu ar polu skaitu, tā panākot caur katru suku mazāku strāvu un radot iespēju samazināt kolektora izmērus.

Vienkārša viļņa tinuma katrs paralēlais zars satur sekcijas, kas atrodas zem visiem mašīnas poliem. Tāpēc, ja atsevišķu polu magnētiskās plūsmas ir dažādas, paralēlo zaru EDS tomēr ir vienādi un vienkāršam viļņa tinumam izlīdzinošie savienojumi nav vajadzīgi.

Salikts viļņa tinums. Salikts viļņa tinums sastāv no m vienkāršiem viļņa tinumiem, kuri ar sukām slēgti paralēli. Tāpēc šāda tinuma paralēlo zaru skaits

$$2a=2m. \quad (3.16)$$

Rezultējošo soli y un kolektora soli y_k saliktam viļņa tinumam aprēķina pēc formulas

$$y=y_k=\frac{K-m}{p}, \quad (3.17)$$

bet tinuma soļus y_1 un y_2 nosaka tāpat kā vienkāršam viļņa tinumam.

3.4.4. Tinuma tipa izvēle

Līdzstrāvas mašīnas tinuma tipu izvēlas atkarībā no sprieguma un jaudas, no kuriem savukārt ir atkarīga enkura strāva.

Jo augstāks mašīnas nominālais spriegums, jo lielākam jābūt paralēlā zara aktīvo vadu skaitam. Savukārt, jo lielāka nominālā strāva, jo lielākam jābūt paralēlo zaru skaitam, lai ierobežotu strāvu katrā paralēlā zarā (vēlams, lai paralēlā zara strāva nepārsniegtu 300...350 A).

Paralēlo zaru vislielāko skaitu var iegūt saliktā cilpas tinumā ($2a=2pm$), bet vismazāko — vienkāršā viļņa tinumā ($2a=2$), pie tam viļņa tinums nodrošina lielāku aktīvo vadu skaitu nekā cilpas tinums.

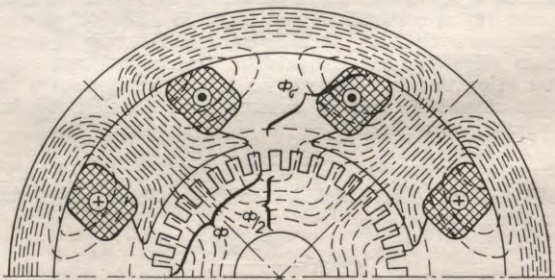
Vadoties no minētajiem apsvērumiem un praktiskās pieredzes, līdzstrāvas mašīnās atkarībā no nominālā sprieguma U_N un nominālās jaudas P_N izvēlas šāda tipa enkura tinumus: vienkāršu viļņa tinumu, ja $P_N < 50$ kW, $U_N = 110 \dots 230$ V un $P_N = 50 \dots 500$ kW, $U_N > 440$ V; saliktu viļņa tinumu, ja $P_N = 50 \dots 500$ kW, $U_N = 440 \dots 600$ V; vienkāršu cilpas tinumu, ja $P_N = 50 \dots 500$ kW, $U_N = 110 \dots 230$ V un $P_N > 500$ kW, $U_N = 440 \dots 600$ V; saliktu cilpas tinumu, ja $P_N < 500$ kW, $U_N < 24$ V un $P_N > 500$ kW, $U_N < 230$ V.

Tinuma tipa izvēle ir atkarīga arī no citiem parametriem (polu skaita, rotācijas frekvences u. tml.).

3.5. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS MAGNĒTISKAIS LAUKS

3.5.1. Magnētiskais lauks tukšgaitā

Tukšgaitas režīmā, kad $I_a = 0$, magnētisko plūsmu mašīnā rada tikai ierosmes tinuma magnetizējošais spēks (MS). Magnētiskā plūsma noslēdzas pa atsevišķiem magnētiskās sistēmas elementiem



3.15. zim. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskā lauka aina tukšgaitā.

(statni, poliem, gaisa spraugu, enkuru), kuri veido mašīnas magnētisko ķēdi.

3.15. zīmējumā parādīta četrpolu mašīnas magnētiskā lauka aina tukšgaitā.

Ierosmes tinuma strāva rada galveno magnētisko plūsmu Φ , kas saķēdēta ar enkura tinumu, un, enkuram rotējot, inducē tā tinumā EDS. Bez galvenās plūsmas pastāv arī izkliedes plūsma Φ_{σ} , kas noslēdzas starp poliem un enerģijas pārveidošanas procesā nepiedalās. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskā sistēma jāizveido tā, lai izkliedes plūsma, kas papildus noslogo magnētisko ķēdi un palielina lietderīgās plūsmas Φ radišanai nepieciešamo ierosmes tinuma MS, būtu iespējami maza.

3.5.2. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskās ķēdes aprēķins

Magnētiskās ķēdes aprēķina pamatzdevums ir noteikt ierosmes tinuma MS, kas nodrošina mašīnā vajadzīgo magnētisko plūsmu. Magnētisko ķēdi aprēķina, izmantojot pilnās strāvas likumu:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma I, \quad (3.18)$$

kur \vec{H} — magnētiskā lauka intensitātes vektors;

$d\vec{l}$ — integrēšanas kontūra bezgalīgi mazs elements;

ΣI — integrēšanas kontūra ietvertā pilnā strāva.

Par integrēšanas kontūru var izvēlēties vidējo magnētisko spēka līniju. Tā kā magnētiskās spēka līnijas katrā punktā vektoru \vec{H} un $d\vec{l}$ virzieni sakrīt, tad izteiksmes (3.18) vietā var rakstīt

$$\oint H dl = \Sigma I. \quad (3.19)$$

Integrāli (3.19) precīzi aprēķināt ir samērā grūti. Tāpēc praktiskos aprēķinos magnētisko ķēdi sadala atsevišķos posmos, kuru robežās var pieņemt, ka magnētiskā lauka intensitāte H ir nemainīga. Šādi posmi ir gaisa sprauga, enkura zobu slānis, enkura jūgs, poli un statora jūgs. Tad integrāli (3.19) var aizstāt ar summu:

$$2H_{\delta}\delta + 2H_z h_z + 2H_a L_a + 2H_m h_m + 2H_s L_s = 2\omega_f I_f, \quad (3.20)$$

kur δ , h_z , L_a , h_m , L_s — ģeometriskie izmēri (3.16. zīm.), kas atbilst vidējās magnētiskās spēka līnijas atsevišķo posmu garumiem;

H_{δ} , H_z , H_a , H_m , H_s — magnētiskā lauka intensitāte šajos posmos;

ω_f — ierosmes tinuma vijumu skaits uz vienu polu;

I_f — ierosmes strāva.

Vienādojuma (3.20) kreisajā pusē ir magnētiskās ķēdes atsevišķo posmu magnetizējošie spēki, bet labajā pusē — kopējais ķēdes magnetizējošais spēks uz polu pāri:

$$2F_{\delta} + 2F_z + 2F_a + 2F_m + 2F_s = 2F_f. \quad (3.21)$$

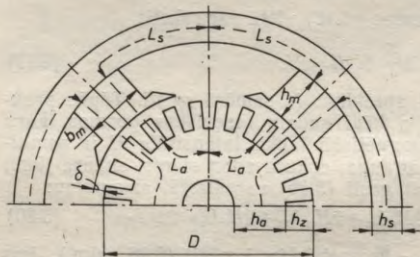
Magnētiskās ķēdes aprēķina secība ir šāda. Zinot enkura tinuma EDS vērtību, vispirms nosaka magnētisko plūsmu, kas nepieciešama šī EDS radīšanai, un magnētisko indukciju gaisa spraugā B . Pēc tam aprēķina indukciju atsevišķos magnētiskās ķēdes posmos, no materiālu magnetizēšanas liknēm $B=f(H)$ atrod šai indukcijai atbilstošās intensitātes H vērtību un aprēķina katra posma MS. Tā kā mašīnas magnētiskā sistēma ir simetriska (3.16. zīm.), tad parasti aprēķina viena pola MS, t. i., pusi no summas izteiksmēs (3.20) un (3.21).

Aplūkosim sīkāk magnētiskās ķēdes atsevišķu posmu MS aprēķinu.

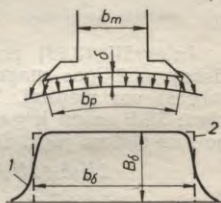
Gaisa spraugas MS. Ja gaisa sprauga starp enkuru un polu ir nemainīga (enkurā nav rievu), tad indukcijas sadalījumu gar enkura aploci pola iedaļas τ robežās raksturo likne 1 (3.17. zīm.). Aprēķinot gaisa spraugas MS, šo likni aizvieto ar taisnstūri 2, kura platums ir b_{δ} , bet augstums vienāds ar indukcijas vērtību zem pola centra (B_{δ}). Taisnstūra platums b_{δ} jāizvēlas tā, lai magnētiskā plūsma, kas proporcionāla līknes 1 un taisnstūra 2 ietvertajiem laukumiem, būtu nemainīga. Lielumu b_{δ} sauc par *pola loka ekvivalento platumu* un to aprēķina no sakarības

$$b_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau, \quad (3.22)$$

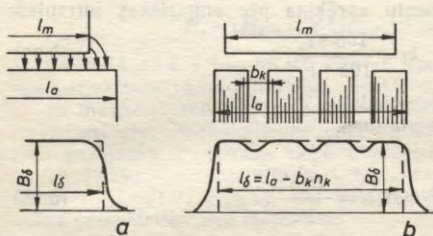
kur α_{δ} — ekvivalentais pola pārklājuma koeficients. Mašīnās ar papildpoliem $\alpha_{\delta} = 0,6 \dots 0,75$, bez papildpoliem — $\alpha_{\delta} = 0,7 \dots 0,85$.



3.16. zīm. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskā ķēde: δ — gaisa sprauga, h_z — enkura zobu slāņa augstums, h_m — pola augstums, h_s — statora jūga augstums, h_a — enkura jūga augstums, b_m — pola platums, L_s — magnētiskās spēka līnijas vidējais garums statora jūgā, L_a — magnētiskās spēka līnijas vidējais garums enkura jūgā, D — enkura diametrs.

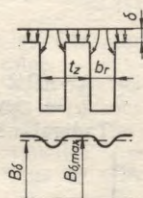


3.17. zīm. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā, ja gaisa sprauga ir vienmērīga.



3.18. zīm. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā aksiālā virzienā:

a — enkura izvirsītājā daļā, *b* — enkuram ar radiāliem ventilācijas kanāliem.



3.19. zīm. Magnētiskais lauks gaisa spraugā mašīnai ar riervotu enkuru.

Arī aksiālā virzienā magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā nav vienmērīgs. Parasti enkura garumu l_a izvēlas par 5...10 mm lielāku nekā polu garumu l_m . Tāpēc enkura izvirsītājā daļā magnētiskā indukcija ir mazāka (3.18. zīm. *a*). Bez tam enkurā var būt izveidoti radiāli ventilācijas kanāli (sk. 2.5.4.), kuri rada nevienmērīgu indukcijas sadalījumu arī enkura vidusdaļā (3.18. zīm. *b*). Tāpēc aprēķinos lieto *enkura ekvivalento garumu* l_δ , ko iegūst, ja faktiskās indukcijas sadalījuma līknes ietverto laukumu aizvieto ar vienāda lieluma taisnstūra laukumu, kura augstums ir B_δ . Mašīnai bez radiāliem kanāliem

$$l_\delta \approx (l_a + l_m)/2, \quad (3.23)$$

bet mašīnai ar radiāliem kanāliem

$$l_\delta \approx l_a - n_k b_k / 2, \quad (3.24)$$

kur n_k — radiālo kanālu skaits;

b_k — kanālu platums.

Ja zināmas b_δ un l_δ vērtības, var noteikt magnētisko indukciju gaisa spraugā:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{b_\delta l_\delta}. \quad (3.25)$$

Aprēķinot gaisa spraugas MS, jāievēro arī riervu ietekme, kuru dēļ magnētiskās spēka līnijas vidējais garums gaisa spraugā ir lielāks nekā δ , jo atsevišķas spēka līnijas daļēji noslēdzas caur riervu (3.19. zīm.). Gaisa spraugas MS aprēķinā šajā gadījumā lieto *ekvivalento gaisa spraugu* δ' :

$$\delta' = k_\delta \delta, \quad (3.26)$$

kur k_δ — gaisa spraugas koeficients.

Gaisa spraugas koeficientu aprēķina pēc empīriskas formulas:

$$k_{\delta} = \frac{10\delta + t_z}{10\delta + b_r}, \quad (3.27)$$

kur $t_z = \pi D/Z$ — enkura zoba iedaļa;
 b_r — rievas atvēruma platums.

Tad gaisa spraugas MS

$$F_{\delta} = H_{\delta} \delta' = \frac{B_{\delta} \delta'}{\mu_0}. \quad (3.28)$$

Līdzstrāvas mašīnās parasti $\delta = 1 \dots 10$ mm, $B_{\delta} = 0,6 \dots 1,1$ T, $k_{\delta} = 1,1 \dots 1,35$.

Zobu slāņa MS. Magnētisko indukciju jebkurā zoba šķērsgrīzumā, kas atrodas attālumā x no zoba pamatnes (3.20. zīm.), aprēķina šādi:

$$B_{z,x} = \frac{t_z \cdot x l_{\delta}}{b_{z,x} l_a k_a} B_{\delta}, \quad (3.29)$$

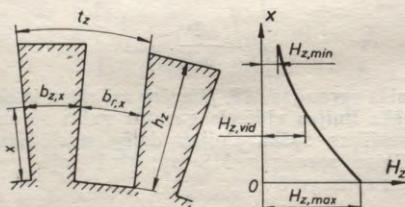
kur t_z — zoba iedaļas platums aplūkojamā šķērsgrīzumā;
 $b_{z,x}$ — zoba platums aplūkojamā šķērsgrīzumā;
 l_a — enkura garums;
 k_a — enkura serdes tērauda aizpildes koeficients, ar kuru ievēro izolācijas biežumu starp skārdiem ($k_a = 0,9 \dots 0,95$).

Magnētiskā lauka intensitāti $H_{z,x}$ aplūkojamā šķērsgrīzumā atrod no enkura serdes materiāla magnetizēšanas līknes $B = f(H)$. Ja $H_{z,x}$ aprēķina vairākiem zoba šķērsgrīzumiem, kas atrodas dažādos attālumos no zoba pamatnes, tad var uzzīmēt likni $H_{z,x} = f(x)$ (3.20. zīm.) un zobu slāņa MS noteikt, integrējot šo likni:

$$F_z = \int_0^{h_z} H_{z,x} dx.$$

Praktiskos aprēķinos var izmantot aptuvenu integrēšanas formulu (Simpsona formulu). Tad

$$F_z = H_z h_z, \quad (3.30)$$



3.20. zīm. Zobu slāņa MS noteikšana.

kur

$$H_z = (H_{z, \max} + 4H_{z, \text{vid}} + H_{z, \min})/6. \quad (3.31)$$

Formulā (3.31) lielumi $H_{z, \max}$, $H_{z, \text{vid}}$, $H_{z, \min}$ noteikti trīs zoba šķērsriezumos (3.20. zīm.): pie pamatnes, vidū un virsotnē.

Ja indukcija zobā $B_z > 1,8$ T, tad, aprēķinot zobu slāņa MS, jāievēro arī magnētiskā plūsma caur rievu. Istā indukcija $B'_{z, x}$ zobā šajā gadījumā ir mazāka nekā indukcija, kas aprēķināta pēc formulas (3.29). Lai noteiktu $B'_{z, x}$ izmanto speciālas magnetizēšanas līknes $B'_{z, x} = f(H_{z, x}, k_{z, x})$, kur koeficients $k_{z, x}$ ir atkarīgs no zobu slāņa ģeometriskajiem izmēriem:

$$k_{z, x} = (t_{z, x} l_{\Delta} / b_{z, x} l_a k_a) - 1.$$

Parasti līdzstrāvas mašīnās vidējā indukcija zobā $B_z = 1,6 \dots 2,1$ T.

Enkura jūga MS. Enkura jūgā magnētiskā plūsma sadalās divās daļās (sk. 3.15. zīm.), un tāpēc vidējā indukcija jūgā

$$B_a = \frac{\Phi}{2l_a h_a k_a}. \quad (3.32)$$

Indukcijai B_a atbilstošo H_a vērtību atrod no magnetizēšanas līknes un jūga MS F_a aprēķina pēc formulas

$$F_a = H_a L_a, \quad (3.33)$$

kur L_a — vidējās magnētiskās spēka līnijas garums enkura jūgā. Saskaņā ar 3.16. zīmējumu

$$L_a \approx \frac{\pi(D - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2}. \quad (3.34)$$

Polu MS. Aprēķinot polu MS, jāievēro, ka polu magnētiskā plūsma sastāv no galvenās plūsmas Φ un izkliedes plūsmas Φ_{σ} . Izkliedes plūsmas vērtību raksturo polu izkliedes koeficients

$$\sigma = \frac{\Phi + \Phi_{\sigma}}{\Phi} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi}, \quad (3.35)$$

kas atkarīgs no galveno polu ģeometriskajiem izmēriem un no galveno polu piesātinājuma. Parasti līdzstrāvas mašīnās $\sigma = 1,1 \dots 1,25$, pie tam lielākās vērtības atbilst mašīnām ar papildpoliem, bet mazākās — mašīnām bez papildpoliem.

Indukcija pola serdē

$$B_m = \frac{\sigma \Phi}{l_m b_m k_a}, \quad (3.36)$$

kur l_m — pola aksiālais garums;
 b_m — pola platums.

Nosakot no magnetizēšanas līknes H_m , polu MS

$$F_m = H_m h_m. \quad (3.37)$$

Statora jūga MS. Indukcija statora jūgā

$$B_s = \frac{\sigma \Phi}{2l_s h_s}, \quad (3.38)$$

kur l_s — jūga aksiālais garums.

Izmantojot no magnetizēšanas līknes atrasto H_s vērtību, statora jūga MS

$$F_s = H_s L_s, \quad (3.39)$$

kur L_s — vidējās magnētiskās spēka līnijas garums statora jūgā. Saskaņā ar 3.16. zīmējumu

$$L_s \approx \frac{\pi(D + 2\delta + 2h_m + h_s)}{4p} + \frac{h_s}{2}. \quad (3.40)$$

Ierosmes tinuma MS. Summējot atsevišķu magnētiskās ķēdes posmu MS, iegūst kopējo ķēdes MS, kas jārada ierosmes tinumam. Ierosmes tinuma MS uz vienu polu

$$F_j = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_s, \quad (3.41)$$

un saskaņā ar izteiksmēm (3.20) un (3.21) ierosmes strāva

$$I_j = \frac{F_j}{\omega_j}, \quad (3.42)$$

kur ω_j — ierosmes tinuma vijumu skaits.

Projektējot līdzstrāvas mašīnu, uzdevums ir nedaudz sarežģītāks, jo jāatrod gan nepieciešamais vijumu skaits, gan arī ierosmes strāva. Šie lielumi ir atkarīgi no ierosmes tinumam pievienotā sprieguma u_j un no tinuma parametriem (vada šķērsriezuma S_j un tinuma garuma). Tāpēc jāievēro, ka ierosmes tinuma MS nevar izmainīt, izmainot tikai vijumu skaitu, jo, piemēram, palielinot vijumu skaitu, proporcionāli palielinās ierosmes tinumu pretestība un samazinās strāva. Var pierādīt, ka

$$I_j \omega_j \sim u_j S_j, \quad (3.43)$$

no kurienes izriet, ka ierosmes tinuma MS var izmainīt, tikai izmainot pievienoto spriegumu vai vada šķērsriezumu.

Var atzīmēt, ka šeit iztīrātā līdzstrāvas mašīnas magnētiskās ķēdes aprēķina metode ir piemērojama arī maiņstrāvas mašīnām (sinhronajām un asinhronajām), jo maiņstrāvas mašīnās magnētiskā ķēde sastāv no tādiem pašiem elementiem kā līdzstrāvas mašīnās, tikai konstruktīvi šie elementi izvietoti citādi.

Mašīnas magnetizēšanas līkne. Aprēķinot magnētisko ķēdi dažādām plūsmas Φ vērtībām, var uzzīmēt mašīnas magnetizēšanas līkni $\Phi = f(F_j)$ vai arī $\Phi = f(I_j)$ (3.21. zīm.).

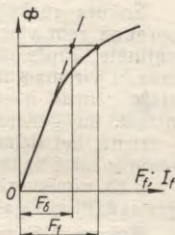
Magnetizēšanas līknes sākuma lineārā daļa atbilst nepiesātinātai magnētiskajai sistēmai, kad magnētiskās ķēdes feromagnētisko

posmu MS ir ļoti mazi salīdzinājumā ar gaisa spraugas MS. Tāpēc, novelkot pieskari magnetizēšanas līknes sākuma daļai, šī pieskare attēlo sakarību $\Phi = f(F_\delta)$.

Mašinas magnētiskās ķēdes piesātinājuma pakāpi var raksturot ar *piesātinājuma koeficientu* k_μ , kuru jebkurai plūsmas Φ vērtībai sašķaņā ar 3.21. zīmējumu nosaka attiecība

$$k_\mu = \frac{F_f}{F_\delta} \quad (3.44)$$

Piesātinājuma koeficients k_μ , kas atbilst magnētiskās plūsmas nominālajai vērtībai, raksturo mašinas aktīvo materiālu izmantošanas pakāpi. Jo lielāks k_μ (lielākas indukcijas atsevišķos magnētiskās ķēdes posmos), jo labāk izmantoti magnētiskie materiāli, t. i., mazāki mašinas izmēri, masa un izmaksas. Tomēr ievērojami palielināt k_μ vērtību nav vēlams, jo tad palielinās ierosmes tinuma izmēri un līdz ar to pieaug arī visas mašinas izmēri, kā arī palielinās elektriskie zudumi ierosmes tinumā. Tāpēc līdzstrāvas mašīnas, kā arī cita tipa elektriskās mašīnas projektē un izgatavo ar vidēju piesātinājuma pakāpi ($k_\mu = 1,2 \dots 1,7$). Šāda piesātinājuma pakāpe atbilst darba punktam, kas atrodas uz magnetizēšanas līknes nedaudz virs tās izliekuma.



3.21. zīm. Mašinas magnetizēšanas līkne.

3.5.3. Magnētiskais lauks slogotā līdzstrāvas mašīnā

Enkura reakcija. Līdzstrāvas mašīnas tukšgaitas režīmā ($I_a = 0$) mašīnā ir tikai polu magnētiskais lauks, kas rada simetrisku magnētiskās indukcijas sadalījumu attiecībā pret polu asi (3.22. zīm. a). Vienkāršības un uzskatāmības dēļ 3.22. zīmējumā kolektors nav parādīts, bet sukās nosacīti pievienotas enkura virsmai pret tiem vadiem, kuros inducētie EDS ir vienādi ar nulli, t. i., sukās novietotas uz ģeometriskās neitrāles $n-n$.

Slogotā mašīnā ($I_a \neq 0$) enkura strāva rada savu magnētisko lauku — enkura lauku. Šāda lauka aina, ja sukās atrodas uz ģeometriskās neitrāles un ierosmes strāva $I_f = 0$, parādīta 3.22. zīmējumā b. No zīmējuma redzams, ka enkura magnētiskā lauka ass sakrīt ar ģeometriskās neitrāles $n-n$ virzienu.

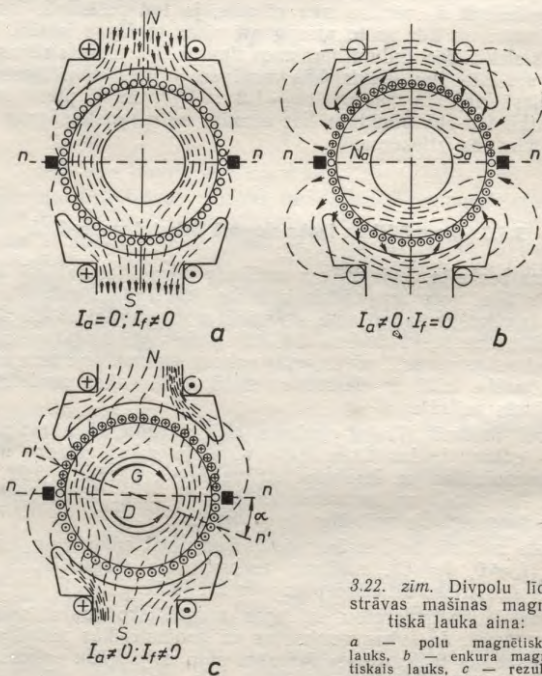
Slogotā mašīnā, kad strāva vienlaikus plūst enkura un ierosmes tinumā ($I_a \neq 0$, $I_f \neq 0$), mašīnas rezultējošais magnētiskais lauks vairs nav simetrisks attiecībā pret polu asi (3.22. zīm. c).

Enkura lauka iedarbību uz polu magnētisko lauku sauc par *enkura reakciju*. Ja sukās novietotas uz ģeometriskās neitrāles, tad enkura reakcijas lauks vērstas šķērsām polu asij. Šādu enkura reakciju sauc par *šķērsreakciju*.

Enkura reakcijas darbības rezultātā magnētiskais lauks gaisa spraugā zem vienas pola malas tiek pastiprināts, bet zem otras — vājināts. Tāpēc mašīnas fizikālā neitrāle $n'-n'$ (līnija, kas savieno enkura virsmas punktus, kuros indukcija $B=0$) nesakrīt ar ģeometrisko neitrāli $n-n$. Izmantojot labās un kreisās rokas likumus, var atrast, ka ģeneratorā fizikālā neitrāle pagriežas enkura rotācijas virzienā, bet dzinējā — pretēji. Fizikālās neitrāles nobīdes leņķis α mainās reizē ar mašīnas slodzi.

3.23. zīmējumā *a* parādīts polu MS radītās magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā, ja $I_a=0$, $I_f \neq 0$.

Enkura MS radīto indukcijas sadalījumu gaisa spraugā var atrast, pieņemot, ka enkura tinuma vadi vienmērīgi izvietoti pa enkura virsmu. Izmantosim pilnās strāvas likumu $\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma i$ magnētiskajai spēka līnijai, kas šķērso gaisa spraugu attālumā x no pola centra (3.23. zīm. *b*). Tā kā tērauda magnētiskā caurlaidība μ ir daudzkārt



3.22. zīm. Divpolu līdzstrāvas mašīnas magnētiskā lauka aina:

a — polu magnētiskais lauks, *b* — enkura magnētiskais lauks, *c* — rezultējošais magnētiskais lauks.

lielāka par gaisa magnētisko caurlaidību μ_0 , var pieņemt, ka $\mu = \infty$. Tad saskaņā ar pilnās strāvas likumu

$$2H_{aq}\delta = 2A_ax, \quad (3.45)$$

kur H_{aq} — enkura reakcijas magnētiskā lauka intensitāte gaisa spraugā;

A_a — enkura lineārā noslodze.

Lineārā noslodze (enkura pilnā strāva, kas attiecināta uz enkura aploces garuma vienību)

$$A_a = \frac{i_a N}{\pi D}, \quad (3.46)$$

kur i_a — strāva enkura tinuma vados;

N — enkura aktīvo vadu skaits.

No izteiksmes (3.45) var atrast, ka

$$H_{aq} = \frac{A_ax}{\delta}. \quad (3.47)$$

Tad enkura lauka indukcija

$$B_{aq} = \mu_0 H_{aq} = \frac{\mu_0}{\delta} A_ax \quad (3.48)$$

jeb

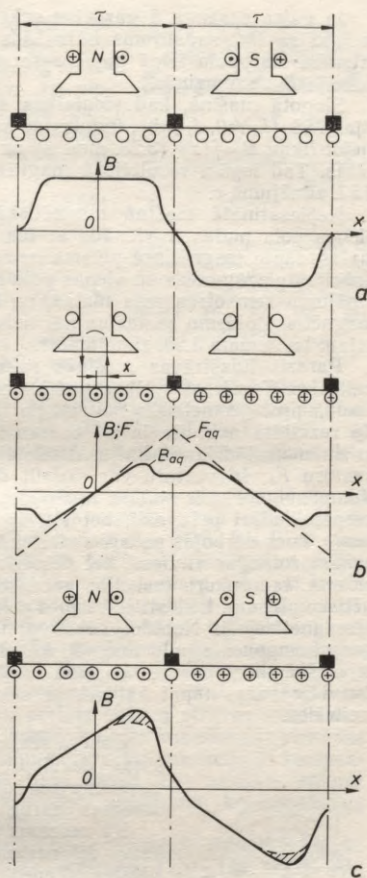
$$B_{aq} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{aq}, \quad (3.49)$$

kur

$$F_{aq} = A_ax \quad (3.50)$$

ir enkura reakcijas MS.

Enkura reakcijas MS F_{aq} pa enkura aploci mainās lineāri (3.23. zīm. b), pie tam F_{aq} maksimālā vērtība ir uz ģeometriskās neitrāles, bet uz pola ass $F_{aq} = 0$.



3.23. zīm. Magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā:

a — polu magnētiskais lauks, b — enkura magnētiskais lauks, c — rezultējošais magnētiskais lauks.

Ja gaisa sprauga δ gar visu enkura aploci būtu nemainīga, tad indukcijas B_{aq} sadalījums būtu tāds pats kā MS F_{aq} sadalījums. Istenībā starppolu telpā gaisa sprauga ir lielāka, un tāpēc šeit indukcija B_{aq} samazinās.

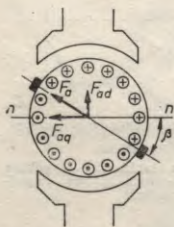
Slogotā mašīnā, kad vienlaikus darbojas polu un enkura reakcijas MS ($I_a \neq 0, I_f \neq 0$), indukcijas sadalījuma likni var iegūt, summējot likņu $B=f(x)$ (3.23. zīm. a) un $B_{aq}=f(x)$ (3.23. zīm. b) ordinātas. Tad iegūst rezultējošā magnētiskā lauka likni, kas parādīta 3.23. zīmējumā c.

Nepiesātinātā mašīnā magnētiskās indukcijas pieaugums zem vienas pola malas ir vienāds ar tās samazinājumu zem otras pola malas, tāpēc magnētiskā plūsma neizmainās. Piesātinātā mašīnā indukcijas pieaugums zem vienas pola malas ir mazāks par tās samazinājumu zem otras pola malas, un tāpēc enkura reakcija mašīnas magnētisko plūsmu samazina par lielumu, kas proporcionāls iesvītrotajam laukumam 3.23. zīmējumā c.

Parasti līdzstrāvas mašīnās sukas novietotas uz geometriskās neitrāles. Tomēr atsevišķos gadījumos tās var būt arī nobīdītas attiecībā pret geometrisko neitrāli par kaut kādu leņķi β (3.24. zīm.). Tā rezultātā nobīdīta ir arī enkura lauka ass, kura vienmēr sakrīt ar suku nostādīšanas līniju. Attēlojot šajā gadījumā enkura MS ar vektoru F_a , šo vektoru var sadalīt divās komponentēs F_{aq} un F_{ad} . Komponente F_{aq} ir enkura reakcijas šķērskomponente, kas darbojas perpendikulāri polu asij, bet F_{ad} ir enkura reakcijas garenkomponente, kura darbojas polu ass virzienā. Ja sukas ģeneratorā nobīdītas enkura rotācijas virzienā, bet dzinējā — pretēji enkura rotācijas virzienam, tad enkura reakcijas garenkomponente samazina polu magnētisko plūsmu, t. i., attiecībā pret polu magnētisko lauku tā darbojas atmagnetizējoši. Nobīdot sukas pretēja virzienā, enkura reakcijas garenkomponente polu magnētisko plūsmu pastiprina. Enkura reakcijas šķērskomponentes darbība mašīnā ar nobīdītām sukām kvalitatīvi izpaužas tāpat kā tad, ja sukas novietotas uz geometriskās neitrāles.

Enkura reakcijas ietekme uz līdzstrāvas mašīnas darbību. Enkura reakcija izraisa virkni nevēlamu parādību, kas pasliktina līdzstrāvas mašīnas darba apstākļus.

Kā redzams no 3.23. zīmējuma c, piesātinājuma dēļ nedaudz samazinās polu magnētiskā plūsma. Tāpēc samazinās arī enkura tinumā inducētais EDS un mašīnas elektromagnētiskais moments. Bez tam sakarā ar fizikālās neitrāles nobīdi samazinās arī paralēlā zara EDS, jo atsevišķi paralēlā zara vadi atrodas pretējas polaritātes magnētiskā lauka zonā. Tāpat samazinās arī mašīnas elektromagnētiskais moments, jo daļa enkura tinuma paralēlā zara vadu rada pretēja virziena elektromagnētisko momentu.



3.24. zīm. Enkura reakcija līdzstrāvas mašīnā ar nobīdītām sukām.

Fizikālās neitrāles nobīde var būt par cēloni pastiprinātai dzirksteļošānai pie sukām, jo enkura reakcijas dēļ pieaug spriegums starp kolektora plāksnītēm. Ja, piemēram, enkurā ir cilpas tinums, tad maksimālais spriegums starp blakus kolektora plāksnītēm $u_{k, max}$ skaitliski ir vienāds ar sekcijā inducēto EDS:

$$u_{k, max} = 2B_{max}\omega_s l_0 v, \quad (3.51)$$

kur B_{max} — maksimālā indukcijas vērtība gaisa spraugā;

ω_s — sekcijas vijumu skaits;

v — enkura aploces lineārais ātrums.

Tā kā slogotā mašīnā enkura reakcijas dēļ indukcija B_{max} zem vienas pola malas var būt ievērojami lielāka nekā tukšgaitas režīmā (3.23. zīm.), tad spriegums $u_{k, max}$ var sasniegt tādas vērtības, kas izraisa izolācijas pārklāšanos starp kolektora plāksnītēm. Tā rezultātā ap kolektoru var izveidoties «riņņa uguns», t. i., enkura īsslēgums elektriskā loka veidā.

Pastiprināta dzirksteļošana pie sukām var rasties arī tāpēc, ka sukās saslēdz īsi enkura tinuma sekcijas momentā, kad šajās sekcijās no enkura reakcijas lauka inducējas ievērojams EDS. Šis EDS rada sekcijās relatīvi lielas strāvas, un tāpēc, pārtraucot īsslēgtās sekcijas ķēdi (kolektora plāksnītei noskrejot no sukas), starp suku un kolektora plāksnīti izveidojas elektriskais loks, t. i., notiek dzirksteļošana.

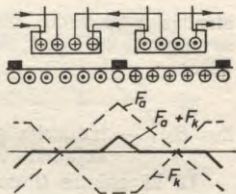
Kompensācijas tinums un tā nozīme. Efektīvs līdzeklis enkura reakcijas radīto nevēlamo parādību novēršanai ir kompensācijas tinums. So tinumu ievieto rievās, kas izveidotas polu uzgaļos (3.25. zīm.). Strāvas virzienam kompensācijas tinumā jābūt tādam, lai tas pola iedaļas robežās būtu pretējs enkura strāvas virzienam.

Ja kompensācijas un enkura tinumu lineārās noslodzes ir vienādas ($A_k = A_a$), tad pa visu pola platumu enkura šķērsreakcija ir kompensēta pilnīgi, bet starppolu zonā tikai daļēji. Lai panāktu enkura reakcijas kompensāciju jebkuras slodzes gadījumā, kompensācijas tinumu un enkura tinumu slēdz virknē.

Līdzstrāvas mašīnas ar kompensācijas tinumu ir dārgākas, tāpēc šādu tinumu lieto tikai lieljaudas mašīnās ($P_N = 150..500$ kW, $U_N > 400$ 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.

3.6. ENKURA TINUMA EDS

Noteiksim enkura tinuma EDS, sākumā pieņemot, ka sukās atrodas uz ģeometriskās neitrāles un tinuma solis $y_1 = \tau$. Apzīmēsim ar N enkura tinuma aktīvo vadu skaitu. Tad zem mašīnas viena pola



3.25. zīm. Kompensācijas tinuma izveidojuma princips un enkura (F_a), kompensācijas tinuma (F_k) un rezultējošā ($F_a + F_k$) MS diagrammas.

atrodas $N/2p$ vadu. Zinot magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā (3.26. zīm.), no formulas (2.1) var noteikt vadā i inducēto EDS:

$$e_i = B_{\delta, i} l_{\delta} v, \quad (3.52)$$

kur $B_{\delta, i}$ — indukcija gaisa spraugas tajā vietā, kur atrodas aplūkojamais vads.

Tā kā enkura tinumā visi $N/2p$ vadi savienoti virknē un viena paralēlā zarā ir $N/2a$ vadu, tad enkura tinuma EDS

$$E_a = \frac{2p}{2a} \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta, i} l_{\delta} v = \frac{pl_{\delta} v}{a} \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta, i}. \quad (3.53)$$

Ja enkurā zem viena pola ir pietiekami daudz vadu, tad

$$\sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta, i} = \frac{N}{2p} B_{vid}, \quad (3.54)$$

kur B_{vid} — magnētiskās indukcijas vidējā vērtība pola iedaļas robežās.

Magnētiskās indukcijas vidējā vērtība

$$B_{vid} = \frac{\Phi}{\tau l_{\delta}}, \quad (3.55)$$

kur Φ — viena pola magnētiskā plūsma.

Enkura aploces lineārais ātrums

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{2p \tau n}{60}, \quad (3.56)$$

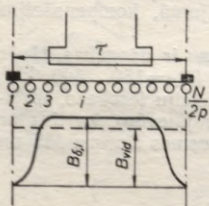
kur n — enkura rotācijas frekvence (min^{-1}).

Ievērojot sakarības (3.54), ..., (3.56), no izteiksmes (3.53) iegūstam

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n \quad (3.57)$$

$$E_a = c_E \Phi n, \quad (3.58)$$

$$c_E = \frac{pN}{60a} \quad (3.59)$$

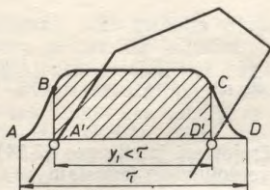


3.26. zīm. Enkura tinumā inducētā EDS un elektromagnētiskā momenta noteikšana.

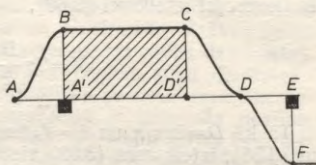
jeb

kur

ir katrai mašīnai nemainīgs koeficients.



3.27. *zim.* Magnētiskās plūsmas un EDS noteikšana tinumam ar saīsinātu soli.



3.28. *zim.* Magnētiskās plūsmas un EDS noteikšana, ja suku nobīdītas no ģeometriskās neitrāles.

Enkura tinumā ar saīsinātu soli EDS vērtība ir nedaudz mazāka, jo mazāka ir katru enkura sekciju caurtverošā magnētiskā plūsma (3.27. *zim.*). Ja $y_1 = \tau$, tad sekciju caurtver magnētiskā plūsma, kas proporcionāla laukumam $ABCD$, bet sekciju ar saīsinātu soli ($y_1 < \tau$) — plūsma, kas proporcionāla mazākam laukumam $A'B'C'D'$.

Ja suku nobīdītas no ģeometriskās neitrāles, enkura tinuma paralēlajos zarus darbojas pretēja virziena EDS, kas atbilst laukumam DFE (3.28. *zim.*). Šāda EDS darbība līdzvērtīga plūsmas samazināšanai proporcionāli laukumiem ABA' un DCD' .

3.7. ELEKTROMAGNĒTISKAIS MOMENTS

Līdzstrāvas mašīnu darbinot ģeneratora vai dzinēja režīmā, magnētiskās plūsmas un enkura vadus plūstošās strāvas mijiedarbība rada elektromagnētisko momentu.

Uz katru enkura tinuma vadu (sk. 3.26. *zim.*) darbojas elektromagnētiskais spēks, kura skaitliskā vērtība saskaņā ar izteiksmi (2.2)

$$F_i = B_\delta \cdot i_a l_\delta. \quad (3.60)$$

Elektromagnētiskais moments, kas darbojas uz enkura tinuma katru vadu,

$$M_i = F_i \frac{D}{2}. \quad (3.61)$$

Tā kā zem viena pola atrodas $N/2p$ vadu, tad mašīnas elektromagnētiskais moments

$$M = 2p \sum_{i=1}^{N/2p} M_i = 2p \sum_{i=1}^{N/2p} F_i \frac{D}{2}$$

jeb, ievērojot izteiksmi (3.60),

$$M = 2p \frac{D}{2} i_a l_0 \sum_{i=1}^{N/2p} B_{\delta, i}. \quad (3.62)$$

Tā kā $D = 2p\tau/\pi$ un $i_a = I_a/2a$, tad, ievērojot arī izteiksmes (3.54) un (3.55), izteiksmes (3.62) vietā pēc pārveidojumiem iegūstam

$$M = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi \quad (3.63)$$

jeb

$$M = c_M I_a \Phi, \quad (3.64)$$

kur

$$c_M = \frac{pN}{2\pi a}$$

ir katrai mašīnai nemainīgs koeficients, pie tam (sk. izteiksmi (3.59))

$$c_M = \frac{30}{\pi} c_B. \quad (3.65)$$

Enkura tinuma soļa saīsinājums, kā arī suku nobīde, aprēķinot elektromagnētisko momentu, jāievēro tāpat, kā aprēķinot enkura tinuma EDS (sk. 3.6.).

Generators režīmā mašīnas elektromagnētiskais moments ir bremzējošs un līdzsvaro primārā dzinēja griezes momentu, bet dzinēja režīmā elektromagnētiskais moments pārvar ar enkura vārpstu saistītā darba mehānisma pretestības momentu.

3.8. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU KOMUTĀCIJA

3.8.1. Komutācijas procesa vispārīgs raksturojums

Enkura rotējot, tinuma sekcijas pēc kārtas pāriet no viena paralēlā zara citā un tajās mainās strāvas virziens. Pārslēdzoties no viena paralēlā zara citā, sekcijas ar sukām uz brīdi ir slēgtas īsi. Visu to parādību kopumu, kuras noris sekcijās un suku kontaktos šādā pārslēgšanas procesā, sauc par komutāciju.

Slikta komutācijas gadījumā zem sukām notiek dzirksteļošana, kas bojā kolektora un suku virsmu un tādejādi samazina mašīnas darbmūžu.

Suku dzirksteļošānu var izraisīt mehāniskas un elektromagnētiskas dabas cēloņi. Mehāniskās dabas cēloņi ir kolektora ekscentricitāte, tā nelīdzena virsma, slikta suku un kolektora savstarpēja pieslē-

pēšanās, suku turētāja vibrācijas u. tml. Minēto cēloņu dēļ kontakts starp sukām un kolektoru un līdz ar to elektriskās strāvas ķēde, kolektoram rotējot, tiek pārtraukta, un zem sukām rodas dzirksteles.

Daudz sarežģītāki ir elektromagnētiskās dabas suku dzirksteļošanas cēloņi, kas saistīti ar elektromagnētisko procesu norisi komutējamās sekcijās. Šiem procesiem komutācijā ir izšķiroša nozīme.

Saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 183—74 komutācijas kvalitāti raksturo ar suku dzirksteļošanas pakāpi jeb *komutācijas klasi*. Valsts standarts nosaka šādas komutācijas klases: 1 — komutācija bez dzirksteļošanas; 1^{1/4} — vāja dzirksteļošana zem sukas nelielas daļas; 1^{1/2} — vāja dzirksteļošana zem sukas lielākās daļas; 2 — dzirksteļošana zem visas sukas; 3 — stipra dzirksteļošana zem visas sukas. Normālā darba režīmā dzirksteļošanas pakāpe nedrīkst būt lielāka par 1^{1/2}, bet dzirksteļošanas pakāpes 2 un 3 pieļaujamas tikai īslaicīgā režīmā (palaišana, reverss, īslaicīgas pārslodzes).

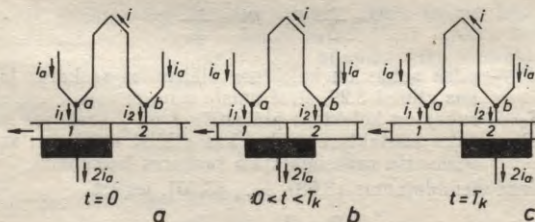
3.8.2. Komutācijas procesa fizikālā aina un pamatvienādojumi

Lai sīkāk iepazītos ar komutācijas procesa norisi, noskaidrosim strāvas izmaiņu enkura tinuma sekcijā laika periodā, kad tā pārslēdzas no viena paralēlā zara citā. Aplūkosim komutācijas procesu, sākmā pieņemot, ka sukas platums b_s vienāds ar kolektora iedaļu. Laika sprīdi, kurā suka pilnīgi pāriet no vienas kolektora plāksnītes uz citu (3.29. zīm.), sauc par *komutācijas periodu* T_k , pie tam

$$T_k = \frac{b_s}{v_k}, \quad (3.66)$$

kur v_k — kolektora apleces ātrums.

3.29. zīmējumā attēlota cilpas tinuma sekcija, kura pievienota divām blakus kolektora plāksnītēm, trīs dažādos sukas stāvokļos attiecībā pret kolektoru, pieņemot, ka kolektors pārvietojas virzienā pa kreisi. Komutācijas process sākas momentā, kad suka pieskaras kolektora plāksnītei 2 (3.29. zīm. a). Komutācijas laikā suka sekciju



3.29. zīm. Enkura tinuma sekcijas komutācijas process.

ir saslēgusi īsi (3.29. zīm. *b*), bet komutācija beidzas, kad tiek pārtraukts sukas kontakts ar kolektora plāksnīti *1* (3.29. zīm. *c*).

Saskaņā ar otro Kirhhofa likumu sastādīsim vienādojumu komutējošai sekcijai:

$$iR_s + i_1R_1 - i_2R_2 = \Sigma e, \quad (3.67)$$

kur *i* — strāva komutējošā sekcijā, kuras pozitīvais virziens atbilst komutācijas sākuma momentam (*t*=0);

*i*₁ un *i*₂ — strāvas caur suku kontaktiem;

*R*_s — sekcijas pretestība;

*R*₁ un *R*₂ — kontaktpretestības starp suku un kolektora plāksnītēm *1* un *2*;

Σe — komutācijas perioda laikā sekcijā inducētais EDS.

Tā kā sekcijas pretestība *R*_s ir daudzkārt mazāka par suku kontaktpretestībām *R*₁ un *R*₂, tad var pieņemt, ka *R*_s=0, un vienādojuma (3.67) vietā iegūstam

$$i_1R_1 - i_2R_2 = \Sigma e. \quad (3.68)$$

Mezglā punktiem *a* un *b* (3.29. zīm.) saskaņā ar pirmo Kirhhofa likumu var uzrakstīt vienādojumus

$$i_a + i - i_1 = 0; \quad (3.69)$$

$$i_a - i - i_2 = 0. \quad (3.70)$$

Komutācijas procesu raksturo strāvu *i*, *i*₁, *i*₂ izmaiņa laikā. Šīs strāvas var aprēķināt no vienādojumiem (3.68), ..., (3.70), ja zināmi lielumi *i*_a, *R*₁, *R*₂ un Σe . Istenībā par zināmu var uzskatīt tikai enkura paralēlā zara strāvu *i*_a, bet suku kontaktpretestības *R*₁ un *R*₂ ir atkarīgas no lielumiem, kas komutācijas procesā mainās (strāvas blīvuma sukā, sukas un kolektora plāksnīšu saskares laukuma). Tāpat arī komutācijas perioda laikā mainās sekcijā inducētais EDS. Tāpēc analīzei izmantosim vienādojumu (3.68), ..., (3.70) tuvinātu risinājumu, pieņemot, ka $\Sigma e = \text{const}$ un suku kontaktpretestības ir apgriezti proporcionālas sukas un kolektora plāksnīšu saskares laukumiem, t. i.,

$$R_1 = \frac{S}{S_1} R; \quad R_2 = \frac{S}{S_2} R, \quad (3.71)$$

kur *S* — pilns sukas un kolektora plāksnītes saskares laukums, kas atbilst 3.29. zīmējumam *a* un *c*;

*S*₁ un *S*₂ — sukas un kolektora plāksnīšu *1* un *2* saskares laukumi;

R — suku kontaktpretestība, kas atbilst sukas un kolektora plāksnīšu maksimālajam saskares laukumam.

Atrisinot vienādojumus (3.68), ..., (3.70), iegūst

$$i = i_a \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} + \frac{\Sigma e}{R_1 + R_2}. \quad (3.72)$$

Var uzskatīt, ka komutējošās sekcijas strāva i sastāv no divām komponentēm i' un i'' . Strāvu

$$i' = i_a \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.73)$$

sauc par *komutācijas galveno strāvu*, bet strāvu

$$i'' = \frac{\Sigma e}{R_1 + R_2} \quad (3.74)$$

par *komutācijas papildstrāvu*, pie tam komutācijas papildstrāva ir išslēguma strāva komutējošā sekcijā.

3.8.3. Komutācijas veidi

Lineāra komutācija. Aplūkosim gadījumu, kad komutējošā sekcijā inducētais EDS $\Sigma e = 0$. Tad saskaņā ar izteiksmēm (3.72), ..., (3.74) $i'' = 0$ un

$$i = i' = i_a \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.75)$$

Suku un kolektora plāksnišu saskares laukumi ir proporcionāli laikam, kas pagājis no komutācijas sākuma:

$$S_1 = \frac{T_k - t}{T_k} S; \quad S_2 = \frac{t}{T_k} S. \quad (3.76)$$

Ievērojot sakarības (3.76), no izteiksmēm (3.71) iegūstam

$$R_1 = \frac{T_k}{T_k - t} R; \quad R_2 = \frac{T_k}{t} R. \quad (3.77)$$

Ievietojot šīs pretestību vērtības izteiksmē (3.73), pēc pārveidojumiem iegūstam

$$i' = \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) i_a. \quad (3.78)$$

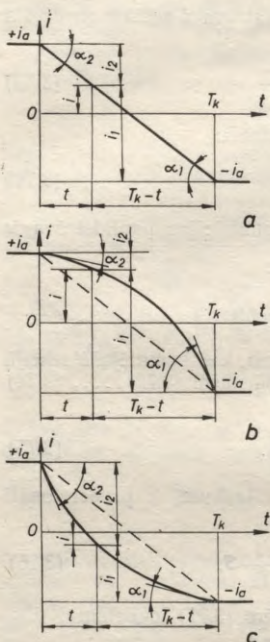
Strāvas izmaiņu komutācijas procesā attēlo taisne, kas parādīta 3.30. zīmējumā a , un šādu komutāciju sauc par lineāru komutāciju.

Noskaidrosim, kā mainās strāvas blīvums suku kontaktos komutācijas procesa laikā. Strāvas blīvums zem suku noskrejošās (j_1) un uzskrejošās malas (j_2)

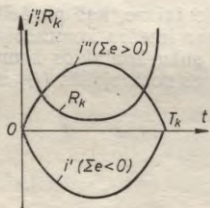
$$j_1 = \frac{i_1}{S_1}; \quad j_2 = \frac{i_2}{S_2}$$

jeb, ievērojot izteiksmes (3.76),

$$j_1 = \frac{T_k}{S} \frac{i_1}{T_k - t}; \quad j_2 = \frac{T_k}{S} \frac{i_2}{t}. \quad (3.79)$$



3.30. zim. Lineāra (a), kavēta (b) un forsēta (c) komutācija.



3.31. zim. Komutācijas papildstrāvas noteikšana.

No 3.30. zīmējuma *a*, kur parādītas strāvu i_1 un i_2 vērtības laika momentā t , un no izteiksmēm (3.79) var secināt, ka

$$j_1 \sim \operatorname{tg} \alpha_1; \quad j_2 \sim \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (3.80)$$

Tas nozīmē, ka lineāras komutācijas gadījumā $\alpha_1 = \alpha_2 = \operatorname{const}$ un $j_1 = j_2 = \operatorname{const}$, t. i., strāvas blīvums zem suku komutācijas perioda laikā nemainās un tāpēc lineāra komutācija ir vislabākā.

Kavēta un forsēta komutācija. Vispārīgā gadījumā $\Sigma e \neq 0$, un komutējamā sekcijā bez galvenās komutācijas strāvas i' ir arī komutācijas papildstrāva i'' . Tās vērtība saskaņā ar izteiksmi (3.74) ir

$$i'' = \frac{\Sigma e}{R_k}, \quad (3.81)$$

kur $R_k = R_1 + R_2$ — sekcijas išslēgtā kontūra pretestība.

Ievērojot izteiksmes (3.77), var atrast, ka

$$R_k = \frac{T_k^2}{(T_k - t)t} R. \quad (3.82)$$

Pretestības R_k izmaiņa laikā attēlota 3.31. zīmējumā. Ja $t=0$ un $t=T_k$, tad $R_k = \infty$, bet, ja $t=T_k/2$, pretestībai R_k ir minimālā vērtība. Ja pieņem, ka komutācijas perioda laikā $\Sigma e = \operatorname{const}$, tad saskaņā ar izteiksmi (3.81) komutācijas papildstrāvas izmaiņu laikā attēlo 3.31. zīmējumā parādītās līknes.

Ja $\Sigma e > 0$, tad komutācijas papildstrāva ($i'' > 0$) summējas ar komutācijas galveno strāvu. Strāvas izmaiņu komutējošā sekcijā šajā gadījumā attēlo 3.30. zīmējumā *b* parādītā līkne. Šādu komutāciju sauc par *kavētu komutāciju*, jo strāva i sākumā izmainās lēni un nulles vērtību sasniedz vēlāk nekā lineāras komutācijas gadījumā. Mašīnā ar kavētu komutāciju strāvas blīvums zem suku noskrejošām malām ($j_1 \sim \operatorname{tg} \alpha_1$) ir lielāks nekā zem suku uzskrejošām ma-

lām ($j_2 \sim \text{tg } \alpha_2$), un tāpēc rodas labvēlīgi apstākļi dzirksteļošanai zem suku noskreošām malām.

Ja $\Sigma e < 0$, tad komutācijas papildstrāva ($i'' < 0$) ir pretēja komutācijas galvenajai strāvai un komutējamās sekcijas strāvas izmaiņu attēlo likne, kas parādīta 3.30. zīmējumā *c*. Šādu komutāciju sauc par *forsētu komutāciju*. Forsētas komutācijas gadījumā $j_2 > j_1$, un tāpēc iespējama dzirksteļošana zem sukas uzskreošās malas. Tomēr parasti dzirksteļošana forsētas komutācijas gadījumā nav novērojama. Forsētas komutācijas beigās, kā tas redzams no 3.30. zīmējuma *c*, strāva i_1 un tātad arī strāvas blīvums j_1 zem sukas noskreošās malas ir ļoti mazi. Tāpēc īsslēgtās sekcijas ķēdes pārtraukšana šajā gadījumā nevar izraisīt jūtamu dzirksteļošanu, jo tiek pārtraukta ķēde ar mazu strāvu.

3.8.4. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni

Lai uzlabotu komutāciju, jāsamazina komutācijas papildstrāva, ko var panākt, samazinot komutējošā sekcijā inducēto EDS Σe , kā arī palielinot komutējošās sekcijas īsslēgtā kontūra pretestību.

Izmainoties strāvai īsslēgtajā sekcijā, tajā inducējas pašindukcijas EDS

$$e_L = -L_s \frac{di}{dt}, \quad (3.83)$$

kur L_s — sekcijas induktivitāte.

Šī EDS vidējā vērtība komutācijas perioda laikā, strāvai sekcijā mainoties no $+i_a$ līdz $-i_a$,

$$e_{L, \text{vid}} = -L_s \frac{-i_a - i_a}{T_k} = \frac{2L_s i_a}{T_k}. \quad (3.84)$$

Parasti līdzstrāvas mašīnā suka pārklāj vairākas kolektora plāksnītes ($b_s > b_k$) un tāpēc vienlaikus komutē vairākas sekcijas. Ja šo sekciju malas atrodas vienā rievā, t. i., $n_e > 1$ (sk. 3.4.1.), tad īsslēgtajās sekcijās inducējas savstarpējās indukcijas EDS

$$e_M = - \sum_{m=1}^{m=n} M_m \frac{di_m}{dt}, \quad (3.85)$$

kur M_m — savstarpējā induktivitāte starp aplūkojamo sekciju un vienlaikus ar to komutējošo sekciju m ;

i_m — strāva sekcijā m ;

n — vienlaikus komutējošo sekciju skaits.

Pēc analogijas ar izteiksmi (3.84) var atrast, ka EDS e_M vidējā vērtība

$$e_{M, \text{vid}} = \frac{2i_a}{T_k} \sum_{m=1}^{m=n} M_m. \quad (3.86)$$

Pašindukcijas un savstarpējās indukcijas rezultējošo EDS

$$e_r = e_L + e_M \quad (3.87)$$

sauc par *reaktīvo EDS*.

Tā kā saskaņā ar izteiksmēm (3.84) un (3.86) $e_L > 0$ un $e_M > 0$, tad arī $e_r > 0$ un šo EDS darbības dēļ komutācija ir kavēta.

Bez minētā reaktīvā EDS e_r enkura reakcijas magnētiskais lauks, kas darbojas komutējošo sekciju zonā, inducē šajās sekcijās EDS e_{aq} , kura virziens sakrīt ar reaktīvā EDS virzienu, pie tam

$$e_{aq} = 2B_{aq}\omega_s l_\delta v_a, \quad (3.88)$$

kur B_{aq} — enkura šķērsreakcijas magnētiskā lauka indukcija komutējošo sekciju zonā;

ω_s — sekcijas vijumu skaits;

v_a — enkura aploces ātrums.

Komutējošo sekciju zonā var radīt arī ārēju magnētisku lauku B_k , pie tam tādu, lai šī lauka inducētais EDS e_k būtu skaitliski vienāds ar EDS $e_r + e_{aq}$ un vērsts tam pretī. EDS e_k sauc par *komutējošo EDS*, pie tam

$$e_k = 2B_k\omega_s l_\delta v_a. \quad (3.89)$$

Komutācija ir lineāra, ja nodrošināts nosacījums

$$e_r + e_{aq} + e_k = 0. \quad (3.90)$$

Visefektīvākais līdzeklis komutācijas uzlabošanai ir papildpoli, kurus novieto starp galvenajiem poliem (sk. 3.3.) tā, lai papildpolu ass sakristu ar ģeometrisko neitrāli. Papildpolu MS virzienam jābūt pretējam enkura reakcijas MS virzienam. Tāpēc ģeneratorā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola atrodas tam pretēja nosaukuma papildpols, bet dzinējā enkura griešanās virzienā aiz galvenā pola — tā paša nosaukuma papildpols.

EDS $e_r + e_{aq}$ ir proporcionāls enkura strāvai. Tāpēc, lai nosacījums (3.90) būtu spēkā jebkurai slodzei, papildpolu tinumu slēdz virknē ar enkura tinumu.

Papildpoli ir visām līdzstrāvas mašīnām, kuru jauda $P_N > 1$ kW. Mašīnās ar jaudu $P_N < 1$ kW komutējošo EDS var radīt ar suku nobīdi: ģeneratorā — enkura griešanās virzienā, bet dzinējā — pretēji tam. Tad komutējošo sekciju zonā darbojas galveno polu lauks, kas inducē šajās sekcijās komutējošo EDS e_k . Tomēr nosacījums (3.90) šeit ir spēkā tikai noteiktai slodzei, jo $e_r + e_{aq}$ mainās reizē ar slodzi, bet e_k noteiktā suku stāvoklī ir nemainīgs.

Komutācijas apstākļus daļēji var uzlabot arī, samazinot reaktīvā EDS e_r vērtību. To panāk, izveidojot tinumu ar nelielu vijumu skaitu sekcijā, jo sekcijas induktivitāte L_s ir proporcionāla sekcijas vijumu skaita kvadrātam. Bez tam, ja tinumu izveido ar saīsinātu soli ($y_1 < \tau$), tad komutējošo sekciju malas atrodas dažādās rievās, un līdz ar to samazinās komutējošo sekciju savstarpējā induktivitāte M .

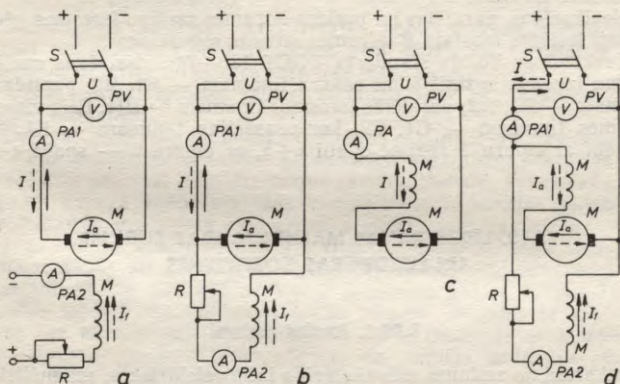
Labas komutācijas nodrošināšanā liela nozīme ir arī suku markai. Palielinot kontaktpretestību starp suku un kolektora plāksnītēm, t. i., izmantojot, piemēram, ogles-grafīta suku ar palielinātu pārejas pretestību, komutācijas papildstrāva samazinās. Palielināt suku pretestību komutācijas uzlabošanas nolūkā nav lietderīgi zema sprieguma mašīnās ($U_N < 25 \dots 30 \text{ V}$), jo šādām mašīnām suku kontaktos ir relatīvi liels sprieguma kritums, kā arī palielināti elektriskie zudumi.

Lai nodrošinātu labu komutāciju, jā rūpējas arī par kolektora un suku aparāta stāvokli, novēršot mehāniskas dabas suku dzirkstejošanas cēloņus.

3.9. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU KLASIFIKĀCIJA PĒC IEROSMES VEIDA

Līdzstrāvas mašīnas atkarībā no ierosmes tinuma barošanas veida iedala *neatkarīgas ierosmes* un *pašierosmes mašīnās*.

Mašīnās ar neatkarīgu ierosmi (3.32. zīm. a) ierosmes tinumu baro no mašīnas neatkarīgs līdzstrāvas avots, piemēram, akumulatoru baterija, taisngriezis u. tml. Pašierosmes mašīnās ierosmes tinums tiek barots no enkura spailēm, un atkarībā no tā, kā ierosmes tinums saslēgts ar enkura tinumu, izšķir paralēlas, virknes un jauktas ierosmes mašīnas. Mazjaudas mašīnas dažreiz izgatavo ar pastāvīgo magnētu poliem bez ierosmes tinuma. Pēc savām īpašībām tās tuvas neatkarīgas ierosmes mašīnām.



3.32. zīm. Dažādu ierosmes veidu līdzstrāvas mašīnu principiālās shēmas:

a — mašīna ar neatkarīgu ierosmi, b — mašīna ar paralēlu ierosmi, c — mašīna ar virknes ierosmi, d — mašīna ar jauktu ierosmi (bultlīnijas, kas attēlotas ar nepārtrauktu līniju, norāda strāvu virzienus generatora režīmā, ar svītrlīniju — dzinēja režīmā).

Paralēlas ierosmes mašīnā ierosmes tinums pieslēgts paralēli enkura tinumam (3.32. zīm. *b*). Ierosmes tinuma spoles izgatavotas ar lielu vijumu skaitu no maza šķērsriezuma vada. Tāpēc ierosmes tinumam ir relatīvi liela pretestība un ierosmes strāva I_f normālā darba režīmā daudzārt mazāka par enkura strāvu ($I_f = (0,01 \dots 0,05) I_a$). Paralēlas ierosmes ģeneratorā enkura strāva

$$I_a = I + I_f, \quad (3.91)$$

bet dzinējā

$$I_a = I - I_f, \quad (3.92)$$

kur I — slodzes strāva.

Virtnes ierosmes mašīnā ierosmes tinums slēgts virknē ar enkura tinumu (3.32. zīm. *c*). Tā kā visa enkura strāva plūst arī ierosmes tinumā, tad

$$I_a = I_f = I, \quad (3.93)$$

un tāpēc ierosmes tinuma spoles izgatavotas no liela šķērsriezuma vada ar mazu vijumu skaitu. Ierosmes tinumam ir relatīvi maza pretestība, un normālā darba režīmā sprieguma kritums šajā tinumā nepārsniedz $1 \dots 5\%$ no enkura nominālā sprieguma.

Jauktas ierosmes mašīnā ir divi ierosmes tinumi, no kuriem viens savienots virknē ar enkura tinumu, bet otrs pievienots tam paralēli (3.32. zīm. *d*). Abus ierosmes tinumus var saslēgt *saskaņotā slēgumā* (tinumi rada vienāda virziena MS) vai *pretslēgumā* (tinumu MS ir pretēji virzieni). Parasti viens no tinumiem ir galvenais, bet otram ir palīgozīme. Var būt arī jauktas ierosmes mašīnas ar neatkarīgas un virtnes ierosmes tinumiem.

Neatkarīgas, paralēlas un jauktas ierosmes mašīnu ierosmes ķēdēs parasti ieslēgts reostats R ierosmes strāvas regulēšanai.

Saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 183—74 līdzstrāvas mašīnu tinumu izvadus apzīmē šādi: enkura tinumam — Я1, Я2; papildpolu tinumam — Д1, Д2; paralēlās ierosmes tinumam — Ш1, Ш2; virtnes ierosmes tinumam — С1, С2; kompensācijas tinumam — К1, К2, pie tam ar ciparu 1 apzīmē spaili «+», ar ciparu 2 — spaili «-».

3.10. LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU JAUDAS ZUDUMI UN LIETDERĪBAS KOEFICIENTS

3.10.1. Jaudas zudumi

Atkarībā no zudumu rašanās veida izšķir elektriskos, magnētiskos un mehāniskos zudumus.

Elektriskie zudumi sastāv no zudumiem tinumos $\Delta P_{e,w}$ un zudumiem suku pārejas kontaktos $\Delta P_{e,s}$:

$$\Delta P_e = \Delta P_{e,w} + \Delta P_{e,s}. \quad (3.94)$$

Elektriskos zudumus jebkurā no līdzstrāvas mašīnas tinumiem aprēķina pēc formulas

$$\Delta P_{e, w} = I^2 R. \quad (3.95)$$

Tā kā tinuma pretestība R ir atkarīga no temperatūras, tad elektriskie zudumi tinumos jāaprēķina atbilstoši tinuma darba temperatūrai, kuru saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 183—74 pieņem 75°C vai 115°C atkarībā no izolācijas klases.

Jaudas zudumus suku kontaktos (uz vienu suku pāri) aprēķina pēc formulas

$$\Delta P_{e, s} = 2 \Delta U_s I, \quad (3.96)$$

kur $2 \Delta U_s$ — sprieguma kritums uz suku pāri (saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 11828—75 oglek-grafīta sukām pieņem, ka $2 \Delta U_s = 2 \text{ V}$, metāla-grafīta sukām —, ka $2 \Delta U_s = 0,6 \text{ V}$).

Magnētiskie zudumi ΔP_{mg} saistīti ar enkura serdes periodisku pārmagnetizēšanu, un tie sastāv no histerēzes un virpuļstrāvu zudumiem. Magnētiskie zudumi ir atkarīgi no magnētiskās indukcijas B un pārmagnetizēšanas frekvences f , un tos aprēķina, izmantojot empirisku formulu

$$\Delta P_{mg} = k_p p_{mg} B^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G, \quad (3.97)$$

kur k_p — koeficients, kas ievēro tehnoloģiskus faktorus;

p_{mg} — īpatnējie zudumi (zudumi uz masas vienību, ja $f = 50 \text{ Hz}$ un $B = 1,0 \text{ T}$);

G — tērauda masa.

Mehāniskos zudumus ΔP_m izraisa berze gultņos, berze starp sukām un kolektoru, enkura berze pret gaisu un ventilācija. Šie zudumi ir atkarīgi no enkura rotācijas frekvences.

Visus iepriekš minētos jaudas zudumus sauc par mašīnas *galvenajiem zudumiem*.

Bez galvenajiem zudumiem līdzstrāvas mašīnā ir arī *papildzudumi* ΔP_p , kuri saistīti ar dažādām sekundārām parādībām enerģijas pārveidošanas procesā. Papildzudumus sastāda zudumi, kurus rada polu uzgaļos enkura zobu izraisītās magnētiskās indukcijas pulsācijas, nevienmērīgs indukcijas sadalījums slogotas mašīnas serdē, virpuļstrāvas enkura tinuma vados (ja tinumi veidoti no liela šķērsgriezuma vadiem) un citi faktori. Precīzi aprēķināt papildzudumus nav iespējams. Tāpēc saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 11828—75 nominālās slodzes režīmā šos zudumus pieņem vienādus ar 1% (mašīnās bez kompensācijas tinuma) un 0,5% (mašīnās ar kompensācijas tinumu) no ģeneratora atdotās vai dzinēja uzņemtās jaudas.

Kopējie zudumi līdzstrāvas mašīnā

$$\Delta P = \Delta P_e + \Delta P_{mg} + \Delta P_m + \Delta P_p \quad (3.98)$$

un atdotā jauda

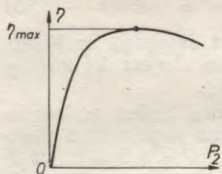
$$P_2 = P_1 - \Delta P. \quad (3.99)$$

3.10.2. Lietderības koeficients

Līdzstrāvas mašīnas lietderības koeficients ir atdotās lietderīgās jaudas P_2 un mašīnas uzņemtās jaudas P_1 attiecība:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.100)$$

3.33. zīmējumā attēlota līdzstrāvas mašīnas lietderības koeficienta atkarība no atdotās jaudas. Mašīnas lietderības koeficients, slodzei pieaugot, sasniedz savu maksimālo vērtību, bet pēc tam samazinās. Šāds līknes raksturs izskaidrojams ar to, ka elektriskie zudumi, kas ir proporcionāli strāvas kvadrātam, palielinās straujāk nekā lietderīgā jauda.



3.33. zīm. Līdzstrāvas mašīnas lietderības koeficienta atkarība no atdotās jaudas.

Vidējas jaudas un lieljaudas līdzstrāvas mašīnām nominālās slodzes režīmā lietderības koeficients $\eta = 0,88 \dots 0,96$, bet mazjaudas mašīnām $\eta = 0,8 \dots 0,87$.

Līdzstrāvas mašīnu lietderības koeficienta eksperimentālai noteikšanai izmanto tiešo un netiešo metodi.

Lietojot *tiešo metodi*, izmēra jaudas P_1 un P_2 un lietderības koeficientu aprēķina no izteiksmes (3.100).

Lietojot *netiešo metodi*, izmēra mašīnas elektrisko jaudu (ģeneratora atdoto jaudu P_2 vai dzinēja uzņemto jaudu P_1) un kopējos jaudas zudumus. Tad no izteiksmēm (3.99) un (3.100) var atrast

Nosakot lietderības koeficientu ar *netiešo metodi*, izmēra mašīnas elektrisko jaudu (ģeneratora atdoto jaudu P_2 vai dzinēja uzņemto jaudu P_1) un kopējos jaudas zudumus. Tad no izteiksmēm (3.99) un (3.100) var atrast

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{UI} \quad (3.101)$$

jeb

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{UI + \Delta P} \quad (3.102)$$

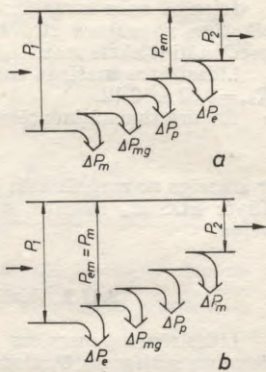
Tā kā ērtāk izmērīt elektrisko jaudu, tad lietderības koeficienta noteikšanai dzinējam izmantojama formula (3.101), bet ģeneratoram — formula (3.102). Bez tam elektrisko jaudu var izmērīt precīzāk nekā mehānisko jaudu, tāpēc, nosakot lietderības koeficientu ar netiešo metodi, iegūst precīzāku rezultātu.

3.10.3. Enerģētiskā diagramma

Enerģijas pārveidošanas procesu līdzstrāvas mašīnā uzskatāmi attēlo enerģētiskā diagramma. Paralēlas ierosmes līdzstrāvas ģenerators un dzinēja enerģētiskās diagrammas attēlotas 3.34. zīmējumā.

Generators enkuram no primārā dzinēja pievada jaudu P_1 . Daļa šīs jaudas tiek patērēta mehānisko zudumu ΔP_m , magnētisko zudumu ΔP_{mg} un papildzudumu ΔP_p segšanai. Atlikusī jaudas daļa pārveidojas elektromagnētiskajā jaudā P_{em} . Daļa no elektromagnētiskās jaudas sedz elektriskos zudumus enkura un ierosmes tinumos (ΔP_e), bet atlikusī jauda ir ģenerators lietderīgā elektriskā jauda P_2 .

Dzinēja režīmā uzņemtā jauda P_1 ir elektriskā jauda. Uz šīs jaudas rēķina tiek segti elektriskie zudumi enkura un ierosmes tinumā (ΔP_e), bet atlikusī jaudas daļa ir elektromagnētiskā jauda, kas pārvēršas mehāniskajā jaudā P_m . Magnētiskie zudumi ΔP_{mg} , papildzudumi ΔP_p un mehāniskie zudumi ΔP_m tiek segti uz mehāniskās jaudas rēķina, bet atlikusī jaudas daļa ir dzinēja lietderīgā mehāniskā jauda P_2 .



3.34. zim. Līdzstrāvas ģenerators (a) un dzinēja (b) enerģētiskā diagramma.

3.11. LĪDZSTRĀVAS ĢENERATORI

3.11.1. Līdzstrāvas ģenerators pamatvienādojumi

Līdzstrāvas ģenerators sprieguma vienādojums ir šāds:

$$U = E_a - I_a R_{a,w} - 2 \Delta U_s, \quad (3.103)$$

kur $R_{a,w}$ — enkura ķēdes pretestība, kas ietver enkura tinuma pretestību un ar enkura tinumu virknē slēgto tinumu (papildpolu, virknes ierosmes, kompensācijas tinumu) pretestības;

$2 \Delta U_s$ — sprieguma kritums uz suku pāri (ogles-grafīta sukām pieņem, ka $2 \Delta U_s = 2$ V, metāla-grafīta sukām —, ka $2 \Delta U_s = 0,6$ V).

Vienkāršības dēļ var ieviest nemainīgu suku kontaktpretestību

$$R_s = \frac{2 \Delta U_s}{I_{a,N}}, \quad (3.104)$$

kur $I_{a,N}$ — enkura nominālā strāva.

Tad vienādojuma (3.103) vietā iegūstam

$$U = E_a - I_a R_a, \quad (3.105)$$

kur $R_a = R_{a,w} + R_s$.

Istenībā suku kontaktpretestība ir mainīgs lielums un tās vērtība atkarīga no enkura strāvas, tomēr pieņēmums $R_s = \text{const}$ aprēķinu precizitāti ietekmē maz.

Līdzstrāvas mašīnās enkura ķēdes pretestība relatīvajās vienībās $R_{a*} = 0,02 \dots 0,12$.

Enkura tinumā inducētais EDS

$$E_a = c_E n \Phi \quad (3.106)$$

ir atkarīgs no magnētiskās plūsmas un tātad arī no ierosmes strāvas. Tāpēc EDS E_a izmaiņa, mašīnu slogojot, ir atkarīga no ierosmes veida.

3.11.2. Neatkarīgas ierosmes ģenerators

Līdzstrāvas ģenerators darbību raksturo četri pamatlielumi: ģenerators spriegums U , slodzes strāva I , ierosmes strāva I_f un enkura rotācijas frekvence n , kuru parasti uztur nemainīgu ($n = n_N = \text{const}$).

Par ģenerators darbības īpašībām spriež pēc tā raksturliņņēm, kuras attēlo sakarības starp minētajiem pamatlielumiem. Līdzstrāvas ģenerators darbību var raksturot ar četrām galvenajām raksturliņņēm: tukšgaitas, slodzes, ārējo un regulēšanas raksturliņņi. Ģenerators raksturliņņes var aprēķināt vai arī noteikt eksperimentāli.

Neatkarīgas ierosmes ģenerators raksturliņņu uzņemšanai var izmantot 3.32. zīmējumā a attēloto shēmu.

Tukšgaitas raksturliņne. Tukšgaitas raksturliņne attēlo sakarību $E_a = f(I_f)$, ja $I = 0$.

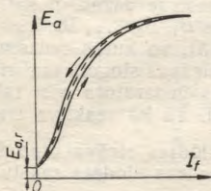
Uzņemot tukšgaitas raksturliņni, slēdzis S (sk. 3.32. zīm. a) atslēgts. Ierosmes strāvu maina ar ierosmes ķēdē ieslēgto reostatu R . Tā kā tukšgaitā ģenerators spriegums $U = E_a$, tad enkura spailēm pieslēgtais voltmētrs rāda ģenerators EDS vērtību.

Tukšgaitas raksturliņni vēlams uzņemt, sākot no maksimālās ierosmes strāvas, kad $E_a = (1,1 \dots 1,25) U_N$. Samazinot ierosmes strāvu, iegūst raksturliņnes lejupejošo zaru (3.35. zīm.). Ja $I_f = 0$, enkura inducētais EDS $E_a, r = (0,02 \dots 0,03) U_N$, kura vērtība ir atkarīga no paliekošās magnētiskās plūsmas. Palielinot ierosmes strāvu, iegūst tukšgaitas raksturliņnes augšupejošo zaru, kurš histerēzes dēļ atrodas nedaudz zemāk par lejupejošo zaru. Praksē par tukšgaitas raksturliņni pieņem vidējo starp abām liņņēm (svītrliņija 3.35. zīmējumā). Tukšgaitas raksturliņne citā mērogā attēlo mašīnas magnetizēšanas liņni $\Phi = f(I_f)$ (sk. 3.21. zīm.). Tāpēc no tukšgaitas raksturliņnes var noteikt piesātinājuma koeficienta k_μ vērtību un spriest par mašīnas magnētiskās sistēmas izmantojuma pakāpi.

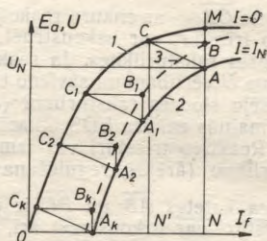
Slodzes raksturliņne un reaktīvais trīsstūris. Slodzes raksturliņne attēlo sakarību $U = f(I_f)$, ja $I = \text{const}$.

Uzņemot slodzes raksturliņni, enkura tinuma spailēm jāpieslēdz regulējams reostats.

Parasti slodzes raksturliņni uzņem strāvai $I = I_N$. Tā kā slogotā ģeneratorā $U < E_a$ (sk. izteiksmi (3.105)), tad slodzes raksturliņne



3.35. zīm. Neatkarīgas ierosmes ģenerators tukšgaitas raksturliķne.



3.36. zīm. Neatkarīgas ierosmes ģenerators slodzes raksturliķne un reaktīvais trīsstūris.

(3.36. zīm. līkne 2) atrodas zemāk par tukšgaitas raksturliķni (līkne 1) sakarā ar sprieguma kritumu enkura ķēdē un enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību. Slodzes raksturliķnes punkts A_k atbilst išslēguma režīmam, kad $U=0$ un išslēguma strāva $I_h=I_N$.

No izteiksmes (3.105), ievērojot, ka neatkarīgas ierosmes ģeneratorā $I=I_a$, enkura EDS

$$E_a = U + IR_a. \quad (3.107)$$

Pieņemsim, ka ģenerators nominālajam spriegumam uz slodzes raksturliķnes 3.36. zīmējumā atbilst punkts A ($U_N = \overline{AN}$). Atliekot no punkta A vertikāli uz augšu nogriezni $\overline{AB} = IR_a$, saskaņā ar vienādojumu (3.107) iegūstam enkura EDS slodzes režīmā $E_a = \overline{BN}$. Tai pašai ierosmes strāvai $I_f = \overline{ON}$ tukšgaitas režīmā atbilst EDS $E_a = \overline{MN}$, jo slogotā mašīnā enkura reakcija magnētisko plūsmu samazina. Velkot horizontālu līniju no punkta B līdz krustpunktam ar tukšgaitas raksturliķni, iegūstam punktu C . Tā kā $\overline{BN} = \overline{CN}$, tad var secināt, ka viena un tā paša EDS inducēšanai slogotā mašīnā ir nepieciešama lielāka ierosmes strāva $I_f = \overline{ON}$ nekā tukšgaitas režīmā $I_{f,0} = \overline{ON'}$. Var uzskatīt, ka ierosmes strāva slogotā mašīnā $I_f = \overline{ON}$ sastāv no divām komponentēm: $I_{f,0} = \overline{ON'}$ un $\Delta I_f = \overline{N'N}$. Ierosmes strāvas komponente $\overline{ON'}$ tukšgaitas režīmā rada plūsmu, kas inducē enkura tinumā EDS E_a , bet komponente $\overline{N'N}$ kompensē enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību slodzes režīmā.

Trīsstūri ABC sauc par līdzstrāvas mašīnas *reaktīvo trīsstūri*. Šī trīsstūra vertikālā katete \overline{AB} ir vienāda ar $I_N R_a$, bet horizontālā

katete \overline{CB} — ar enkura reakcijas MS ierosmes strāvas mērogā. Reaktīvo trīsstūri var uzkonstruēt, ja zināmas ģenerators tukšgaitas un slodzes raksturlieknes. Ja reaktīvo trīsstūri konstruē dažādām sprieguma U vērtībām un savieno trīsstūru virsotnes B_1, B_2, \dots, B_k , iegūst iekšējo slodzes raksturliekni (3.36. zīm. likne 3), no kuras redzams, kā mainās enkura EDS atkarībā no ierosmes strāvas slēgtā mašīnā.

Reaktīvo trīsstūri var izmantot līdzstrāvas ģenerators citu raksturliekņu (ārējās, regulēšanas) konstruēšanai. Tā kā reaktīvā trīsstūra katetes \overline{AB} un \overline{BC} ir proporcionālas slodzes strāvai, tad šo trīsstūri var uzkonstruēt arī, ja zināms tikai viens slodzes raksturlieknes punkts, t. i., išslēguma punkts A_k .

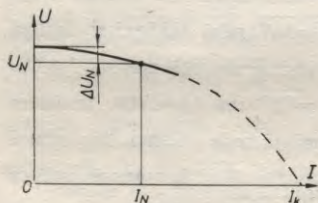
Ārējā raksturliekne. Ārējā raksturliekne (3.37. zīm.) attēlo sakarību $U=f(I)$, ja $I_f = \text{const}$.

Ģenerators sprieguma izmaiņai ir divi cēloņi: slodzei pieaugot, palielinās sprieguma kritums enkura ķēdē (sk. izteiksmi (3.103)) un pastiprinās enkura reakcija, tāpēc samazinās ģenerators magnētiskā plūsma un EDS E_a . Sprieguma U vērtību enkura reakcija jūtami ietekmē tikai tad, ja slodze pārsniedz nominālo. Ģenerators slodzei pieaugot no tukšgaitas līdz nominālajai, spriegums uz enkura spailēm izmainās par ΔU_N . Lielumu

$$\Delta U_N (\%) = \frac{\Delta U_N}{U_N} 100 \quad (3.108)$$

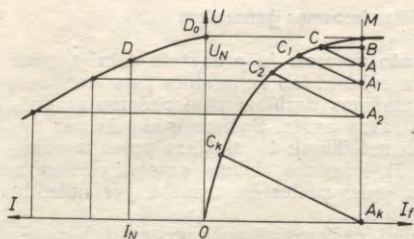
sauc par *sprieguma procentuālo izmaiņu*. Neatkarīgas ierosmes ģeneratorsiem $\Delta U_N (\%) = 5 \dots 15\%$.

Izmantojot tukšgaitas raksturliekni un reaktīvo trīsstūri, ārējo raksturliekni var atrast grafiski (3.38. zīm.). Šim nolūkam novelk vertikālu taisni $\overline{MA_k}$, kas atbilst dotajai ierosmes strāvai $I_f = \text{const}$. Tad nogrieznis $\overline{MA_k} = \overline{D_0O}$ attēlo spriegumu U tukšgaitā, kad $I = 0$, un punkts D_0 ir ārējās raksturlieknes sākuma punkts. Pēc tam konstruē reaktīvo trīsstūri ABC , kas atbilst nominālajai strāvai. Šo trīsstūri novieto tā, lai virsotne C atrastos uz tukšgaitas raksturlieknes, bet katete

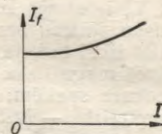


3.37. zīm. Neatkarīgas ierosmes ģenerators ārējā raksturliekne.

\overline{AB} — uz taisnes $\overline{MA_k}$. Tādā gadījumā trīsstūra virsotne A atbilst nominālajam spriegumam U_N . Atliekot pa kreisi no koordinātu sākuma strāvu $I = I_N$, iegūst ārējās raksturlieknes punktu D , kas atbilst nominālajam režīmam. Velkot hipotenūzai \overline{AC} paralēlas taisnes $\overline{A_1C_1}$, $\overline{A_2C_2}, \dots, \overline{A_kC_k}$, var noteikt citus ārējās raksturlieknes punktus, jo punkti A_1, A_2, \dots, A_k norāda spriegumu, bet nogriežņi $\overline{A_1C_1}, \overline{A_2C_2}$



3.38. zim. Neatkarīgas ierosmes ģeneratora ārējās raksturliktnes grafiska noteikšana.



3.39. zim. Neatkarīgas ierosmes ģeneratora regulēšanas raksturliktne.

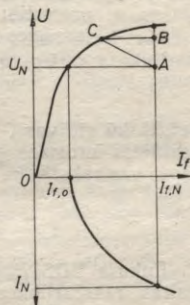
ir proporcionāli enkura strāvai. Diagrammā parādītais nogrieznis $\overline{C_k A_k}$ atbilst īsslēguma režīmam, kad $U=0$ un $I=I_h$. Neatkarīgas ierosmes ģeneratorā $I_h = (5 \dots 15)I_N$.

Regulēšanas raksturliktne. Regulēšanas raksturliktne (3.39. zim.) attēlo sakarību $I_f = f(I)$, ja $U = \text{const}$, t. i., no šīs raksturliktnes redzams, kā jāregulē ģeneratora ierosmes strāva, lai, slodzei pieaugot, spriegums uz enkura spailēm paliktu nemainīgs.

Arī regulēšanas raksturliktnes grafiskai noteikšanai var izmantot tukšgaitas raksturliktni un reaktīvo trīsstūri (3.40. zim.). Pieņemtajai slodzes strāvai (piemēram, $I = I_N$) atbilstošu ierosmes strāvu $I_{f,N}$ nosaka trīsstūra virsotne A uz nominālā sprie-

guma horizontāles, ja katete \overline{CB} ir paralēla abscisu asij un virsotne C atrodas uz tukšgaitas raksturliktnes. Regulēšanas raksturliktnes punktu, ja $I=0$, nosaka ierosmes strāva $I_{f,0}$, kas nodrošina nominālo spriegumu tukšgaitas režīmā. Slodzes strāvām $0 < I < I_N$ atbilstošus regulēšanas raksturliktnes punktus atrod, konstruējot reaktīvos trīsstūrus, kuru malas ir proporcionālas šo strāvu vērtībām.

Neatkarīgas ierosmes ģeneratorus lieto tajos gadījumos, kad mašīnas spriegums nav piemērots ierosmes tinuma barošanai, piemēram, ģeneratoriem ar ļoti augstu vai ļoti zemu nominālo spriegumu, kā arī tad, ja ģeneratora spriegums jāregulē plašā diapazonā. Neatkarīgas ierosmes ģeneratoru trūkums ir tas, ka šiem ģeneratoriem nepieciešams atsevišķs līdzstrāvas avots ierosmes tinuma barošanai.



3.40. zim. Neatkarīgas ierosmes ģeneratora regulēšanas raksturliktnes grafiska noteikšana.

3.11.3. Paralēlas ierosmes ģenerators

Ģenerators pašierosināšanās process. Ja primārais dzinējs griež paralēlas ierosmes ģenerators enkuru, tad ģenerators pats ierosinās, t. i., ierosmes tinums rada mašīnas darbībai nepieciešamo magnētisko plūsmu bez ārēja līdzstrāvas avota. Pašierosināšanās var notikt tikai tad, ja ievēroti šādi noteikumi: 1) mašīnas polos ir palielošā magnētiskā plūsma Φ_r ; 2) ierosmes tinums pareizi pievienots enkura spailēm; 3) ierosmes ķēdes pretestība mazāka par noteiktu pretestību — *kritisko pretestību* R_{cr} .

Ja ievēroti minētie noteikumi, pašierosināšanās process tukšgaitas režīmā noris šādi. Enkura rotējot, tā vadi šķēļ palielošo magnētisko plūsmu Φ_r , tāpēc enkura inducējas neliels EDS $E_{a,r}$, kas ierosmes ķēdē rada nelielu strāvu, kura savukārt rada papildu magnētisko plūsmu. Pašierosināšanās iespējama tikai tad, ja ierosmes tinums pievienots enkura spailēm tā, ka ierosmes strāvas radītā papildu magnētiskā plūsma darbojas vienā virzienā ar palielošo magnētisko plūsmu Φ_r . Tad summārā plūsma rada jau lielāku enkura EDS, un tā rezultātā palielinās ierosmes strāva un pastiprinās polu plūsma. Bet lielāka magnētiskā plūsma rada enkura lielāku EDS un arī lielāku ierosmes strāvu utt. Šis process turpinās tik ilgi, kamēr ģenerators enkura EDS kļūst vienāds ar sprieguma kritumu ierosmes ķēdē.

Robežu, līdz kādai ģenerators ierosinās, var noteikt, izmantojot ierosmes ķēdes sprieguma vienādojumu:

$$U_f = R_f I_f + \frac{d(L_f I_f)}{dt}, \quad (3.109)$$

kur U_f — spriegums uz ierosmes tinuma spailēm;

R_f — ierosmes ķēdes pretestība, kura ietver enkura un ierosmes tinumu pretestības, kā arī ierosmes ķēdē ieslēgtā reostata pretestību;

L_f — ierosmes ķēdes induktivitāte.

Enkura spriegums tukšgaitā

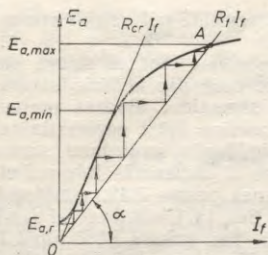
$$U_a = E_a - I_f R_a, \quad (3.110)$$

bet, tā kā strāvas I_f vērtība ir maza, tad praktiski $U_a = E_a$. Bez tam paralēlas ierosmes ģeneratorā $U_a = U_f$, un vienādojuma (3.109) vietā tāpēc var rakstīt, ka

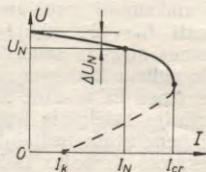
$$E_a = R_f I_f + \frac{d(L_f I_f)}{dt}. \quad (3.111)$$

Enkura EDS E_a atkarībā no ierosmes strāvas mainās pēc tukšgaitas raksturlieknes, bet sprieguma kritums $R_f I_f$ mainās lineāri (3.41. zīm.). Pašierosināšanās process beidzas punktā A , jo šajā punktā $E_a = I_f R_f$ un $d(L_f I_f)/dt = 0$. Krustpunkta A vieta ir atkarīga no taisnes $I_f R_f = f(I_f)$ slīpuma leņķa α , jo $\text{tg } \alpha \sim I_f R_f / I_f = R_f$.

Palielinot ierosmes ķēdes pretestību, tiek sasniegta vērtība, kad taisne $I_f R_f = f(I_f)$ pārvēršas par tukšgaitas raksturlieknes pieskāri.



3.41. zim. Paralēlas ierosmes ģenerators pašierosināšanās.



3.42. zim. Paralēlas ierosmes ģenerators ārējā raksturlikne.

lielinojot pretestību virs šīs vērtības, pašierosināšanās nav iespējama. Ierosmes ķēdes pretestību, kura atbilst pašierosināšanās robežai, sauc par *kritisko pretestību* R_{cr} .

Kritiskās pretestības R_{cr} vērtība ir atkarīga no enkura rotācijas frekvences n . Tā kā $E_a \sim n$, tad, izmainot enkura rotācijas frekvenci, mainās arī tukšgaitas raksturliknes lineārās daļas slīpums. Tāpēc $R_{cr} \sim n$ un šis apstāklis jāievēro, ģeneratoru darbinot ar rotācijas frekvenci, kas mazāka par nominālo.

No 3.41. zīmējuma var secināt, ka paralēlas ierosmes ģenerators spriegumu tukšgaitā ar ierosmes ķēdē ieslēgtu reostatu var regulēt robežās no $E_{a,min}$ līdz $E_{a,max}$. Tādējādi paralēlas ierosmes ģeneratoram sprieguma regulēšanas diapazons ir šaurāks nekā neatkarīgas ierosmes ģeneratoram.

Tukšgaitas raksturlikne. Tukšgaitas raksturlikni $E_a = f(I_f)$, ja $I = 0$, paralēlas ierosmes ģeneratoram uzņem tāpat kā neatkarīgas ierosmes ģeneratoram. Tā kā ierosmes strāva nepārsniedz $1 \dots 5\%$ no slodzes strāvas I , tad paralēlas ierosmes ģenerators raksturliknes praktiski neatšķiras no neatkarīgas ierosmes ģenerators tukšgaitas raksturliknes.

Slodzes raksturlikne. Arī slodzes raksturlikne $U = f(I_f)$, ja $I = \text{const}$, paralēlas ierosmes ģeneratoram praktiski neatšķiras no neatkarīgas ierosmes ģenerators slodzes raksturliknes.

Ārējā raksturlikne. Paralēlas ierosmes ģenerators ārējā raksturlikni $U = f(I)$ uzņem, nemainot pretestību ierosmes ķēdē ($R_f = \text{const}$).

Paralēlas ierosmes ģenerators spriegums U , palielinot slodzi no $I = 0$ līdz $I = I_N$, samazinās straujāk nekā neatkarīgas ierosmes ģeneratorā (3.42. zim.), un tāpēc sprieguma procentuālā izmaiņa ir lielāka ($\Delta U_N (\%) = 10 \dots 20\%$).

Paralēlas ierosmes ģeneratorā sprieguma samazināšanās, slodzei pieaugot, ir atkarīga no trīs faktoriem: 1) sprieguma krituma enkura ķēdē; 2) enkura reakcijas atmagnetizējošās darbības, kuras dēļ samazinās enkura EDS E_a ; 3) ierosmes strāvas samazināšanās pirmo

divu faktoru ietekmē, jo $I_f = U/R_f$, kā rezultātā vēl vairāk samazinās enkura EDS.

Pakāpeniski samazinot slodzes pretestību, slodzes strāva pieaug līdz maksimāli iespējamai vērtībai, ko sauc par *kritisko strāvu* I_{cr} . Parasti $I_{cr} = (2 \dots 2,5) I_N$. Vēl tālāk samazinot slodzes pretestību, ierosmes strāvas samazināšanās dēļ mašīna kļūst nepiesātināta, un tāpēc neliela ierosmes strāvas samazināšanās ievērojami samazina ģenerators EDS. Līdz ar to spriegums U samazinās līdz nullei (ar svitrliņiju attēlotais ārējās raksturlienes posms 3.42. zīmējumā atbilst ģenerators nestabilai darbībai). Bet, ja $U=0$, tad arī $I_f=0$ un ģenerators darbojas īsslēguma režīmā. Tad enkura ķēdē plūst īsslēguma strāva I_h , kura parasti ir mazāka par nominālo strāvu. Šo īsslēguma strāvu uztur paliekošā magnētisma inducētais enkura EDS $E_{a,r}$. Tāpēc paralēlas ierosmes ģeneratoram nav būtams īsslēguma režīms, kas iestājas I un U lēnu izmaiņu rezultātā. Tomēr, ja enkura ārējā ķēdē notiek pēkšņs īsslēgums, enkura strāva īsslēguma procesa sākuma periodā var daudzkārt pārsniegt nominālo strāvu. Šāda strāva būtama kolektoram, jo izraisa spēcīgu dzirksteļošanu, kas var pāriet riņķa uguni.

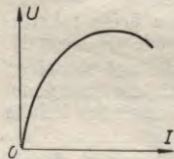
Regulēšanas raksturliene. Paralēlas ierosmes ģenerators regulēšanas raksturliene $I_f = f(I)$, ja $U = \text{const}$, praktiski neatšķiras no neatkarīgas ierosmes ģenerators regulēšanas raksturlienes, jo ierosmes strāvas izraisītais sprieguma kritums enkura tinumā ir neliels.

Paralēlas ierosmes ģenerators ārējo un regulēšanas raksturliņi arī var noteikt grafiski, izmantojot tukšgaitas raksturliņi un reaktīvo trīsstūri.

Paralēlas ierosmes līdzstrāvas ģenerators ir visvairāk izplatīts, jo šim ģeneratoram nav vajadzīgs atsevišķs ierosmes tinuma barošanas avots, bet paralēlas ierosmes ģenerators raksturlienes maz atšķiras no neatkarīgas ierosmes ģenerators raksturlienēm.

3.11.4. Virknes ierosmes ģenerators

Virknes ierosmes ģeneratorā $I_f = I_a = I$, tāpēc šādam ģeneratoram ar normālu slēguma shēmu (sk. 3.32. zīm. c) var uzņemt tikai ārējo raksturliņi $U = f(I)$. Pārējās ģenerators raksturlienes var iegūt, tikai barojot ierosmes tinumu no neatkarīga līdzstrāvas avota.



3.43. zīm. Virknes ierosmes ģenerators ārējā raksturliene.

Ārējās raksturlienes (3.43. zīm.) sākuma daļā magnētiskā plūsma Φ , enkura EDS E_a un spriegums U pieaug lineāri, jo mašīnas magnētiskā sistēma ir nepiesātināta. Tālāk palielinot slodzes strāvu, magnētiskā sistēma sāk piesātināties, tāpēc ģenerators magnētiskās plūsmas pieaugums kļūst aizvien mazāks. Bet, tā kā enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pastiprinās un sprieguma kritums enkura ķēdē palielinās, tad ģenerators spriegums sāk samazināties.

Tā kā virknes ierosmes ģenerators spriegums ir ļoti atkarīgs no slodzes, tad šādi ģeneratori nav piemēroti līdzstrāvas patērētāju lielākās daļas barošanai. Tāpēc virknes ierosmes ģeneratorus lieto ļoti reti, tikai speciālam vajadzībām.

3.11.5. Jauktas ierosmes ģeneratori

Jauktas ierosmes ģeneratoram ir divi (paralēlās un virknes) ierosmes tinumi (sk. 3.32. zīm. *d*), tāpēc šie ģeneratori apvieno paralēlas un virknes ierosmes ģeneratoru īpašības.

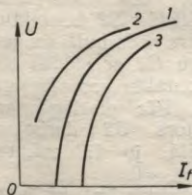
Praksē visbiežāk lieto jauktas ierosmes ģeneratorus, kuriem abi ierosmes tinumi savienoti saskaņotā slēgumā, t. i., tā, ka to MS darbojas vienā virzienā, pie tam kopējā MS lielāko daļu rada paralēlās ierosmes tinums.

Tukšgaitas raksturlikne. Jauktas ierosmes ģenerators tukšgaitas raksturlikne ir tāda pati kā paralēlas ierosmes ģeneratoram, jo tukšgaitā virknes ierosmes tinumā strāva neplūst.

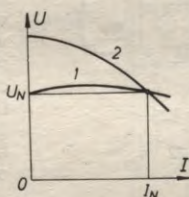
Slodzes raksturliknes. Jauktas ierosmes ģenerators slodzes raksturlikne attēlo enkura sprieguma U atkarību no paralēlās ierosmes tinuma strāvas I_f , ja slodzes strāva $I = \text{const}$.

Virknes ierosmes tinuma darbība jauktas ierosmes ģeneratorā ir līdzvērtīga enkura garenreakcijas magnetizējošai (saskaņotā slēgumā) vai atmagnetizējošai (pretslēgumā) darbībai. Tāpēc saskaņotā slēgumā slodzes raksturlikne (3.44. zīm. likne 2) atrodas augstāk par paralēlas ierosmes ģenerators slodzes raksturlikni (likne 1), bet pretslēgumā — zemāk (likne 3).

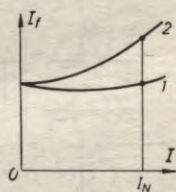
Ārējās raksturliknes. Jauktas ierosmes ģenerators ārējās raksturliknes ir dažādas atkarībā no paralēlās un virknes ierosmes tinumu MS attiecības. Ģeneratoram ar saskaņotu slēgumu virknes ierosmes tinuma vijumu skaits vēlamā izraudzīties tādu, lai šī tinuma MS slogotā mašīnā kompensētu enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību un sprieguma kritumu enkura ķēdē. Šādā veidā var



3.44. zīm. Jauktas un paralēlas ierosmes ģeneratoru slodzes raksturliknes.



3.45. zīm. Jauktas ierosmes ģeneratoru ārējās raksturliknes.



3.46. zīm. Jauktas ierosmes ģeneratoru regulēšanas raksturliknes.

panākt, ka ģenerators spriegums nominālās slodzes režīmā ir vienāds ar tukšgaitas spriegumu (3.45. zīm. līkne 1).

Jauktas ierosmes ģeneratoram ar pretslēgumu var iegūt strauji krītošu ārējo raksturliķni (3.45. zīm. līkne 2). Šāda ārējā raksturliķne nepieciešama, piemēram, metināšanas ģeneratoram īsslēguma strāvas ierobežošanai.

Regulēšanas raksturliķnes. Jauktas ierosmes ģenerators regulēšanas raksturliķnes attēlotas 3.46. zīmējumā, kur līkne 1 atbilst ģeneratoram ar saskaņotu slēgumu, bet līkne 2 — ģeneratoram ar pretslēgumu.

3.11.6. Līdzstrāvas ģeneratoru paralēla darbība

Lielākas jaudas līdzstrāvas elektroiekārtu barošanai atsevišķos gadījumos lietderīgi izmantot vairākus līdzstrāvas ģeneratorus, kuri darbojas paralēli. Atkarībā no pieprasītās jaudas darbinā tādu ģeneratoru skaitu, lai būtu nodrošināta katra ģenerators pilnīga noslodze. Tā, piemēram, minimālās slodzes laikā, atslēdzot zināmu skaitu ģeneratoru, pārējiem ģeneratoriem var nodrošināt tādu darba režīmu, kurā lietderības koeficienta vērtība ir tuva maksimālajai vērtībai. Bez tam paralēla darbība nodrošina nepārtrauktu elektroapgādi kāda ģenerators avārijas gadījumā, kā arī rada profilaktiska remonta iespējas.

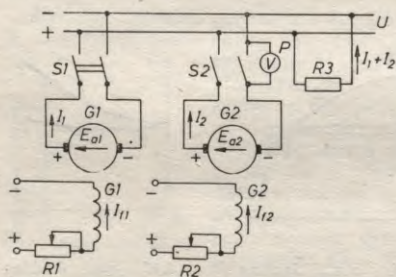
Paralēlai darbībai izmanto neatkarīgas, paralēlas un jauktas ierosmes līdzstrāvas ģeneratorus.

Aplūkosim divu neatkarīgas ierosmes ģeneratoru paralēlu darbību, kuru slēguma shēma parādīta 3.47. zīmējumā.

Pieņemsim, ka ģeneratoram $G1$, kas baro līdzstrāvas tīklu, paralēli jāpieslēdz ģenerators $G2$. Lai pieslēgšanas momentā nerastos lielas strāvas, jāievēro šādi noteikumi: 1) pieslēdzamā ģenerators spaiļu polaritātei jābūt vienādai ar tīkla spaiļu polaritāti; 2) pieslēdzamā ģenerators EDS jābūt vienādam ar tīkla spriegumu ($E_{a2} = U$).

So noteikumu ievērošanu kontrolē ar voltmetru P . Ja ievēroti pieslēgšanas noteikumi, tad, saslēdzot vienu slēdža $S2$ kontaktu, voltmetrs rāda nulli un ģenerators $G2$ ar slēdža $S2$ otru kontaktu var pieslēgt tīklam. Pēc pieslēgšanas ģenerators $G2$ darbojas tukšgaitā, jo tā enkura strāva $I_{a2} = 0$.

Noskaidrosim, kā var izmainīt slodzes sadalījumu starp diviem paralēli strādājošiem ģeneratoriem, lai tīkla spriegums



3.47. zīm. Neatkarīgas ierosmes ģeneratoru paralēlās darbības slēguma shēma.

paliktu nemainīgs. Tā kā paralēlā slēgumā $U_1=U_2=U$, tad no līdzstrāvas ģenerators sprieguma vienādojuma (sk. izteiksmi (3.105)) var atrast, ka

$$I_1 = \frac{E_{a1} - U}{R_{a1}}; \quad I_2 = \frac{E_{a2} - U}{R_{a2}}. \quad (3.112)$$

Bez tam saskaņā ar 3.47. zīmējumu

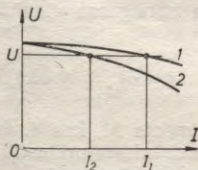
$$U = (I_1 + I_2)R_{R3}, \quad (3.113)$$

kur R_{R3} — slodzes pretestība.

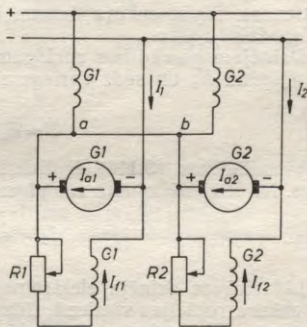
Ja palielina ģenerators $G2$ EDS, tad $E_{a2} > U$ un šī ģenerators enkura ķēdē saskaņā ar izteiksmi (3.112) plūst strāva I_2 . Lai saglabātu $U = \text{const}$, tad jāsamazina strāva I_1 ģeneratorā $G1$ (sk. izteiksmi (3.113)). To var panākt, samazinot EDS E_{a1} . Ģeneratoru EDS var izmainīt divējādi: mainot ierosmes strāvas vai primāro dzinēju rotācijas frekvences. Parasti pirmais no šiem paņēmieniem ir vienkāršāks.

Lai nodrošinātu vienmērīgu slodzes sadalījumu starp paralēli strādājošiem ģeneratoriem, kuru ierosmes strāvas netiek regulētas, nepieciešams, lai to ārējās raksturlienes sakristu.

Pieņemsim, ka divu vienādas jaudas ģeneratoru ārējām raksturlikenēm atbilst līknes 1 un 2 (3.48. zīm.). No šī zīmējuma redzams, ka ģenerators ar «cietāku» ārējo raksturlikeni uzņem lielāku slodzi nekā ģenerators, kura ārējā raksturliene ir «mīkstāka». Lai spriestu par dažādas jaudas paralēli strādājošu ģeneratoru noslodzi, jāsalīdzina šo ģeneratoru raksturlienes relatīvajās vienībās, t. i., $U = f(I_{1*}) = f(I_1/I_{1N})$ un $U = f(I_{2*}) = f(I_2/I_{2N})$. Ja šīs raksturlienes sakrīt, tad slodze starp ģeneratoriem sadalās proporcionāli to nominālajām jaudām.



3.48. zīm. Slodzes sadalījums starp paralēli strādājošiem ģeneratoriem.



3.49. zīm. Jauktas ierosmes ģeneratoru ar saskaņotu slēgumu paralēlā slēguma shēma.

Paralēlas darbības īpatnības paralēlas un jauktas pretslēguma ierosmes ģeneratoros pamatvilcienos ir tādas pašas kā neatkarīgas ierosmes ģeneratoros.

Jauktas ierosmes saskaņota slēguma ģeneratorus paralēli saslēdz pēc 3.49. zīmējumā attēlotās shēmas. Seit abi ģeneratori savienoti ar izlīdzinošo savienojumu ab , jo bez šī savienojuma ģeneratori darbojas nestabili. Ja kādu iemeslu dēļ nedaudz pieaug viena ģeneratora EDS (piemēram, palielinoties rotācijas frekvencei), tad gadījumā, ja nav izlīdzinošā savienojuma, pieaug arī šī ģeneratora strāva, kas savukārt atkal palielina EDS, strāvu utt. Rezultātā viens ģenerators darbojas ar pārslodzi, bet otrs ir nepilnīgi noslogots. Lietojot izlīdzinošo savienojumu, EDS pieaugums rada strāvas pieaugumu arī otra ģeneratora tinumā, un slodze starp ģeneratoriem sadalās vienmērīgi.

3.12. LĪDZSTRĀVAS DZINĒJI

3.12.1. Līdzstrāvas dzinēju pamatvienādojumi

Galvenās magnētiskās plūsmas Φ un enkura strāvas I_a mijiedarbības rezultātā uz dzinēja enkuru darbojas elektromagnētiskais griezes moments

$$M = c_M I_a \Phi. \quad (3.114)$$

Enkuram rotējot, tā tinumā inducējas EDS

$$E_a = c_E n \Phi. \quad (3.115)$$

Dzinēja enkura tinumā inducētā EDS virziens ir pretējs strāvas virzienam. Tāpēc enkura tinuma EDS šajā gadījumā sauc par *pretelektrodzinējspēku*.

Dzinējam pievadītais spriegums U kompensē enkura pretelektrodzinējspēku E_a un sedz sprieguma kritumu enkura ķēdes pretestībā R_a :

$$U = E_a + I_a R_a. \quad (3.116)$$

Vienādojums (3.116) ir līdzstrāvas dzinēja sprieguma vienādojums. No šī vienādojuma var atrast, ka

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}. \quad (3.117)$$

Līdzstrāvas dzinēja elektromagnētiskais moments M , kas darbojas enkura rotācijas virzienā, līdzsvaro darba mehānisma pretestības momentu M_{pr} , zudumu momentu M_o un dinamisko momentu M_{dyn} .

Darba mehānisma *pretestības moments*

$$M_{pr} = \frac{P_2}{\Omega}, \quad (3.118)$$

kur P_2 — darba mehānismam pievadītā jauda (dzinēja atdotā lietderīgā jauda);

Ω — enkura leņķiskā rotācijas frekvence.

Zudumu moments M_o atbilst mehāniskajiem, magnētiskajiem un papildzudumiem, kuri tiek segti uz enkura attīstītās elektromagnētiskās jaudas rēķina:

$$M_o = \frac{\Delta P_m + \Delta P_{mg} + \Delta P_p}{\Omega} \quad (3.119)$$

Dinamiskais moments M_{dyn} rodas dzinēja vārpstas rotācijas frekvences izmaiņas dēļ, un to nosaka pēc formulas

$$M_{dyn} = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (3.120)$$

kur J — visu rotējošo daļu kopējais inerces moments.

Līdzstrāvas dzinēja momentu vienādojums ir šāds:

$$M = M_{pr} + M_o + M_{dyn} \quad (3.121)$$

jeb

$$M = M_{stat} + M_{dyn}, \quad (3.122)$$

kur M_{stat} — statiskais pretestības moments.

Stacionārā režīmā, kad $n = \text{const}$ un tāpēc $M_{dyn} = 0$,

$$M = M_{stat}. \quad (3.123)$$

Parasti moments M_o salīdzinājumā ar M_{pr} ir mazs, un tāpēc var uzskatīt, ka stacionārā režīmā dzinēja elektromagnētiskais moments līdzsvaro darba mehānisma pretestības momentu.

Līdzstrāvas dzinēja sprieguma vienādojumā (3.116) EDS E_a aizstājot ar tā vērtību no izteiksmes (3.115), var atrast, ka dzinēja rotācijas frekvence

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_E \Phi}. \quad (3.124)$$

Izteiksme (3.124) ir līdzstrāvas dzinēja ātruma jeb elektromehāniskās raksturlieknes $n = f(I_a)$ vienādojums.

Izsakot no vienādojuma (3.114) strāvu I_a un ievietojot tās vērtību vienādojumā (3.124), iegūst līdzstrāvas dzinēja mehāniskās raksturlieknes $n = f(M)$ vienādojumu:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E c_M \Phi^2} M. \quad (3.125)$$

Mehāniskās raksturlieknes forma ir atkarīga no tā, kā, mainoties momentam M , izmainās mašīnas magnētiskā plūsma, un tātad atkarīga no dzinēja ierosmes veida.

3.12.2. Līdzstrāvas dzinēju palaišana

Ar līdzstrāvas dzinēja palaišanu saprot tā pieslēgšanu tīkla spriegumam un enkura iegriešanos līdz dzinēja slodzei atbilstoši rotācijas frekvencei. Palaišanas procesam līdzstrāvas dzinēju ekspluatācijā ir liela nozīme; jo no šī procesa norises ir atkarīgi ne tikai paša dzinēja, bet arī elektropiedziņas iekārtas un barošanas tīkla darbības apstākļi.

Palaižot līdzstrāvas dzinēju, jācenšas panākt, lai *palaišanas moments* M_p būtu pietiekami liels un *palaišanas strāva* I_p iespējami maza, kā arī lai palaišanas shēma būtu vienkārša un ekonomiska.

Palaišanas sākuma momentā $n=0$ un tātad arī $E_a=0$. Tāpēc saskaņā ar izteiksmi (3.117)

$$I_p = I_a = \frac{U}{R_a}. \quad (3.126)$$

Līdzstrāvas mašīnu enkura ķēdes pretestība ir ļoti maza ($R_{a*} = 0,02 \dots 0,12$). Tāpēc, ja palaiž dzinēju, tieši pieslēdzot tā enkuru tīkla spriegumam, enkura tinumā plūst nepieļaujami liela palaišanas strāva I_p , kas daudzkārt pārsniedz nominālo strāvu ($I_p = (8 \dots 50)I_N$).

Praksē izmanto šādus līdzstrāvas dzinēju palaišanas paņēmienus: 1) tiešo palaišanu (enkuru tieši pieslēdzot pilnam tīkla spriegumam); 2) palaišanu, izmantojot papildu reostatu enkura ķēdē; 3) palaišanu, pazeminot spriegumu.

Tieši pieslēdzot tīklam, palaiž tikai dzinējus, kuru jauda nepārsniedz dažus kilovatus un $I_p \leq (4 \dots 6)I_N$.

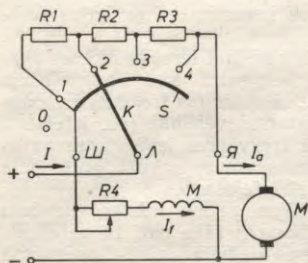
Visbiežāk līdzstrāvas dzinējus palaiž, izmantojot virknē ar enkuru ieslēgtu maināmu pretestību — palaišanas reostatu R_p . Šajā gadījumā saskaņā ar izteiksmēm (3.117) un (3.115)

$$I_p = \frac{U - c_E n \Phi}{R_a + R_p}, \quad (3.127)$$

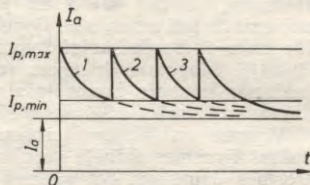
bet palaišanas sākuma momentā, kad $n=0$,

$$I_{p, \max} = \frac{U}{R_a + R_p}. \quad (3.128)$$

3.50. zīmējumā parādīta shēma paralēlas ierosmes dzinēja palaišanai ar *palaišanas reostatu*. Šādam reostatam ir trīs spaiļes Π , \mathfrak{Y} un III un metāla kontaktstienis S , pa kuru slid ar rokturi savienotais kontakts K . Spaiļei Π pievienots līnijas vads, kontaktstieņa S spaiļei III — ierosmes ķēde, bet palaišanas reostata spaiļei \mathfrak{Y} — enkura ķēde. Tā kā ierosmes ķēde ir pievienota nekustīgam kontaktstienim S , tad ierosmes tinums visu laiku ir pievienots pilnam tīkla spriegumam. Tas nepieciešams, lai ierosmes strāvai I_f un magnētiskajai plūsmai Φ būtu maksimālās vērtības, jo tad saskaņā ar izteiksmi (3.114) tiek nodrošināts vislielākais moments. Šī paša iemesla dēļ



3.50. zim. Paralēlas ierosmes dzinēja palaišanas shēma.



3.51. zim. Strāvas izmaiņa līdzstrāvas dzinēja palaišanas procesa laikā.

ierosmes ķēdes reostata R_4 pretestībai palaišanas brīdī jābūt izslēgtai ($R_{R4}=0$).

Palaišanas reostats sastāv no vairākām pakāpēm, kuras, pārvietojot rokturi, pakāpeniski izslēdz. Kad reostata rokturis atrodas uz nullkontakta 0 , dzinējs ir atslēgts no tikla, bet ierosmes ķēde paliek ieslēgta virknē ar palaišanas reostatu un enkura ķēdi. Šādos apstākļos ierosmes strāva samazinās līdz nullei nevis momentāni, bet lēnām, un ierosmes tinumā nevar inducēties liels pašindukcijas EDS. Liels pašindukcijas EDS var būt bīstams tinuma izolācijai un izraisīt kontaktu apdegšanu.

3.51. zīmējumā ilustrēts dzinēja palaišanas process, izmantojot palaišanas reostatu ar trīs pakāpēm R_1 , R_2 un R_3 . Palaišanas reostats paredzēts īslaicīgam darba režīmam, un pilno palaišanas reostata pretestību $R_p = R_{R1} + R_{R2} + R_{R3}$ izvēlas tādu, lai palaišanas strāvas maksimālā vērtība $I_{p,max} = (1,5 \dots 2,5)I_N$, bet tās minimālā vērtība — $I_{p,min} = (1,0 \dots 1,25)I_N$.

Palaišanas strāvas izmaiņu var noskaidrot, izmantojot izteiksmes (3.127) un (3.128). Palaišanas sākumā ($t=0$) šī strāva sasniedz maksimālo vērtību $I_{p,max} = U / (R_a + R_{R1} + R_{R2} + R_{R3})$. Pēc tam enkurs sāk griezties un saskaņā ar izteiksmi (3.127) strāva samazinās atbilstoši liknei 1. Kad $I_p = I_{p,min}$, izslēdz palaišanas reostata pirmo pakāpi R_1 , un slodzes strāvai lēcieneidīgi pieaugot līdz maksimālajai vērtībai, dzinēja darbība tālāk noris raksturliknes 2 režīmā. Izslēdzot reostata otro pakāpi R_2 , darbība noris raksturliknes 3 režīmā, bet, kad izslēgta reostata pēdējā pakāpe R_3 , slodzes strāva samazinās līdz stacionārā režīma strāvas vērtībai I_a .

Palaišanas strāvu var ierobežot arī, palaišanas laikā enkura tinumu barojot no atsevišķa līdzstrāvas avota, piemēram, generatora ar regulējamu spriegumu, vadāma taisngrieža. Ierosmes tinums šajā gadījumā jābaro no atsevišķa avota, lai nodrošinātu maksimālo magnētisko plūsmu Φ un tātad pietiekami lielu palaišanas momentu. Šādu paņēmieni visbiežāk lieto lieljaudas dzinēju palaišanai, pie tam

regulējamo sprieguma avotu viēnlaikus izmanto arī rotācijas frekvences regulēšanai (sk. 3.12.3.).

Palaižot un darbinot dzinēju, nedrīkst pieļaut ierosmes ķēdes pārtraukumu, jo tad $\Phi=0$ un dzinējs tukšgaitā, kad bremzējošais moments ir ļoti mazs, sāk «joņot», t. i., tā rotācijas frekvence pieaug līdz enkura mehāniskajai izturībai bīstamai vērtībai (sk. izteiksmi (3.124)). Slogotam dzinējam rotācijas frekvences ievērojamu palielināšanos ierobežo bremzējošais moments, tomēr enkurā plūst liela strāva, kas izraisa suku pastiprinātu dzirksteļošanu.

Virtnes un jauktas ierosmes dzinējus palaiž līdzīgi, pie tam jauktas ierosmes dzinēja palaišanas shēma ir tāda pati kā paralēlas ierosmes dzinējam, bet virtnes ierosmes dzinēja palaišanas shēmā netiek izmantota palaišanas reostata spaiļe III.

Lai mainītu līdzstrāvas dzinēja enkura griešanās virzienu, jāmaina strāvas virziens vai nu enkura, vai ierosmes tinumā.

3.12.3. Līdzstrāvas dzinēju rotācijas frekvences regulēšana

Ļoti svarīga līdzstrāvas dzinēju priekšrocība ir iespēja ekonomiski un plašā diapazonā regulēt to rotācijas frekvenci.

No izteiksmēm (3.124) un (3.125) izriet secinājums, ka līdzstrāvas dzinēju rotācijas frekvenci var regulēt trejādi: 1) mainot enkura ķēdes pretestību (enkuram virknē ieslēdzot regulēšanas reostatu ar pretestību R_p); 2) mainot magnētisko plūsmu Φ ; 3) mainot dzinēja enkuram pievadīto spriegumu U .

Ja enkura ķēdē ieslēgts regulēšanas reostats, tad saskaņā ar izteiksmi (3.124)

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_p)}{c_E \Phi} \quad (3.129)$$

Redzams, ka, palielinot regulēšanas reostata pretestību R_p , dzinēja rotācijas frekvenci var tikai samazināt. Šis paņēmieni ir visai neekonomiski, jo nepieciešams relatīvi lielas jaudas reostats, kurš jāparedz ilgstošam darbam, un regulēšana ir saistīta ar ievērojamiem jaudas zudumiem regulēšanas reostata pretestībā, kurā plūst visa enkura strāva. Tā, piemēram, ja rotācijas frekvenci samazina divas reizes, tad regulēšanas reostata pretestībā R_p jaudas zudumi ir apmēram puse no dzinējam pievadītās jaudas. Bez tam rotācijas frekvences regulēšanas diapazons ir nenoteikts un atkarīgs no dzinēja slodzes: jo mazāka slodze, jo mazāks regulēšanas diapazons. Tāpēc rotācijas frekvences regulēšanu, izmainot regulēšanas reostata pretestību, izmanto galvenokārt nelielas jaudas dzinējiem, bet lielākas jaudas dzinējiem tikai tad, ja rotācijas frekvence jāregulē īslaicīgi.

Ekonomiskākais, vienkāršākais un tāpēc izplatītākais rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni ir magnētiskās plūsmas Φ , respektīvi, ierosmes strāvas I_f , maiņa. Samazinot plūsmu, saskaņā ar izteiksmēm (3.124) un (3.125) rotācijas frekvence palielinās, bet, palielinot plūsmu, norise ir pretēja. Mainot ierosmes strāvu, dzinēja

rotācijas frekvenci salīdzinājumā ar nominālo var tikai palielināt, jo nominālā režīmā dzinējs paredzēts darbam ar maksimālo plūsmu un maksimālo ierosmes strāvu. Ja rotācijas frekvenci regulē, mainot ierosmes strāvu, saglabājas pietiekami augsts dzinēja lietderības koeficients, jo ierosmes jauda salīdzinājumā ar visa dzinēja jaudu ir neliela, bet, samazinot ierosmes strāvu, šī jauda vēl samazinās.

Jāievēro, ka, samazinot magnētisko plūsmu dzinējam, kurš slogots ar nemainīgu momentu, saskaņā ar izteiksmi (3.114) palielinās enkura strāva un atsevišķos gadījumos tā var pārsniegt nominālo vērtību. Tāpēc, samazinot plūsmu, šajos gadījumos atbilstoši jāsamazina arī moments uz vārpstas. Rotācijas frekvences regulēšanas diapazonu ierobežo galvenokārt komutācijas apstākļi, jo, ievērojami palielinot rotācijas frekvenci, palielinās suku vibrācijas, pieaug reaktīvais EDS, spriegums starp kolektora plāksnītēm un tāpēc pasliktinās komutācija. Vispārīga lietojuma līdzstrāvas dzinējiem rotācijas frekvences regulēšanas diapazons (maksimālās rotācijas frekvences attiecība pret minimālo) parasti ir 2:1, bet speciālajiem — 5:1 vai pat 8:1.

Mainot dzinēja enkuram pievadīto spriegumu, rotācijas frekvenci var palielināt vai samazināt (sk. izteiksmi (3.124)). Tomēr šo paņēmieni izmanto galvenokārt tikai rotācijas frekvences samazināšanai, jo dzinēja darbība, ja $U > U_N$, parasti nav pieļaujama komutācijas apstākļu dēļ.

Ja rotācijas frekvenci regulē, mainot spriegumu, dzinēja lietderības koeficients praktiski neizmainās, un tas ir pietiekami augsts. Šī regulēšanas paņēmiena trūkums ir tas, ka nepieciešams atsevišķs līdzsprieguma avots ar regulējamu spriegumu, kas palielina iekārtas izmaksas.

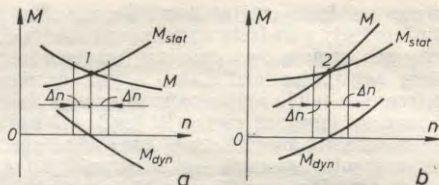
3.12.4. Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte

Par līdzstrāvas dzinēja stabilitāti sauc tā spēju automātiski atjaunot stacionāro režīmu, ja šis režīms īslaicīgas iedarbes rezultātā tiek izjaukts.

Līdzstrāvas dzinēja stabilitāti nosaka dzinēja griezes momenta M un darbināmā mehānisma prettestības momenta M_{stat} atkarība no rotācijas frekvences n , t. i., raksturliķnes $M=f(n)$ un $M_{stat}=f(n)$.

3.52. zīmējumā attēlotas diviem raksturīgiem dzinēja darba režīmiem atbilstošās raksturliķnes. Dzinējam darbojoties stacionārā režīmā, tā elektromagnētiskais moments līdzsvaro statisko prettestības momentu ($M=M_{stat}$), un tāpēc enkurs rotē ar nemainīgu frekvenci ($n=const$). Šādam režīmam 3.52. zīmējumā atbilst raksturliķņu $M=f(n)$ un $M_{stat}=f(n)$ krustpunkti 1 un 2.

Pieņemsim, ka dzinēja un darba mehānisma raksturliķnes atbilst 3.52. zīmējumā a attēlotajām liknēm. Ja šajā gadījumā kaut kādas iedarbes rezultātā rotācijas frekvence palielinās par lielumu Δn , tad statistiskais moments kļūst lielāks par elektromagnētisko griezes



3.52. zim. Līdzstrāvas dzinēja stabila (a) un nestabila (b) darbība.

momentu ($M_{stat} > M$) un saskaņā ar izteiksmi (3.122) uz dzinēja enkuru darbojas bremsējošs dinamiskais moments $M_{dyn} = M - M_{stat} < 0$. Si bremsējošā momenta ietekmē enkura rotācijas frekvences samazinās līdz brīdim, kamēr atkal iestājas momentu līdzsvars punktā 1. Ja dzinējam, strādājot stacionārā režīmā punktā 1, rotācijas frekvence samazinās par lielumu Δn , tad $M > M_{stat}$, uz dzinēja enkuru darbojas dzenošs dinamiskais moments $M_{dyn} = M - M_{stat} > 0$, un enkurs sāk rotēt ātrāk, līdz abi momenti punktā 1 līdzsvarojas. Tādējādi aplūkojamā gadījumā dzinēja darbība ir stabila.

Ja dzinēja un darba mehānisma raksturlieknes atbilst 3.52. zīmējumā b attēlotajām liknēm, tad dzinēja darbība ir nestabila. Tā, piemēram, ja dzinējs darbojas stacionārā režīmā punktā 2 un tā rotācijas frekvence n palielinās par lielumu Δn , tad $M > M_{stat}$, $M_{dyn} > 0$ un tāpēc rotācijas frekvence pieaug vēl vairāk. Bet, pieaugot rotācijas frekvencei, vienlaikus palielinās M_{dyn} , tas savukārt izraisa tālāku rotācijas frekvences pieaugumu utt. Ja dzinējam, strādājot punktā 2, rotācijas frekvence n samazinās par lielumu Δn , tad $M < M_{stat}$, $M_{dyn} < 0$, enkura rotācijas frekvence pakāpeniski samazinās, un dzinējs apstājas. Tātad šādos apstākļos dzinēja darbība ir nestabila.

No teiktā var secināt, ka dzinēja stabila darbība ir iespējama, ja ievērots nosacījums

$$\left| \frac{dM}{dn} < \frac{dM_{stat}}{dn} \right. \quad (3.130)$$

jeb

$$\left| \frac{dM_{dyn}}{dn} < 0. \right. \quad (3.131)$$

Visbiežāk dzinēja nestabila darbība iespējama tad, ja tā mehāniskā raksturliekne $M = f(n)$ vai $n = f(M)$ ir tāda, ka, pieaugot momentam, vienlaikus pieaug rotācijas frekvence (vai, samazinoties momentam, samazinās rotācijas frekvence). Ja, piemēram, dzinējs ar šādu raksturliekni darbina mehānismu, kura $M_{stat} = f(n) = \text{const}$, tad dzinēja darbība ir nestabila.

3.12.5. Paralēlas ierosmes dzinējs

Mehāniskās raksturliknes. Paralēlas ierosmes dzinēja mehāniskās raksturliknes vienādojums ir šāds (sk. 13.12.1.):

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E c_M \Phi^2} M = n_o + \Delta n. \quad (3.132)$$

Šī vienādojuma pirmais loceklis ir ideālās tukšgaitas rotācijas frekvence n_o , bet otrais loceklis raksturo rotācijas frekvences izmaiņu Δn .

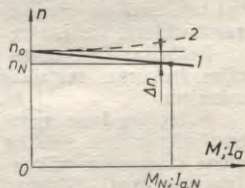
Dzinēju slogojot, pieaug Δn un rotācijas frekvence samazinās. Ja neievēro enkura reakcijas ietekmi, tad magnētiskā plūsma $\Phi = \text{const}$, un dzinēja mehāniskā raksturlikne (3.53. zīm. raksturlikne 1) ir nedaudz krītoša taisne. Šādu raksturlikni sauc par «cietu». Istenībā enkura reakcijas ietekmē slogotā dzinējā magnētiskā plūsma nedaudz samazinās. Šī iemesla dēļ raksturlikne atrodas augstāk par raksturlikni, kas atbilst pilnai plūsmai. Līdzstrāvas dzinējos ar paaugstinātu elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi magnētiskā sistēma ir stipri piesātināta un tāpēc enkura reakcijas ietekme var būt tik liela, ka, slogojot dzinēju, rotācijas frekvence pieaug (3.53. zīm. likne 2). Šāda mehāniskā raksturlikne nav pieļaujama no dzinēja stabilitātes viedokļa. Tāpēc šādos gadījumos dzinējā izveido nelielu virknes ierosmes tinumu, ko sauc par stabilizējošo tinumu. Virknes ierosmes tinumu slēdz saskaņoti ar paralēlas ierosmes tinumu, un tā MS nepārsniedz 10% no paralēlas ierosmes tinuma MS. Virknes ierosmes tinums pilnīgi vai daļēji kompensē enkura reakcijas izraisīto magnētiskās plūsmas samazināšanos un nodrošina nedaudz krītošu mehānisko raksturlikni. Neskatoties uz to, ka dzinējs ar stabilizējošo virknes ierosmes tinumu būtībā ir jauktas ierosmes dzinējs, to tomēr sauc par paralēlas ierosmes dzinēju.

Reālās tukšgaitas rotācijas frekvence n'_o sakarā ar jaudas zudumiem ir mazāka par ideālās tukšgaitas rotācijas frekvenci n_o , jo ideālā tukšgaitā $\Delta n = 0$, bet reālā tukšgaitā $\Delta n = R_a M_o / (c_E c_M \Phi^2)$.

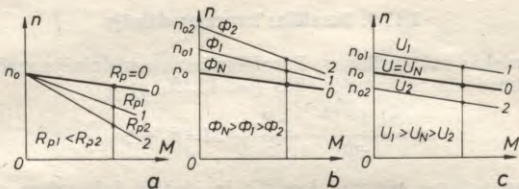
Dzinēja mehānisko raksturlikni, kas atbilst dzinēja darbībai, ja $U = U_N$ un enkura un ierosmes ķēdē nav papildu regulēšanas reostatu, sauc par *dabisko raksturlikni* (3.54. zīm. raksturliknes 0).

Tā kā paralēlas ierosmes dzinēja mehāniskā raksturlikne ir taisne, to var uzkonstruēt, ja zināmi divi šīs taisnes punkti: $M=0$, $n=n_o$ un $M=M_N$, $n=n_N$. Lielumus M_N un n_N var iegūt no dzinēja pases datiem, bet n_o aprēķināt no sakarības

$$\frac{n_o}{n_N} = \frac{U_N}{U_N - I_a, N R_a}. \quad (3.133)$$



3.53. zīm. Paralēlas ierosmes dzinēja mehāniskās raksturliknes.



3.54. zīm. Mehāniskās raksturliktnes paralēlas ierosmes dzinējam:

a — ar dažādām enkura ķēdes pretestībām, *b* — ar dažādu magnētisko plūsmu, *c* — ar dažādu enkura spriegumu.

Paralēlas ierosmes dzinējiem, pārejot no tukšgaitas uz nominālo slodzi, Δn nepārsniedz 2...8% no nominālās rotācijas frekvences n_N .

Tā kā paralēlas ierosmes dzinējā magnētiskā plūsma $\Phi \approx \text{const}$, tad saskaņā ar izteiksmi (3.114) $M \sim I_a$, t. i., dzinēja mehāniskā raksturliktne $n = f(M)$ citā mērogā attēlo ātruma jeb elektromehānisko raksturliktni $n = f(I_a)$.

Ja enkura ķēdē ieslēdz papildu regulēšanas reostatu ar pretestību R_p , tad dzinēja darbība pāriet kādas *mākslīgās raksturliktnes* režīmā (3.54. zīm. *a* raksturliktnes 1 un 2). Sajā gadījumā saskaņā ar izteiksmi (3.132) $\Delta n = (R_a + R_p)M / (c_E c_M \Phi^2)$. Tapēc, jo lielāka ieslēgtās papildpretestības vērtība, jo straujāk, pieaugot slodzei, samazinās rotācijas frekvence (raksturliktne «mikstāka»). Dažādām pretestības R_p vērtībām atbilstošās raksturliktnes krustojas vienā punktā $n = n_0$, jo ideālās tukšgaitas rotācijas frekvence saskaņā ar izteiksmi (3.132) nav atkarīga no šīs pretestības vērtības.

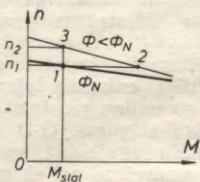
Samazinot magnētisko plūsmu Φ , palielinās ideālās tukšgaitas rotācijas frekvence n_0 un nedaudz palielinās raksturliktnes slīpums (3.54. zīm. *b*), jo saskaņā ar izteiksmi (3.132) $n_0 \sim 1/\Phi$, bet $\Delta n \sim 1/\Phi^2$.

Ja izmaina enkuram pievadīto spriegumu, saglabājot nemainīgu ierosmes tinumam pievadīto spriegumu, tad saskaņā ar izteiksmi (3.132) izmainās dzinēja ideālās tukšgaitas rotācijas frekvence n_0 , bet raksturliktņu slīpums nemainās, un tās atrodas paralēli dabiskajai raksturliktnei (3.54. zīm. *c*).

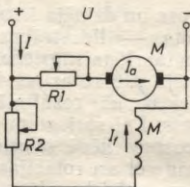
Rotācijas frekvences regulēšana. Paralēlas ierosmes dzinēja rotācijas frekvenci regulē ar iepriekš (sk. 3.12.3.) aplūkotajiem paņēmieniem.

Rotācijas frekvences maiņa, izmantojot jebkuru no regulēšanas paņēmieniem, ir saistīta ar pārejas procesu, kura laikā dzinējs no viena stacionāra režīma ($n = n_1 = \text{const}$) pāriet citā stacionārā režīmā ($n = n_2 = \text{const}$). Šis process paskaidrots 3.55. zīmējumā, kad rotācijas frekvenci regulē, mainot magnētisko plūsmu.

Pieņemsim, ka dzinējs strādā ar nemainīgu slodzi ($M_{stat} = \text{const}$), kas atbilst dabiskās raksturliktnes punktam 1. Samazinot plūsmu,



3.55. zīm. Paralēlas ierosmes dzinēja rotācijas frekvences regulēšana, mainot magnētisko plūsmu.



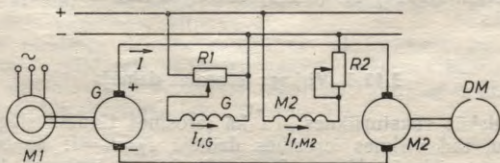
3.56. zīm. Paralēlas ierosmes dzinēja rotācijas frekvences regulēšanas shēma.

samazinās EDS un saskaņā ar izteiksmi (3.117) palielinās enkura strāva. Strāvas pieaugums ir lielāks nekā atbilstošās plūsmas samazinājums, un tāpēc dzinēja moments palielinās $M > M_{stat}$ (makslīgās raksturlienes punkts 2). Dinamiskā momenta $M_{dyn} = M - M_{stat}$ ietekmē enkurs paātrinās līdz jaunam stabila darba punktam 3, kurā iestājas momentu līdzsvars ($M = M_{stat}$). Līdzīgi noris ātruma izmaiņas process, ja rotācijas frekvenci regulē ar citiem paņēmieniem.

Ja rotācijas frekvenci regulē, izmantojot enkura ķēdē ieslēgtu regulēšanas reostatu $R1$ (3.56. zīm.), tad šī reostata pretestībai R_{R1} jābūt aprēķinātai ilgstošam darba režīmam.

Magnētiskās plūsmas vērtību paralēlas ierosmes dzinējā maina, regulējot ierosmes strāvu ar ierosmes ķēdē ieslēgtu regulēšanas reostatu $R2$ (sk. 3.56. zīm.).

Rotācijas frekvences regulēšanu, mainot enkuram pievadītā sprieguma vērtību, var realizēt ar dažādiem regulējamiem enerģijas pārveidotājiem. Šāds pārveidotājs var būt, piemēram, ģeneratora-dzinēja (G-D) sistēma (3.57. zīm.). G-D sistēmā asinhronais dzinējs $M1$ griež neatkarīgas ierosmes ģeneratoru G (asinhronā dzinēja vietā var būt jebkurš cits dzinējs, arī neelektrisks). Līdzstrāvas dzinēja $M2$ enkurs ir tieši pievienots ģeneratora enkuram bez jebkādiem reostatiem.



3.57. zīm. Ģeneratora-dzinēja sistēma paralēlas ierosmes dzinēja rotācijas frekvences regulēšanai.

Ģenerators un dzinēja ierosmes tinumus baro no neatkarīga līdzstrāvas avota — līdzstrāvas tīkla, atsevišķa līdzstrāvas ģenerators (ierosinātāja), taisngrieža.

Dzinēja M2 rotācijas frekvenci regulē, mainot ģenerators ierosmes strāvu, kā rezultātā izmainās dzinēja enkuram pievadītais spriegums. Lai spriegumu varētu regulēt no nulles, reostats ģenerators ierosmes ķēdē jāieslēdz potenciometra slēgumā. G-D sistēmā iespējama vēl arī rotācijas frekvences papildu regulēšana, samazinot dzinēja magnētisko plūsmu. G-D sistēma nodrošina arī ekonomisku dzinēja palaišanu, jo šajā gadījumā to var palaist ar pazeminātu spriegumu bez palaišanas reostata dzinēja enkura ķēdē.

Praksē lieto dažādas G-D sistēmas modifikācijas, kurās izmanto speciālus ģeneratorus un elektromašīnu pastiprinātājus, kas dod iespēju izveidot automatiskās vadības un regulēšanas sistēmas ar dažādām raksturliedēm.

Pēdējā laikā arvien lielāku nozīmi gūst rotācijas frekvences regulēšana ar vadāmiem taisngriežiem, kuri aizstāj G-D sistēmas asinhrono dzinēju un ģeneratoru. Šāda regulēšana salīdzinājumā ar G-D sistēmu nodrošina augstu lietderības koeficientu, plašu regulēšanas diapazonu, kā arī samazina regulēšanas iekārtas gabarītus un izmaksas, it sevišķi, ja izmanto vadāmus pusvadītāju taisngriežus.

Līdzstrāvas dzinējiem, kuru darbība saistīta ar biežu palaišanu un mainīgu rotācijas frekvenci (piemēram, dzinēji elektrificētā transporta ietaisēs), ļoti efektīva ir sprieguma regulēšana ar impulsu metodi (impulsregulēšana). Impulsregulēšanas būtība ir šāda. Dzinēja enkuru baro no nemainīga sprieguma līdzstrāvas avota ar tiristora starpniecību. Tiristors periodiski pieslēdz un atslēdz spriegumu, tādējādi veicot bezkontakta slēdža funkcijas. Dzinēja rotācijas frekvence šajā gadījumā ir atkarīga no sprieguma vidējās vērtības, kas savukārt ir atkarīga no impulsa un pauzes garumu attiecības. Impulsregulēšanas metodes priekšrocība ir tā, ka, barojot enkuru no līdzstrāvas tīkla, iespējama rotācijas frekvences regulēšana bez papildu reostata enkura ķēdē. Tādējādi samazinās enerģijas zudumi regulēšanas un palaišanas procesa laikā.

Jāatgādina, ka dzinējam pieslēgtā sprieguma izmaiņu 3.56. zīmējumā attēlotajā shēmā rotācijas frekvences regulēšanai praktiski izmantot nevar, jo, mainoties enkura spriegumam, vienlaikus mainās arī ierosmes strāva un tātad arī magnētiskā plūsma. Tāpēc saskaņā ar izteiksmēm (3.124) un (3.125) rotācijas frekvence šajā gadījumā neizmainās.

3.12.6. Virknes ierosmes dzinējs

Mehāniskās raksturliednes. Tā kā ierosmes tinums slēgts virknē ar enkuru, tad virknes ierosmes dzinējā $I_f = I_a = I$. Tāpēc dzinēja galvenā magnētiskā plūsma Φ ir atkarīga no enkura strāvas un mainās reizē ar dzinēja slodzi:

$$\Phi = c_\Phi I_a. \quad (3.134)$$

Proporcionalitātes koeficients c_Φ nelielām un vidējām slodzēm ir praktiski nemainīgs, un tikai lielām slodzēm ($I > (0,8 \dots 0,9)I_N$), kad mašīna ir piesātināta, tas nedaudz samazinās.

Ievērojot sakarību (3.134), izteiksmes (3.114) vietā var rakstīt

$$M = c_M c_\Phi I_a^2 \quad (3.135)$$

jeb

$$M = \frac{c_M}{c_\Phi} \Phi^2. \quad (3.136)$$

Virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturliknes $n = f(M)$ vienādojumu iegūst, ja izteiksmē (3.125) ievieto plūsmu Φ no izteiksmes (3.136). Tad

$$n = \frac{\sqrt{c_M U}}{c_E \sqrt{c_\Phi} \sqrt{M}} - \frac{R_a}{c_E c_\Phi}. \quad (3.137)$$

Saskaņā ar šo vienādojumu virknes ierosmes dzinēja mehāniskā raksturlikne (3.58. zīm.) ir strauji krītoša hiperboliska rakstura likne («mīksta» raksturlikne). Lielām slodzēm (piesātinātam dzinējam, kad $c_\Phi \neq \text{const}$) raksturliknes apakšējā daļa kļūst gandrīz lineāra.

Tā kā tukšgaitā dzinējs slogots ar nelielu strāvu, tad arī magnētiskā plūsma ir ļoti maza. Bet šādos apstākļos, kā tas izriet no izteiksmes (3.125) vai (3.137), dzinējs sāk «joņot», t. i., tā rotācijas frekvence pārsniedz vērtību, kāda pieļaujama no dzinēja mehāniskās izturības viedokļa. Tāpēc virknes ierosmes dzinēju nedrīkst palaist un darbināt tukšgaitā vai ar slodzi, kas mazāka par 20...25% no nominālās.

Virknes ierosmes dzinējā $M \sim I^2$, bet paralēlas ierosmes dzinējā $M \sim I$. Tas nozīmē, ka virknes ierosmes dzinējam ir ievērojami lielāks palaišanas moments nekā paralēlas ierosmes dzinējam ar tādu pašu pieļaujamo palaišanas strāvu. Bez tam virknes ierosmes dzinējs ir mazāk jutīgs pret momenta pārslodzēm, jo, palielinot momentu,

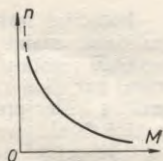
enkura strāva virknes ierosmes dzinējā pieaug proporcionāli \sqrt{M} , bet paralēlas ierosmes dzinējā — proporcionāli M . Šo īpašību dēļ virknes ierosmes dzinējus lieto tur, kur ātri jāiekustina un jāpaātrina lielas masas, piemēram, elektriskajai vilcei (tramvajos, metro, elektrificēto dzelzceļu motorvagonos), celtņos u. c.

Virknes ierosmes dzinēja maksliģās raksturliknes atkarībā no enkura ķēdes papildpretestības, ierosmes vājināšanas koeficienta un sprieguma attēlotas 3.59. zīmējumā. Ierosmes vājināšanas koeficientu nosaka pēc šādas attiecības (sk. 3.60. zīm. b):

$$K_{f,v} = \frac{I_f}{I} = \frac{R_R}{R_f + R_R},$$

kur R_R — šuntējošā reostata pretestība;

R_f — ierosmes tinuma pretestība.

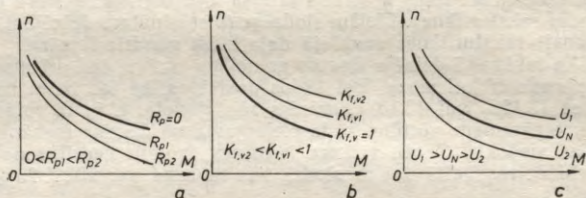


3.58. zīm. Virknes ierosmes dzinēja mehāniskā raksturlikne.

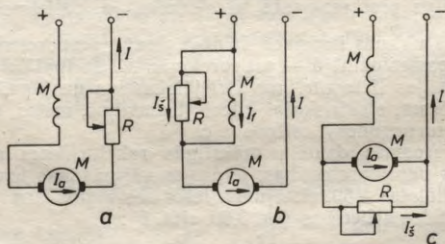
Rotācijas frekvences regulēšana. Dzinēja rotācijas frekvences regulēšanu, mainot enkura ķēdes pretestību, realizē ar enkura ķēdē ieslēgtu reostatu R (3.60. zīm. *a*). Ar šo paņēmieni rotācijas frekvenci var tikai samazināt. Rotācijas frekvences regulēšana, izmainot enkura ķēdes pretestību, nav ekonomiska, jo regulēšanas reostats R patērē daudz enerģijas, tomēr šāda regulēšana ir vienkārša, un tāpēc to lieto celtnu un elektriskās vilces iekārtu islaicīgai rotācijas frekvences regulēšanai.

Virknes ierosmes dzinēja magnētisko plūsmu var mainīt, šuntējot ierosmes tinumu vai enkura tinumu, vai arī samazinot ieslēgto ierosmes tinuma vijumu skaitu. Pēdējā gadījumā ierosmes tinumam jāizveido atzarojumi.

Suntējot ierosmes tinumu ar regulējamu reostatu R (3.60. zīm. *b*), ierosmes strāva un tātad arī galvenā magnētiskā plūsma samazinās, un dzinēja rotācijas frekvence pieaug, t. i., ar šādu regulēšanas paņēmieni rotācijas frekvenci var tikai palielināt. Tā kā regulēšanas reostata pretestība R_R ir maza, jo arī ierosmes tinuma pretestība ir maza, tad regulēšanas paņēmieni ir ekonomiski.



3.59. zīm. Mehāniskās raksturliķnes virknes ierosmes dzinējam:
a — ar dažādām enkura ķēdes pretestībām, *b* — ar dažādiem ierosmes vājināšanas koeficientiem, *c* — ar dažādu enkura spriegumu.

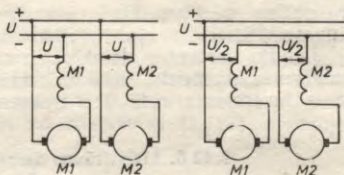


3.60. zīm. Virknes ierosmes dzinēja rotācijas frekvences regulēšanas shēmas:

a — ar papildpretestību enkura ķēdē, *b* — ar šuntētu ierosmes tinumu, *c* — ar šuntētu enkura tinumu.

Šuntējot enkura tinumu ar regulējamu reostatu R (3.60. zīm. c), ierosmes strāva palielinās un dzinēja rotācijas frekvence samazinās. Šāds paņēmieni ir neekonomisks, jo šuntējošā reostatā, kas pieslēgts gandrīz pilnam tikla spriegumam, izdalās lieli jaudas zudumi. Bez tam enkura šuntēšana ir efektīva tikai tad, ja magnētiskā sistēma ir nepiesātināta. Tāpēc praksē šādu regulēšanas paņēmienu lieto ļoti reti.

Dzinēja rotācijas frekvences regulēšanu, mainot enkura spriegumu, var realizēt, slēdzot dzinējus virknē un paralēli vai arī izmantojot barošanai atsevišķu generatoru. Pirmo paņēmienu lieto tad, ja kaut kādu iemeslu dēļ mehānismu piedzen divi vienādas jaudas dzinēji: virknes slēgumā katram dzinējam pievadītais spriegums ir divas reizes mazāks nekā paralēlā slēgumā (3.61. zīm.). Šāds paņēmieni ir izplatīts, piemēram, tramvajos, kur uz katras dzenošās ass uzstādīts atsevišķs dzinējs.



3.61. zīm. Virknes ierosmes dzinēju rotācijas frekvences regulēšana, saslēdzot dzinējus virknē vai paralēli.

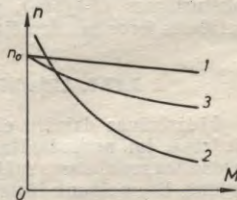
3.12.7. Jauktas ierosmes dzinējs

Jauktas ierosmes dzinējā ir apvienotas virknes un paralēlas ierosmes dzinēju priekšrocības: dzinējam ir liels palaišanas moments, un to var darbināt arī ar mazām slodzēm un tukšgaitā.

Paralēlās un virknes ierosmes tinumus var slēgt gan saskaņotā slēgumā, gan pretslēgumā. Tomēr ierosmes tinumu pretslēgumu lieto ļoti reti, jo šādā slēgumā, slodzei pieaugot, magnētiskā plūsmas samazinās, rotācijas frekvence palielinās un dzinēja darbība var kļūt nestabila.

Ierosmes tinumu saskaņota slēguma gadījumā, pieaugot slodzei, magnētiskā plūsmas palielinās un dzinēja rotācijas frekvence samazinās.

Jauktas ierosmes dzinēja mehāniskās raksturliktnes $n=f(M)$ forma ir atkarīga no abu ierosmes tinumu MS attiecības. Saskaņotā slēgumā virknes ierosmes tinums ir galvenais, un tas dod vismaz 70% no mašīnas kopējā MS. Jauktas ierosmes dzinējam ar saskaņotu slēgumu mehāniskā raksturliktne (3.62. zīm.) atrodas starp paralēlas un virknes ierosmes dzinēju raksturliktnēm. Jauktas ierosmes dzinēja ideālās tukšgaitas rotācijas frekvencei



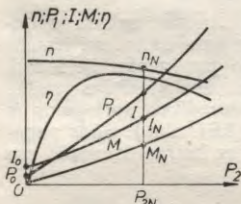
3.62. zīm. Paralēlas (1), virknes (2) un jauktas saskaņota slēguma (3) ierosmes dzinēju mehāniskās raksturliktnes.

ir galīga vērtība, kura atkarīga tikai no paralēlās ierosmes tinuma MS.

Jauktas ierosmes dzinējus izmanto tur, kur nepieciešams liels palaišanas moments, liels paātrinājums palaišanas laikā un iespējama ievērojama rotācijas frekvences izmaiņa, mainoties slodzei.

3.12.8. Līdzstrāvas dzinēju darba raksturlieknes

Darba raksturlieknes dod uzskatāmu priekšstatu par dzinēja darbības īpašībām dažādos režīmos. Tās attēlo dzinēja uzņemtās jaudas P_1 , slodzes strāvas I , rotācijas frekvences n , lietderīgā momenta uz vārpstas (M) un lietderības koeficienta η atkarību no dzinēja atdotās jaudas P_2 , ja dzinējam pievienotais spriegums $U = \text{const}$ un regulēšanas reostatu pretestības ir nemainīgas. Darba raksturlieknes iegūst eksperimentāli vai arī aprēķinot.



3.63. zīm. Paralēlās ierosmes dzinēja darba raksturlieknes.

3.63. zīmējumā attēlotas paralēlās ierosmes dzinēja darba raksturlieknes. Vienlaikus ar atdotās jaudas P_2 pieaugumu palielinās arī moments M . Tā kā, palielinoties P_2 un M , rotācijas frekvence nedaudz samazinās, tad M pieaug nedaudz straujāk nekā P_2 , jo $M \sim P_2/n$. Raksturliekne $I = f(P_2)$ ir līdzīga momenta $M = f(P_2)$ liknei, pie tam I_0 ir tukšgaitas strāva. Proporcionāli strāvai I palielinās arī uzņemtā jauda P_1 . Tukšgaitā ($P_2 = 0$) $\eta = 0$, bet, palielinoties jaudai P_2 , lietderības koeficients sākumā pieaug, bet turpmāk sakarā ar elektrisko zudumu strauju palielināšanos sāk samazināties.

Virknes ierosmes dzinēja liknei $n = f(P_2)$ ir hiperbolisks raksturs, likne $M = f(P_2)$ sākuma daļā ir paraboliska, bet, pieaugot slodzei, mašīnas magnētiskā sistēma piesātinās un griezes moments mainās gandrīz proporcionāli jaudai P_2 . Pārējās virknes ierosmes dzinēja raksturlieknes ($I = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$, $P_1 = f(P_2)$) būtiski neatšķiras no paralēlās ierosmes dzinēja raksturlieknēm.

3.12.9. Līdzstrāvas dzinēju elektriskā bremsēšana

Līdzstrāvas dzinēju elektrisko bremsēšanu plaši izmanto elektro-piedzīnā, lai nodrošinātu mehānismu ātru apturēšanu vai reversu, jo daudzu mehānismu ražīgums ir atkarīgs no bremsēšanas un reversa ilguma. Bremsēšanu izmanto arī tad, kad jāierobežo kāda mehānisma rotācijas frekvence ilgāku laiku, piemēram, celtnim nolaižot kravu.

Līdzstrāvas dzinēju elektriskajai bremsēšanai izmanto trīs paņēmienus: dinamisko, pretslēguma un rekuperatīvo bremsēšanu.

Dinamiskā bremsēšana. Dinamisko bremsēšanu realizē, enkuru atslēdzot no tīkla un pieslēdzot to speciālam bremsēšanas reostatam,

kura pretestība ir R_{br} , bet ierosmes tinumu atstājot pievienotu tīklam. Tā kā ar dzinēja vārpstu saistīto rotējošo daļu kinētiskā enerģija turpina griezt dzinēja enkuru sākotnējā virzienā, tad dzinējs darbojas kā neatkarīgas ierosmes ģenerators. Ražotā elektriskā enerģija tiek patērēta enkura ķēdē, kurā enkura EDS uztur pretēja virziena strāvu. Šīs strāvas vērtību iegūst no izteiksmes (3.117), ievietojot $U=0$:

$$I_a = - \frac{E_a}{R_a + R_{br}}. \quad (3.138)$$

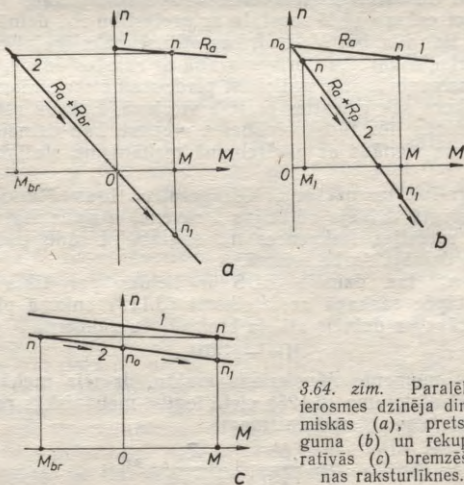
Tāad dzinējs attīsta negatīvu, t. i., bremsējošu, elektromagnētisku momentu, un tā rotācijas frekvence samazinās.

Paralēlas ierosmes dzinējs dinamiskās bremsēšanas režīmā darbojas saskaņā ar dinamiskās bremsēšanas raksturlielni 2 (3.64. zīm. a), kuras vienādojumu iegūst, ja izteiksmē (3.125) ievieto $U=0$ un ievēro pretestību R_{br} :

$$n = - \frac{R_a + R_{br}}{c_{ECM} \Phi^2} M. \quad (3.139)$$

Bremzēšanas raksturlielne ir taisne, kas iet caur koordinātu sākumpunktu.

Ja dzinējs strādā dabiskās raksturlielnes 1 režīmā ar rotācijas frekvenci n , attīstot momentu M , tad, dzinējam pārejot dinamiskās bremsēšanas režīmā, tā darbība noris saskaņā ar raksturlielni 2, un



3.64. zīm. Paralēlas ierosmes dzinēja dinamiskās (a), pretslēguma (b) un rekupe ratīvās (c) bremsēšanas raksturlielnes.

rotācijas frekvence samazinās līdz nullei. Ja piedzenamais mehānisms turpina griezt dzinēja vārpstu, tad enkurs sāk griezties pretējā virzienā un sasniedz nemainīgu rotācijas frekvenci n_1 . Šajā režīmā dzinēja bremsējošais moments līdzsvaro momentu, kas griež dzinēja vārpstu.

Dinamiski bremsējot virknes un jauktas ierosmes dzinējus, tiem jāpārslēdz virknes ierosmes tinuma gali, lai ierosmes strāva un magnētiskā plūsma saglabātu sākotnējo virzienu.

Pretslēguma bremsēšana. Pretslēguma bremsēšanu var realizēt divējādi: 1) ar pārslēgu izmainot dzinēja enkuram pievadītā sprieguma polaritāti un reizē ar to strāvas un elektromagnētiskā momenta M darbības virzienu; 2) ļaujot piedzenamā mehānisma uzkrātajai kinētiskajai enerģijai griezt tiklam pieslēgtā dzinēja enkuru pretēji tā griešanās virzienam dzinēja darba režīmā.

Pirmajā gadījumā enkura EDS virziens nemainās, bet enkura strāvas

$$I_a = \frac{-U - E_a}{R_a + R_p} = - \frac{U + E_a}{R_a + R_p} \quad (3.140)$$

virziens ir pretējs sākotnējam, tāpēc dzinējs attīsta negatīvu (bremzējošu) elektromagnētisko momentu. Dzinēja rotācijas frekvence samazinās līdz nullei, un, ja šai mirklī enkuru neatslēdz no tikla, tas turpina griezties pretējā virzienā. Enkura strāvu bremsēšanas laikā ierobežo enkura ķēdē ieslēgtais reostats.

Otrajā gadījumā bremsēšanas režīms iestājas, ja piedzenamā mehānisma statistiskais moments M_{stat} ir lielāks par dzinēja griezes momentu M . Pieņemsim, ka dzinējs darbojas režīmā, kuram atbilst moments M un rotācijas frekvence n uz raksturlienes 1 (3.64. zīm. b). Ieslēdzot enkura ķēdē reostatu ar pretestību R_p , dzinēja moments samazinās līdz vērtībai $M_1 < M$, kas atbilst mākslīgajai raksturliķnei 2. Tālāk dzinēja darbība noris saskaņā ar raksturliķni 2, tā rotācijas frekvence samazinās līdz nullei un piedzenamā mehānisma momenta ietekmē enkurs sāk griezties pretējā virzienā. Enkura rotācijas frekvence palielinās līdz tādai vērtībai $n_1 = \text{const}$, kad dzinēja bremsējošais moments vienāds ar piedzenamā mehānisma statisko momentu M_{stat} .

Rekuperatīvā bremsēšana. Rekuperatīvo bremsēšanu realizē, ja tiklam pieslēgtā dzinēja rotācijas frekvenci n palielina virs ideālās tukšgaitas rotācijas frekvences n_0 , saglabājot tādu pašu rotācijas virzienu kā dzinēja darba režīmā.

Ja $n > n_0$, tad dzinēja EDS ir lielāks par tikla spriegumu ($E_a > U$), tāpēc saskaņā ar izteiksmi (3.117) enkura plūst pretēja virziena strāva un dzinējs attīsta bremsējošu momentu

$$M = -c_M \Phi I_a. \quad (3.141)$$

Ievērojot momenta M virziena maiņu, dzinēja mehāniskās raksturliķnes vienādojuma (3.125) vietā iegūst mehāniskās raksturliķnes vienādojumu bremsēšanas režīmam:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} + \frac{R_a}{c_E c_M \Phi^2} M. \quad (3.142)$$

Mehāniskā raksturlikne rekuperatīvas bremsēšanas režīmā ir dzinēja režīma mehāniskās raksturliknes turpinājums 2. kvadrantā.

Noteikumu $n > n_0$ var realizēt, ja ar ārēju griezes momentu pārtrina enkura griešanos, vai arī, ja, izmainot U vai Φ , samazina ideālās tukšgaitas rotācijas frekvenci $n_0 = U/c_E \Phi$.

Pieņemsim, ka dzinējs strādā dabiskās raksturliknes I režīmā ar momentu M , kuram atbilst rotācijas frekvence n (3.64. zīm. c). Ja samazina spriegumu, tad dzinēja darbība pāriet maksīgās raksturliknes 2 režīmā, kurā ideālās tukšgaitas rotācijas frekvence $n_0 < n$ un uz enkuru darbojas bremsējošs moments M_{br} . Šī momenta ietekmē dzinēja rotācijas frekvence pakāpeniski samazinās, kamēr iestājas dzinēja elektromagnētiskā un darba mehānisma statiskā momenta līdzsvars punktā, kur $n_1 = \text{const}$.

Izmantojot rekuperatīvo bremsēšanu paralēlas ierosmes dzinējiem, dzinēja slēguma shēma nav jāmaina, bet virknes ierosmes dzinējiem ierosmes tinums ar rezistora starpniecību jāpieslēdz paralēli enkura tinumam.

Rekuperatīvā bremsēšana ir visekonomiskākā, jo rotējošo daļu uzkrātā kinētiskā enerģija, kura bremsēšanas procesa laikā pārveidojas elektriskajā enerģijā, tiek atdota līdzstrāvas tīklam vai citiem patērētājiem. Rekuperatīvo bremsēšanu visbiežāk lieto elektrificētajā transportā.

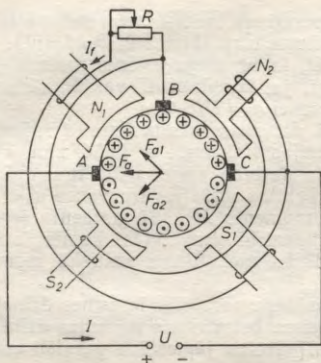
3.13. SPECIĀLAS NOZĪMES LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNAS

3.13.1. Līdzstrāvas metināšanas ģeneratori

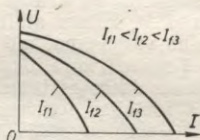
Lai nodrošinātu stabilu elektriskā loka degšanu un ģenerators metināšanas procesā izturētu īsslēguma strāvas, metināšanas ģeneratora ārējai raksturliknei jābūt strauji krītošai. Tad, mainoties elektriskā loka garumam un pretestībai, strāva mainās maz.

Elektriskajai metināšanai lieto speciālas konstrukcijas līdzstrāvas ģeneratoru ar divkāršu polu sistēmu. Tā shēma attēlota 3.65. zīmējumā. Mašīnai ir divi lielāka šķērsriezuma poli N_1, S_1 , kuri ir nepiesātināti, un divi mazāka šķērsriezuma stipri piesātināti poli N_2 un S_2 . Šāds ģenerators būtībā ir divpolu mašīna ar divās daļās sadalītiem poliem. Ģeneratoram ir trīs sukas: galvenās sukas A un C un papildsuka B . Slodzi pieslēdz galvenajām sukām A un C , bet abu polu pāru ierosmes tinumus saslēdz paralēli un pievieno sukām B un C .

Slogojot ģeneratoru, enkura reakcijas MS F_a komponente F_{a1} cenšas samazināt polu N_1 un S_1 magnētisko plūsmu, bet komponente F_{a2} — palielināt polu N_2 un S_2 magnētisko plūsmu. Bet, tā kā poli N_1 un S_1 ir vāji piesātināti, tad, pieaugot enkura strāvai I_a , šo polu plūsma ievērojami samazinās. Turpretī polu N_2 un S_2 magnētiskā plūsma šo polu piesātinājuma dēļ gandrīz nemainās. Tā rezultātā kopējā vienādas polaritātes polu plūsma, palielinoties enkura strāvai, strauji samazinās un līdz ar to strauji samazinās mašīnas spriegums.



3.65. zim. Metināšanas generatora ar divkāršu polu sistēmu shēma.



3.66. zim. Metināšanas generatora ārējās raksturlienes dažādām ierosmes strāvām.

Spriegums starp sukām B un C , kurām pievienoti ierosmes tinumi, gandrīz neizmainās, jo inducētā EDS lielums uz sukām B un C ir atkarīgs no polu N_2 un S_2 nemainīgās plūsmas. Tādējādi tiek nodrošināta nemainīga ierosmes strāva. Metināšanas strāvu var regulēt ar polu N_1 un S_1 ierosmes ķēdē ieslēgto reostatu R .

Metināšanas generatora ārējās raksturlienes dažādām ierosmes strāvām attēlotas 3.66. zīmējumā.

Aplūkotajiem līdzstrāvas metināšanas generatoriem ir vairāki būtiski trūkumi: samērā zems lietderības koeficients, relatīvi liela masa, sarežģīta konstrukcija. Bez tam kolektors un ar to saistītās komutācijas problēmas sarežģī šādu generatoru ekspluatāciju un samazina darba drošumu. Tāpēc pēdējā laikā līdzstrāvas metināšanas generatorus pakāpeniski sāk nomainīt ar bezkontakta barošanas avotiem, kuri sastāv no paaugstinātas frekvences bezkontakta maiņstrāvas generatora (sk. 7.9.2.) un taisngrieža.

3.13.2. Elektromašīnu pastiprinātāji

Automatizētās elektropiedziņas sistēmās nelielu vadības signālu pastiprināšanai līdztekus elektronu, pusvadītāju un magnētiskajiem pastiprinātājiem izmanto elektromašīnu pastiprinātājus.

Kā vienkāršākais elektromašīnu pastiprinātājs darbojas parastais līdzstrāvas neatkarīgas ierosmes ģenerators, kura ierosmes tinumam pievadīto pastiprināmā signāla jaudu P_1 uz ģeneratoram pievadītās mehāniskās enerģijas rēķina pastiprina līdz enkura izejas jaudai P_2 . Tomēr šāda ģenerators pastiprinājuma koeficients

$$k_p = \frac{P_2}{P_1} \quad (3.143)$$

nepārsniedz 20...100 un ir nepietiekams mūsdienu automatikas sistēmās. Tāpēc izveido speciālas mašīnas, kuru darbības pamatā ir

dažādi principi un kuru pastiprinājuma koeficients ir ievērojami lielāks ($k_p = 5000 \dots 20\,000$).

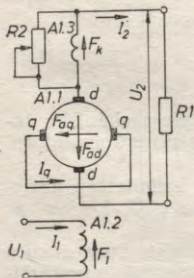
Visvairāk izplatīti ir šķērslauka elektromašīnu pastiprinātāji ar divām pastiprināšanas pakāpēm. Šāda pastiprinātāja principiālā shēma attēlota 3.67. zīmējumā.

Statorā izvietoti vairāki vadības tinumi A1.2, no kuriem zīmējumā parādīts tikai viens, un kompensācijas tinums A1.3. Enkurs ir tāds pats kā normālai līdzstrāvas mašīnai. Uz kolektora novietoti divi suku pāri: šķērssukas $q-q$, kas slēgtas īsi, un garensukas $d-d$, kurām pieslēgta slodzes pretestība R1. Elektromašīnu pastiprinātāja enkuru griež elektrodzinējs (parasti asinhronais).

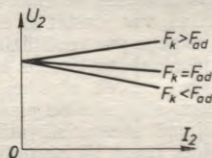
Ja vadības tinumam pievada pastiprināmo signālu, kura spriegums U_1 , tad tinumā plūst strāva I_1 , kuras MS F_1 rada nelielu magnētisko plūsmu polu garenass virzienā. Šī plūsma inducē enkura tinumā nelielu EDS, kura maksimālā vērtība ir uz sukām $q-q$, jo šīs sukas attiecībā pret vadības tinuma magnētisko lauku atrodas uz ģeometriskās neitrāles. Tā kā sukas $q-q$ slēgtas īsi, tad enkura tinumā plūst relatīvi liela strāva I_q , kuras MS F_{aq} izraisa spēcīgu enkura šķērsreakcijas magnētisko lauku. Šis lauks savukārt inducē enkura tinumā relatīvi lielu EDS E_2 ar maksimālo vērtību uz sukām $d-d$, kuras atrodas uz ģeometriskās neitrāles attiecībā pret enkura šķērsreakcijas magnētisko lauku. EDS E_2 uztur ārējā ķēdē strāvu I_2 . Šī strāva rada enkura garenreakcijas MS F_{ad} , kura virziens ir pretējs vadības tinuma MS F_1 virzienam, un cenšas atmagnetizēt mašīnu. Tā kā $F_{ad} \gg F_1$, tad mašīnā jāizveido kompensācijas tinums, kura MS F_k ir vērsts preti F_{ad} . Slodzes režīmā magnētiskā plūsma Φ_d garenass virzienā ir atkarīga no rezultējošā MS

$$F = F_1 - F_{ad} + F_k. \quad (3.144)$$

Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātājs ir divpakāpju pastiprinātājs: pirmās pakāpes ieeja ir vadības tinums un izeja — šķērssukas $q-q$, bet otrās pakāpes ieeja ir šķērssukas un izeja — garensukas $d-d$.



3.67. zīm. Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātāja principiālā shēma.



3.68. zīm. Šķērslauka elektromašīnu pastiprinātāja ārējās raksturliķnes.

Elektromašīnu pastiprinātāja ārējās raksturlieknes (3.68. zīm.) iegūst no sprieguma vienādojuma:

$$U_2 = E_2 - I_2 R_a, \quad (3.145)$$

kur R_a — enkura ķēdes pretestība, kas ietver enkura tinuma, kompensācijas tinuma, papildpolu tinuma pretestības un suku kontaktpretestības.

Inducētais EDS

$$E_2 = c_E n \Phi_d \quad (3.146)$$

un magnētiskā plūsma

$$\Phi_d = \frac{F}{R_{m,d}} = \frac{F_1 - F_{ad} + F_k}{R_{m,d}}, \quad (3.147)$$

kur $R_{m,d}$ — magnētiskā pretestība garenass virzienā.

Ievērojot izteiksmes (3.145) ... (3.147), iegūstam šādu elektro- mašīnu pastiprinātāja ārējās raksturlieknes vienādojumu:

$$U_2 = c_E n \frac{F_1 - F_{ad} + F_k}{R_{m,d}} - I_2 R_a. \quad (3.148)$$

Ja enkura garenreakcija ir pilnīgi kompensēta ($F_k = F_{ad}$), magnētiskā plūsma un tātad arī EDS E_2 , slodzes strāvai I_2 pieaugot, nemainās, bet spriegums U_2 nedaudz samazinās sprieguma krituma $I_2 R_a$ dēļ. Ja enkura garenreakcija nepilnīgi kompensēta ($F_k < F_{ad}$), tad, slodzei pieaugot, magnētiskā plūsma Φ_d , EDS E_2 un spriegums U_2 samazinās. Ja enkura reakcija pārkompensēta ($F_k > F_{ad}$), tad, slodzei pieaugot, E_2 un U_2 palielinās. No darbības stabilitātes viedokļa šāds režīms nav vēlams.

Kompensācijas pakāpi regulē ar šuntējošo reostatu $R2$. Var ierulēt tādu kompensācijas pakāpi (nedaudz pārkompensēta mašīna), kad spriegums U_2 nav atkarīgs no slodzes strāvas I_2 .

Padomju Savienībā šķērslauka elektro- mašīnu pastiprinātājus sērijveidā izgatavo ar jaudu līdz 20 kW.

3.13.3. Ventil- dzinēji

Līdzstrāvas mašīnas kolektoru, kas dzinējā veic mehāniska in- vertora funkcijas, var aizstāt ar tiristoru vai tranzistoru komutatoru. Šādus dzinējus sauc par venti- ldzinējiem.

Venti- ldzinēja enkura tinums kopā ar tiristoru komutatoru novie- tots statorā, bet rotorā atrodas ierosmes tinuma poli, kuriem ar kontaktgredzenu starpniecību pievada līdzstrāvu.

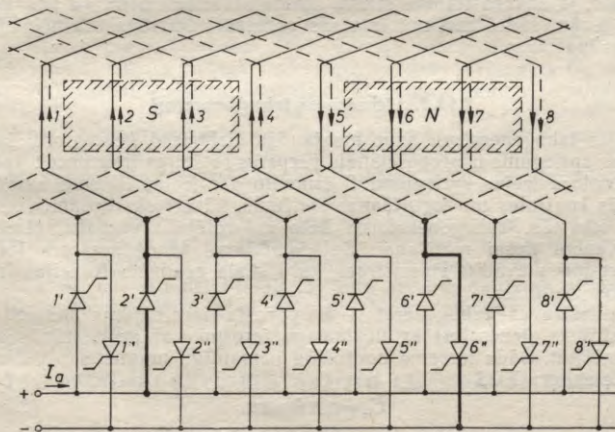
3.69. zīmējumā shematiski attēlots divpolu dzinējs, kura enkura tinums izveidots tāpat kā normālajā līdzstrāvas mašīnā (vienkārši- bas dēļ šeit attēlots tinums ar nelielu sekciju skaitu). Kolektora plāksnišu un suku uzdevumu šeit veic tiristori $1', 1'', 2', 2''$ utt.

Pieņemsim, ka 3.69. zīmējumā attēlotajā rotorā stāvoklī ir atvērti tiristori $2'$ un $6''$. Tad tinumā izveidojas divi paralēlie zari, pa kuriem

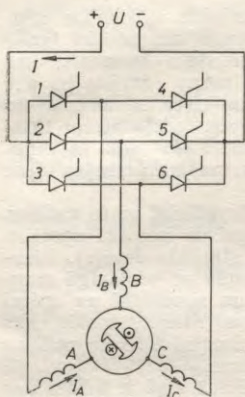
plūst strāva $i_a = I_a/2$, pie tam strāvas virziens visos vados, kas atrodas zem viena pola, ir vienāds. Strāvas un polu magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskais moments, kas rotora polus pārvieto virzienā pa labi. Kad rotors pārvietojies par vienu zoba iedaļu, aizver tiristorus 2' un 6'' un atver tiristorus 3' un 7''. Pēc rotora pārvietošanās vēl par vienu zoba iedaļu aizver tiristorus 3' un 7'' un atver tiristorus 4' un 8'' utt. Šādā veidā saskaņojot rotora pagriešanos ar tiristoru ieslēgšanu, mašīna darbojas tāpat kā parastais līdzstrāvas dzinējs.

Tiristorus atver un aizver noteiktā secībā, padodot uz to vadības elektrodiem attiecīga garuma impulsus. Impulsus izstrādā speciāla ierīce, kas reaģē uz rotora stāvokli (rotora stāvokļa devējs). 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.

Ventilīdzinēji pēc savām īpašībām daudzējādā ziņā ir labāki par parastajiem līdzstrāvas kolektordzinējiem, jo ventilīdzinējos problēmas, kas saistītas ar mehānisku komutāciju un tās uzlabošanu, nepastāv. Tā kā ventilīdzinējā nav kolektora un tos var izveidot bez papildpoliem, šo dzinēju konstrukcija un ekspluatācija ir vienkāršāka. Tomēr ventilīdzinējos ar lielu skaitu sekciju nepieciešams liels skaits tiristoru un sarežģīta ierīce to vadībai. Tāpēc pašreiz galvenokārt lieto dzinējus ar nedaudz vienkāršāku shēmu, kas attēlota



3.69. zim. Ventilīdzinēja principiālā shēma ar līdzstrāvas mašīnas tipa tinumu.



3.70. zim. Ventildzinēja shēma ar trīsfāzu mašīnas tipa tinumu.

3.70. zīmējumā. Šāda dzinēja statorā ir trīs tinumi (fāzes), kas telpā nobīdīti par 120° un izveidoti līdzīgi trīsfāzu maiņstrāvas mašīnu tinumiem (sk. 5.4.). Rotorā izveidoti poli, kuriem ar kontaktgredzenu starpniecību pievada līdzstrāvu.

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, 3, 5, tad $I_A = I/2$, $I_B = -I$, $I_C = I/2$ un statora magnētiskā lauka ass sakrīt ar tinuma A asi. Ja atver tiristorus 1, 5, 6, tad $I_A = I$, $I_B = -I/2$, $I_C = -I/2$, statora lauka ass sakrīt ar tinuma B asi un rotors pagriežas šī tinuma ass virzienā utt. Tiristoru komutatora vadību realizē pēc tāda paša principa kā iepriekš aplūkotajam dzinējam.

Var atzīmēt, ka 3.70. zīmējumā attēlotajā dzinējā tiristoru komutators darbojas kā invertors, kas līdzstrāvu pārveido trīsfāzu maiņstrāvā. Sakarā ar to šis dzinējs būtībā ir trīsfāzu sinhronais dzinējs, ko baro no trīsfāzu invertora. Tomēr, ja enkura tinumā strāvu maina atkarībā no rotora pagriešanās leņķa, šādai mašīnai ir visas parastā līdzstrāvas dzinēja darbības īpatnības.

3.13.4. Līdzstrāvas tahogeneratori

Par tahogeneratoru sauc mazjaudas elektrisko ģeneratoru, kura izejas spriegums ir proporcionāls vārpstas rotācijas frekvencei. Tahogeneratora izejas spriegumu U izmanto par ieejas lielumu automātiskās kontroles un regulēšanas sistēmās, kā arī skaitļošanas tehnikas iekārtās. Tahogeneratorus lieto arī rotējošu vārpstu rotācijas frekvences tiešai mērīšanai. Sajā gadījumā tahogeneratora izejas spriegums pievadīts voltmetram, kura skala graduēta rotācijas frekvences vienībās.

Līdzstrāvas tahogeneratori ir parasta izveidojuma mazjaudas līdzstrāvas ģeneratori ar neatkarīgu ierosmi vai ar pastāvīgajiem magnētiem. Šāda ierosme nodrošina nemainīgu magnētisko plūsmu, tāpēc enkura EDS

$$E_a = c_E n \Phi = cn. \quad (3.149)$$

Vēlams, lai tahogeneratora izejas raksturliktne $U = f(n)$ būtu lineāra. Tomēr enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība un sprieguma kritums enkura ķēdē izkropļo lineāro sakarību starp rotācijas

frekvenci un spriegumu. Lai to novērstu, izvēlas slodzi ar iespējami lielāku pretestību (daudzkārt lielāku par enkura ķēdes pretestību) un lieto sukas ar mazu pārejas pretestību.

Sērijveidā izgatavotie tahogeneratori paredzēti rotācijas frekvences mērīšanai līdz $10\,000\text{ min}^{-1}$. To kļūda (izejas raksturliķnes novirze no lineāras) nepārsniedz $0,5 \dots 3\%$.

3.13.5. Līdzstrāvas servodzinēji

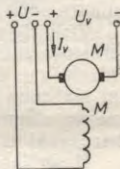
Automātikas un telemehānikas sistēmās, kā arī dažās skaitļošanas tehnikas iekārtās elektrisko signālu pārveidošanai atbilstošā mehāniskā rotācijas kustībā plaši izmanto mazjaudas īpašas mašīnas — servodzinējus.

Servodzinējs, saņemot elektrisku signālu, uztur nepārtrauktā kustībā vai tikai pagriež par noteiktu leņķi kādu automātiskās iekārtas mehānismu. Servodzinējiem ir raksturīga bieža palaišana, apturēšana vai reverss.

Līdzstrāvas servodzinēju darbības princips ir tāds pats kā parastajiem līdzstrāvas dzinējiem. Parasti tos izveido ar neatkarīgu ierosmi, retāk — ar pastāvīgajiem magnētiem. Enkura konstruktīvais izveidojums ir dažāds. Līdzstrāvas servodzinēji strādā magnētiski nepiesātināti, un tāpēc enkura reakcija to darbību neietekmē.

Līdzstrāvas servodzinēji var būt ar enkura vadību un ar polu vadību. Pirmajā gadījumā (3.71. zīm.) ierosmes tinums pastāvīgi pievienots nemainīgam spriegumam $U = \text{const}$, bet dzinēja darbību vada, mainot enkura tinumam pieslēgtā vadības sprieguma U_V skaitlisko vērtību vai virzienu. Dzinējiem ar enkura vadību regulēšanas raksturliķnes $n = f(U_V)$ ir lineāras. Dzinējiem ar polu vadību enkuram pievienots nemainīgs spriegums, bet vadības spriegums U_V pieslēgts ierosmes tinumam. Šajā gadījumā nepieciešama mazāka vadības jauda, bet dzinēja raksturliķnes ir nelineāras. Tāpēc biežāk lieto līdzstrāvas servodzinējus ar enkura vadību.

Līdzstrāvas servodzinēju enkurs var būt izveidots tāpat kā parastajiem līdzstrāvas dzinējiem. Tomēr parastās konstrukcijas enkuram ir relatīvi liels inerces moments un tāpēc nepietiekama ātrdarbība. So iemeslu dēļ plašāk izmanto servodzinējus ar diskveida vai dobu enkuru, kurš izgatavots no plāna izolācijas materiāla ar iespiestu tinumu.



3.71. zīm.
Shēma līdzstrāvas servodzinējam ar enkura vadību.

3.14. PADOMJU SAVIENĪBĀ RAŽOTO LĪDZSTRĀVAS MAŠĪNU PAMATTIPI

Padomju Savienībā izgatavo visus līdzstrāvas mašīnu paveidus, kas nepieciešami tautas saimniecībā. Līdzstrāvas mašīnas, izņemot ļoti lielas jaudas un speciālas mašīnas, ražo sērijās. Vispārīgām

lietojumam pašlaik galvenokārt izmanto vienotās II sērijas līdzstrāvas mašīnas. Bez tam tiek ražotas arī vairākas speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnu sērijas (vilces dzinēji, celtņu dzinēji, mašīnas automobiļu un traktoru elektroiekārtām u. c.).

Vienotajā II sērijā ietilpst vispārīga lietojuma un specializētas līdzstrāvas mašīnas.

Vispārīga lietojuma dzinējiem pieļaujama ir rotācijas frekvences regulēšanas diapazons, samazinot magnētisko plūsmu, ir 2:1. Tie ir aizsargātas konstrukcijas paralēlas ierosmes dzinēji ar nelielu stabilizējošo (virknes ierosmes) tinumu un cietu mehānisko raksturlielni.

Specializētie II sērijas elektrodzinēji ir slēgtas konstrukcijas mašīnas ar ļoti dažādām mehāniskajām raksturlielēm. Dzinēji paredzēti rotācijas frekvences regulēšanai plašā diapazonā (no 2,25:1 līdz 8:1), ne tikai samazinot magnētisko plūsmu, bet arī izmainot enkura spriegumu.

Vispārīga lietojuma II sērijas ģeneratori ir paralēlas vai jauktas ierosmes mašīnas ar cietu ārējo raksturlielni. Tos lieto galvenokārt līdzstrāvas dzinēju barošanai un par lieljaudas līdzstrāvas mašīnu un sinhrono ģeneratoru ierosinātājiem. Specializētos ģeneratorus izmanto akumulatoru bateriju uzpildei, lieljaudas līdzstrāvas dzinēju barošanai u. tml.

II sērijas līdzstrāvas mašīnas iedala trīs grupās.

Pirmajā grupā ietilpst šīs sērijas mašīnu lielākā daļa, to jauda ir 0,3...200 kW, un tās sadalītas 11 gabarītos. Katram gabarītam atbilst noteikts enkura diametrs un divi dažādi garumi. 1., ..., 11. gabarītu mašīnas ir aizsargātas konstrukcijas dzinēji un ģeneratori ar pašventilāciju. Iespējamās arī modifikācijas ar slēgtu konstrukciju. Šīs grupas dzinēju nominālie spriegumi ir 110, 220, 440 V un

3.1. tabula

DAŽU II SĒRIJAS LĪDZSTRĀVAS DZINEJU GALVENIE TEHNISKIE DATI

(1., ..., 11. gabarīti, $U_N=220$ V, $n_N=1500$ min⁻¹)

Tips	P_N (kW)	η (%)	Galvenie izmēri (mm)					Masa (kg)
			B	L	H	h	D	
Π12	0,45	70,0	348	397	210	112	83	23,5
Π22	1,0	76,5	447	458	310	140	106	44,0
Π32	2,2	83,5	493	541	336	150	120	67,5
Π42	4,5	80,5	537	569	355	160	138	80
Π52	8,0	84,5	620	639	400	180	162	124
Π62	14	86,5	694	662	484	225	195	187
Π72	25	85,5	882	847	540	250	210	330
Π82	42	88,0	975	892	600	280	245	435
Π92	75	89,0	990	1187	694	315	294	705
Π102	125	90,0	1095	1304	783	355	327	985
Π112	200	91,0	1200	1447	884	400	368	1370

Piezīme. Tabulā uzrādīto galveno izmēru apzīmējumu nozīme ir šāda: B — mašīnas platums; L — garums; H — augstums; h — rotācijas ass augstums; D — enkura ārējais diametrs.

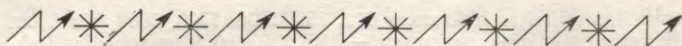
nominālās rotācijas frekvences 600, 750, 1000, 1500, 3000 min⁻¹, bet ģeneratoru nominālie spriegumi — 115, 230, 460 V un rotācijas frekvences — 1450 min⁻¹ un 2850 min⁻¹.

3.1. tabulā doti dažu šīs grupas dzinēju galvenie tehniskie dati.

Otrajā grupā ietilpst 12., ..., 17. gabarītu mašīnas ar jaudu 55...1400 kW un rotācijas frekvenci 300...1000 min⁻¹. Dzinējiem un ģeneratoriem ir aizsargāta vai slēgta konstrukcija, bet ģeneratoriem — arī vaļēja konstrukcija. Visi šīs grupas dzinēji izveidoti ar kompensācijas tinumu, bet ģeneratori var būt arī bez kompensācijas tinuma.

Trešajā grupā ietilpst 18., ..., 22. gabarītu mašīnas ar jaudu 460...5400 kW un rotācijas frekvenci 24...750 min⁻¹. Tās ir slēgtas konstrukcijas mašīnas ar neatkarīgu ventilāciju.

Pašlaik Padomju Savienības elektromašīnbūves uzņēmumi apgūst jaunas līdzstrāvas mašīnu sērijas 2II ražošanu. Šīs sērijas mašīnu tehniski ekonomiskie rādītāji ir ievērojami labāki nekā II sērijas mašīnām.



4. TRANSFORMATORI

4.1. PAMATJĒDZIENI UN TRANSFORMATORA DARBĪBAS PRINCIPS

Par transformatoru sauc statisku elektromagnētisku ierīci, kura paredzēta vienas (primārās) maiņstrāvas sistēmas pārveidošanai citā (sekundārā) maiņstrāvas sistēmā.

Transformatori paredzēti galvenokārt sprieguma pārveidošanai. Tos izmanto arī maiņstrāvas fāzu skaita, frekvences, fāzes, sprieguma formas un citu parametru pārveidošanai.

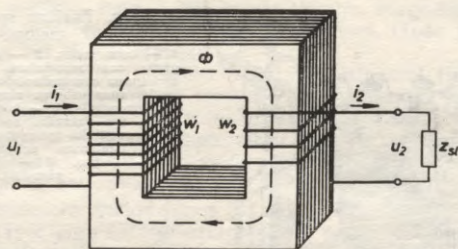
Atkarībā no uzdevuma transformatora konstruktīvais izveidojums un darba režīmi var būt ļoti dažādi. Tomēr elektromagnētiskie procesi visa veida transformatoros būtībā ir vienādi. Tāpēc galvenokārt aplūkosim raksturīgākos transformatorus — *spēka transformatorus*, kurus izmanto maiņsprieguma pārveidošanai elektriskajās sistēmās (elektrostacijās un apakšstacijās, rūpniecības uzņēmumos, pilsētu un lauku sadales tīklos u. c.).

Praksē visbiežāk izmanto vienfāzes un trīsfāzu transformatorus, kuriem ir divi vai vairāki induktīvi saistīti tinumi.

Transformatora darbības principa noskaidrošanai aplūkosim vienfāzes divtinumu transformatoru, kura principiālā shēma parādīta 4.1. zīmējumā. Šāda transformatora darbības princips un galvenās sakarības 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*, bet tinumu, no kura enerģiju pievada patērētājam, — par *sekundāro tinumu*. Turpmāk visu lielumu apzīmējumiem, kas attiecas uz primāro un sekundāro tinumu, pievienosim attiecīgi indeksus 1 un 2.

Enerģijas pārvešana no primārā uz sekundāro tinumu notiek elektromagnētiskās indukcijas ceļā. Ja primārajam tinumam pievieno sinusoidālu maiņspriegumu u_1 , tad šajā tinumā plūst strāva i_1 , kura transformatora serdē rada mainīgu magnētisko plūsmu Φ . Šī magnētiskā plūsma ir saķēdēta ar abiem transformatora tinumiem un inducē tajos EDS e_1 un e_2 , kuru skaitliskās vērtības ir atkarīgas no primārā un sekundārā tinuma vijumu skaita w_1 un w_2 (sk. 4.4.1.). Pievienojot sekundārajam tinumam patērētāju (slodzes pretestību



4.1. zīm. Vienfāzes transformatora principiālā shēma.

Z_{s1}), šajā tinumā rodas strāva i_2 un uz tā spailēm ir spriegums u_2 . Serdes magnētisko plūsmu slogotā transformatorā rada abu tinumu strāvas.

Transformatora nominālo darba režīmu raksturo nominālie dati, kuri uzrādīti transformatoram piestiprinātā uzrakstu plāksnītē — tehniskajā pasē. Spēka transformatoriem parasti uzrādīti šādi nominālie dati: pilnā jauda S_N (kV·A), spriegumi (trīsfāzu transformatoriem līnijas spriegumi) U_{1N} , U_{2N} (kV), strāvas I_{1N} , I_{2N} (A), frekvences (Hz), fāzu skaits u. c.

Par primāro nominālo spriegumu sauc tīkla spriegumu, kuram transformators aprēķināts. Par sekundāro nominālo spriegumu sauc ar Valsts standartu pieņem spriegumu uz sekundārā tinuma spailēm tukšgaitas režīmā, ja primārajam tinumam pievadīts nominālais spriegums. Par nominālajām strāvām sauc strāvas, kas atbilst spriegumu un jaudu nominālajām vērtībām: trīsfāzu transformatoram

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}; \quad (4.1)$$

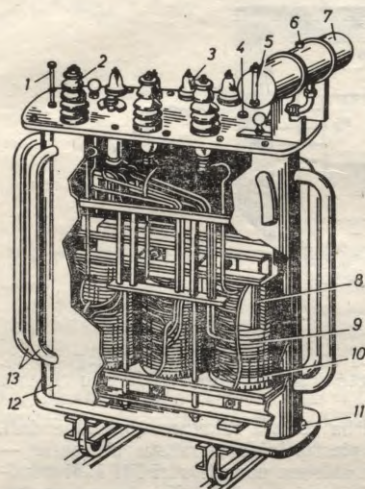
vienfāzes transformatoram

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}; \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}. \quad (4.2)$$

4.2. TRANSFORMATORA UZBŪVE

4.2. zīmējumā parādīts trīsfāzu spēka transformatora kopskats.

Transformatora galvenās sastāvdaļas ir *serde* (magnētqvads) un *tinumi*. Izšķir *sausos* un *eļļas spēka transformatorus*. Eļļas transfor-



4.2. zim. Trisfāzu spēka transformators:

1 — termometrs, 2 — augstākā sprieguma caurvadizolators, 3 — zemākā sprieguma caurvadizolators, 4, 6 — eļļas lepildīšanas urbumu aizgriežņi, 5 — eļļas līmeņrādis, 7 — konservators, 8 — serde, 9 — zemākā sprieguma tinums, 10 — augstākā sprieguma tinums, 11 — eļļas izlaišanas urbuma aizgriežņis, 12 — tvertne, 13 — eļļas dzesēšanas caurules.

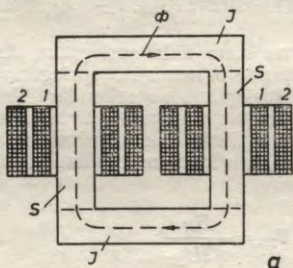
matoriem serde kopā ar tinumiem ievietoti *tvertnē* ar transformatorēlļu, kura vienlaikus ir gan izolācijas materiāls, gan dzesējošais aģents.

4.2.1. Magnētqvadi

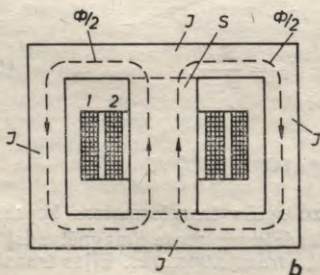
Transformatora magnētisko ķēdi veido tērauda magnētqvads jeb serde, pa kuru noslēdzas magnētiskā plūsma. Raksturīgākie ir stieņu tipa un apvalka tipa magnētqvada izveidojumi.

Vienfāzes *stieņu tipa* transformatora *serde* (4.3. zim. a) sastāv no diviem stieņiem S, uz kuriem novietoti tinumi, un diviem jūgiem J, kuri, savienojot stieņus, veido noslēgtu magnētisko ķēdi. Katram no diviem tinumiem (primārajam 1 un sekundārajam 2) ir divas daļas, kuras novietotas uz diviem stieņiem un savienotas virknē vai paralēli.

Vienfāzes *apvalka tipa* transformatora *serde* (4.3. zim. b) veido sazarotu



a



b

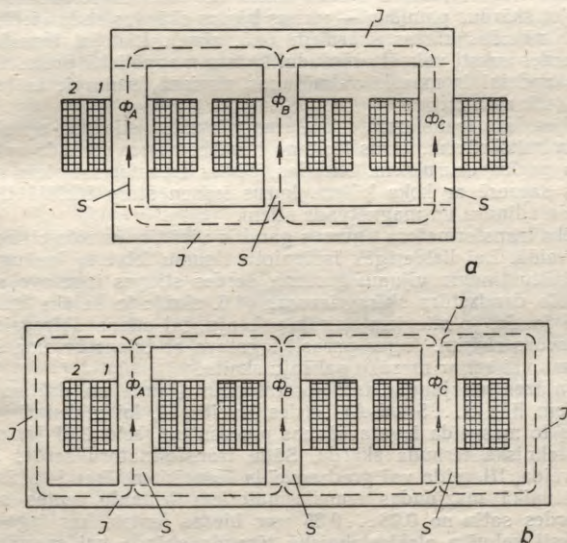
4.3. zim. Vienfāzes transformatoru magnētqvadi:

a — stieņu tipa, b — apvalka tipa.

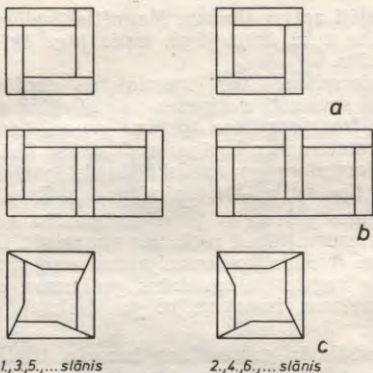
magnētisku sistēmu, kura daļēji aptver tinumu. Magnētiskā plūsma vidējā stienī ir divreiz lielāka nekā ārējā jūgā, tāpēc jūga šķērs-griezums var būt divreiz mazāks.

Trīsfāzu sprieguma transformēšanai var izmantot trīs vienfāzes transformatorus, kuru tinumi savienoti zvaigznes vai trīsstūra slēgumā. Sādu ierīci sauc par *transformatoru trīsfāzu grupu*. Tomēr biežāk lieto trīsfāzu transformatorus ar kopīgu serdi visām fāzēm. Trīsfāzu stieņu tipa transformatora magnētiskā serde parādīta 4.4. zīmējumā *a*, bet apvalka tipa serde — 4.4. zīmējumā *b*. Apvalka tipa transformatora ārējos jūgos plūsma ir $\sqrt{3}$ reizes mazāka nekā stieņos un tāpēc jūgu šķērs griezumu tikpat reizi var samazināt. Bez tam, ja transformatora serdei ir šāda konstrukcija, tad var samazināt transformatora gabarīta augstumu, kas dažos gadījumos, piemēram, lieljaudas transformatorus transportējot pa dzelzceļu, ir jāierobežo.

Elektriskajos tīklos un sistēmās galvenokārt izmanto trīsfāzu transformatorus ar kopīgu magnētisko sistēmu. Transformatoru trīsfāzu grupu izmanto ļoti lielu jaudu gadījumā, kad transportēšana ir stipri apgrūtināta vai neiespējama.



4.4. zīm. Trīsfāzu transformatoru magnētivadi:
a — stieņu tipa, *b* — apvalka tipa.



4.5. zīm. Transformatoru serdes saliekšana no skārdiem:
a un *b* — vienfāzes un trīsfāzu transformatoram ar taisnleņķa sadurvietām, *c* — vienfāzes transformatoram ar slīpām sadurvietām.



4.6. zīm. Transformatora serdes šķērsgriezums.

Transformatora serdi saliek no elektrotehniskā tērauda skārdiem, kuru biezums ir 0,35 mm vai 0,5 mm. Tos savstarpēji izolē ar laku vai papīru.

Spēka transformatoru serdes saliek no taisnstūrveida skārdiem, izvietojot skārdus pamīšus — vienas kārtas skārdus sadurvietās pārklāj ar nākošās kārtas skārdiem (4.5. zīm.). Lietojot transformatora serdei auksti velmēto tēraudu, kuram magnētiskā pretestība un jaudas zudumi ir mazāki velmēšanas virzienā, sadurvietas izveido slīpas (4.5. zīm. *c*).

Lieljaudas transformatoriem magnētvasdu stieņus savēlk ar tērauda bultskrūvēm, kuras izolē no transformatora tērauda ar bachelitizēta papīra caurulītēm. Nelielas jaudas transformatoriem serdes stieņus sapresē ar koka ķīļiem, kurus iedzen starp iekšējā tinuma izolējošo cilindru un magnētvasda stieni.

Spēka transformatora tinumus gandrīz izveido cilindrisku spoļu veidā. Lai lietderīgāk izmantotu tinumu ietveto laukumu un samazinātu tinumu vijumu garumu, serdes stieņus izgatavo ar pakāpveida daudzstūra šķērsgriezumu (4.6. zīm.): jo lielāka transformatora jauda, jo stieņiem vairāk pakāpju, lai stieņa šķērsgriezums būtu tuvāks riņķim. Jūgus parasti izgatavo ar taisnstūrveida šķērsgriezumu vai arī ar mazāku pakāpju skaitu.

Vienfāzes mazjaudas transformatoriem (jauda no dažiem voltampēriem līdz 3...5 kV·A) serdes izveido tā, lai maksimāli vienkāršotu to masveida izgatavošanas procesu un racionālāk izmantotu elektrotehniskā tērauda skārdu. Šādu transformatoru serdes saliek no II veida, III veida vai gredzenveida štancētiem tērauda skārdiem. Pēdējā laikā mazjaudas transformatoriem izmanto lentes serdes. Šīs serdes satin no 0,08...0,35 mm biezas lentes, kas izgatavota no auksti velmēta elektrotehniskā tērauda skārda vai speciāla sakausējuma (4.7. zīm.). Lentes viena puse pārklāta ar izolācijas un saistvielas slāni. Pēc izgatavošanas serdi parasti sazāgē divās daļās,

Iai uz tās varētu novietot jau iepriekš izgatavotas tinuma spoles.

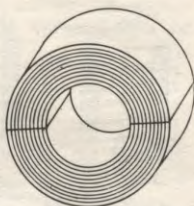
Augstfrekvences (līdz 20 kHz) ķēdēs lietojamo transformatoru serdes saliek no 0,005...0,08 mm biežiem permaloja skārdoim, bet transformatoriem, kas paredzēti vēl augstākām frekvencēm, serdes presē no magnetodielektriķiem un ferītiem.

4.2.2. Tinumi

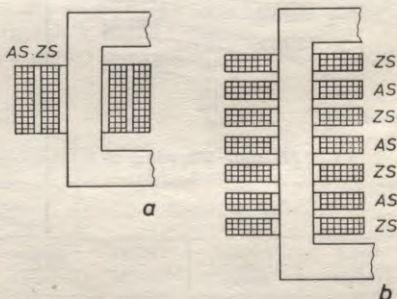
Spēka transformatoru tinumu konstruktīvais izveidojums atkarībā no nominālā sprieguma un jaudas var būt ļoti dažāds. Tinumus izgatavo no vara, bet pēdējā laikā bieži arī no alumīnija vada. Atkarībā no tinumu novietojuma uz serdes stieņiem, kā arī no augstākā sprieguma (AS) un zemākā sprieguma (ZS) tinumu savstarpējā novietojuma izšķir *koncentriskus un jauktus tinumus* (4.8. zīm.). Pirmajā gadījumā tinumi viens attiecībā pret otru un attiecībā pret serdes stieni novietoti koncentriski, pie tam tuvāk serdei atrodas zemākā sprieguma tinums, jo tad augstākā sprieguma tinums ir labāk izolēts no serdes. Jauktā tinuma gadījumā AS un ZS tinumu diskveida spoles novietotas pamīšus viena virs otras, pie tam jūga pusē novietotas ZS tinuma spoles. Jauktajam tinumam ir labāki dzesēšanas apstākļi un labāka magnētiskā saite starp AS un ZS tinumiem, tomēr to izgatavošana ir sarežģītāka, it sevišķi augsta sprieguma transformatoros. Tāpēc spēka transformatoros parasti lieto koncentriskos tinumus, kuru konstruktīvais izveidojums turpmāk aplūkots sīkāk.

Izšķir šādus galvenos koncentrisko tinumu veidus: cilindriskos, vītņveida jeb skrūves un nepārtrauktos spirāles tinumus.

Cilindriskie tinumi var būt vienslāņa un daudzslāņu (4.9. zīm.), un tos izgatavo no taisnstūrveida vai apaļa šķērsgriezuma vadiem. Ja tinumā ir daudz slāņu (5...6), to izveido no divām koncentriskām spoļēm, atstājot starp

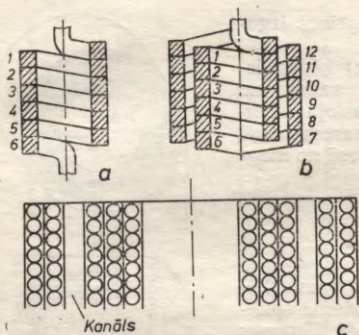


4.7. zīm. Vienfāzes mazjaudas transformatoru lentes serdes.



4.8. zīm. Transformatora tinumu novietojums uz serdes:

a — koncentriskis tinums, b — jaukts tinums.



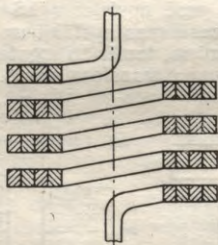
4.9. zim. Cilindriskis tinums:

a — vienslāņa no taisnstūrveida šķēsgriezuma vadiem, *b* — divslāņu no taisnstūrveida šķēsgriezuma vadiem, *c* — daudzslāņu (ar dzesēšanas kanālu) no apaļa šķēsgriezuma vadiem.

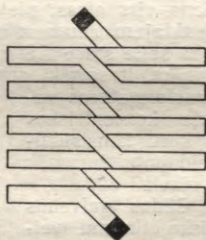
tām vertikālu kanālu dzesēšanas apstākļu uzlabošanai (4.9. zim. *c*).

Vītņveida tinuma vijumu (4.10. zim.) uztin no vairākiem paralēliem taisnstūrveida šķēsgriezuma vadiem, kuri pieguļ cits citam radiālā virzienā. Aksiālā virzienā starp tinuma atsevišķiem vijumiem ir spraugas dzesēšanas apstākļu uzlabošanai. Lai visos paralēlajos vados, kuri veido vijumu, strāva sadalītos vienmērīgi, lieto *tinumu transpozīciju*: pārejot no viena vijuma uz citu, paralēlos vadus maina vietām tā, lai katrs no tiem pēc kārtas ieņemtu visus viena vijuma robežās iespējamus stāvokļus.

Nepārtraukto spirāles tinumu (4.11. zim.) izveido no taisnstūrveida šķēsgriezuma vada, un tas sastāv no diskveida spolēm, pie



4.10. zim. Vītņveida tinums.



4.11. zim. Nepārtrauktais spirāles tinums.

tam spoles uztin pa spirāli un tās ir savstarpēji savienotas nepārtraukti (bez lodēšanas). Diskveida spoles aksiālā virzienā cita no citas atdalītas ar kanāliem.

4.2.3. Tvertne

Transformatora tvertnes konstrukcija ir atkarīga no transformatora jaudas — jo tā lielāka, jo lielākai jābūt tvertnes virsmai, ar kuras starpniecību notiek eļļas siltuma atdeve apkārtējai videi.

Transformatoriem, kuru jauda nepārsniedz 20 kV·A, tvertnes izveido ar gludām sienām. Lielākas jaudas transformatoriem nepieciešams palielināt tvertnes dzesējošo virsmu. To var panākt, tvertnes sienas izveidojot viļņotas. Tomēr šādas konstrukcijas tvertnēm samazinās mehāniskā stiprība un to izgatavošana ir samērā sarežģīta un darbietilpīga. Tāpēc biežāk izmanto konstrukciju ar tvertnes ārpusē piemetinātām vertikālām caurulēm, kas augšējā un apakšējā daļā ir savienotas ar tvertnes iekšpusi (sk. 4.2. zīm.).

Transformatoriem ar jaudu virs 1800 kV·A tvertnes sienām piebūvēti cauruļveida radiatoru, kurus dabiski vai mākslīgi (ar ventilatoru) dzesē gaiss.

Transformatora eļļas tvertni noslēdz ar bultskrūvēm piestiprināts tērauda vāks, kurā iestiprināti porcelāna caurvadizolatori (sk. 4.2. zīm.). Tvertnes vākam pierikots konservators 7, lai, paaugstinoties temperatūrai, eļļai būtu iespējams izplesties un lai tvertne vienmēr būtu piepildīta ar eļļu. Eļļas līmeņa kontrolei konservatora sānos piestiprināts līmeņrādītājs 5. Bez tam vākā ir nostiprināti vijumu pārslēga rokturis, vāka pacelšanas skrūves un citas detaļas.

4.3. TRANSFORMATORA TINUMU SLĒGUMI UN SAVIENOJUMU GRUPAS

Transformatora tinumu spaiļu apzīmējumi, kuri noteikti saskaņā ar Valsts standartu GOCT 11677—75, doti 4.1. tabulā.

Apzīmējumi «sākums» un «beigas» ir nosacīti, tomēr tie vajadzīgi, lai pareizi savienotu tinumus.

4.1. tabula

TRANSFORMATORA TINUMU SPAIĻU APZĪMĒJUMI

Tinuma galu nosaukums	Vienfāzes transformators		Trīsfāzu transformators		
	augstākā sprieguma tinums	zemākā sprieguma tinums	augstākā sprieguma tinums	zemākā sprieguma tinums	vidējā sprieguma tinums
Tinuma sākums	A	a	A, B, C	a, b, c	A _m , B _m , C _m
Tinuma beigas	X	x	X, Y, Z	x, y, z	X _m , Y _m , Z _m

Trīsfāzu transformatoru primāros un sekundāros tinumus slēdz zvaigznē (Υ), trīsstūrī (Δ) vai retāk zigzagzvaigznē (N). Pēdējā gadījumā katru tinuma fāzi sadala divās daļās un katru no tām novieto uz serdes diviem stieņiem. Zvaigznes un zigzagzvaigznes slēgumā var būt arī nullpunkta izvads (Y , N).

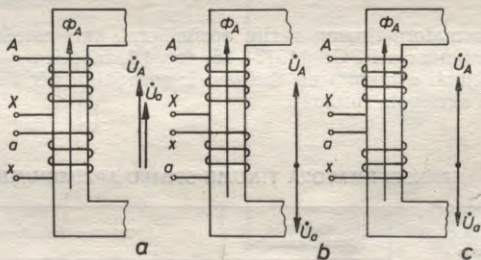
Lai pareizi saslēgtu transformatora fāzu tinumus transformatoru paralēlas darbības gadījumā (sk. 4.6.4.), jāzina transformatora primārā un sekundārā sprieguma fāzu nobīdes leņķis. Sis leņķis ir atkarīgs no abu tinumu tišanas virziena un no galu apzīmējumiem («sākums», «beigas»).

4.12. zīmējumā *a* parādīta transformatora viena fāze ar vienā virzienā tītiem AS un ZS tinumiem. Tā kā abus tinumus caurtver viena un tā pati magnētiskā plūsma Φ_A , tad abos tinumos inducētie EDS sakrīt fāzē, t. i., katrā mirklī tiem ir viens un tas pats virziens attiecībā pret tinuma spailēm, piemēram, no *X* uz *A* un no *x* uz *a* (pieņemtais pozitīvais virziens). Tātad arī fāzu spriegumu \dot{U}_A un \dot{U}_a pozitīvie virzieni sakrīt.

Apmainot vietām sekundārā tinuma spaiļu apzīmējumus (4.12. zīm. *b*), AS tinuma EDS virzīts no *X* uz *A*, bet ZS tinumā tai pašā mirklī — no *a* uz *x*, tātad \dot{U}_A un \dot{U}_a ir pretējās fāzēs.

Arī tad, ja tinumi uztīti pretējos virzienos, bet to spaiļu apzīmējumi palikuši tie paši (4.12. zīm. *c*), \dot{U}_A un \dot{U}_a ir pretējās fāzēs.

Primārā un sekundārā sprieguma fāzu nobīdes leņķi raksturo ar *tinumu savienojumu grupu*. Savienojumu grupu noteikšanai izmanto skalu, kura analoga pulksteņa ciparnīcai. Savietojot augstākā sprieguma (trīsfāzu transformatoros līnijas sprieguma) vektoru ar ciparu 12, savienojuma grupu raksturo cipars, ar kuru šajā gadījumā sakrīt zemākā sprieguma vektors. Fāzu nobīdes leņķis starp spriegumiem ir leņķis no AS tinuma sprieguma vektora līdz ZS tinuma



4.12. zīm. Fāzu nobīde starp primāro un sekundāro spriegumu atkarībā no tinumu uztīšanas virziena un spaiļu apzīmējumiem:

a un *b* — vienā virzienā uztītiem tinumiem ar dažādiem spaiļu apzīmējumiem, *c* — pretējos virzienos uztītiem tinumiem.

sprieguma vektoram pulksteņa rādītāju kustības virzienā. Tātad, ja abu pušu spriegumi sakrīt fāzē, tad transformatora tinumu savienojumam ir nulles grupa (šajā gadījumā grupu pieņemts apzīmēt nevis ar ciparu 12, bet ar 0).

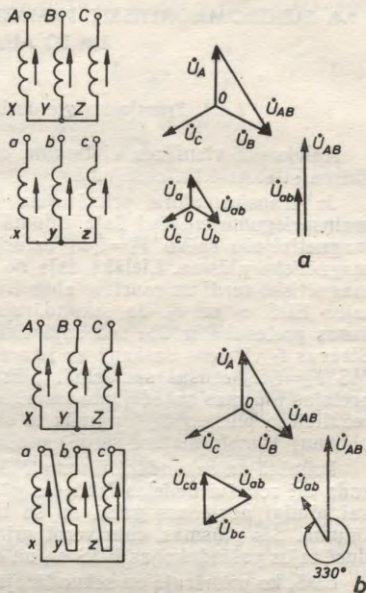
4.13. zīmējumā parādītas tinumu slēguma shēmas un savienojumi, kas atbilst 0 un 11 grupai.

Var atzīmēt, ka tad, ja abu tinumu slēguma shēmas ir vienādas, piemēram, zvaigzne-zvaigzne, mainot tinumu galu apzīmējumus, var iegūt visas pārskaitļu grupas (0, 2, 4...). Ja tinumiem ir dažādas slēguma shēmas, var iegūt nepārskaitļu grupas (1, 3, 5...). Tomēr liela grupu dažādība var radīt zināmas neērtības, tāpēc Padomju Savienībā trīsfāzu transformatorus izgatavo ar divām savienojumu grupām — ar nulles un vienpadsmito grupu.

Saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 11677—75 Padomju Savienībā izmanto šādas trīsfāzu transformatoru slēguma shēmas un savienojumu grupas:

Υ/Υ -0, Υ/Δ -11, Υ/Δ -11, Υ/Υ -11, $\Upsilon/\Upsilon/\Delta$ -0-11, $\Upsilon/\Delta/\Delta$ -11-11. (Šeit apzīmējumi attiecas uz transformatora tinumiem šādā secībā: augstākā sprieguma tinums, vidējā sprieguma tinums (trīstinumu transformatoros), zemākā sprieguma tinums.)

Vienfāzes transformatoriem iespējamas tikai divas savienojumu grupas (0 un 6), no kurām izmanto vienu — nulles grupu.



4.13. zim. Tinumu slēguma shēmas un vektoru diagrammas transformatora tinumu savienojumu grupu noteikšanai: a — savienojumu grupai 0, b — savienojumu grupai 11.

4.4. ELEKTROMAGNĒTISKIE PAMATPROCESI TRANSFORMATOROS UN TO ANALĪZE

4.4.1. Transformatora darbības fizikālie pamati

Aplūkosim vienfāzes divtinumu transformatoru, kura principiālā shēma attēlota 4.14. zīmējumā.

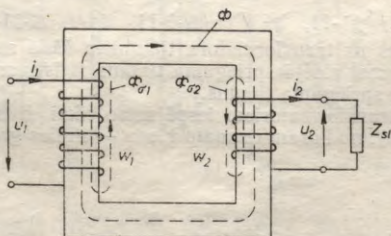
Ja transformatora primārajam tinumam pievieno sinusoidālu maiņspriegumu u_1 , tad šajā tinumā plūst strāva i_1 , kura ar savu magnetizējošo spēku $F_1 = i_1 w_1$ uztur transformatorā serdē mainīgu magnētisko plūsmu. Lielākā daļa no šīs plūsmas noslēdzas pa feromagnētisko serdi un caurtver abus transformatora tinumus, inducējot tajos EDS e_1 un e_2 . Ja sekundārajam tinumam pievienota slodze, kuras pretestība ir Z_{sl} , tad šajā tinumā plūst sekundārā strāva i_2 . Strāvas i_2 virziens saskaņā ar Lenca likumu ir tāds, ka šīs strāvas MS $F_2 = i_2 w_2$ cenšas samazināt plūsmu transformatora serdē, t. i., pretojas plūsmas saķēdējuma izmaiņai sekundārajā tinumā. Tādējādi rezultējošo plūsmu Φ (turpmāk to sauksim par galveno magnētisko plūsmu) transformatora serdē nosaka divu MS (F_1 un F_2) darbība.

Primārā un sekundārā tinuma MS F_1 un F_2 bez galvenās plūsmas rada arī relatīvi nelielas izkliedes plūsmas $\Phi_{\sigma 1}$ un $\Phi_{\sigma 2}$, kuras daļēji vai pilnīgi noslēdzas gaisā ap šo tinumu vijumiem, neskarot otru tinumu. Šīs plūsmas, caurtverot primāro un sekundāro tinumu, inducē tajos pašindukcijas EDS $e_{\sigma 1}$ un $e_{\sigma 2}$.

EDS, ko primārajā un sekundārajā tinumā inducē galvenā magnētiskā plūsma, ir nosakāmi pēc elektromagnētiskās indukcijas likuma:

$$e_1 = - \frac{d\Psi_1}{dt}; \quad e_2 = - \frac{d\Psi_2}{dt}, \quad (4.3)$$

kur $\Psi_1 = w_1 \Phi$ un $\Psi_2 = w_2 \Phi$ — galvenās plūsmas saķēdējums ar primāro un sekundāro tinumu.



4.14. zīm. Slodgta transformatora principiālā shēma.

Pašindukcijas EDS, ko transformatora tinumos inducē izkliedes plūsmas,

$$e_{\sigma} = - \frac{d\Psi_{\sigma}}{dt} = - \frac{d(L_{\sigma}i)}{dt} = -L_{\sigma} \frac{di}{dt} - i \frac{dL_{\sigma}}{dt}, \quad (4.4)$$

kur $\Psi_{\sigma} = L_{\sigma}i$ — izkliedes plūsmas saķēdējums ar tinumiem;
 L_{σ} — tinumu izkliedes induktivitāte.

Tā kā izkliedes plūsmas galvenokārt noslēdzas gaisā, tad $L_{\sigma} = \text{const}$ un saskaņā ar izteiksmi (4.4)

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{di_1}{dt}; \quad e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}. \quad (4.5)$$

4.4.2. Transformatora pamatvienādojumi

Ar transformatora pamatvienādojumiem saprot spriegumu un strāvu jeb MS vienādojumus primārā un sekundārā tinuma ķēdēm. Spriegumu vienādojumus var iegūt, ja izmanto otro Kirhhofa likumu transformatora primārā un sekundārā tinuma ķēdēm.

Transformatora primārā tinuma ķēdē darbojas spriegums u_1 , EDS e_1 un $e_{\sigma 1}$, kuri šajā ķēdē uztur strāvu i_1 . Sekundārā tinuma ķēdē darbojas EDS e_2 un $e_{\sigma 2}$, kuri uztur sekundāro strāvu i_2 . Šī strāva izraisa sprieguma kritumu slodzes pretestībā, kas ir transformatora sekundārais spriegums u_2 . Tādējādi saskaņā ar otro Kirhhofa likumu (kontūrā ieslēgto EDS algebriskā summa ir vienāda ar sprieguma kritumu summu šī kontūra zaros)

$$u_1 + e_1 + e_{\sigma 1} = i_1 R_1, \quad (4.6)$$

$$e_2 + e_{\sigma 2} = i_2 R_2 + u_2, \quad (4.7)$$

kur R_1 un R_2 — primārā un sekundārā tinuma aktīvās pretestības.

Sakarību vienkāršošanai sākumā pieņemsim, ka spriegumi, strāvas un magnētiskā plūsma transformatorā mainās sinusoidāli, t. i., neņemsim vērā serdes piesātinājuma ietekmi (sk. 4.4.6.). Tad saskaņā ar izteiksmi (4.3)

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = \omega_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2), \quad (4.8)$$

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = \omega_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2),$$

kur Φ_m — galvenās magnētiskās plūsmas amplitūdas vērtība.

No izteiksmēm var secināt, ka inducētais EDS no galvenās magnētiskās plūsmas atpaliek fāzē par 90° .

Tinumos inducēto EDS maksimālās vērtības

$$E_{1m} = \omega_1 \omega \Phi_m, \quad E_{2m} = \omega_2 \omega \Phi_m. \quad (4.9)$$

Tā kā $\omega = 2\pi f$ un EDS efektīvā vērtība ir $\sqrt{2}$ reizes mazāka par maksimālo vērtību, bet $2\pi/\sqrt{2} = 4,44$, tad

$$E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_m, \quad (4.10)$$

$$E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_m. \quad (4.11)$$

Primārajā un sekundārajā tinumā inducēto EDS attiecību

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = k \quad (4.12)$$

sauc par transformatora *transformācijas koeficientu*.

Saskaņā ar izteiksmēm (4.5) izkļiedes plūsmu inducētie EDS

$$e_{\sigma 1} = -L_{\sigma 1} \frac{d(I_{1m} \sin \omega t)}{dt} = -L_{\sigma 1} \omega I_{1m} \cos \omega t = L_{\sigma 1} \omega I_{1m} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (4.13)$$

$$e_{\sigma 2} = -L_{\sigma 2} \frac{d(I_{2m} \sin \omega t)}{dt} = -L_{\sigma 2} \omega I_{2m} \cos \omega t = L_{\sigma 2} \omega I_{2m} \sin(\omega t - \pi/2).$$

Tā kā $\omega L = X$, tad izteiksmes (4.13) var uzrakstīt šādi:

$$e_{\sigma 1} = X_1 I_{1m} \sin(\omega t - \pi/2), \quad (4.14)$$

$$e_{\sigma 2} = X_2 I_{2m} \sin(\omega t - \pi/2),$$

kur X_1 un X_2 — primārā un sekundārā tinuma izkļiedes induktīvās pretestības.

Tā kā visi elektriskie lielumi mainās sinusoidāli, tad turpmāk izmantosim simbolisko (komplekso) pieraksta formu. Transformatora spriegumu vienādojumus (4.6) un (4.7) simboliskā formā raksta šādi:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = I_1 R_1, \quad (4.15)$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = I_2 R_2 + \dot{U}_2. \quad (4.16)$$

Ievērojot, ka saskaņā ar izteiksmi (4.14)

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jX_1 I_1, \quad \dot{E}_{\sigma 2} = -jX_2 I_2,$$

no izteiksmēm (4.15) un (4.16) iegūstam, ka

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 - jI_1 X_1 = I_1 R_1, \quad (4.17)$$

$$\dot{E}_2 - jI_2 X_2 = I_2 R_2 + \dot{U}_2 \quad (4.18)$$

jeb

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1, \quad (4.19)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2 \underline{Z}_2, \quad (4.20)$$

kur $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ un $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ — transformatora primārā un sekundārā tinuma pilnās pretestības.

Lai iegūtu transformatora strāvu jeb MS vienādojumu, izmantosim izteiksmi (4.10), no kuras

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44f\omega_1} \quad (4.21)$$

Slogotā transformatorā sprieguma kritums primārajā tinumā ($I_1 Z_1$) ir visai mazs (normāli slogotam transformatoram tas nepārsniedz 2,5...5% no E_1 vērtības). Tāpēc, mainoties transformatora slodzei un reizē ar to primārajai strāvai I_1 , E_1 vērtība praktiski nemainās. Bet, tā kā E_1 saskaņā ar izteiksmi (4.10) ir proporcionāls galvenajai magnētiskajai plūsmai, tad secinām, ka transformatora galvenā plūsma Φ praktiski nav atkarīga no transformatora slodzes, t. i., $\Phi \approx \text{const}$.

Ievērojot, ka $U_1 \approx E_1$, vēl var secināt, ka ar nelielu tuvinājumu transformatora galvenā plūsma Φ ir proporcionāla transformatora primārajam spriegumam: $\Phi \sim U$.

Transformatora tukšgaitas režīmā, kad primārajam tinumam pievienots nominālais spriegums, bet sekundārā ķēde pārtraukta, plūsma serdē

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{F}_o}{R_{mg}} = \frac{I_o \omega_1}{R_{mg}}, \quad (4.22)$$

kur $\dot{F}_o = I_o \omega_1$ — primārā tinuma MS tukšgaitas režīmā;

I_o — tukšgaitas strāva;

R_{mg} — transformatora serdes magnētiskā pretestība.

Slogotā transformatorā strāvas plūst primārajā un sekundārajā tinumā un galveno magnētisko plūsmu Φ rada šo tinumu MS kopīga darbība:

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{F}_1 + \dot{F}_2}{R_{mg}} = \frac{I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2}{R_{mg}} \quad (4.23)$$

Tā kā magnētiskā plūsma Φ transformatora serdē nemainās, tad saskaņā ar izteiksmēm (4.22) un (4.23)

$$\frac{I_o \omega_1}{R_{mg}} = \frac{I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2}{R_{mg}} \quad (4.24)$$

Magnētiskās pretestības R_{mg} izteiksmēs (4.22) un (4.23) ir vienādas, jo galvenā magnētiskā plūsma tukšgaitas un slodzes režīmā noslēdzas pa vienu un to pašu ceļu. Tāpēc no izteiksmes (4.24) iegūstam vienādojumu

$$I_o \omega_1 = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2, \quad (4.25)$$

ko sauc par transformatora strāvu jeb MS vienādojumu.

Vienādojumi (4.19), (4.20) un (4.25) veido transformatora pamatvienādojumu sistēmu.

4.4.3. Reducētais transformators

Vispārīgā gadījumā transformatora abu tinumu vijumu skaits ir dažāds ($\omega_1 \neq \omega_2$), tāpēc dažādi ir arī tinumos inducētie EDS ($E_1 \neq E_2$) un tinumos plūstošās strāvas ($I_1 \neq I_2$). Šis apstāklis apgrūtina transformatora primārajā un sekundārajā tinumā norisošo procesu kvantitatīvu salīdzināšanu un attēlošanu vektoru diagrammās, jo transformācijas koeficienti lielākoties ir samērā lieli un tāpēc vienā mērogā grūti attēlot primārās un sekundārās ķēdes elektriskos lielumus (EDS, spriegumus, strāvas).

Minēto grūtību nav, ja abu tinumu elektriskos lielumus pārrēķina jeb reducē uz vienu un to pašu vijumu skaitu. Parasti sekundāro tinumu reducē uz primārā tinuma vijumu skaitu.

Sekundārā tinuma reducēšanas būtība ir tāda, ka transformatora sekundāro tinumu ar vijumu skaitu ω_2 aizstāj ar enerģētiskā ziņā ekvivalentu reducēto tinumu, kuram $\omega'_2 = \omega_1$, t. i., reālo transformatoru, kuram $\omega_1 \neq \omega_2$, aizstāj ar reducēto transformatoru, kuram transformācijas koeficients $k = \omega_1 / \omega'_2 = 1$.

Reducējot sekundāro tinumu uz primāro tinumu, primārās ķēdes lielumi un primārās ķēdes darba režīms netiek mainīti.

Visus sekundārās ķēdes lielumus, kas atbilstoši pārrēķināti uz vijumu skaitu ω'_2 , sauc par reducētajiem lielumiem un tos apzīmē ar tiem pašiem simboliem kā patiesos lielumus, pievienojot zīmi '.

Ievērojot iepriekš minētos nosacījumus, noteiksim transformatora sekundārā tinuma reducētos lielumus.

Tā kā reducētajam transformatoram $\omega'_2 = \omega_1$, tad $E'_2 = E_1$ un no izteiksmes (4.12)

$$E_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} E_2 = k E_2,$$

tad reducētais sekundārā tinuma EDS

$$\left| \begin{array}{l} E'_2 = k E_2. \end{array} \right. \quad (4.26)$$

Sekundāro tinumu reducējot uz primāro, sekundārā tinuma pilnajai jaudai jāpaliek bez izmaiņām, t. i., $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$, no kurienes

$$\left| \begin{array}{l} I'_2 = I_2 \frac{E_2}{E'_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2. \end{array} \right. \quad (4.27)$$

Tā kā pilnajām jaudām, ko slodzei atdod reālais un reducētais sekundārais tinums, jābūt vienādām, t. i., $U'_2 I'_2 = U_2 I_2$, tad

$$\left| \begin{array}{l} U'_2 = \frac{I_2}{I'_2} U_2 = k U_2. \end{array} \right. \quad (4.28)$$

Arī elektriskajiem zudumiem reālajā un reducētajā tinumā jābūt vienādiem, t. i., $I'^2_2 R'_2 = I^2_2 R_2$,

no kurienes reducētā sekundārā tinuma aktīvā pretestība

$$R'_2 = \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 R_2 = k^2 R_2. \quad (4.29)$$

Tā kā aktīvajām jaudām, ko atdod reālā un reducētā transformatora sekundārais tinums, jābūt vienādām, tad jāslabājas arī fāzu nobīdes leņķim starp sekundāro EDS un sekundāro strāvu, t. i.,

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X'_2}{R'_2} = \frac{X_2}{R_2},$$

no kurienes reducētā sekundārā tinuma izkļiedes induktīvā pretestība

$$X'_2 = R'_2 \frac{X_2}{R_2} = k^2 R_2 \frac{X_2}{R_2} = k^2 X_2. \quad (4.30)$$

Reducētā sekundārā tinuma pilno pretestību iegūst, ja ievēro izteiksmes (4.29) un (4.30):

$$\underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2 = k^2 R_2 + jk^2 X_2 = k^2 \underline{Z}_2. \quad (4.31)$$

Ievietosim transformatora sekundārā sprieguma vienādojumā (4.20) un strāvu vienādojumā (4.25) lielumus E_2 , U_2 , I_2 un \underline{Z}_2 no izteiksmēm (4.26), ..., (4.28) un (4.30), t. i., $E_2 = E'_2/k$, $U_2 = U'_2/k$, $I_2 = I'_2/k$, $\underline{Z}_2 = \underline{Z}'_2/k^2$. Pēc iegūto izteiksmju vienkāršošanas reducētā transformatora pamatvienādojumu sistēmu var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1; \quad (4.32)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - I'_2 \underline{Z}'_2; \quad (4.33)$$

$$I_o = I_1 + I'_2. \quad (4.34)$$

4.4.4. Transformatora vektoru diagramma

Vektoru diagramma uzskatāmi parāda sakarības starp primārā un sekundārā tinuma elektriskajiem lielumiem. To var izmantot transformatora dažādu raksturlielumu noteikšanai un procesu analīzei.

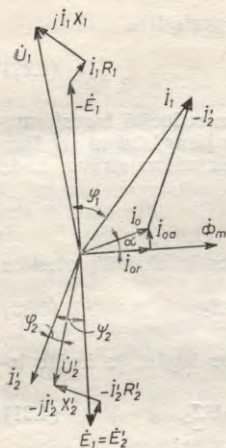
Transformatora vektoru diagrammu var konstruēt, izmantojot reducētā transformatora pamatvienādojumus (4.32), ..., (4.34). Šos vienādojumus nedaudz pārveidojot, iegūstam

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 (R_1 + jX_1), \quad (4.35)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - I'_2 (R'_2 + jX'_2), \quad (4.36)$$

$$I_1 = I_o - I'_2. \quad (4.37)$$

Transformatora vektoru diagrammu (4.15. zīm.) konstruē šādā secībā.



4.15. zīm. Transformatora vektoru diagramma.

kur R'_{s1} un X'_{s1} — reducētā slodzes aktīvā un induktīvā pretestība, pie tam plusa zīme atbilst induktīva rakstura slodzei, bet mīnusa zīme — kapacitīva rakstura slodzei. (4.15. zīmējumā parādītajā vektoru diagrammā attēlots gadījums, kad $\psi_2 > 0$, kas atbilst induktīva rakstura slodzei.)

5. Saskaņā ar vienādojumu (4.37) vektoram I_o pieskaita vektoru $-I'_2$ un iegūst primārās strāvas I_1 vektoru.

6. Atliek vektoru $-E_1$ un tam pieskaita sprieguma krituma vektoru $I_1 R_1$, kas paralēls vektoram I_1 , un sprieguma krituma vektoru $jI_1 X_1$, kas perpendikulārs vektoram I_1 . Tad saskaņā ar vienādojumu (4.35) šo vektoru summa dod primāro spriegumu \dot{U}_1 .

7. Saskaņā ar vienādojumu (4.36), vektoram \dot{E}'_2 pieskaitot vektoru $-I'_2 R'_2$ un vektoru $-jI'_2 X'_2$, iegūst sekundārā sprieguma \dot{U}'_2 vektoru.

Induktīva rakstura slodzes gadījumā vienmēr $\psi_2 > 0$ un strāvas I'_2 vektors atpaliek fāzē no \dot{E}'_2 . Ja slodzei ir kapacitīvs raksturs, iespējami trīs raksturīgi gadījumi: a) $X'_{s1} < X'_2$, kad saskaņā ar izteiksmi (4.39) $\psi_2 > 0$; b) $X'_{s1} > X'_2$, $\psi_2 < 0$; c) $X'_{s1} = X'_2$, $\psi_2 = 0$.

Vektoru diagrammā attēloto tukšgaitas strāvas vektoru I_o var sadalīt aktīvajā komponentē $I_{o,a}$, kuras lielums atkarīgs no magnētiskajiem zudumiem transformatorā, un reaktīvajā komponentē $I_{o,r}$, kura rada galveno magnētisko plūsmu, un tāpēc to sauc par *magnetizēšanas strāvu*. Spēka transformatoros tukšgaitas strāva I_o ir neliela (1...5% no I_N). Bez tam parasti $I_{o,a} \ll I_{o,r}$, un tāpēc daudzos gadījumos var pieņemt, ka $I_o \approx I_{o,r}$.

1. Konstruē magnētiskās plūsmas $\dot{\Phi}_m$ vektoru.

2. Strāvas mērogā atliek tukšgaitas strāvas I_o vektoru, kas apsteidz plūsmas $\dot{\Phi}_m$ vektoru par magnētisko zudumu leņķi α , kura lielums atkarīgs no magnētiskajiem zudumiem transformatorā serdē.

3. Sprieguma mērogā konstruē EDS \dot{E}_1 un \dot{E}'_2 vektorus, kuri saskaņā ar izteiksmi (4.8) atpaliek fāzē no $\dot{\Phi}_m$ par 90° .

4. Atliek strāvas I'_2 vektoru. Strāvas I'_2 skaitlisko vērtību un fāzu nobīdes leņķi attiecībā pret \dot{E}'_2 aprēķina no šādām izteiksmēm:

$$I'_2 = \frac{E'_2}{\sqrt{(R'_2 + R'_{s1})^2 + (X'_2 \pm X'_{s1})^2}}; \quad (4.38)$$

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 \pm X'_{s1}}{R'_2 + R'_{s1}}, \quad (4.39)$$

4.4.5. Transformatora ekvivalentās shēmas

Enerģijas pārvešana transformatorā no primārā uz sekundāro tinumu notiek ar elektromagnētiskā lauka starpniecību. Tas nozīmē, ka precīzai kvantitatīvo un kvalitatīvo sakarību analīzei transformatorā būtu jāizmanto elektromagnētiskā lauka vienādojumi. Tomēr šāds ceļš ir sarežģīts, un tāpēc transformatora darba režīmu analīzei un aprēķiniem izmanto ekvivalentās shēmas.

Par transformatora ekvivalento shēmu sauc tādu elektrisko pretestību slēgumu, kurš, pievienots transformatora vietā spriegumam \dot{U}_1 , patērē tādu pašu strāvu un tādu pašu jaudu kā reālais transformators.

Transformatora ekvivalento shēmu izveido tā, lai Kirhhofa vienādojumi šādai shēmai atbilstu reducētā transformatora pamatvienādojumiem, t. i., vienādojumiem (4.35), ..., (4.37).

Sekundārais reducētais spriegums \dot{U}'_2 vienādojumā (4.36) ir vienāds ar sprieguma kritumu slodzes reducētajā pretestībā Z'_{s1} :

$$\dot{U}'_2 = I'_2 Z'_{s1}. \quad (4.40)$$

No transformatora vektoru diagrammas (4.15. zīm.) redzams, ka fāzu nobīdes leņķis starp vektoriem $-\dot{E}_1$ un I_o ir mazāks par 90° . Tāpēc var uzskatīt, ka spriegumam $-\dot{E}_1$ ir pieslēgta kaut kāda pilna pretestība $Z_m = R_m + jX_m$, no kuras ir atkarīga strāva I_o , t. i., $-\dot{E}_1 = I_o Z_m$ jeb

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -I_o Z_m. \quad (4.41)$$

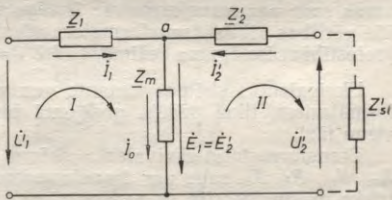
Ievērojot izteiksmes (4.40) un (4.41), transformatora pamatvienādojumus (4.35), ..., (4.37) var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U}_1 = I_1 Z_1 + I_o Z_m; \quad (4.42)$$

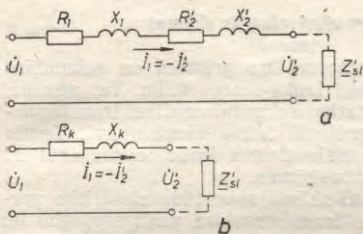
$$-I_o Z_m - I'_2 Z'_2 = I'_2 Z'_{s1}; \quad (4.43)$$

$$I_1 + I'_2 = I_o. \quad (4.44)$$

Var pārliecināties, ka šie vienādojumi atbilst 4.16. zīmējumā attēlotās elektriskās shēmas Kirhhofa vienādojumiem, kuri uzrakstīti kontūriem I un II un mezgla punktam a. Tas nozīmē, ka reālos procesus, kas noris transformatorā ar magnētisku saiti starp primāro un sekundāro tinumu, var aprakstīt un aprēķināt, izmantojot ekvivalentu shēmu, kurā starp šiem tinumiem ir elektriska saite. Šādu shēmu sauc par transformatora T veida ekvivalento shēmu.



4.16. zīm. Transformatora T veida ekvivalentā shēma.



4.17. zīm. Transformatora vienkāršotas ekvivalentās shēmas:

a — shēma ar virknē slēgtām primārā un sekundārā tinuma pretestībām, *b* — shēma ar išslēguma pretestībām.

Noskaidrosim magnetizēšanas zara pilnās pretestības $\underline{Z}_m = R_m + jX_m$ fizikālo jēgu.

Galvenā magnētiskā plūsmas uzturēšanai transformatora serdē izraisa magnētiskos zudumus ΔP_{mg} . Ekvivalentajā shēmā šie zudumi tiek ievēroti kā elektriskie zudumi, kas izdala pretestībā R_m . Tātad

$$R_m = \frac{\Delta P_{mg}}{I_o^2} \quad (4.45)$$

Galvenās magnētiskās plūsmas uzturēšanai transformatora serdē tiek patērēta

kaut kāda reaktīvā jauda Q_m . Ekvivalentajā shēmā šai jaudai atbilst reaktīvā jauda, kuru patērē pretestība X_m un tāpēc

$$X_m = \frac{Q_m}{I_o^2} \quad (4.46)$$

Daudziem praktiskiem aprēķiniem, kuros nav nepieciešama liela precizitāte, izmanto *vienkāršotu ekvivalento shēmu*. To iegūst no T veida ekvivalentās shēmas, pieņemot, ka $I_o = 0$, jo I_o ir tikai dažī procenti no I_{1N} . Vienkāršoto ekvivalento shēmu gan nevar izmantot tukšgaitai tuva darba režīma aprēķinam.

Tātad vienkāršotajā ekvivalentajā shēmā nav magnetizēšanas zara *ab*, t. i., $R_m = X_m = \infty$, visas transformatora pretestības slēgtas virknē un $I_1 = -I'_2$ (4.17. zīm. *a*). Tāpēc pretestības R_1 , R'_2 , X_1 un X'_2 var aizstāt ar summārajām pretestībām (4.17. zīm. *b*)

$$R_k = R_1 + R'_2, \quad (4.47)$$

$$X_k = X_1 + X'_2, \quad (4.48)$$

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2, \quad (4.49)$$

kuras sauc par *transformatora išslēguma pretestībām*, jo to skaitliskās vērtības atbilst transformatora vienkāršotās ekvivalentās shēmas pretestībām išslēguma režīmā, kad $\underline{Z}'_{s1} = 0$.

Ekvivalentās shēmas izmanto gan vienfāzes, gan trīsfāzu transformatoriem, tikai pēdējā gadījumā tās attiecas uz transformatora vienu fāzi.

Transformatora ekvivalento shēmu pretestības R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2 , R_m , X_m , R_k , X_k sauc par transformatora parametriem. Vispār elektrisko mašīnu teorijā ar parametriem saprot dažādus elektriska rakstura lielumus (galvenokārt pretestības), kuri praktiski nav atkarīgi no darba režīma, vai arī šī atkarība izpaužas netieši.

Lai salīdzinātu dažādas jaudas transformatoru parametrus, ir lietderīgi tos izteikt relatīvajās vienībās (sk. 2.6.). Spēka transformatoriem pretestības relatīvajās vienībās: $R_{1*} \approx R'_{2*} = 0,01 \dots 0,05$; $X_{1*} \approx X'_{2*} = 0,02 \dots 0,1$; $R_{m*} = 2,5 \dots 20$; $X_{m*} = 25 \dots 200$.

4.4.6. Procesi, kas saistīti ar transformatora serdes magnetizēšanu. EDS un strāvu augstākās harmoniskās

Magnētisko materiālu īpašības raksturo šo materiālu magnetizēšanas likne $B=f(H)$. Ja indukcija serdē nepārsniedz 0,8 T, tad magnetizēšanas likne ir praktiski lineāra, bet lielāku indukciju gadījumā piesātinājuma dēļ tā kļūst nelineāra (4.18. zīm.). Analizējot procesus, kas saistīti ar transformatora serdes magnetizēšanu, ērtāk ir izmantot nevis likni $B=f(H)$, bet gan likni, kura raksturo magnētiskās plūsmas Φ atkarību no magnetizēšanas strāvas (tukšgaitas strāvas reaktīvās komponentes) $i_{o,r}$.

Magnētiskā plūsma transformatora serdē ir tieši proporcionāla indukcijai:

$$\Phi = BS, \quad (4.50)$$

kur S — serdes šķēsgriezums.

Savukārt magnetizēšanas strāva $i_{o,r}$ ir proporcionāla magnētiskā lauka intensitātei H , kas izriet no pilnās strāvas likuma:

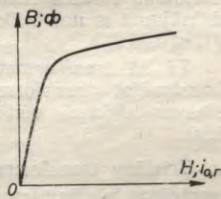
$$Hl = i_{o,r} w_1, \quad (4.51)$$

kur l — magnētiskās spēka līnijas vidējais garums transformatora serdē.

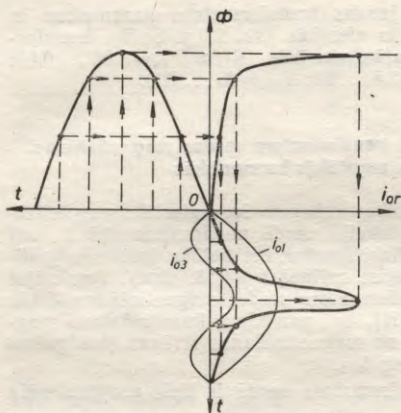
Tādējādi no izteiksmēm (4.50) un (4.51) var secināt, ka sakarība $\Phi = f(i_{o,r})$ citā mērogā attēlo transformatora magnetizēšanas likni $B = f(H)$.

Parādības, kas saistītas ar serdes magnetizēšanu, vienfāzes un trīsfāzu transformatoros izpaužas dažādi. Trīsfāzu transformatoros tās ir atkarīgas no serdes konstrukcijas un tinumu slēguma shēmas. Analizējot šīs parādības trīsfāzu transformatoros, atsevišķi jāaplūko divi magnētisko sistēmu tipi: stieņu tipa transformatori ar kopīgu magnētviadu visām fāzēm (sk. 4.4. zīm. a) un transformatoru trīsfāzu grupa, kuru veido trīs vienfāzes transformatori ar atsevišķu magnētisko sistēmu katrai fāzei. Trīsfāzu apvalka tipa transformatoros ar serdes magnetizēšanu saistītās īpatnības ir pilnīgi analogiskas parādībām transformatoru trīsfāzu grupā, tikai mazāk izteiktas.

Vienfāzes transformators. Pieņemsim, ka transformators strādā tukšgaitā un tā primārajam tinumam pievienots sinusoidāls maiņspriegums.



4.18. zīm. Transformatora magnetizēšanas likne.



4.19. zīm. Vienfāzes transformatora magnetizēšanas strāva un tās noteikšana.

Ja neievērojam nelielo sprieguma kritumu transformatora primārajā tinumā, tad primārais spriegums tiek līdzsvarots ar inducēto EDS: $u_1 \approx -e_1$. Tāpēc, ja transformatoram pievienotais spriegums u_1 mainās sinusoidāli, tad arī EDS e_1 mainās sinusoidāli, bet tas nozīmē, ka arī magnētiskā plūsma transformatora serdē mainās sinusoidāli (sk. 4.4.2.).

Starp magnētisko plūsmu Φ un magnetizēšanas strāvu $i_{o,r}$, kā jau minēts, pastāv nelineāra sakarība, un tāpēc strāva $i_{o,r}$ ir nesinusoidāla. 4.19. zīmējumā parādīta liknes $i_{o,r} = f(t)$ konstruēšana sinusoidāli mainīgai magnētiskajai plūsmaj (šeit parādīts ti-

kai viens Φ un $i_{o,r}$ izmaiņas pusperiods). Konstruācijas gaita parādīta ar bultiņām.

Nesinusoidālā magnetizēšanas strāvas likne ir simetriska attiecībā pret t asi, un tāpēc šī strāva satur tikai nepārskaitļu harmoniskās ($i_{o1}, i_{o3}, i_{o5} \dots$), pie tam praktiski jāņem vērā tikai pirmā un trešā harmoniskā.

Tukšgaitas strāvas i_o likni var iegūt, ja ievēro šīs strāvas aktīvo komponenti $i_{o,a}$, kura ir sinusoidāla un attiecībā pret magnetizēšanas strāvu nobīdīta fāzē par 90° (sk. 4.15. zīm.). Bet, tā kā parasti $I_{o,a} \ll I_{o,r}$, tad aktīvā komponente $i_{o,a}$ tukšgaitas strāvas liknes formu praktiski neietekmē un to var neievērot.

Tukšgaitas strāvas liknes kropļojumi transformatora darbību normālas slodzes režīmā nevar ietekmēt, jo tukšgaitas strāva salīdzinājumā ar nominālo strāvu spēka transformatoros ir relatīvi maza ($I_o \leq 0,05 I_N$).

Tā kā transformatora tukšgaitas strāva ir nesinusoidāla, tad konstruējot transformatora vektoru diagrammu, tajā jāatliek šīs strāvas efektīvā vērtība, kas aprēķināta no ekvivalentās sinusoidas.

Trīsfāzu transformators ar tinumu slēgumu Y / Y . Aplūkojot parādības trīsfāzu transformatorā, ņemsim vērā tikai tukšgaitas strāvas trešo harmonisko, jo pārējās (piektā, septītā utt.) jau ir relatīvi mazas.

Tinuma fāzēs tukšgaitas strāvas trešās harmoniskās

$$\begin{aligned} i_{03A} &= I_{03m} \sin 3 \omega t, \\ i_{03B} &= I_{03m} \sin 3 (\omega t - 2\pi/3) = I_{03m} \sin 3 \omega t, \\ i_{03C} &= I_{03m} \sin 3 (\omega t - 4\pi/3) = I_{03m} \sin 3 \omega t. \end{aligned} \quad (4.52)$$

Tātad tukšgaitas strāvas trešās harmoniskās sakrīt fāzē, t. i., vērstas no tinuma sākuma uz beigām vai otrādi visās fāzēs vienlaikus. Tas nozīmē, ka zvaigznes slēgumā strāvas trešās harmoniskās nevar izveidoties, jo tām nav noslēgšanās ceļa. Šai gadījumā trešās harmoniskās parādās magnētiskās plūsmas līknē, kuras konstrukcija parādīta 4.20. zīmējumā.

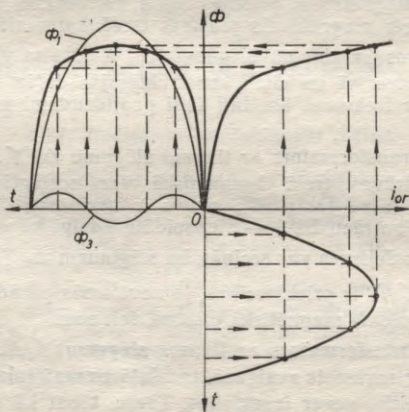
Ja ievērojam tikai pirmo un trešo harmonisko, magnētiskā plūsma serdē

$$\Phi = \Phi_{1m} \sin \omega t + \Phi_{3m} \sin 3 \omega t$$

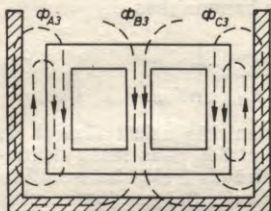
un fāzes EDS

$$e_t = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega_1 \omega \Phi_{1m} \cos \omega t - 3\omega_1 \omega \Phi_{3m} \cos 3\omega t = e_{t1} + e_{t3}.$$

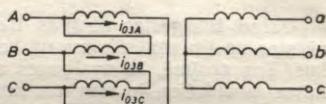
Sevišķi izteikta magnētiskās plūsmas trešā harmoniskā ir transformatoru trīsfāzu grupai (Φ_{3m} skaitliskā vērtība šajā gadījumā ir 15...20% no Φ_{1m} , jo šī plūsma noslēdzas pa ceļu ar mazu magnētisko pretestību, t. i., pa to pašu ceļu, kur plūsmas pirmā harmoniskā). Tā kā plūsma Φ_3 mainās ar frekvenci 3ω , tad šīs plūsmas inducētā EDS e_{t3} amplitūdas vērtība var sasniegt 45...60% no



4.20. zīm. Magnētiskā plūsma transformatora serdē, ja tukšgaitas strāva sinusoidāla.



4.21. zīm. Magnētiskās plūsmas trešo harmonisko lauks trīsfāzu stieņu tipa transformatorā.



4.22. zīm. Tukšgaitas strāvas trešās harmoniskās, ja primārais tinums slēgts trīsstūrī.

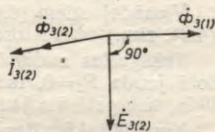
EDS e_{t1} amplitūdas vērtības. Līdz ar to transformatora EDS un fāzu spriegumu līknes ir stipri kroplotas. Līnijas spriegumi, kas vienādi ar fāzu spriegumu starpību, trešās harmoniskās nesatur, jo šīs harmoniskās visu fāzu tinumos sakrīt fāzē.

Trīsfāzu stieņu tipa transformatoros aprakstītās parādības kvalitatīvi ir analogiskas. Tomēr šādos transformatoros magnētiskās plūsmas, fāzu EDS un fāzu spriegumu līknes ir praktiski sinusoidālas. Stieņu tipa transformatoros magnētiskās plūsmas trešajām harmoniskajām, kuras jebkurā mirklī visos stieņos ir vērstas vienā virzienā, ir iespēja noslēgties tikai gaisā, tvertnes sienās un citās konstruktīvajās daļās (4.21. zīm.), t. i., pa ceļiem ar lielu magnētisko pretestību. Tāpēc magnētiskās plūsmas trešā harmoniskā šajā gadījumā ir maza. Tomēr magnētiskās plūsmas trešā harmoniskā stieņu tipa transformatoros ar tinumu slēgumu Υ / Υ izraisa virpuļstrāvu papildzudumus tvertnē un citās konstruktīvajās daļās. Tā kā plūsma Φ_3 mainās ar frekvenci 3ω , tad šādi papildzudumi var būt relatīvi lieli.

Trīsfāzu transformators ar tinumu slēgumu Δ / Υ . Šādā slēgumā tukšgaitas strāvas trešā harmoniskā var noslēgties pa tinumu (4.22. zīm.). Tātad tukšgaitas strāva ir nesinusoidāla, bet magnētiskā plūsma un fāzu EDS — sinusoidāli, līdzīgi kā vienfāzes transformatorā. No šejienes var secināt, ka slēgumam Δ / Υ salīdzinājumā ar slēgumu Υ / Υ ir priekšrocības, jo nevēlamās parādības, kuras izraisa nesinusoidāla magnētiskā plūsma, šeit nav.

Trīsfāzu transformators ar tinumu slēgumu Υ / Δ . Tā kā primārais tinums ir savienots zvaigznē, tad šajā tinumā tukšgaitas strāvas trešā harmoniskā nevar izveidoties. Tāpēc, tāpat kā slēgumā Υ / Υ , trešo harmonisko satur magnētiskās plūsmas līkne. Tomēr plūsmas trešā harmoniskā ir maza un transformatora darbību praktiski netiek mē. Lai to izskaidrotu, aplūkosim 4.23. zīmējumā attēloto vektoru

diagrammu. Primārā tinuma magnētiskās plūsmas trešā harmoniskā $\dot{\Phi}_{3(1)}$ sekundārā tinuma katrā fāzē inducē EDS trešo harmonisko $\dot{E}_{3(2)}$, kas no plūsmas atpaliek fāzē par 90° . EDS $\dot{E}_{3(2)}$ visās fāzēs vērsti vienā virzienā, un to kopīgās darbības rezultātā noslēgtajā sekundārā tinuma kontūrā plūst strāva $I_{3(2)}$. Tā kā transformatora tinumam pārsvarā ir induktīva pretestība, tad strāva $I_{3(2)}$ atpaliek fāzē no EDS $\dot{E}_{3(2)}$ par leņķi, kas tuvs 90° . Šādos apstākļos magnētiskā plūsma $\dot{\Phi}_{3(2)}$ gandrīz pilnīgi kompensē plūsmu $\dot{\Phi}_{3(1)}$. Tāpēc rezultējošā trešās harmoniskās magnētiskās plūsma transformatora serdē ir maza un magnētiskās plūsmas, EDS un fāzu spriegumu liknes ir praktiski sinusoidālas. No šī viedokļa tinumu slēgumu Υ/Δ var uzskatīt par līdzvērtīgu slēgumam Δ/Υ .



4.23. zīm. Magnētisko plūsmu un strāvu harmonisko vektoru diagramma.

No teiktā var secināt, ka slēgumā Υ/Υ neatkarīgi no magnētiskās sistēmas konstrukcijas transformatorā rodas nevēlamas parādības (fāzu spriegumu kropļojumi vai palielināti papildzudumi). Tāpēc slēgumu Υ/Υ lieljaudas transformatoriem parasti nelieto. Ja tomēr rodas nepieciešamība izmantot slēgumu Υ/Υ , tad transformatorā izveido trešo tinumu, kurš slēgts trīsstūrī (bez izvadiem), un šī tinuma vadu šķērsriezums aprēķināts tikai trešās harmoniskās strāvām.

4.5. TRANSFORMATORA TUKŠGAITA UN ĪSSLĒGUMS

4.5.1. Transformatora tukšgaitas režīms

Tukšgaitas un īsslēguma režīms ir transformatora normāla darba režīma divi robežgadījumi, kurus izmanto transformatora dažādu raksturlielumu noteikšanai. Uz šo režīmu sintēzes pamata var iegūt transformatora raksturlielnes un parametrus jebkuram režīmam, to skaitā arī nominālās slodzes režīmam.

Par transformatora tukšgaitu sauc režīmu, kurā transformatora primārajam tinumam pievada spriegumu, bet sekundārā tinuma ķēde ir pārtraukta, t. i., $Z_{s1} = \infty$, $I'_2 = 0$ (sk. 4.16. zīm.). Minētajiem nosacījumiem reducētā transformatora pamatvienādojumu sistēma (4.32), ..., (4.34) pārveidojas šādi:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + I_o Z_1; \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2; \\ I_o &= I_1. \end{aligned} \quad (4.53)$$

Vienādojumiem (4.53) atbilst ekvivalentā shēma tukšgaitas režīmā (4.24. zīm.) un vektoru diagramma (4.25. zīm.).

Tukšgaitas zudumi. Tā kā tukšgaitas režīmā transformatora atdotā jauda $P_2=0$, tad visa jauda P_0 , ko transformators saņem no tīkla, tiek patērēta jaudas zudumu segšanai.

Kopējie tukšgaitas zudumi P_0 sastāv no tukšgaitas elektriskajiem zudumiem transformatora primārajā tīnumā ΔP_{e1_0} un magnētiskajiem zudumiem serdes tēraudā ΔP_{mg} .

Tukšgaitas elektriskie zudumi $\Delta P_{e1_0}=I_0^2 R_1$ spēka transformatoros ir ļoti mazi, tāpēc šos zudumus aprēķinos var neievērot. Magnētiskie zudumi summējas no histerēzes un virpuļstrāvu zudumiem, kurus transformatora serdē izraisa periodiski mainīga magnētiskā plūsma. Šie zudumi ir atkarīgi no indukcijas serdē un frekvences:

$$\Delta P_{mg} \sim B^2 f^{1.3}$$

jeb

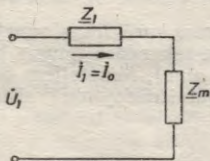
$$\Delta P_{mg} \sim \Phi^2 f^{1.3}$$

Ja $f=\text{const}$, tad, ievērojot, ka $\Phi \sim U$ (sk. 4.4.2.), magnētiskie zudumi ir proporcionāli primārā sprieguma kvadrātam, t. i.,

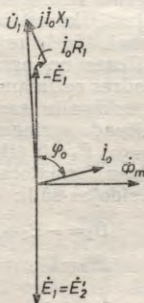
$$\Delta P_{mg} \sim U_1^2. \quad (4.54)$$

Ievērojot teikto, var secināt, ka transformatora tukšgaitas jauda tiek patērēta magnētisko zudumu segšanai, t. i., $P_0=\Delta P_{mg}$. Šie zudumi nav atkarīgi no transformatora slodzes, un tāpēc tos sauc arī par nemainīgajiem zudumiem.

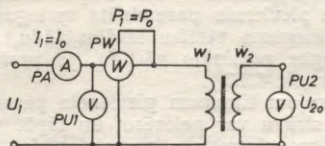
Transformatora magnētisko zudumu aprēķinos parasti izmanto īpatnējos zudumus p_{mg} (W/kg), kuri ir atkarīgi no lietojamā tērauda markas. Aprēķinos ievēro arī papildzudumus, kuru cēloņi ir struktūras izmaiņa elektrotehniskā tērauda skārdā, to mehāniski apstrādājot; magnētiskās indukcijas nevienmērīgs sadalījums sadurvietās un skrūvju stiprinājuma vietās; izkliedes plūsmas, kuras daļēji noslēdzas pa transformatora konstruktīvajām daļām, utt.



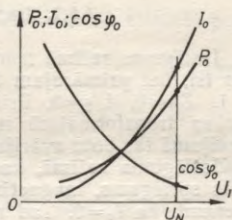
4.24. zīm. Transformatora ekvivalentā shēma tukšgaitas režīmā.



4.25. zīm. Transformatora vektoru diagramma tukšgaitas režīmā.



4.26. zīm. Transformatora tukšgaitas mēģinājuma shēma.



4.27. zīm. Transformatora tukšgaitas raksturlieknes.

Tukšgaitas mēģinājums. Lai noteiktu svarīgākos parametrus, kas raksturo transformatora tukšgaitas režīmu, veic tukšgaitas mēģinājumu, kura shēma attēlota 4.26. zīmējumā.

Transformatora primārajam tinumam pievieno sinusoidālu spriegumu, bet sekundārā tinuma ķēde ir pārtraukta. Tukšgaitas mēģinājumā izmēra primāro spriegumu U_1 , strāvu $I_1 = I_0$ un jaudu $P_1 = P_0$, kā arī sekundāro spriegumu U_{20} .

No mēģinājuma rezultātiem aprēķina transformācijas koeficientu

$$k = \frac{U_1}{U_{20}};$$

tukšgaitas pilno, aktīvo un induktīvo pretestību

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}, \quad R_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

jaudas koeficientu tukšgaitā

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}.$$

No transformatora ekvivalentās shēmas tukšgaitas režīmā (sk. 4.24. zīm.) redzams, ka $Z_0 = Z_1 + Z_m$, $R_0 = R_1 + R_m$, $X_0 = X_1 + X_m$.

Spēka transformatoros $R_1 \ll R_m$ un $X_1 \ll X_m$. Tāpēc ar pietiekamu precizitāti var uzskatīt, ka tukšgaitas mēģinājumā ir noteiktas magnetizēšanas zara pretesības $R_m \approx R_0$, $X_m \approx X_0$, $Z_m \approx Z_0 = R_0 + jX_0$. Ši

paša iemesla dēļ izmērītā jauda P_0 ir vienāda ar transformatora magnētiskajiem zudumiem.

Veicot transformatora tukšgaitas mēģinājumu, primāro spriegumu maina no 0,3 U_{1N} līdz 1,1 U_{1N} . Lai novērstu gadījuma rakstura kļūdas, P_0 , I_0 un $\cos \varphi_0$ vērtības, kas atbilst nominālajam spriegumam, nosaka no *tukšgaitas raksturlieknēm* (4.27. zīm.).

Trīsfāzu transformatora tukšgaitas mēģinājumu veic tāpat kā vienfāzes transformatoram. Tikai, nosakot parametrus, jāņem vērā transformatora primārā tinuma slēgums, jo pretestības Z_0 , R_0 un X_0 ir jāaprēķina kā fāzu pretestības.

4.5.2. Transformatora īsslēguma režīms

Īsslēguma režīmā transformatora sekundārā tinuma spaiļes slēgtas īsi, bet primārajam tinumam pievienots pazemināts spriegums, t. i., $Z_{s1}=0$, $U'_2=0$. Primārā sprieguma vērtību izvēlas tādu, lai strāva transformatorā nepārsniegtu nominālo vērtību, jo pretējā gadījumā tas būtu avārijas režīms (sk. 4.8.3.).

Īsslēguma režīmā, kad primārajam tinumam pievienots pazemināts spriegums, magnetizēšanas strāvu var neievērot un tāpēc var pieņemt, ka $I_0=0$. Tad reducētā transformatora pamatvienādojumu sistēma (4.32), ..., (4.34) pārveidojas šādi:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{E}'_2 &= I'_2 \underline{Z}'_2; \\ I_1 &= -I'_2. \end{aligned} \quad (4.55)$$

Saskaņā ar vienādojumiem (4.55) konstruētā transformatora vektoru diagramma īsslēguma režīmā attēlota 4.28. zīmējumā *a*.

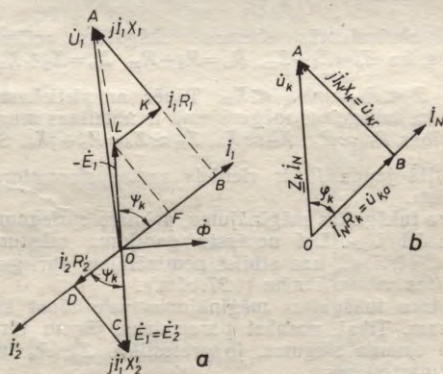
Īsslēguma režīma aprēķinam derīga transformatora vienkāršotā ekvivalentā shēma (4.29. zīm.).

Īsslēguma spriegums. Vektoru diagrammu ekvivalentajai shēmai, kas attēlota 4.29. zīmējumā, var iegūt, ja sprieguma kritumu trīsstūrus *OCD* un *AKL* apvieno kopējā sprieguma kritumu trīsstūrī *ABO*

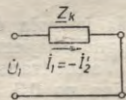
(4.28. zīm. *a*). (Tā kā $I_1 = -I'_2$, tad $\overline{OF} = I'_2 R'_2$ un $\overline{BK} = I'_2 X'_2$.) Trīsstūrī *ABO* sauc par *īsslēguma trīsstūri*, un tas atsevišķi parādīts 4.28. zīmējumā *b* gadījumam, kad $I_1 = I_N$.

Spriegumu, kas īsslēguma režīmā primārajam tinumam uztur nominālo strāvu I_N , sauc par transformatora īsslēguma spriegumu u_k .

Ja $I_1 = I_N$, saskaņā ar vienkāršoto ekvivalento shēmu (4.29. zīm.)



4.28. zim. Transformatora vektoru diagramma īsslēguma režīmā (a) un īsslēguma trīsstūris (b).



4.29. zim. Transformatora ekvivalentā shēma īsslēguma režīmā.

Issléguma spriegums skaitliski ir vienāds ar sprieguma kritumu pretestībā Z_h :

$$| \quad \quad \quad u_h = I_N Z_h. \quad (4.56)$$

Lielumus

$$u_{h,a} = u_h \cos \varphi_h = I_N R_h, \quad (4.57)$$

$$u_{h,r} = u_h \sin \varphi_h = I_N X_h \quad (4.58)$$

sauc par *issléguma sprieguma aktīvo un reaktīvo komponenti*.

Issléguma spriegums relatīvajās vienībās skaitliski ir vienāds ar īssléguma pretestību relatīvajās vienībās:

$$u_{h*} = \frac{u_h}{U_N} = \frac{I_N Z_h}{U_N} = \frac{Z_h}{Z_B} = Z_{h*}. \quad (4.59)$$

Līdzīgi

$$u_{h,a*} = R_{h*}, \quad u_{h,r*} = X_{h*}.$$

Parasti īssléguma spriegumu izsaka procentos no nominālā sprieguma:

$$u_h (\%) = \frac{u_h}{U_N} \cdot 100 = 100 u_{h*} = 100 Z_{h*}.$$

Issléguma spriegums procentos dots transformatora pasē, un tas ir viens no svarīgākajiem transformatora lielumiem. Tā, piemēram, zinot $u_h (\%)$ vērtību, var aprēķināt transformatora īssléguma strāvu I_h avārijas īssléguma režīmā, t. i., apstākļos, kad transformatoram pieslēgts nominālais spriegums. Šajā gadījumā $I_h = U_N / Z_h$ jeb $I_{h*} = 1 / Z_{h*} = 100 / u_h (\%)$.

Spēka transformatoriem parasti $u_h (\%) = 4,5 \dots 15 \%$. Mazākās vērtības attiecas uz zemu spriegumu un mazjaudas transformatoriem, bet lielākās — uz augstu spriegumu un lieljaudas transformatoriem. Augsta sprieguma transformatoriem elektroizolācijas efektivitātes paaugstināšanai augstsprieguma un zemsprieguma tinumus novieto tālāk no serdes un vienu no otra. Līdz ar to palielinās izkliedes plūsmas, tinumu izkliedes induktīvās pretestības X_1 un X_2 un tātad arī īssléguma sprieguma reaktīvā komponente $u_{h,r}$.

Issléguma zudumi. Tā kā īssléguma režīmā transformatora primārajam tinumam pievienots daudzkārt samazināts spriegums, bet magnētiskie zudumi serdē saskaņā ar izteiksmi (4.54) proporcionāli sprieguma kvadrātam, tad magnētiskie zudumi šajā režīmā $\Delta P_{mg} \approx 0$. Tāpēc var uzskatīt, ka visa jauda P_h , ko transformators uzņem no tīkla īssléguma režīmā, tiek patērēta elektrisko zudumu segšanai primārajā (ΔP_{e1}) un sekundārajā (ΔP_{e2}) tinumā:

$$P_h = \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R^2 = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'. \quad (4.60)$$

Tā kā īssléguma režīmā saskaņā ar izteiksmēm (4.55) $I_1 = I_2'$, bet $R_1 + R_2' = R_h$, tad

$$P_h = I_1^2 R_h. \quad (4.61)$$

Praktiskos aprēķinos īsslēguma zudumus (elektriskos zudumus) nosaka, izmantojot relatīvo slodzes strāvu jeb *slodzes koeficientu*

$$I_* = \frac{I_1}{I_{1N}} = \frac{I_2}{I_{2N}}, \quad (4.62)$$

no kurienes

$$I_1 = I_* I_{1N}, \quad I_2 = I_* I_{2N}. \quad (4.63)$$

Ievērojot izteiksmes (4.61) un (4.63),

$$P_k = I_*^2 I_{1N}^2 R_k = I_*^2 P_{k,N}, \quad (4.64)$$

kur $P_{k,N}$ — īsslēguma zudumi, kas atbilst nominālajai strāvai tinumos.

Tādas īsslēguma zudumi ir atkarīgi no transformatora slodzes, un tāpēc tos sauc arī par mainīgajiem zudumiem.

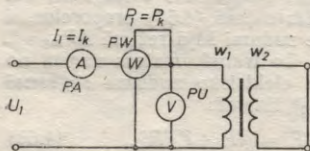
Īsslēguma mēģinājums. Īsslēguma mēģinājuma shēma attēlota 4.30. zīmējumā. Transformatora primārajam tinumam pievieno samazinātu spriegumu U_1 , bet sekundārā tinuma spaiļes saslēdz īsi. Īsslēguma mēģinājumā izmēra primāro spriegumu U_1 , strāvu $I_1 = I_k$ un jaudu $P_1 = P_k$.

No mēģinājuma rezultātiem aprēķina īsslēguma pilno, aktīvo un induktīvo pretestību $Z_k = U_1/I_k$, $R_k = P_k/I_k^2$, $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$; īsslēguma spriegumu un tā komponentes

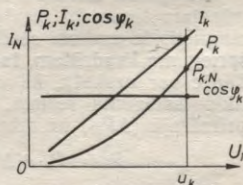
$$u_k(\%) = \frac{I_N Z_k}{U_N} 100, \quad u_{k,a}(\%) = \frac{I_N R_k}{U_N} 100, \quad U_{k,r}(\%) = \frac{I_N X_k}{U_N} 100.$$

Nosakot pretestību R_k , kā arī citus no šīs pretestības atkarīgus lielumus ($u_{k,a}(\%)$, $u_k(\%)$, $P_{k,N}$), tos reducē atbilstoši nosacītajai temperatūrai 75 °C, jo tādu saskaņā ar Valsts standartu GOST 11677—75 pieņem slogota transformatora vidējo darba temperatūru.

No īsslēguma mēģinājuma var noteikt tikai vienkāršotās ekvivalentās shēmas parametrus R_k , X_k . T veida ekvivalentās shēmas primārā un sekundārā tinuma parametrus R_1 , R'_2 un X_1 , X'_2 var noteikt aptuveni, pieņemot, ka $R_1 \approx R'_2 \approx R_k/2$, $X_1 \approx X'_2 \approx X_k/2$.



4.30. zīm. Transformatora īsslēguma mēģinājuma shēma.



4.31. zīm. Transformatora īsslēguma raksturliķnes.

Ja primārā un sekundārā tinuma pretestības izmērītas ar līdzstrāvu, piemēram, ar voltmetra un ampērmētra metodi, tad pretestības R_1, R'_2, X_1, X'_2 var noteikt no šādām aptuvenām sakarībām:

$$R_1/R'_2 = R_{10}/k^2 R_{20}; \quad X_1/X'_2 = R_{10}/k^2 R_{20},$$

kur R_{10} un R_{20} — tinumu aktīvās pretestības, kas izmērītas ar līdzstrāvu.

Veicot transformatora išslēguma mēģinājumu, primāro spriegumu maina no nulles līdz vērtībai, kad $I_1 \approx 1,1 I_N$. Lai novērstu gadījuma rakstura kļūdas, u_h, P_h un $\cos \varphi_h$ vērtības, kas atbilst nominālajai strāvai, nosaka no išslēguma raksturliņņēm (4.31. zīm.).

4.6. TRANSFORMATORA DARBĪBA SLODZES REŽĪMĀ

4.6.1. Slēgta transformatora sprieguma izmaiņa

Par transformatora sprieguma izmaiņu sauc algebrisko starpību starp sekundāro spriegumu tukšgaitā U_{20} un sekundāro spriegumu U_2 , kas atbilst nominālajai slodzes strāvai I_{2N} , ja $U_1 = U_{1N}$.

Sprieguma izmaiņu parasti izsaka procentos no nominālā sekundārā sprieguma, bet, tā kā $U_{20} = U_{2N}$, tad

$$\Delta U (\%) = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} 100 = \frac{U'_{2N} - U'_2}{U'_{2N}} 100 = \frac{U_{1N} - U'_2}{U_{1N}} 100. \quad (4.65)$$

Noteiksim *sprieguma procentuālo izmaiņu* nominālās slodzes režīmā, izmantojot vienkāršoto transformatora ekvivalento shēmu (sk. 4.17. zīm.). Sai shēmai atbilst sprieguma vienādojums

$$\dot{U}_{1N} = \dot{U}'_2 + I_{1N} \dot{Z}_h \quad (4.66)$$

un vektoru diagramma, kas attēlota 4.32. zīmējumā.

No vektoru diagrammas izriet, ka, neievērojot samērā nelielo nogriezni \overline{KL} ,

$$U_{1N} - U'_2 \approx \overline{AK} = \overline{AF} + \overline{FK} = I_{1N} R_h \cos \varphi_2 + I_{1N} X_h \sin \varphi_2.$$

Ievietojot iegūto sakarību izteiksmē (4.65) un ievērojot, ka

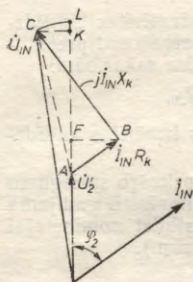
$$\frac{I_{1N} R_h}{U_{1N}} 100 = u_{h,a} (\%), \quad \frac{I_{1N} X_h}{U_{1N}} 100 = u_{h,r} (\%),$$

iegūstam

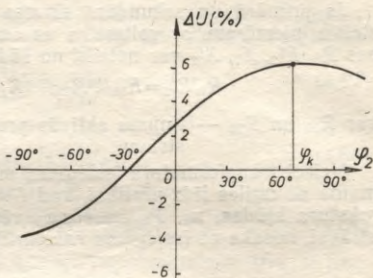
$$\Delta U (\%) = u_{h,a} (\%) \cos \varphi_2 + u_{h,r} (\%) \sin \varphi_2. \quad (4.67)$$

Aprēķinot sprieguma procentuālo izmaiņu jebkurai slodzei ($I_1 \neq I_{1N}, I_2 \neq I_{2N}$), izteiksmes (4.67) labā puse jāpareizina ar relatīvo strāvu jeb slodzes koeficientu I_* :

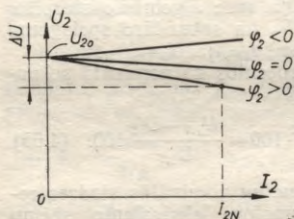
$$\Delta U (\%) = I_* (u_{h,a} (\%) \cos \varphi_2 + u_{h,r} (\%) \sin \varphi_2). \quad (4.68)$$



4.32. zim. Vektoru diagramma transformatora sprieguma izmaiņas noteikšanai.



4.33. zim. Transformatora sprieguma procentuālā izmaiņa atkarībā no slodzes rakstura.



4.34. zim. Transformatora ārējās raksturlienes dažāda rakstura slodzēm.

4.33. zīmējumā attēlota $\Delta U(\%)$ atkarība no leņķa φ_2 nemainīgai slodzei $I_* = \text{const}$. Var pierādīt, ka sprieguma vislielākā izmaiņa ir tad, ja $\varphi_2 = \varphi_k$.

No izteiksmes (4.65) iegūstam, ka

$$U'_2 = U_{1N} \left(1 - \frac{\Delta U(\%)}{100} \right). \quad (4.69)$$

Tas nozīmē, ka sekundārā sprieguma vērtība atkarīga no $\Delta U(\%)$ zīmes: ja $\Delta U(\%) > 0$ (aktīvi induktīva slodze), tad, slogojot transformatoru, sekundārais spriegums samazinās, ja $\Delta U(\%) < 0$ (aktīvi kapacitīva slodze), — palielinās.

Sekundārā sprieguma atkarību no slodzes strāvas $U_2 = f(I_2)$, ja $U_1 = \text{const}$ un $\cos \varphi_2 = \text{const}$, sauc par transformatora ārējo raksturlietni (4.34. zim.).

Parastī spēka transformatoriem $\Delta U(\%) = 2 \dots 8\%$, pie tam lielākās vērtības atbilst augsta sprieguma transformatoriem, jo tiem ir lielāks išslēguma spriegums.

4.6.2. Sprieguma regulēšana

Sakarā ar slodzes strāvas izraisīto sprieguma kritumu transformatorā un tīklā, kuram tas pieslēgts, patērētāju slodzes izmaiņas izraisa transformatora sekundārā sprieguma izmaiņas. Tā kā daudzi patērētāji ir jutīgi pret šādām sprieguma izmaiņām, tad rodas nepie-

ciešamība regulēt transformatora sekundāro spriegumu atbilstoši slodzes izmaiņām.

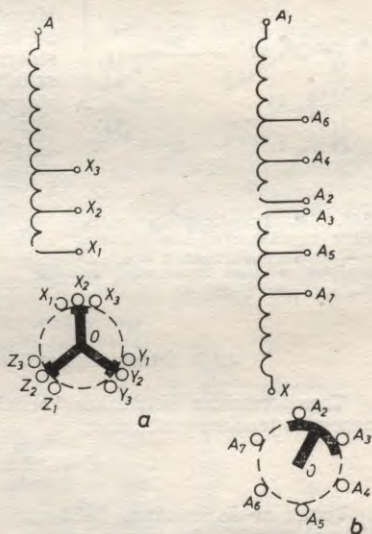
Spēka transformatoriem spriegumu regulē, mainot transformācijas koeficientu. Šim nolūkam tinumam izveido ar speciālu ierīci pārslēdzamus atzarojumus.

Transformatora sprieguma regulēšanu, mainot transformācijas koeficientu, var realizēt divējādi: atslēdzot transformatoru no tīkla vai transformatoram darbojoties slodzes režīmā. Pirmajā gadījumā pārslēgšanas iekārta ir vienkāršāka un lētāka, bet pārslēgšana ir saistīta ar patērētāju barošanas pārtraukumu, un to nevar izdarīt bieži. Tāpēc šo paņēmieni lieto galvenokārt tīklu pazeminošajiem transformatoriem, kā arī ieregulējot spriegumu ilgākam laika periodam, piemēram, sezonai. Sprieguma regulēšana slodzes režīmā ir sarežģītāka, un to lieto lieljaudas transformatoriem.

Sprieguma regulēšana, atslēdzot transformatoru no tīkla. Atzarojumi sprieguma regulēšanai ir izveidoti tā, ka vidējais atzarojums atbilst nominālajam spriegumam, bet pārējie — spriegumiem, kuri uz vienu vai otru pusi atšķiras no nominālā sprieguma. Mazjaudas un vidējas jaudas transformatoriem izveido trīs atzarojumus (+5%; 0; -5%), bet lieljaudas transformatoriem — piecus atzarojumus (+5%; +2,5%; 0; -2,5%; -5%). Parasti atzarojumus izveido augstākā sprieguma tinuma pusē, jo šajā tinumā ir mazāka strāva un tāpēc pārslēgšanas iznāk kompaktāks.

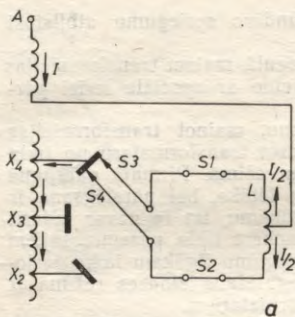
4.35. zīmējumā *a* parādīta viena tinuma fāze ar atzarojumiem X_1, X_2, X_3 un pārslēgu, kurš ir kopīgs visām trīs fāzēm, bet 4.35. zīmējumā *b* — viena fāze ar atzarojumiem $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ un pārslēgu, kurš paredzēts katrai fāzei atsevišķi.

Sprieguma regulēšana slodzes režīmā. Slodzes režīmā regulējamo transformatoru regulēšanas diapazons parasti ir 6...10% ar pakāpēm pa 1,25...1,67%. Šādiem transformatoriem pāreja no vienas pakāpes uz citu notiek, nepārtraucot strāvas ķēdi. Sprieguma regulēšanai slodzes režīmā izmanto dažā-

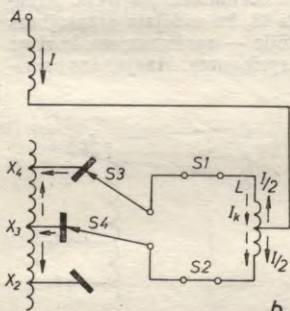


4.35. zīm. Sprieguma regulēšana, atslēdzot transformatoru no tīkla:

a — ar visām trīs fāzēm kopīgu pārslēgu,
b — ar pārslēgu, kurš paredzēts katrai fāzei atsevišķi.



a



b

4.36. zīm. Transformatora sprieguma regulēšana slodzes režīmā: a — shēma izejas stāvoklī, b — shēma, pārslēdzot no tīnuma atzarojuma X_4 uz atzarojumu X_3 .

das shēmas, no kurām visvairāk izplatīta ir shēma ar strāvu ierobežojošo reaktoru (4.36. zīm.).

4.36. zīmējumā a parādītajā stāvoklī pārslēga kontakti S_3 un S_4 savienoti ar tīnuma atzarojumu X_4 . Slēdži S_1 un S_2 ir saslēgti, un strāva abos reaktora pustinosos plūst pretējos virzienos. Tāpēc rezultējošā magnētiskā plūsma reaktorā L un reaktora induktīvā pretestība ir vienāda ar nulli.

Pārslēgšanu uz atzarojumu X_3 izdara šādā secībā: 1) atslēdz slēdži S_2 ; 2) pārslēga kontaktu S_4 savieno ar atzarojumu X_3 ; 3) saslēdz slēdži S_2 ; 4) atslēdz slēdži S_1 ; 5) pārslēga kontaktu S_3 savieno ar atzarojumu X_3 ; 6) saslēdz slēdži S_1 .

Starpstāvoklī, kad pārslēgs S_3 savienots ar atzarojumu X_4 un pārslēgs S_4 ar atzarojumu X_3 (4.36. zīm. b), strāva I_k (zīmējumā tā parādīta ar svītrlinijām), kuru rada EDS starp atzarojumiem X_4 un X_3 , reaktorā plūst vienlaikus ar darba strāvu I . Strāva I_k plūst abos reaktora pustinosos vienā virzienā, tāpēc reaktora induktīvā pretestība ir liela un šīs strāvas vērtība tiek ierobežota.

Dažos gadījumos strāvas ierobežošanai izmanto arī aktīvu pretestību.

4.6.3. Transformatora lietderības koeficients

Transformatora lietderības koeficients ir atdotās jaudas P_2 un uzņemtās jaudas P_1 attiecība:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (4.70)$$

Tomēr ar šo izteiksmi lietderības koeficientu nevar noteikt pietiekami precīzi, jo transformatora lietderības koeficients ir ļoti augsts, un tāpēc jaudu P_1 un P_2 mērījumu kļūdas var nepieļaujami ietekmēt rezultātu. Šī iemesla dēļ transformatora lietderības koeficientu aprēķina pēc netiešās metodes, izmantojot eksperimentāli vai aprēķinu ceļā noteiktos jaudas zudumus.

Tā kā $P_2 = P_1 - \Delta P$, kur ΔP — jaudas zudumi, tad saskaņā ar izteiksmi (4.70)

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}$$

jeb

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \quad (4.71)$$

Transformatora jaudas zudumi ΔP sastāv no tukšgaitas zudumiem P_o (nemainīgie jeb magnētiskie zudumi) un išslēguma zudumiem P_k (mainīgie jeb elektriskie zudumi) (sk. 4.5.1. un 4.5.2.):

$$\Delta P = P_o + P_k$$

jeb saskaņā ar izteiksmi (4.64)

$$\Delta P = P_o + I_*^2 P_{k, N} \quad (4.72)$$

Transformatora sekundārā tinuma atdotā aktīvā jauda

$$P_2 = m I_2 U_{2N} \cos \varphi_2 = I_* m I_{2N} U_{2N} \cos \varphi_2 = I_* S_N \cos \varphi_2 \quad (4.73)$$

kur m — fāzu skaits.

Ievietojot sakarības (4.72) un (4.73) izteiksmē (4.71), iegūstam, ka

$$\eta = 1 - \frac{P_o + I_*^2 P_{k, N}}{I_* S_N \cos \varphi_2 + P_o + I_*^2 P_{k, N}} \quad (4.74)$$

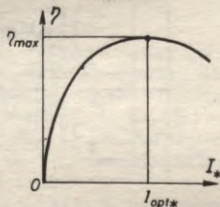
Lietderības koeficienta atkarība no slodzes $\eta = f(I_*)$ parādīta 4.37. zīmējumā. Liknes sākuma daļa atbilst režīmam, kad pārsvarā ir nemainīgie magnētiskie zudumi. Slodzei pieaugot, strauji palielinās elektriskie zudumi un, kad tie kļūst lielāki par magnētiskajiem zudumiem, transformatora lietderības koeficients samazinās.

Noteiksim, kādai slodzei atbilst lietderības koeficienta maksimālā vērtība, t. i., atradīsim *optimālo slodzes koeficientu* I_{opt*} . Šim nolūkam lietderības koeficienta izteiksme (4.74) jāizpēta, lai atrastu maksimumu. Funkcijas $\eta = f(I_*)$ pirmo atvasinājumu pielīdzinot nullei un atrisinot vienādojumu $d\eta/dI_* = 0$, iegūst, ka

$$P_o = I_{opt*}^2 P_{k, N} \quad (4.75)$$

Tātad transformatora lietderības koeficienta maksimālā vērtība atbilst tādai slodzei, kad nemainīgie magnētiskie zudumi ir vienādi ar mainīgajiem elektriskajiem zudumiem.

Spēka transformatoriem nominālās slodzes režīmā lietderības koeficients ir ļoti augsts — lieljaudas transformatoriem $\eta = 0,96 \dots 0,99$, pie tam η maksimālās vērtības atbilst slodzēm $I_* = 0,5 \dots 0,7$.



4.37. zīm. Transformatora lietderības koeficienta atkarība no slodzes.

4.6.4. Transformatoru paralēla darbība

Uzstādot transformatoru apakšstacijās divus vai vairākus transformatorus, kuri darbojas paralēli, var panākt to ekonomisku ekspluatāciju. Tā, piemēram, slodzes minimuma laikā, atslēdzot zināmu skaitu transformatoru, pārējiem transformatoriem var nodrošināt tādu darba režīmu, kad lietderības koeficients ir maksimālais vai tuvs maksimālajam. Bez tam transformatoru paralēlā darbība nodrošina nepārtrauktu elektroapgādi kāda transformatora avārijas gadījumā, rada profilaktiska remonta iespējas utt.

Paralēli strādājošu transformatoru normāla darbība ir iespējama, ja ievēroti šādi *paralēlas darbības nosacījumi*: 1) transformācijas koeficienti ir vienādi; 2) tinumu savienojumu grupas ir vienādas; 3) īsslēguma spriegumi ir vienādi.

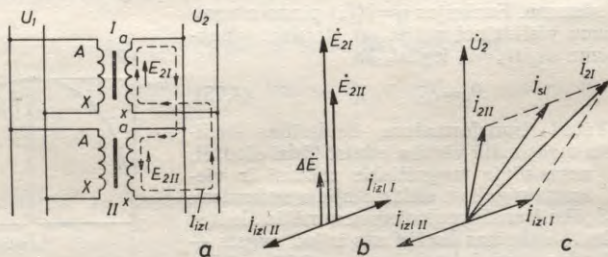
Pirmie divi nosacījumi nodrošina transformatora normālu darbību tukšgaitas un slodzes režīmā. Trešais nosacījums attiecas tikai uz slodzes režīmu, un tā ievērošana novērš atsevišķu paralēli strādājošu transformatoru pārslodzi.

Aplūkosim sīkāk transformatoru paralēlas darbības īpatnības, ja minētie nosacījumi precīzi nav ievēroti.

Transformatoru paralēla darbība, ja tiem ir dažādi transformācijas koeficienti. 4.38. zīmējumā *a* parādīta divu vienfāzes transformatoru paralēlā slēguma shēma.

Pieņemsim, ka transformatoriem *I* un *II* ir dažādi transformācijas koeficienti, konkrētajā gadījumā tādi, ka $E_{2I} > E_{2II}$. Tad noslēgtajā kontūrā, ko veido abu transformatoru sekundārie tinumi un savienošanas vadi, darbojas rezultējošais EDS $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$. Šis EDS kontūrā izraisa izlīdzinošo strāvu I_{izl} , pie tam izlīdzinošās strāvas virziens attiecībā pret EDS \dot{E}_{2I} un \dot{E}_{2II} transformatoru sekundārajos tinumos ir pretējs: $I_{izl I} = -I_{izl II}$.

Tā kā transformatora primārie un sekundārie tinumi ir induktīvi saistīti, tad izlīdzinošā strāva, kas plūst sekundārajos tinumos, izraisa izlīdzinošo strāvu arī primārajos tinumos, t. i., attiecībā pret EDS $\Delta \dot{E}$ abi transformatori darbojas režīmā, kas atbilst īsslēguma



4.38. zim. Vienfāzes transformatoru paralēlais slēgums (a) un vektoru diagrammas (b, c), ja transformācijas koeficienti ir dažādi.

režimam. Tāpēc izlīdzinošās strāvas vērtība ir atkarīga no abu transformatoru īsslēguma pretestībām Z_{hI} un Z_{hII} :

$$I_{izl} = \frac{\Delta \dot{E}}{Z_{hI} + Z_{hII}} \quad (4.76)$$

Tā kā transformatora īsslēguma pretestības ir relatīvi mazas, tad izlīdzinošās strāvas jau tukšgaitas režīmā var būt ievērojamas. Piemēram, ja transformatora īsslēguma spriegumi $u_{hI}(\%) = u_{hII}(\%) = 5,0\%$ un transformācijas koeficienti atšķiras tikai par 1%, tad $Z_{hI*} = Z_{hII*} = 0,05$ un $\Delta E_* = 0,01$. Šajā gadījumā saskaņā ar izteiksmi (4.76) izlīdzinošā strāva relatīvajās vienībās $I_{izl*} = 0,1$, t. i., 10% no transformatora nominālās strāvas.

Slodzes režīmā izlīdzinošās strāvas summējas ar katra transformatora slodzes strāvām (4.38. zīm. c) un izraisa transformatoru nevienādu noslodzi, pie tam vairāk noslogots ir transformators, kura sekundāro tinumu EDS ir lielāks.

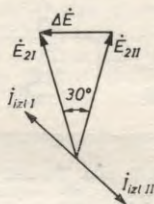
Pieļaujams saslēgt paralēli darbībai transformatorus, kuru transformācijas koeficienti neatšķiras vairāk par 0,5% vai 1% atkarībā no transformatora tipa.

Transformatoru paralēla darbība, ja tiem ir dažādas tinumu savienojumu grupas. Aplūkosim divu trīsfāzu transformatoru paralēlu darbību, ja tiem ir vienādi transformācijas koeficienti, bet dažādas savienojumu grupas, piemēram, $\Delta/\Upsilon-11$ un $\Upsilon/\Upsilon-0$. Abu transformatoru tinumu EDS skaitliskās vērtības ir vienādas, bet sekundāro tinumu EDS nobīdīti fāzē par 30° (4.39. zīm.). Rezultējošais EDS, kas darbojas sekundāro tinumu kontūrā, $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$. No 4.39. zīmējumā attēlotās vektoru diagrammas var atrast $\Delta \dot{E}$ skaitlisko vērtību:

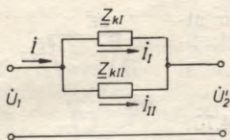
$$\Delta E = 2E_{2II} \sin 15^\circ = 0,518E_{2II}.$$

Tātad sekundāro tinumu īsslēgtajā kontūrā darbojas relatīvi liels EDS (apmēram puse no sekundāro tinumu nominālā sprieguma) un šis EDS transformatora primārajos un sekundārajos tinumos izraisa nepieļaujami lielas izlīdzinošās strāvas. Tā, piemēram, ja $u_{hI}(\%) = u_{hII}(\%) = 5,0\%$, tad no izteiksmes (4.76) var atrast, ka $I_{izl} = 5,18 I_N$. No teiktā var secināt, ka paralēla darbība transformatoriem ar dažādām savienojumu grupām nav pieļaujama.

Transformatoru paralēla darbība, ja tiem ir dažādi īsslēguma spriegumi. Pieņemsim, ka paralēli darbojas divi transformatori, kuru īsslēguma spriegumi ir dažādi ($u_{hI}(\%) \neq u_{hII}(\%)$), bet pārējie paralēlās darbības nosacījumi ievēroti.



4.39. zīm. Sekundārajos tinumos inducētie EDS un izlīdzinošās strāvas paralēli strādājošos transformatoros ar dažādām savienojumu grupām.



4.40. zīm. Paralēli strādājošu transformatoru vienkāršota ekvivalentā shēma.

Izmantojot transformatoru vienkāršoto ekvivalento shēmu, paralēli strādājošus transformatorus var aizstāt ar 4.40. zīmējumā parādīto ekvivalento shēmu.

Tā kā abu transformatoru primārie un sekundārie spriegumi ir vienādi, tad vienādi ir arī sprieguma kritumi ekvivalentās shēmas pretestībās \underline{Z}_{hI} un \underline{Z}_{hII} :

$$I_I \underline{Z}_{hI} = I_{II} \underline{Z}_{hII},$$

no kurienes

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{\underline{Z}_{hII}}{\underline{Z}_{hI}}, \quad (4.77)$$

t. i., paralēli strādājošos transformatoros slodzes strāvas sadalītas apgriezti proporcionāli šo transformatoru īsslēguma pretestībām.

Ievērojot, ka

$$\underline{Z}_{hI} = Z_{hI} e^{j\varphi_{hI}}, \quad \underline{Z}_{hII} = Z_{hII} e^{j\varphi_{hII}},$$

izteiksmes (4.77) vietā iegūstam

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{hII}}{Z_{hI}} e^{j(\varphi_{hII} - \varphi_{hI})}, \quad (4.78)$$

t. i., strāvas nobīdītas fāzē par leņķi $\varphi_{hII} - \varphi_{hI}$. Tomēr parasti šī nobīde ir neliela, un tāpēc var pieņemt, ka

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{Z_{hII}}{Z_{hI}}. \quad (4.79)$$

Transformatoru īsslēguma pretestības var izteikt ar šo transformatoru īsslēguma spriegumiem (sk. 4.5.2.):

$$Z_{hI} = u_{hI*} \frac{U_N}{I_{NI}}; \quad Z_{hII} = u_{hII*} \frac{U_N}{I_{NII}}. \quad (4.80)$$

Transformatoru pilnā jauda

$$S_I = I_I U_N, \quad S_{II} = I_{II} U_N,$$

un šo jaudu attiecība

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{I_I}{I_{II}}. \quad (4.81)$$

Ievērojot sakarības (4.79) un (4.80), izteiksmes (4.81) vietā iegūstam

$$\frac{S_I}{S_{II}} = \frac{u_{hII*} I_{NI} U_N}{u_{hI*} I_{NII} U_N} = \frac{u_{hII*} S_{NI}}{u_{hI*} S_{NII}} \quad (4.82)$$

kur S_{NI} un S_{NII} — transformatoru nominālās jaudas.

Analizējot izteiksmi (4.82), var secināt: 1) ja paralēli strādājošo transformatoru īsslēguma spriegumi ir vienādi, tad jaudas tajos sadalās proporcionāli šo transformatoru nominālajām jaudām; 2) ja transformatoru īsslēguma spriegumi ir dažādi, tad lielāku slodzi uzņēms transformators, kura īsslēguma spriegums ir mazāks, tātad iespējama šī transformatora pārslodze.

Lai novērstu atsevišķu paralēli strādājošu transformatoru pārslodzi, to īsslēguma spriegumi saskaņā ar pastāvošajām normām nedrīkst atšķirties vairāk par 10% no visu transformatoru īsslēgumu spriegumu vidējās aritmētiskās vērtības.

4.7. TRĪSFĀZU TRANSFORMATORU NESIMETRISKA SLODZE

4.7.1. Simetrisko komponentu metode nesimetrisko režīmu analīzē

Trīsfāzu transformatora nesimetrisku slodzi rada vienfāzes lieljaudas patērētāji, kā arī nesimetriski īsslēgumi elektriskajos tīklos. Nesimetriska slodze izraisa transformatora sekundārā sprieguma nesimetriju, un šis apstāklis var nelabvēlīgi ietekmēt transformatora un tam pieslēgto patērētāju darbību.

Nesimetrisko režīmu analīzē izmanto simetrisko komponentu metodi. Saskaņā ar šo metodi nesimetriskas trīsfāzu strāvas (I_a, I_b, I_c) aizvieto ar simetriskām tiešās (I_{a1}, I_{b1}, I_{c1}), pretējās (I_{a2}, I_{b2}, I_{c2}) un nullsecības (I_{a0}, I_{b0}, I_{c0}) komponentēm (4.41. zīm.):

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}; \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}; \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}. \end{aligned} \quad (4.83)$$

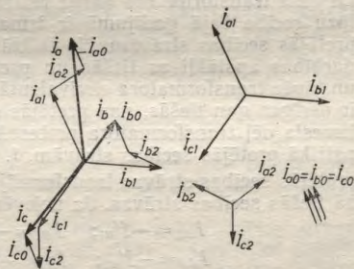
No 4.41. zīmējuma izriet, ka

$$\begin{aligned} I_{b1} &= a^2 I_{a1}; & I_{c1} &= a I_{a1}; \\ I_{b2} &= a I_{a2}; & I_{c2} &= a^2 I_{a2}, \end{aligned} \quad (4.84)$$

kur $a = e^{j2\pi/3}$; $a^2 = e^{j4\pi/3}$, pie tam $1 + a + a^2 = 0$. (4.85)

Ievietojot izteiksmēs (4.83) attiecīgās strāvu vērtības no izteiksmēm (4.84), iegūstam, ka

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}; \\ I_b &= a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{a0}; \\ I_c &= a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{a0}. \end{aligned} \quad (4.86)$$



4.41. zīm. Nesimetriskas trīsfāzu strāvu sistēmas simetriskās komponentes.

Atrisinot vienādojumu sistēmu (4.86) attiecībā pret strāvām I_{a1} , I_{a2} , I_{a0} , iegūstam, ka

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c), \\ I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c), \\ I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c). \end{aligned} \quad (4.87)$$

Izteiksmes (4.87) var izmantot nesimetriskas strāvu sistēmas sadalīšanai simetriskās komponentēs, bet izteiksmes (4.83) — fāzu strāvu aprēķināšanai, ja zināmas to simetriskās komponentes.

Līdzīgas izteiksmes ir spēkā arī nesimetriskai fāzu spriegumu sistēmai (\dot{U}_a , \dot{U}_b , \dot{U}_c) un to simetriskajām komponentēm.

Analizējot transformatora nesimetriskos režīmus, vienkāršības dēļ pieņemsim, ka primārajam tinumam pievienots simetrisks spriegums.

4.7.2. Nesimetriska slodze transformatoru slēguma shēmās bez nullvada

Transformatoros ar tinumu slēgumu shēmām Δ/∇ , ∇/Δ un ∇/∇ var būt tikai tiešās un pretējās secības strāvas, jo nullsecības strāvas, kuru virzieni atsevišķās fāzēs jebkurā laika momentā sakrīt, var parādīties tikai tad, ja kādam no tinumiem ir zvaigznes slēgums ar nullvadu.

Iepriekš tika aplūkota transformatora darbība simetriskas slodzes režīmā, kad $I_b = a^2I_a$, $I_c = aI_a$. Ievietojot šīs I_b un I_c vērtības izteiksmēs (4.87), iegūstam, ka $I_{a1} = I_a$, $I_{a2} = 0$, $I_{a0} = 0$, t. i., šajā gadījumā ir tikai tiešās secības strāvas. Tāpēc iepriekš iztirzātie jautājumi attiecas arī uz tiešās secības strāvām transformatora nesimetriskas slodzes gadījumā.

Ja transformatoram, kurš darbojas ar simetrisku slodzi, apmaina vietām divus tinumu spailēm pievienotos vadus, piemēram, B un C augstsprieguma pusē un b un c zemsprieguma pusē, tad patērētāju un paša transformatora darba režīms neizmainās. Bet strāvu vektoru fāzu secība šajā gadījumā ir izmainījusies uz pretējo, t. i., atbilst pretējās secības strāvām. No teiktā var secināt, ka transformatora darbības apstākļi ar tiešās un pretējās secības strāvām ir vienādi un tāpēc transformatora ekvivalentās shēmas (sk. 4.16. un 4.17. zīm.) ir derīgas gan tiešās, gan pretējās secības strāvu gadījumā. Šī paša iemesla dēļ transformatora pretestība tiešās secības strāvām ir tāda pati kā pretējās secības strāvām, t. i., vienāda ar Z_k . Tas nozīmē, ka pretējās secības strāvas transformējas no viena tinuma uz otru tāpat kā tiešās secības strāvas. Ja neievēro tukšgaitas strāvu, tad

$$I_{A1} = -I'_{a1}; \quad I_{B1} = -I'_{b1}; \quad I_{C1} = -I'_{c1}; \quad (4.88)$$

$$I_{A2} = -I'_{a2}; \quad I_{B2} = -I'_{b2}; \quad I_{C2} = -I'_{c2}; \quad (4.89)$$

kur I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} , I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} — attiecīgi primārā tinuma fāzu tiešās un pretējās secības strāvas;

$I'_{a1}, I'_{b1}, I'_{c1}, I'_{a2}, I'_{b2}, I'_{c2}$ — sekundārā tinuma fāzu tiešās un pretējās secības strāvas, kas reducētas uz primāro tinumu.

Summējot šo izteiksmju labās un kreisās puses katrai fāzei un ievērojot izteiksmes (4.83), iegūstam, ka

$$I_A = -I'_a; \quad I_B = -I'_b; \quad I_C = -I'_c. \quad (4.90)$$

No šejienes var secināt, ka shēmās bez nullvada nav nepieciešama strāvu sadalīšana simetriskās komponentēs. Katru fāzi var aplūkot neatkarīgi no pārējām fāzēm, jo saskaņā ar sakarībām (4.90) primārā un sekundārā tinuma strāvas līdzsvarojas katrā fāzē atsevišķi.

Transformatora sekundāros fāzu spriegumus var atrast, izmantojot vienkāršoto ekvivalento shēmu (sk. 4.17. zīm.):

$$\dot{U}'_a = \dot{U}_A - I_A \underline{Z}_h; \quad \dot{U}'_b = \dot{U}_B - I_B \underline{Z}_h; \quad \dot{U}'_c = \dot{U}_C - I_C \underline{Z}_h. \quad (4.91)$$

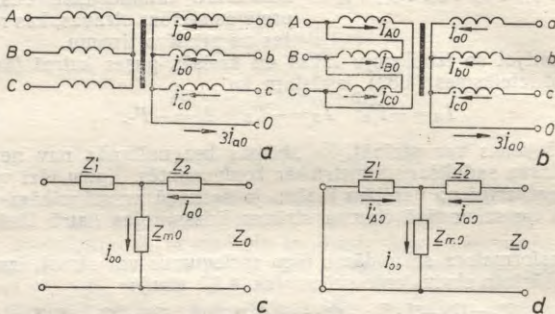
Nesimetriskas slodzes gadījumā sprieguma kritumi $\Delta U = I Z_h$ atsevišķās fāzēs ir dažādi. Tomēr tas nerada sekundāro spriegumu jūtamam nesimetriju, jo pretestības Z_h ir relatīvi mazas un, ja strāvas atsevišķās fāzēs nepārsniedz nominālās vērtības, tad arī ΔU ir mazi. Tāpēc slēguma shēmās bez nullvada nesimetriska slodze transformatora un patērētāju darbību jūkami nevar ietekmēt.

4.7.3. Nesimetriska slodze transformatoru slēguma shēmās ar nullvadu

Nullsecības strāvas var rasties tikai transformatorā ar tinumu slēgumiem ∇/∇ un Δ/∇ , ja sekundārajam tinumam pieslēgti vienfāzes patērētāji. Abos gadījumos transformatora sekundārajos tinumos šīs strāvas var noslēgties tikai caur nullvadu (4.42. zīm.), jo visās fāzēs to virzieni sakrīt. Transformatorā ar tinumu slēgumu ∇/∇ (4.42. zīm. a) nullsecības strāvas primārajā tinumā nevar parādīties, jo tām nav noslēgšanās ceļa. Slēgumā Δ/∇ šīs strāvas primārajā tinumā cirkulē pa noslēgtu kontūru, un tāpēc fāzu strāvas satur nullsecības komponentes, bet līnijas strāvas $I_{AB} = I_A - I_B$, $I_{BC} = I_B - I_C$, $I_{CA} = I_C - I_A$ nullsecības komponentes nesatur. Tas nozīmē, ka nullsecības strāvas trīsstūrī slēgtā tinumā var rasties, tikai inducējoties no otra tinuma.

Nullsecības strāvas visās fāzēs rada nullsecības magnētiskās plūsmas Φ_0 , kuras jebkurā mirklī visos stieņos ir vērstas vienā virzienā. Sajā nozīmē nullsecības plūsmas ir analogiskas magnētisko plūsmu trešajām harmoniskajām, kas rodas magnētiskās sistēmas piesātinājuma dēļ (sk. 4.4.6.).

Apvalka tipa transformatoros un transformatoru trīsfāzu grupā nullsecības plūsma noslēdzas pa serdi ar mazu magnētisko pretestību, t. i., pa to pašu ceļu, kur galvenā magnētiskā plūsma. Tāpēc šādas konstrukcijas transformatoros pat nelielas nullsecības strāvas $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$ var radīt lielas nullsecības plūsmas.



4.42. zim. Nullsecības strāvas (a, b) un ekvivalentās shēmas (c, d) transformatoriem ar tinumu slēgumu Υ/Υ un Δ/Υ .

Stieņu tipa transformatoros nullsecības plūsmām ir iespēja noslēgties tikai pa gaisu, tvertnes sienām un citām konstruktīvajām daļām (sk. 4.21. zim.). Tāpēc šajā gadījumā nullsecības plūsmas ir nelielas, bet šīs plūsmas rada magnētiskos papildzudumus tvertnes sienās un citās konstruktīvajās daļās.

No teiktā var secināt, ka nullsecības strāvu un magnētisko plūsmu darbība transformatorā ir analogiska magnetizēšanas strāvas un plūsmas trešo harmonisko darbībai. Atšķirība ir tikai tāda, ka nullsecības strāvas un plūsmas mainās ar tīkla frekvenci f_1 , bet strāvu un plūsmu trešās harmoniskās — ar frekvenci $3f_1$.

Nullsecības pretestība un tās eksperimentāla noteikšana. Nullsecības magnētiskā plūsma inducē transformatora primārajā un sekundārajā tinumā pašindukcijas un savstarpējās indukcijas EDS. Tāpēc nullsecības strāvu aprēķinam var izmantot tādu pašu T veida ekvivalento shēmu kā tiešās secības strāvu aprēķinam (4.42. zim. c un d). Bet, tā kā šajā gadījumā nullsecības strāvu avots ir transformatora sekundārais tinums, tad ērtāk izmantot shēmu, kurā primārā tinuma lielumi ir reducēti uz sekundāro tinumu.

Transformatorā ar tinumu slēgumu Υ/Υ nullsecības strāvas primārajā tinumā neplūst, tāpēc ekvivalentajā shēmā (4.42. zim. c) primārā ķēde ir pārtraukta un nullsecības pretestība

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_{m0}. \quad (4.92)$$

Magnetizēšanas zara pretestība nullsecības strāvām (\underline{Z}_{m0}) ir atkarīga no transformatora serdes konstrukcijas. Apvalka tipa transformatoram un transformatoru trīsfāzu grupai, kuros nullsecības plūsma noslēdzas pa to pašu ceļu, kur galvenā magnētiskā plūsma, šī pretestība ir vienāda ar \underline{Z}_m , t. i., ar magnetizēšanas zara pretestību tie-

šās secības strāvām. Bet, tā kā $Z_2 \ll Z_m$, tad apvalka tipa transformatoriem un transformatoru trīsfāzu grupai ar slēgumu Υ/Υ

$$\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_m. \quad (4.93)$$

Stieņu tipa transformatoriem Z_{m0} ir daudz mazāka par Z_m , jo nullsecības magnētiskā plūsma noslēdzas gaisā, t. i., tāpat kā izkliedes plūsma. Tāpēc $\underline{Z}_{m0} \approx \underline{Z}_2 \approx \underline{Z}'_1$ un saskaņā ar izteiksmi (4.92) stieņu tipa transformatoriem ar tinumu slēgumu Υ/Υ nullsecības pretestība ir gandrīz tāda pati kā transformatora īsslēguma pretestība

$$\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_k. \quad (4.94)$$

Transformatoros ar slēgumu Δ/Υ nullsecības strāvas noslēdzas primārajā tinumā, tāpēc ekvivalentajā shēmā (4.42. zīm. d) primārā tinuma ķēde ir slēgta īsi un transformatora nullsecības pretestība

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}'_1 \underline{Z}_{m0}}{\underline{Z}'_1 + \underline{Z}_{m0}} = \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}'_1}{\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{m0}} + 1}, \quad (4.95)$$

bet, tā kā $Z_{m0} > Z'_1$, tad

$$\underline{Z}_0 \approx \underline{Z}_2 + \underline{Z}'_1 = \underline{Z}_k. \quad (4.96)$$

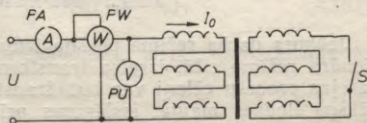
Tāpat atkarībā no transformatora serdes konstrukcijas un tinumu slēguma shēmas nullsecības pretestība \underline{Z}_0 var mainīties no \underline{Z}_k līdz \underline{Z}_m .

Eksperimentāli nosakot transformatora nullsecības pretestību, jāpanāk, lai $I_a = I_b = I_c = I_0$. Šim nolūkam visas transformatora primārā un sekundārā tinuma fāzes savieno virknē (4.43. zīm.). Nosakot nullsecības pretestību transformatoru slēgumam Δ/Υ , slēdzis S ir atslēgts, bet, nosakot to slēgumam Υ/Υ , — atslēgts. Ja izmēra spriegumu U , jaudu P un strāvu I , tad nullsecības parametrus var aprēķināt no šādām formulām:

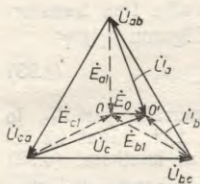
$$Z_0 = \frac{U}{3I}; \quad R_0 = \frac{P}{3I^2}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (4.97)$$

Spēka transformatoriem parasti $R_0 \ll X_0$, un tāpēc var pieņemt, ka $Z_0 \approx X_0$.

Nullsecības pretestību eksperimentālai noteikšanai var izmantot arī slēguma shēmu, kurā tinumu atsevišķas fāzes slēgtas paralēli.



4.43. zīm. Shēma transformatora nullsecības pretestību eksperimentālai noteikšanai.



4.44. zīm. Sekundāro spriegumu vektoru diagrammas transformatoram ar nullsecības strāvām.

diagrammas nullpunkts O' nesakrīt ar līnijas spriegumu trīsstūra smaguma centru O , kā tas ir diagrammā transformatoram ar simetrisku slodzi. Līnijas spriegumi, tāpat kā simetriskas slodzes gadījumā, ir simetriski.

Ievērojama sekundāro spriegumu nesimetrija ir iespējama apvalka tipa transformatoros un transformatoru trīsfāzu grupā ar tinumu slēgumu ∇/∇ , jo šādos transformatoros pat nelielas nullsecības strāvas var radīt lielas nullsecības plūsmas un nullsecības EDS. Tā, piemēram, ja nullsecības strāva ir vienāda ar transformatora tukšgaitas strāvu ($1 \dots 5\% \text{ no } I_N$), tad nullsecības plūsma ir gandrīz tāda pati kā galvenā magnētiskā plūsma normālā darba režīmā un nullsecības EDS $E_0 \approx U_N$. Šī iemesla dēļ slēgumu ∇/∇ lieljaudas transformatoriem nelieto (sk. arī 4.4.6.).

Slēgumā Δ/∇ nullsecības strāvas abos tinumos savstarpēji līdzsvarojas, un tāpēc rezultējošā nullsecības plūsma un nullsecības EDS ir mazi. Nesimetriska slodze šajā gadījumā, tāpat kā slēgumos bez nullvada, rada spriegumu nelielu nesimetriju, kas transformatora un patērētāju darbību praktiski neietekmē.

4.8. PĀREJAS PROCESI TRANSFORMATOROS

4.8.1. Vispārīgi norādījumi

Jebkura darba režīma pēkšņa izmaiņa, t. i., pāreja no viena stacionāra režīma citā, izraisa transformatorā pārejas procesus. Šādu pārejas procesu cēloņi var būt transformatora pieslēgšana tīklam, pēkšņa slodzes maiņa, īsslēgums primārajā vai sekundārajā ķēdē u. tml.

Pārejas procesi ir saistīti ar magnētiskā vai elektriskā lauka enerģijas izmaiņu, kura nevar notikt momentāni, bet tikai noteiktā, kaut

Nesimetriskās slodzes ietekme uz transformatora darbību. Pieņemsim, ka transformators, kura sekundārais tinums slēgts zvaigznē ar nullvadu, slogots nesimetriski un tā sekundārā tinuma strāva satur tiešās un nullsecības komponentes. Nullsecības magnētiskā plūsma katrā sekundārā tinuma fāzē inducē nullsecības EDS $\dot{E}_{a0} = \dot{E}_{b0} = \dot{E}_{c0} = \dot{E}_0$, kuri summējas ar tiešās secības EDS, un rezultējošie sekundārā tinuma fāzu EDS

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{a1} + \dot{E}_0; \quad \dot{E}_b = \dot{E}_{b1} + \dot{E}_0; \quad \dot{E}_c = \dot{E}_{c1} + \dot{E}_0 \quad (4.98)$$

veido nesimetrisku sistēmu (4.44. zīm.). Arī sekundārie fāzu spriegumi ($\dot{U}_a \approx \dot{E}_a$, $\dot{U}_b \approx \dot{E}_b$, $\dot{U}_c \approx \dot{E}_c$) ir nesimetriski un spriegumu vektoru

arī isā laika sprīdī. Transformatora pārejas procesa laikā strāvas tinumos, spriegumi starp atsevišķām tinumu daļām, kā arī mehāniskie spēki, kas darbojas uz tinumiem, var daudzkārt pārsniegt normālā darba režīma vērtības. Šis apstāklis jāņem vērā transformatoru projektēšanā un ekspluatācijā.

Seit aplūkosim un sīkāk analizēsim raksturīgākos pārejas procesus transformatorā: transformatora pieslēgšanu tīklam, pēkšņo īsslēgumu un pārspriegumus.

4.8.2. Transformatora pieslēgšana tīklam

Pieņemsim, ka transformatoru pieslēdz tīklam tukšgaitā un tīkla spriegums mainās sinusoidāli:

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi), \quad (4.99)$$

kur ψ — leņķis, kurš raksturo sprieguma fāzi ieslēgšanas sākuma momentā $t=0$.

Pārejas procesam transformatorā šajā gadījumā var uzrakstīt šādu diferenciālvienādojumu:

$$i_1 R_1 + \omega_1 \frac{d\Phi}{dt} = U_{1m} \sin(\omega t + \psi). \quad (4.100)$$

Pārveidosim šo vienādojumu, izmantojot sakarību

$$\omega_1 \Phi = \Psi_1 = L_1 i_1, \quad (4.101)$$

kur Ψ_1 — plūsmas saķēdējums ar primāro tinumu;

L_1 — primārā tinuma induktivitāte.

Tā kā starp plūsmu Φ un strāvu i_1 pastāv nelineāra sakarība (sk. 4.4.6.), tad $L_1 \neq \text{const}$ un vienādojuma (4.100) analītiska atrisināšana nav iespējama. Tāpēc aprobežosimies ar tuvinātu risinājumu, pieņemot, ka $L_1 = \text{const}$.

No izteiksmes (4.101) var atrast, ka

$$i_1 = \frac{\omega_1 \Phi}{L_1}.$$

Ievietojot šo strāvas vērtību vienādojumā (4.100) un izdalot vienādojuma abas puses ar ω_1 , iegūstam, ka

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi = \frac{U_{1m}}{\omega_1} \sin(\omega t + \psi). \quad (4.102)$$

Kā zināms, šāda diferenciālvienādojuma atrisinājums sastāv no divām daļām:

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (4.103)$$

kur Φ' — uzspiestā jeb stacionārā plūsma, kura ir atkarīga no sinusoidālā sprieguma u_1 ;

Φ'' — brīvā jeb pārejas plūsma, kura pastāv tikai pārejas procesa laikā.

Uzspiesto plūsmu Φ' var noteikt no šādas izteiksmes (sk. 4.4.2.):

$$\Phi' = \Phi_m \sin \left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2} \right) = -\Phi_m \cos (\omega t + \psi), \quad (4.104)$$

kur $\Phi_m \approx U_1 / (4,44f\omega_1)$.

Brīvo plūsmu iegūstam no homogēna diferenciālvienādojuma

$$\frac{d\Phi''}{dt} + \frac{R_1}{L_1} \Phi'' = 0$$

atrisinājuma:

$$\Phi'' = Ce^{-R_1 t / L_1}, \quad (4.105)$$

kur C — integrēšanas konstante.

Ievietojot izteiksmē (4.103) Φ' un Φ'' vērtības no izteiksmēm (4.104) un (4.105), iegūstam, ka

$$\Phi = -\Phi_m \cos (\omega t + \psi) + Ce^{-R_1 t / L_1}, \quad (4.106)$$

Integrēšanas konstanti C nosaka, ievērojot sākuma noteikumus. Tā kā ieslēgšanas brīdī ($t=0$) transformatora serdē var būt paliekošā magnētiskā plūsma $\pm \Phi_r$, tad no izteiksmes (4.106) laika momentam $t=0$ atrodam, ka

$$\pm \Phi_r = -\Phi_m \cos \psi + C,$$

no kurienes

$$C = \Phi_m \cos \psi \pm \Phi_r.$$

Ievietojot šo C vērtību izteiksmē (4.106), iegūstam, ka

$$\Phi = -\Phi_m \cos (\omega t + \psi) + (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_r) e^{-R_1 t / L_1}, \quad (4.107)$$

Analizējot iegūto izteiksmi, var secināt, ka magnētiskās plūsmas Φ izmaiņas raksturs ir atkarīgs no ieslēgšanas momenta (leņķa ψ). Šeit raksturīgi ir divi robežgadījumi: 1) ieslēgšanas momentā $\psi = \pi/2$ un $\Phi_r = 0$; 2) ieslēgšanas momentā $\psi = 0$ un paliekošā magnētiskā plūsma ar plusa zīmi ($+\Phi_r$).

Pirmajā gadījumā saskaņā ar izteiksmi (4.107)

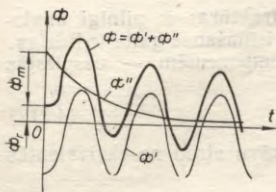
$$\Phi = -\Phi_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \Phi_m \sin \omega t, \quad (4.108)$$

t. i., reizē ar ieslēgšanu transformatorā iestājas stacionārs režīms ar sinusoidālu magnētisko plūsmu.

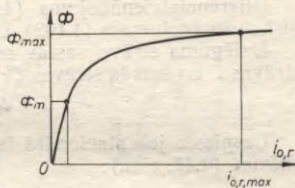
Otrajā gadījumā no izteiksmes (4.107) iegūstam, ka

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_r) e^{-R_1 t / L_1}, \quad (4.109)$$

Šajā gadījumā ir visnelabvēlīgākie apstākļi, jo magnētiskā plūsma pārsniedz stacionārā režīma plūsmas vērtību.



4.45. zīm. Transformatora magnētiskās plūsmas izmaiņa laikā, pieslēdzot to tīklam, ja $\psi = 0$ un paliekošā magnētiskā plūsma $+\Phi_r$.



4.46. zīm. Magnetizēšanas strāvas maksimālās vērtības noteikšana, transformatoru pieslēdzot tīklam.

4.45. zīmējumā attēlota transformatora magnētiskās plūsmas izmaiņa laikā atbilstoši izteiksmei (4.109). Kā redzams no zīmējuma, magnētiskā plūsma vislielāko vērtību (Φ_{max}) sasniedz pirmajā pusperiodā, t. i., kad $\omega t = \pi$ jeb $t = \pi/\omega$. Šajā gadījumā

$$e^{-R_1 t/L_1} = e^{-R_1 \pi/(\omega L_1)} \approx 1,$$

jo parasti $R_1 \ll L_1$. Tāpēc saskaņā ar izteiksmi (4.109)

$$\Phi_{max} = 2\Phi_m + \Phi_r. \quad (4.110)$$

Tas nozīmē, ka Φ_{max} vairāk nekā divas reizes var pārsniegt normālā darba režīma plūsmu un tāpēc magnētiskā sistēma strauji piesātinās. Tas savukārt izraisa ļoti lielu magnetizēšanas strāvu, kuras vērtību var noteikt no transformatora magnetizēšanas liknes $\Phi = f(i_{o,r})$ (4.46. zīm.).

Spēka transformatoriem strāvas $i_{o,r,max}$ vērtība 50...80 reizes var pārsniegt magnetizēšanas strāvu normālā darba režīmā vai 2...5 reizes nominālo strāvu I_N . Ja ievēro, ka pārejas process noris ļoti īsā laikā, tad šāda strāva transformatora termiskai izturībai nav bīstama. Tomēr tā var ietekmēt transformatora primārajā ķēdē ieslēgtās aparatūras darbību, piemēram, nepareizi var nostrādāt releju aizsardzība, var rasties mēraparātu pārslodze utt. Tāpēc šis apstāklis jāņem vērā, attiecīgo aparatūru izvēloties un noregulējot.

4.8.3. Transformatora pēkšņais īsslēgums

Analizējot transformatora pēkšņo īsslēgumu, tāpat kā stacionārā īsslēguma gadījumā, var neievērot tukšgaitas strāvu un aprēķinos izmantot vienkāršotu ekvivalento shēmu (4.47. zīm.) ar parametriem $R_h = R_1 + R'_2$ un $L_h = X_h/\omega = (X_1 + X'_2)/\omega$.

Ja primārajam tinumam pievienots sinusoidāls maiņspriegums $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$, tad īsslēguma strāvu i_h var noteikt, atrisinot šādu diferenciālvienādojumu:

$$L_h \frac{di_h}{dt} + R_h i_h = U_{1m} \sin(\omega t + \psi). \quad (4.111)$$

Diferenciālvienādojums (4.111) pēc struktūras ir pilnīgi analoģisks vienādojumam (4.102), tāpēc arī tā risināšanas gaita ir līdzīga.

Isslēguma strāva sastāv no divām komponentēm — uzspiestās strāvas i' un brīvās strāvas i'' :

$$i_k = i' + i'' \quad (4.112)$$

Uzspiesto jeb stacionārā isslēguma strāvu atrod no ekvivalentās shēmas (4.47. zīm.):

$$i' = I_{k,m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k), \quad (4.113)$$

kur

$$I_{k,m} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}; \quad \varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}.$$

Brīvo strāvu iegūst no homogēna diferenciālvienādojuma

$$\frac{di''}{dt} + \frac{R_k}{L_k} i'' = 0$$

atrisinājuma:

$$i'' = C e^{-R_k t / L_k}. \quad (4.114)$$

Tad saskaņā ar izteiksmēm (4.112), ..., (4.114)

$$i_k = I_{k,m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) + C e^{-R_k t / L_k}. \quad (4.115)$$

Integrēšanas konstanti C nosaka, ievērojot sākuma noteikumus. Ja isslēgums notiek, transformatoram strādājot tukšgaitā, tad sākuma momentā ($t=0$) isslēguma strāva $i_k=0$ un no izteiksmes (4.115) izriet, ka

$$0 = I_{k,m} \sin(\psi - \varphi_k) + C,$$

no kurienes

$$C = -I_{k,m} \sin(\psi - \varphi_k).$$

Ievietojot C vērtību izteiksmē (4.115), iegūstam, ka

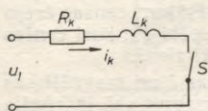
$$i_k = I_{k,m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{k,m} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-R_k t / L_k}. \quad (4.116)$$

Analizējot izteiksmi (4.116), var konstatēt, ka visnelabvēlīgākie apstākļi ir tad, ja $\psi - \varphi_k = \pm \pi/2$. Tā, piemēram, ja $\psi - \varphi_k = -\pi/2$, no izteiksmes (4.116) iegūstam, ka

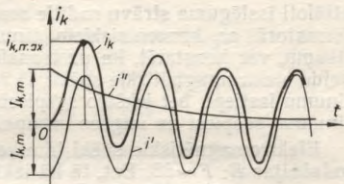
$$i_k = -I_{k,m} \cos \omega t + I_{k,m} e^{-R_k t / L_k}. \quad (4.117)$$

Isslēguma strāvas izmaiņa laikā atbilstoši izteiksmei (4.117) atēlota 4.48. zīmējumā. Kā redzams no zīmējuma, vislielāko vērtību ($i_{k,max}$) isslēguma strāva sasniedz pirmajā pusperiodā, t. i., kad $\omega t = \pi$ jeb $t = \pi/\omega$. Strāvu $i_{k,max}$ sauc par *isslēguma triecienstrāvu*, un saskaņā ar izteiksmi (4.117) šī strāva

$$i_{k,max} = I_{k,m} (1 + e^{-\pi R_k / X_k}). \quad (4.118)$$



4.47. zim. Ekvivalentā shēma transformatora pēkšņā īsslēguma aprēķinam.



4.48. zim. Transformatora īsslēguma strāvas izmaiņa laikā, ja $\psi - \varphi_k = -\pi/2$.

Lielumu

$$k_m = 1 + e^{-\pi R_k / X_k} \quad (4.119)$$

sauc par *trīcienkoeficientu*, kurš raksturo, cik reizes īsslēguma trīcienstrāva pārsniedz stacionārā īsslēguma strāvas amplitūdas vērtību. Atkarībā no attiecības R_k/X_k šis koeficients var mainīties robežās no 1 līdz 2: ja $R_k \ll X_k$, tad $k_m \approx 2$, bet, ja $R_k \gg X_k$, tad $k_m \approx 1$. Lieljaudas transformatoriem $k_m = 1,7 \dots 1,8$, bet mazjaudas un vidējas jaudas transformatoriem $k_m = 1,2 \dots 1,3$.

Tā kā stacionārā īsslēguma strāvas efektīvā vērtība (sk. 4.5.2.)

$$I_h = \frac{100}{u_h (\%) } I_N,$$

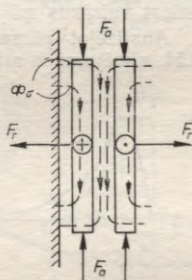
tad var iegūt izteiksmi, pēc kuras iespējams aprēķināt īsslēguma trīcienstrāvu no transformatora pases datiem:

$$i_{h,max} = \frac{100\sqrt{2}}{u_h (\%) } k_m I_N. \quad (4.120)$$

Spēka transformatoriem $i_{h,max} = (20 \dots 60) I_N$.

Pēkšņā īsslēguma strāvas var izraisīt pastiprinātu transformatora tinumu silšanu. Taču mūsdienu elektriskajās sistēmās un tīklos ir uzstādītas ātrdarbīgas aizsardzības iekārtas, kuras īsslēguma gadījumā transformatoru dažu sekundes desmitdaļu laikā no tīkla atslēdz. Sajā īsajā laikā transformatora tinumi nespēj sasilt līdz temperatūrai, kas bīstama izolācijai, tāpēc īsslēguma strāvu termiskā darbība transformatoram nav bīstama.

Daudz bīstamāki ir elektromagnētiskie spēki, kuri, darbojoties uz tinumiem, var deformēt tos vai pat saraut. 4.49. zīmējumā



4.49. zim. Elektromagnētiskie spēki transformatora pēkšņā īsslēguma gadījumā.

attēloti īsslēguma strāvu radītie magnētiskie izkliedes lauki Φ_{σ} transformatorā ar koncentriskiem tinumiem. Izmantojot kreisās rokas likumu, var konstatēt, ka uz transformatora tinumiem darbojas divu veidu elektromagnētiskie spēki: 1) radiālie spēki F_r , kuri cenšas ārējo tinumu izstiept, bet iekšējo saspīest; 2) aksiālie spēki F_a , kuri cenšas tinumus saspīest no augšas un apakšas aksiālā virzienā.

Elektromagnētiskie spēki ir atkarīgi no strāvas i un magnētiskās indukcijas B : $F \sim iB$. Bet, tā kā izkliedes lauka magnētiskā indukcija ir proporcionāla strāvai ($B \sim i$), tad $F \sim i^2$. Tas nozīmē, ka pēkšņā īsslēguma gadījumā, kad īsslēguma triecienstrāva desmitiem reižu pārsniedz nominālo strāvu, elektromagnētiskie spēki vairākus tūkstošus reižu var pārsniegt spēkus, kuri darbojas uz tinumiem normālā darba režīmā. Tāpēc transformatoru tinumu un to stiprinājumu mehāniskā izturība jānosaka, ievērojot īsslēguma triecienstrāvas $i_{h, max}$ vērtību.

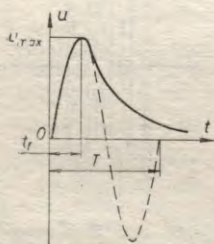
4.8.4. Pārspriegumi

Par pārspriegumiem sauc tādu spriegumu iedarbi uz transformatora tinumiem, kuru vērtības daudzkārt pārsniedz nominālos darba spriegumus un kuru frekvence un forma var atšķirties no darba sprieguma frekvences un formas.

Pēc rakstura un cēloņiem pārspriegumus var iedalīt divās grupās: 1) iekšējie pārspriegumi, kuri saistīti ar pārejas procesiem transformatorā (transformatora atslēgšana, pēkšņa slodzes maiņa, īsslēgumi); 2) ārējie pārspriegumi, kurus izraisa atmosfēras parādības (zibens izlāde, elektrostatiskā indukcija no uzlādētiem mākoņiem).

Pārspriegumi, kuri darbojas uz transformatoru, ir aperiodiski viļņi ar ļoti stāvu fronti (4.50. zīm.). Iekšējo pārspriegumu amplitūdas vērtība U_{max} nepārsniedz $3,5U_N$, bet atmosfēras pārspriegumi var sasniegt vairākus miljonus voltu amplitūdu un to fronte ir ļoti stāva.

Analizējot pārspriegumu darbību transformatorā, izmantosim 4.51. zīmējumā a attēloto ekvivalento shēmu, kurā pieņemti šādi apzīmējumi:

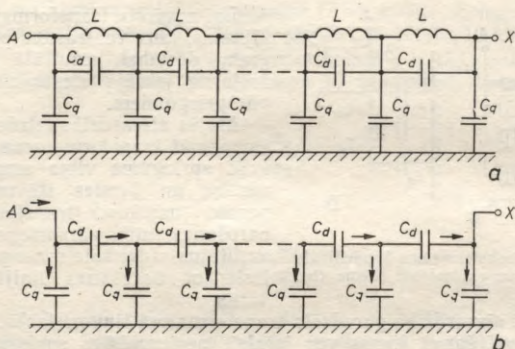


4.50. zīm. Pārsprieguma viļņa forma.

L — tinuma atsevišķo vijumu induktivitāte; C_d — kapacitāte starp vijumiem; C_q — kapacitāte starp vijumiem un korpusu.

Tā kā $X_L = \omega L$ un $X_C = 1/(\omega C)$, tad transformatora normālā darba režīmā, kad sprieguma frekvence $f = 50$ Hz, kapacitātes C_d un C_q var neievērot, jo $X_C \gg X_L$.

Ja uz transformatoru iedarbojas pārspriegums ar ļoti stāvu fronti, laika sprādis t_t , kurā spriegums sasniedz maksimālo vērtību, ir dažas mikrosekundes. Tāpēc sprieguma vilni var uzskatīt par ļoti augstas frekvences ($f = 10\,000 \dots 50\,000$ Hz) periodiski mainīga sprieguma vienu ceturtdaļperiodu



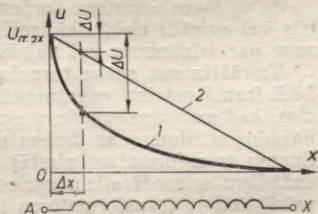
4.51. zīm. Transformatora ekvivalentās shēmas ar kapacitīvajām saitēm (a) un vienkāršota ekvivalentā shēma pārsprieguma gadījumā (b).

(sk. 4.50. zīm.). Šādas frekvences gadījumā $X_C \ll X_L$, tāpēc tinuma atsevišķo vijumu induktīvās pretestības var neievērot un analīzei izmantot ekvivalento shēmu, kura attēlota 4.51. zīmējumā b.

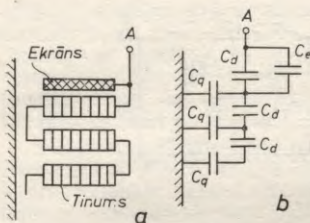
Ja uz transformatora tinumu iedarbojas sprieguma vilnis, tad kondensatori shēmā uzlādējas un uz tiem izveidojas nevienmērīgs sprieguma sadalījums (sprieguma sākuma sadalījums), jo strāvas kondensatoros C_d samazinās virzienā no tinuma sākuma uz beigām. Šāds sprieguma sākuma sadalījums transformatoram ar zemētu neitrāli parādīts 4.52. zīmējumā (raksturliktne 1). Procesa tālākajā gaitā notiek kondensatoru izlāde, un transformatorā izveidojas vienmērīgs sprieguma sadalījums (4.52. zīm. raksturliktne 2), t. i., tāds kā normālā darba režīmā.

Pāreja no sprieguma sākuma sadalījuma uz vienmērīgu sadalījumu notiek rimstošu svārstību veidā, jo darbojas tinuma atsevišķo vijumu induktivitātes un kapacitātes, pie tam procesa gaitā svārstību amplitūdas var pārsniegt maksimālo sprieguma vērtību procesa sākumā.

No 4.52. zīmējuma redzams, ka sākumā vislielākais sprieguma kritums ΔU ir uz transformatora pirmajiem vijumiem, tāpēc šeit iespējama izolācijas caursīte.



4.52. zīm. Sprieguma sadalījums transformatora tinumā.



4.53. zīm. Transformatora kapacitīvais ekrāns (a) un ekvivalentā shēma (b).

Iekšējā aizsardzība paredzēta transformatora tinuma izolācijas bojājumu novēršanai, kurus var izraisīt nevienmērīgs sprieguma sākuma sadalījums tinumā. Šim nolūkam pastiprina transformatora ieejas vijumu izolāciju, kā arī izmanto nepārtraukto spirāles tinumu, kurš palielina kapacitātes C_d un samazina kapacitātes C_q vērtību, tādējādi nodrošinot vienmērīgāku sprieguma sadalījumu tinumā. Bez tam aizsardzībai pret pārspriegumiem transformatorā izveido kapacitīvus ekrānus. Šādus ekrānus izgatavo no elektrokartona ar metalizētu virsmu gredzena veidā, kuru radiālā virzienā pārgriež, lai neizveidotos īsslēgts kontūrs, un pievieno tinuma sākumam (4.53. zīm. a). Transformatoram ar kapacitīvo ekrānu atbilstošā ekvivalentā shēma parādīta 4.53. zīmējumā b. No shēmas redzams, ka ekrāna kapacitāte C_e nodrošina kondensatoru C_q uzlādi, apejot kondensatoru C_d , un tādējādi izlīdzina spriegumu tinuma sākumā.

Lai novērstu transformatora bojājumus, kuri var rasties pārspriegumu darbības rezultātā, izveido arī jo iekšējo aizsardzību pret pārspriegumiem.

Ārējās aizsardzības uzdevums ir samazināt transformatoram pienākošā sprieguma viļņa amplitūdas vērtību un frontes stāvumu. To panāk, uzstādot transformatora barošanas līnijā pārsprieguma novadītājus (dzirksteļspraugas) un ieslēdzot barošanas līnijā reaktorus.

4.9. SPECIĀLAS NOZĪMES TRANSFORMATORI

4.9.1. Trīstinumu transformatori

Ja uz transformatora serdes katra stieņa novietoti nevis divi, bet trīs vai vairāki elektriski izolēti tinumi, tad tādus transformatorus sauc par trīstinumu vai vairāktinumu transformatoriem.

Vairāktinumu spēka transformatori ir trīstinumu transformatori. Šādi transformatori energosistēmā ekonomiski izdevīgi tajos gadījumos, kad no transformatoru apakšstacijas elektroenerģija jāaizvada dažādos attālumos ar diviem dažādiem spriegumiem, jo tad trīstinumu transformators aizstāj divus divtinumu transformatorus ar dažādiem sekundārajiem spriegumiem. Mazjaudas zemu spriegumu vairāktinumu transformatorus lieto radiotehnikā, sakaru tehnikā, automātikā u. c.

Trīstinumu transformatoram uz serdes katra stieņa novietoti 3 neatkarīgi tinumi (4.54. zīm.), no kuriem viens ir primārais, bet divi

sekundārie tinumi: augstākā sprieguma (AS), vidējā sprieguma (VS) un zemākā sprieguma (ZS) tinums, piemēram, 110/35/10 kV.

Trīstinumu transformatora darbības princips ir tāds pats kā divtinumu transformatoram. Transformācijas koeficients tinumiem AS un VS

$$k_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (4.121)$$

tinumiem AS un ZS

$$k_{13} = \frac{\omega_1}{\omega_3}. \quad (4.122)$$

Ja neievēro tukšgaitas strāvu, tad, pamatojoties uz divtinumu transformatoru teoriju, var uzrakstīt trīstinumu transformatora pamatvienādojumus:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \quad (4.123)$$

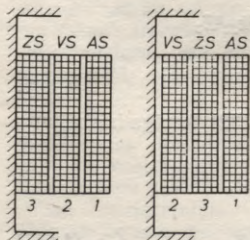
$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2; \quad (4.124)$$

$$\dot{U}'_3 = \dot{E}'_3 - \dot{I}'_3 \underline{Z}'_3; \quad (4.125)$$

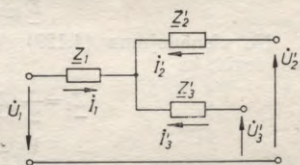
$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 = 0, \quad (4.126)$$

kur \dot{E}'_2 , \dot{E}'_3 , \dot{U}'_2 , \dot{U}'_3 , \dot{I}'_2 , \dot{I}'_3 — sekundāro tinumu elektriskie lielumi, kas reducēti uz primāro tinumu.

Vienādojumiem (4.123), ..., (4.126) atbilst trīstinumu transformatora vienkāršota ekvivalentā shēma, kura attēlota 4.55. zīmējumā. Ekvivalentās shēmas parametrus var noteikt no tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumiem.



4.54. zīm. Tinumu novietojums trīstinumu transformatorā.



4.55. zīm. Trīstinumu transformatora ekvivalentā shēma.

No tukšgaitas mēģinājuma rezultātiem atrod tukšgaitas strāvu I_0 , tukšgaitas (magnētiskos) zudumus P_0 un transformācijas koeficientus:

$$k_{12} = \frac{U_1}{U_{20}}; \quad k_{13} = \frac{U_1}{U_{30}}; \quad k_{23} = \frac{U_{20}}{U_{30}}, \quad (4.127)$$

pie tam

$$\dot{k}_{23} = \frac{k_{13}}{k_{12}}. \quad (4.128)$$

No īsslēguma mēģinājuma rezultātiem atrod īsslēguma spriegumus u_h , īsslēguma (elektriskos) zudumus P_h un ekvivalentās shēmas parametrus $\underline{Z}_1, \underline{Z}'_2, \underline{Z}'_3$.

Nosakot ekvivalentās shēmas parametrus, jāveic trīs īsslēguma mēģinājumi.

Pirmajā mēģinājumā tinumam 1 pievada īsslēguma spriegumu u_{k12} , tinumu 2 saslēdz īsi, tinumu 3 atstāj nenoslēgtu un nosaka pretestību

$$\underline{Z}_{k12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2. \quad (4.129)$$

Otrajā mēģinājumā tinumam 1 pievada īsslēguma spriegumu u_{k13} , tinumu 3 saslēdz īsi, tinumu 2 atstāj nenoslēgtu un atrod pretestību

$$\underline{Z}_{k13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3. \quad (4.130)$$

Trešajā mēģinājumā īsslēguma spriegumu u_{k23} pievada tinumam 2, tinumu 3 saslēdz īsi, tinumu 1 atstāj nenoslēgtu un nosaka pretestību

$$\underline{Z}_{k23} = \underline{Z}_2 + k_{23}^2 \underline{Z}_3, \quad (4.131)$$

kur pretestība $k_{23}^2 \underline{Z}_3$ ir tinuma 3 pretestība, kas reducēta uz tinumu 2.

Tālākajiem aprēķiniem pretestību \underline{Z}_{k23} reducē uz primāro tinumu 1:

$$\underline{Z}'_{k23} = k_{12}^2 \underline{Z}_{k23} = k_{12}^2 \underline{Z}_2 + k_{12}^2 k_{23}^2 \underline{Z}_3$$

jeb, ievērojot izteiksmi (4.128),

$$\underline{Z}'_{k23} = \underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3. \quad (4.132)$$

No vienādojumu (4.129), (4.130) un (4.132) kopīga risinājuma var iegūt, ka

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{k12} + \underline{Z}_{k13} - \underline{Z}'_{k23}), \\ \underline{Z}'_2 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{k12} + \underline{Z}'_{k23} - \underline{Z}_{k13}), \\ \underline{Z}'_3 &= \frac{1}{2} (\underline{Z}_{k13} + \underline{Z}'_{k23} - \underline{Z}_{k12}), \end{aligned} \quad (4.133)$$

kur

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1; \quad \underline{Z}'_2 = R'_2 + jX'_2; \quad \underline{Z}'_3 = R'_3 - jX'_3. \quad (4.134)$$

Issléguma spriegumus trīstinumu transformatoram aprēķina no šādām izteiksmēm:

$$\begin{aligned} u_{k12}(\%) &= \frac{I_{1N} Z_{k12}}{U_{1N}} 100; \\ u_{k13}(\%) &= \frac{I_{1N} Z'_{k13}}{U_{1N}} 100; \\ u_{k23}(\%) &= \frac{I_{1N} Z'_{k23}}{U_{1N}} 100; \end{aligned} \quad (4.135)$$

pie tam īssléguma aktīvās pretestības un tātad arī īssléguma sprieguma aktīvās komponentes reducē uz 75 °C temperatūru.

Trīstinumu transformatora atsevišķo tinumu pilnajām jaudām ir spēkā šāda sakarība:

$$S_1 \leq S_2 + S_3, \quad (4.136)$$

jo jaudas koeficienti $\cos \varphi_2$ un $\cos \varphi_3$ vispārīgā gadījumā ir dažādi, strāvas I'_2 un I'_3 ir nobīdītas fāzē un tāpēc $I_1 \leq I'_2 + I'_3$.

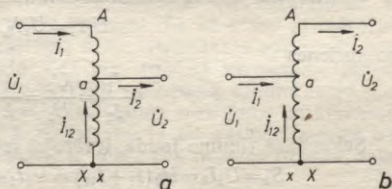
Par trīstinumu transformatora nominālo jaudu pieņem lielāko no tinumu jaudām (parasti primārā tinuma jaudu). Ja AS tinuma jaudu pieņem par 100%, tad VS un ZS tinumus izgatavo ar jaudām 100% un 67% dažādās kombinācijās.

Parasti trīsfāzu trīstinumu transformatorus izgatavo ar tinumu slēgumiem $\Upsilon/\Upsilon/\Delta-0-11$ un $\Upsilon/\Delta/\Delta-11-11$.

4.9.2. Autotransformatori

Autotransformators atšķiras no parastā divtinumu transformatora ar to, ka autotransformatoram 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. Tādējādi autotransformatora primārā un sekundārā ķēde ir saistītas ne tikai magnētiski, bet arī elektriski.

Pārējais konstruktīvais izveidojums un darbības princips autotransformatoram ir tāds pats kā divtinumu transformatoram. Izšķir spriegumu pazeminošos (4.56. zīm. a) un spriegumu paaugstinošos (4.56. zīm. b) autotransformatorus.



4.56. zīm. Vienfāzes pazeminoša (a) un paaugstinoša (b) autotransformatora shēma.

Pazeminoša autotransformatora primārais spriegums U_1 primārajā tinumā ar ω_1 vijumiem uztur strāvu I_1 . Sekundārajā ķēdē strāvu I_2 uztur tinuma posma $a-x$ ar ω_2 vijumiem inducētais EDS \dot{E}_2 , kas ir daļa no $A-X$ tinumā inducētā EDS \dot{E}_1 .

Transformācijas koeficientu autotransformatoram nosaka tāpat kā divtinumu transformatoram:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (4.137)$$

Strāva I_1 īstenībā plūst tikai tinuma posmā ar $\omega_1 - \omega_2$ vijumiem, bet abām ķēdēm kopīgā posmā $a-x$ plūst strāva, kas vienāda ar I_1 un I_2 ģeometrisku summu:

$$I_{12} = I_1 + I_2. \quad (4.138)$$

Neievērojot tukšgaitas strāvu, slogota autotransformatora magnetizējošo spēku vienādojumu var uzrakstīt šādi:

$$I_1(\omega_1 - \omega_2) + (I_1 + I_2)\omega_2 = 0, \quad (4.139)$$

no kurienes, tāpat kā divtinumu transformatoram,

$$I_1 = -\frac{I_2}{k}. \quad (4.140)$$

Saskaņā ar vienādojumiem (4.138) un (4.140)

$$I_{12} = -I_1(k-1) = I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (4.141)$$

No pēdējās izteiksmes redzams, ka pazeminošam autotransformatoram ($k > 1$) strāvas I_1 un I_2 tinuma kopīgajā posmā ir pretējas, tāpēc, ievērojot vienādojumu (4.138),

$$I_{12} = I_2 - I_1. \quad (4.142)$$

No izteiksmes (4.141) var secināt, ka pazeminošam autotransformatoram, kura $k=2$, $I_{12}=I_1$, un tāpēc visu tinumu var izgatavot no viena šķērgriezuma vada. Bet, ja $1 < k < 2$, tad kopīgā posma strāva $I_{12} < I_1$, tāpēc posmu $a-x$ var izveidot no tievāka vada nekā pārējo tinuma daļu.

Ja neievēro jaudas zudumus autotransformatorā, tad

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

no kurienes

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{k}. \quad (4.143)$$

Sekundārā tinuma jauda, ievērojot izteiksmi (4.142),

$$S_2 = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_2) = U_2 I_1 + U_2 I_2 = S_e + S_{em}, \quad (4.144)$$

kur S_e — jauda, kuru sekundārais tinums saņem tieši no tikla bez magnētiskā lauka līdzdalības;

S_{em} — jauda, kuru sekundārajai ķēdei nodod ar elektromagnētisko lauku (elektromagnētiskā jauda).

No iepriekšējām izteiksmēm izriet, ka

$$S_e = U_2 I_1 = U_2 I_2 \frac{1}{k} = S_2 \frac{1}{k}, \quad (4.145)$$

$$S_{em} = U_2 I_{12} = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right) = S_2 \left(1 - \frac{1}{k}\right). \quad (4.146)$$

Transformatora izmēri, masa un aktīvo materiālu patēriņš ir atkarīgi no elektromagnētiskās jaudas S_{em} . Autotransformatoram $S_{em} < S_2$, bet divtinumu transformatoram $S_{em} = S_2$. Tādējādi autotransformators, kura transformācijas koeficients nedaudz lielāks par 1, ir ekonomiski izdevīgāks par divtinumu transformatoru, jo autotransformatoram ir mazāks aktīvo materiālu patēriņš, tas ir lētāks, tam ir mazāki jaudas zudumi un augstāks lietderības koeficients.

Transformācijas koeficientam palielinoties, minētās priekšrocības krasi samazinās. Tāpēc autotransformatori efektīvi ir tikai tad, ja nepieciešama neliela sprieguma izmaiņa. Parasti autotransformatoriem $k \leq 2,5$.

Lieljaudas autotransformatorus izmanto apakšstacijās augstu spriegumu, piemēram, no 110 kV uz 220 kV paaugstināšanai. Autotransformatorus — sprieguma pazeminātājus lieto lieljaudas asinhrono un sinhrono dzinēju palaišanai, kā arī laboratorijās sprieguma nepartrauktai regulēšanai. Pēdējā gadījumā tiem ir maināms transformācijas koeficients.

Trīsfāzu autotransformatoru parasti slēdz zvaigznē, jo tad var izveidot nullpunktu. Bez tam trīsstūra slēguma izmantošanu ierobežo tas apstāklis, ka autotransformatoram tinumu savienojumu grupa ir viennozīmīgi atkarīga no transformācijas koeficienta k .

Lai novērstu nevēlamās parādības, kas saistītas ar serdes magnetizēšanu, tad trīsfāzu autotransformatoram izveido papildu tinumu, kuru slēdz trīsstūrī (sk. arī 4.4.6.). Šis tinums no pārējiem tinumiem ir elektriski izolēts, t. i., enerģiju saņem tikai ar elektromagnētiskā lauka starpniecību. Autotransformators ar šādu papildtinumu var aizstāt trīstinumu transformatoru.

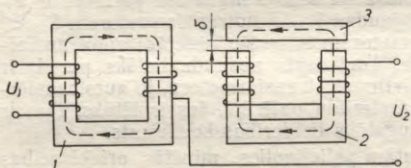
Līdztekus priekšrocībām autotransformatoriem salīdzinājumā ar divtinumu transformatoriem ir arī trūkumi. Tā kā starp primāro un sekundāro tinumu pastāv elektriska saite, augstākais spriegums var nokļūt zemākā sprieguma tīklā. Bez tam zemākā sprieguma tinuma izolācijai jābūt tādai pašai kā augstākā sprieguma tinuma izolācijai. Autotransformatoram ir arī mazāks īsslēguma spriegums un atbilstoši lielākas īsslēguma strāvas. Tā, piemēram, ja īsi saslēdz spaiļes $a-x$ (sk. 4.56. zīm. a), tīkla spriegums ir pievadīts nelielai tinuma daļai ar mazu īsslēguma pretestību.

Padomju Savienībā autotransformatorus izgatavo ar jaudu līdz 250 MV·A un spriegumu līdz 500 kV.

4.9.3. Metināšanas transformatori

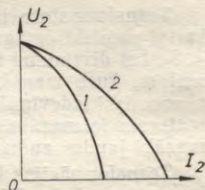
Metināšanā lieto vienfāzes pazeminošos transformatorus, kuru sekundārā tinuma spriegums tukšgaitā ir 60...75 V.

Lai panāktu elektriskā loka stabilu degšanu, metināšanas transformatora ārējai raksturliknei jābūt strauji kritošai. Šādos apstākļos, mainoties elektriskā loka garumam un spriegumam, strāva mainās maz.



4.57. zim. Metināšanas transformators ar regulējamu drosele:

1 — pazeminošs transformators, 2 — drosele (spole ar tērauda serdi), 3 — pārvietojama serde droseles induktīvās pretestības regulēšanai.



4.58. zim. Metināšanas transformatora ārējās raksturliknes:

1 — ja gaisa sprauga droselē ir minimāla, 2 — ja gaisa sprauga droselē ir maksimāla.

Tā kā metināšanas procesā nepieciešams regulēt strāvu, tad visbiežāk lieto metināšanas transformatorus ar regulējamu drosele. Šāda iekārta attēlota 4.57. zīmējumā. Sprieguma kritums droselē nodrošina strauji kritošu ārējo raksturlikni $U_2 = f(I_2)$. 4.58. zīmējumā attēlotas metināšanas transformatora ar regulējamu drosele ārējās raksturliknes, kuras atbilst minimālajai un maksimālajai gaisa spraugai δ .

Vienfāzes metināšanas transformatoru trūkums ir tas, ka šie transformatori rada nesimetrisku slodzi tīklā.

4.9.4. Taisngriežu lekārtu transformatori

Izmantojot transformatoru taisngriežu iekārtu barošanai, tā sekundārajā pusē ir ieslēgti ventiļi, kuri strāvu vada tikai vienā virzienā.

Aplūkosim vienfāzes transformatora darbību vienpusperioda taisngriešanas shēmā (4.59. zim. a). Transformatora sekundārā strāva i_2 ir pulsējoša (4.59. zim. b) un sastāv no divām komponentēm:

$$i_2 = i_\omega + I_d, \quad (4.147)$$

kur i_ω — periodiski pulsējošās strāvas mainīgā komponente;
 I_d — nemainīgā komponente (taisngrieztās strāvas vidējā vērtība).

Ja neievēro tukšgaitas strāvu, tad transformatora magnetizējošo spēku vienādojums ir šāds:

$$i_1 \omega_1 + i_0 \omega_2 + I_d \omega_2 = 0. \quad (4.148)$$

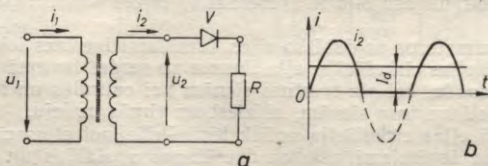
Primārajā tinumā transformējas tikai strāvas i_2 mainīgā komponente i_0 , tāpēc magnetizējošais spēks $I_d \omega_2$ paliek nelīdzsvarots un rada transformatora serdē nemainīgu magnētisko plūsmu Φ_d , ko sauc par *piespiedmagnetizēšanas plūsmu*. Šī plūsmas rada serdē papildu piesātinājumu, un tāpēc jāpalielina serdes šķērsgriezums. Tādējādi palielinās transformatora izmēri, masa, aktīvo materiālu patēriņš un izmaksas.

Trīsfāzu taisngriešanas shēmās transformators jebkurā laika momentā strādā nesimetriskas slodzes režīmā un piespiedmagnetizēšanas plūsmas Φ_d pēc savas darbības rakstura ir līdzīga nullsecības magnētiskajai plūsmai (sk. 4.7.3.). Tāpēc, izvēloties atbilstošu transformatora tinumu slēgumu un serdes konstrukciju (piemēram, stieņu tipa transformatoru ar tinumu slēgumu ∇ / ∇ , kur Φ_d noslēdzas gaisā), var panākt piespiedmagnetizēšanas plūsmas ievērojamu samazināšanu.

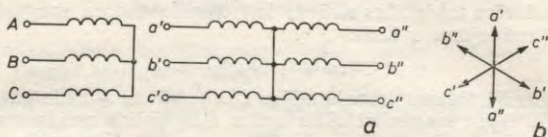
Otra īpatnība, kas raksturīga taisngriežu iekārtu barošanas transformatoriem, ir tā, ka primārā un sekundārā tinuma strāvas ir nesinusoidālas. Strāvas augstākās harmoniskās, kuru sastāvs ir atkarīgs no taisngriešanas shēmas, kā arī no slodzes rakstura (aktīva, induktīva, kapacitīva slodze), izraisa transformatorā papildzudumus, palielina tā silšānu un samazina lietderības koeficientu. Tā kā augstākās harmoniskās, ko satur primārā un sekundārā tinuma strāvas, ir dažādas, tad dažādas ir arī šo tinumu pilnās jaudas, t. i., $S_1 \neq S_2$. Tāpēc par aprēķina jaudu taisngriežu iekārtu transformatoriem pieņem jaudu

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2}. \quad (4.149)$$

Taisngriežu iekārtu transformatoru aprēķina jauda S vienmēr ir lielāka par jaudu taisngrieža izejā, t. i., par līdzstrāvas ķēdes jaudu $P_d = U_d I_d$. Šāda īpatnība izskaidrojama ar to, ka jebkurai taisngriešanas shēmai sakarā ar transformatora sekundārā sprieguma U_2 un sekundārās strāvas I_2 nesinusoidālo raksturu $U_2 > U_d$ un $I_2 > I_d$.



4.59. *zim.* Transformatora darbība vienusperioda taisngriešanas shēmā (a) un sekundārās strāvas izmaiņa laikā (b).



4.60 zīm. Sešfāzu transformatora shēma (a) un sekundāro spriegumu vektoru diagramma (b).

Tā, piemēram, vienfāzes vienpusperioda taisngriešanas shēmā $S = 3,09P_d$, vienfāzes divpusperiodu taisngriešanas shēmā $S = 1,48P_d$, trīsfāzu divpusperiodu taisngriešanas shēmā $S = 1,05P_d$.

Lai samazinātu taisngrieztā sprieguma un strāvas pulsācijas, kā arī primārā un sekundārā tinuma strāvu augstākās harmoniskās, vēlams palielināt transformatora sekundārā tinuma fāzu skaitu. Šim nolūkam izmanto transformatoru ar sešfāzu sekundāro tinumu, kura slēguma shēma parādīta 4.60. zīmējumā.

4.10. TRANSFORMATORU SILŠANA UN DZESĒŠANA

Transformatora darba procesā enerģijas zudumi tā tinumos un serdē pārveidojas siltumā, un šīs transformatora daļas sasilst. Pieaugot transformatora atsevišķo daļu temperatūrai, notiek siltuma pāreja no vietām ar augstāku temperatūru uz vietām ar zemāku temperatūru. Šī pāreja notiek izstarošanas un konvekcijas ceļā.

Transformatora atsevišķo daļu silšana ir atkarīga no transformatorā izdalītajiem zudumiem, kā arī no dzesēšanas intensitātes. Tā kā izolācijas materiāliem pieļaujamā temperatūra ir ierobežota, tad no silšanas apstākļiem ir atkarīga transformatoram ilgstoši vai īslaicīgi pieļaujamā slodze.

Palielinot transformatora nominālo jaudu, bet saglabājot nemainīgu elektromagnētiskā noslogojuma pakāpi (sk. 2.3.), zudumi palielinās straujāk nekā dzesējošā virsma, tāpēc lieljaudas transformatoriem nepieciešama intensīvāka dzesēšana — dabiskā vai mākslīgā dzesēšana ar eļļu. Transformatorēļļa ievērojami paātrina siltuma aizvadišanu no tinumiem un serdes, jo normālā darba režīmā siltuma pāreja uz cirkulējošu eļļu ir apmēram 10 reizes intensīvāka nekā uz gaisu.

Transformatoros ar dabisko eļļas dzesēšanu tvertnes iekšpusē noris dabiskā eļļas cirkulācija: eļļa tinumu un serdes tuvumā sasilst un virzās uz augšu, bet pie tvertnes sienām vai caurulēs un radiatoros, kuri pierīkoti tvertnes sienām, atdziest un virzās uz leju.

Dabiskā eļļas cirkulācija notiek lēni. Palielinot eļļas cirkulācijas ātrumu, var ievērojami uzlabot dzesēšanas apstākļus un palielināt transformatora jaudu. Tāpēc ļoti lielas jaudas transformatoros ierīko dzesēšanu ar piespiedu eļļas cirkulāciju, novadot sakarsēto eļļu spirālveida caurulē, ko dzesē ar tekošu ūdeni.

4.11. PADOMJU SAVIENĪBĀ RAŽOTO TRANSFORMATORU PAMATTIPI

Padomju Savienībā ražoto transformatoru nomenklatūra ir ļoti daudzveidīga, tāpēc šeit aprobežosimies tikai ar dažām ziņām par vispārīga lietojuma spēka transformatoriem. Vispārīga lietojuma spēka transformatoru raksturīgākie parametri doti 4.2. tabulā. Sajā tabulā ietverti tikai vismazākās un vislielākās jaudas transformatori, kurus izgatavo dotajai sprieguma klasei.

4.2. tabula

PADOMJU SAVIENĪBĀ RAŽOTO DAŽU VISPĀRĪGA LIETOJUMA
TRANSFORMATORU GALVENIE TEHNISKIE DATI

Tips	Valsts standarts	Zudumi (kW)		u_h (%)	I_o (%)	Masa (t)
		P_o	P_h			
TM-25/10	ГОСТ 12022—76	0,135	0,6	4,5	3,2	0,38
TM-630/10	" "	1,560	7,6	5,5	2,0	3,0
TM-100/35	" "	0,465	1,97	6,5	2,6	1,3
TM-630/35	" "	1,900	7,60	6,5	2,0	3,5
TM-1000/10	ГОСТ 11920—73	2,45	12,2	5,5	1,4	5,0
TM-6300/10	" "	9,00	46,5	6,5	0,8	17,3
TM-1000/35	" "	2,75	12,5	6,5	1,5	6,0
ТДЦ-80 000/35	" "	60,0	280,0	9,5	0,3	78,6
ТМТН-6300/35	" "	12,0	55,0		1,2	25,0
ТДТН-16 000/35	" "	28,0	115,0		0,95	47,0
ТДЦ-80 000/110	ГОСТ 12965—74	89	310	10,5	0,55	111,0
ТДЦ-400 000/110	" "	320	900	10,5	0,45	296,8
ТМН-2500/110	" "	6,5	22,0	10,5	1,5	24,5
ТРДЦН-63 000/110	" "	70,0	245	10,5	0,6	107,2
ТМТН-6300/110	" "	17,0	58		1,2	42,0
ТДТН-80 000/110	" "	102	390		0,6	146,0
ТДЦ-125 000/220	ГОСТ 15957—70	135	380	11,0	0,50	169,0
ТЦ-630 000/220	" "	380	1300	11,0	0,35	374,2
ТРДН-32 000/220	" "	53	167	12,0	0,9	150
ТРДЦН-160 000/220	" "	167	525	12,0	0,6	249
ТДЦ-125 000/330	ГОСТ 17545—72	145	360	11,0	0,5	
ТЦ-1 000 000/330	" "	480	2200	11,5	0,3	
ТРДН-32 000/330	" "	82	170	11,0	0,85	
ТРДН-125 000/330	" "	180	420	11,0	0,5	

Tips	Valsts standarts	Zudumi (kW)		μ_k (%)	I_o (%)	Masa (t)
		P_o	P_k			
TC3-10/0,66 TC3-160/0,66	ГОСТ 18619—73 " "	0,09 0,71	0,28 2,06	4,5 4,5	7,0 2,3	0,15 0,80
TC3-160/10 TC3-1600/10	ГОСТ 14074—76 " "	0,7 4,2	2,7 16,0	5,5 5,5	4,0 1,5	1,4 6,5
TC3-250/15 TC3-1600/15	" " " "	1,1 4,3	4,4 16,0	8,0 8,0	4,0 2,0	2,2 6,8
ОРДЦ-333 000/500 ОРЦ-533 000/500	ГОСТ 17544—72 " "	200 300	950 1400	12,5 13,5	0,35 0,30	
АТДТН-63 000/220 АТДЦТН-250 000/220	ГОСТ 15957—70 " "	45 145	215 520		0,5 0,5	
АТДЦТН-63 000/330 АТДЦТН-200 000/330	ГОСТ 17545—72 " "	70 180	280 600		0,6 0,5	
АТДЦТН-125 000/500 АТДЦТН-250 000/500	ГОСТ 17544—72 " "	150 270	330 550		0,5 0,45	
АОДЦТН-167 000/500 АОДЦТН-267 000/500	" " " "	125 160	325 420		0,4 0,35	

Transformatora tipa apzīmējuma burtiem un cipariem attiecīgā secībā ir šāda nozīme: А — autotransformators (pārējie transformatori bez apzīmējuma); Т — trīsfāzu vai О — vienfāzes; Р — ar dalītu zemākā sprieguma tinumu; С, СЗ, М, Д, ДЦ, Ц — burti, kas apzīmē dzesēšanas veidu; Т — trīstinumu; Н — ar ierīci sprieguma regulēšanai slodzes režīmā (ja tipa apzīmējums burtu Н nesatur, tad

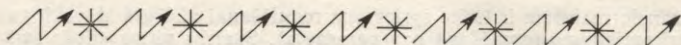
4.3. tabula

DAŽU TIPU MAZJAUĐAS TRANSFORMATORU GALVENIE TEHNISKIE DATI

Tips	S_N (kV·A)	μ_k (%)	I_o (%)	Masa (kg)
OCM-0,063	0,063	12,0	24	1,4
OCM-0,10	0,10	9,0	24	2,0
OCM-0,16	0,16	7,0	23	3,0
OCM-0,25	0,25	5,5	22	4,3
OCM-0,40	0,40	4,5	20	6,2
OCM-0,63	0,63	3,5	19	9,5
OCM-1,00	1,00	2,5	18	14,4

transformatoram ir ierīce sprieguma regulēšanai atslēgtā stāvoklī vai arī sprieguma regulēšana nav paredzēta). Skaitlis pirms slīpās svītras norāda transformatora nominālo jaudu (kV·A), skaitlis aiz svītras — augstāko spriegumu (kV). Tā, piemēram, transformatora apzīmējums TMH-2500/110 norāda, ka tas ir trīsfāzu transformators ar dabisko eļļas dzesēšanu un ierīci sprieguma regulēšanai slodzes režīmā, ar jaudu $S_N=2500$ kV·A un augstāko spriegumu $U_N=110$ kV.

4.3. tabulā doti tehniskie dati dažu tipu mazjaudas transformatoriem, kurus izgatavo sērijveidā saskaņā ar Valsts standartu ГOCT 16710—76. Apzīmējuma OCM nozīme ir šāda: O — vienfāzes; C — sausais; M — plaša lietojuma transformators.



5. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU TEORIJAS KOPĪGI JAUTĀJUMI

5.1. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU PAMATTIPI UN UZBŪVE

5.1.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi

Izšķir trīs galvenos maiņstrāvas mašīnu pamattipus: sinhronās, asinhronās mašīnas un maiņstrāvas kolektormašīnas.

Visvairāk izplatītas ir trīsfāzu maiņstrāvas mašīnas. Vienfāzes mašīnas lieto reti, galvenokārt ļoti mazām jaudām ($P_N < 1$ 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 iztīrāšanas.

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 rādītāji ir ievērojami sliktāki nekā līdzstrāvas un, it sevišķi, asinhronajiem dzinējiem, tāpēc maiņstrāvas kolektordzinējus lieto ļoti reti.

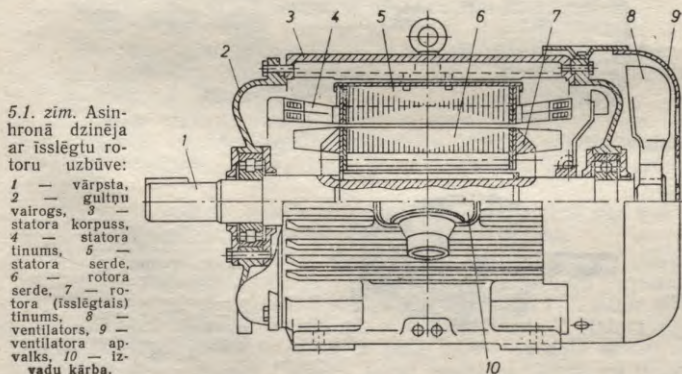
5.1.2. Asinhrono mašīnu uzbūve

Asinfronās mašīnas galvenās sastāvdaļas ir *stators* un *rotors*. Atkarībā no rotora konstruktīvā izveidojuma izšķir divus asinhrono mašīnu pamattipus: *asinhronās mašīnas ar isslēgtu rotoru* (5.1. zīm.) un *asinhronās mašīnas ar fāzu rotoru* (kontaktgredzenu rotoru) (5.2. zīm.).

Asinhronās mašīnas stators sastāv no tērauda serdes 5, 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 4 (parasti trīsfāzu).

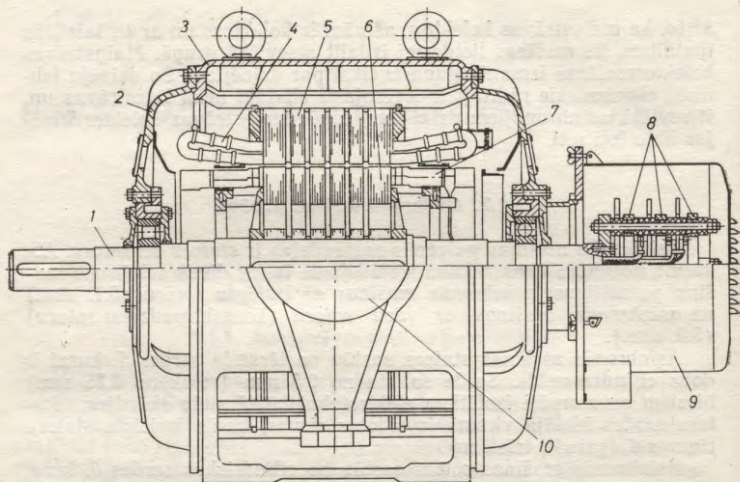
Asinhronās mašīnas rotors sastāv no cilindriskas serdes 6, kura, tāpat kā statora serde, salikta no elektrotehniskā tērauda skārdiem un nostiprināta uz vārpstas 1. Rotora serdes ārējā virsmā izveidotas rievas rotora tinuma 7 ievietošanai.

Isslēgtā rotora rievās ievietots «vāveres rata» tipa tinums (5.3. zīm. a). Tas izveidots no vara vai alumīnija stieņiem, kuri no rotora serdes nav izolēti. Stieņu gali rotora abās pusēs savienoti ar diviem tāda paša materiāla gredzeniem. Mašīnām ar jaudu līdz 100 kW rotora rievas zem spiediena pielej ar izkausētu alumīniju, reizē atlejšot arī abus gredzenus rotora galos kopā ar ventilācijas



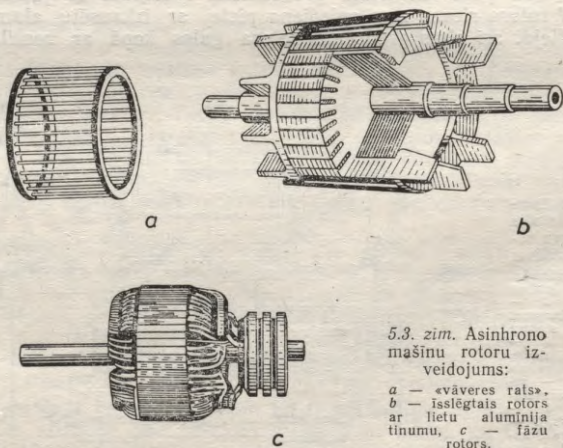
5.1. zīm. Asinhronā dzinēja ar isslēgtu rotoru uzbūve:

- 1 — vārpsta,
- 2 — gultņu vairogs,
- 3 — statora korpuss,
- 4 — statora tinums,
- 5 — statora serde,
- 6 — rotora serde,
- 7 — rotora (isslēgtais) tinums,
- 8 — ventilators,
- 9 — ventilatora apvalks,
- 10 — izvadū kārba.



5.2. zim. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru uzbūve:

1 — vārpsta, 2 — gultņu vairogs, 3 — statora korpuss, 4 — statora tinums, 5 — statora serde, 6 — rotora serde, 7 — rotora (fāzu) tinums, 8 — kontaktgredzeni, 9 — apvalks, 10 — izvadu kārba.



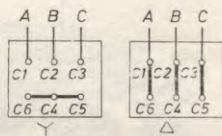
5.3. zim. Asinhrono mašīnu rotoru izveidojums:

a — «vāveres rats»,
b — isslēgtais rotors
ar lietu alumīnija
tinumu, c — fāzu
rotors.

spārņiņiem (5.3. zīm. *b*). Asinhronie dzinēji ar išslēgtu 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 (5.3. zīm. *c*) ievietots trīsfāzu tinums, kura konstruktīvais izveidojums līdzīgs statora trīsfāzu tinumam. Rotora tinuma fāzes saslēgtas zvaigznē un izvadi pievienoti uz vārpstas nekustīgi nostiprinātiem kontaktgredzeniem (sk. 5.2. zīm.). Pa kontaktgredzeniem slīd sukas, ar kuru starpniecību rotora ķēdē var ieslēgt trīsfāzu reostatu vai arī rotora tinumu saslēgt īsi. Lai samazinātu mehānisko zudumus un kontaktgredzenu un suku nodilumu, dzinējiem ar fāzu rotoru parasti ir iekārtots mehānisms, ar kuru, kontaktgredzenus saslēdzot īsi, paceļ sukas.

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 (5.4. zīm.). Tā kā fāzu tinumi aprēķināti noteiktam nominālajam 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/Υ , 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 *P1*, *P2*, *P3*.



5.4. zīm. Statora tinumu saslēgšana zvaigznē un trīsstūrī.

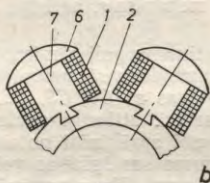
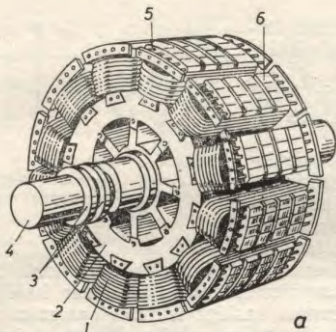
5.1.3. Sinhrono mašīnu uzbūve

Sinhronās mašīnas statoram ir tāda pati uzbūve kā asinhronās mašīnas statoram. Sinhronās mašīnas statoru kopā ar tinumu sauc arī par *enkuru*.

Sinhronās mašīnas rotorā novietots ierosmes tinums, kuru baro ar līdzstrāvu. Ierosmes tinuma uzdevums ir radīt mašīnā galveno magnētisko plūsmu. Rotoru kopā ar ierosmes tinumu sauc arī par *induktoru*.

Sinhronās mašīnas rotora konstruktīvais izveidojums var būt divējāds: ar izvirzītiem poliem un ar neizvirzītiem poliem.

Izvirzīto polu rotors (5.5. zīm.) sastāv no atsevišķiem elektromagnētiem — ierosmes poliem, kuri nekustīgi nostiprināti korpusā 2, kas vienlaikus ir rotora jūgs. Katrs pols ir salikts no 1...2 mm bieža elektrotehniskā tērauda skārda, pie tam pola serde 7 statora pusē beidzas ar paplašinātu uzgali 6 — pola kurpi. Uz pola serdes novietotas ierosmes tinuma 1 spoles, kuras saslēgtas virknē, un tinuma



5.5. zīm. Sinhronās mašīnas rotors ar izvirzītiem poliem:

a — kopskats, *b* — polu sistēmas šķērsgrīzums; 1 — ierosmes tinums, 2 — rotora korpuss (jūgs), 3 — kontaktgredzeni, 4 — vārpsta, 5 — palaišanas tinums (vai slāpētājtinums), 6 — pola kurpe, 7 — pola serde.

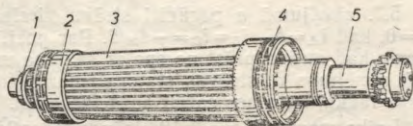
divi izvadi pievienoti uz vārpstas 4 nekustīgi nostiprinātiem kontaktgredzeniem 3. Pa tiem slid sukas, ar kuru starpniecību ierosmes tinumam pievada līdzstrāvu. Sinhrono dzinēju polu korpēs ievietots palaišanas tinums 5, kurš izgatavots no materiāla ar samērā lielu īpatnējo pretestību (misiņš, bronza). Palaišanas tinuma stieņi polu galos savienoti ar tāda paša materiāla gredzeniem vai segmentiem. Šāds tinums ir līdzīgs asinhronās mašīnas išslēgtā rotora tinumam, un to izmanto sinhrono dzinēju asinhronai palaišanai (sk. 7.6.1.). Līdzīgas konstrukcijas tinumu, tikai no vara stieņiem, izveido sinhronajos ģeneratoros, un to sauc par slāpētājtinumu (sk. 7.7.3.). Dažreiz rotoru izveido ar masīviem poliem, kuri tad veic palaišanas tinuma vai slāpētājtinuma funkcijas.

Izvirzīto polu rotorus lieto lēngaitas sinhronajās mašīnās, kuru rotācijas frekvence $n \leq 1500 \text{ min}^{-1}$ ($2p \geq 4$). Pie šādām mašīnām pieder hidroģeneratori, kurus darbina hidroturbīnas, dizeļģeneratori un gandrīz

vīsi sinhronie dzinēji. Tā kā hidroturbīnu rotācijas frekvence ir neliela ($n = 60 \dots 400 \text{ min}^{-1}$), tad hidroģeneratori jāizveido ar lielu polu skaitu (sk. 7.1.), tāpēc hidroģeneratoru rotoriem ir liels diametrs (līdz 16 m) un tie ir samērā īsi (to garums nepārsniedz 3 m).

Atgaitas sinhronajās mašīnās izvirzīto polu rotoru konstrukcija nenodrošina pietiekamu rotora mehānisko izturību. Tāpēc mašīnās, kuru rotācijas frekvence $n \geq 1500 \text{ min}^{-1}$, izmanto neizvirzīto polu rotoru.

Neizvirzīto polu rotors (5.6. zīm.) ir masīvs tērauda cilindrs, kura virsmā iefrēzētajās rievās ievietots ierosmes tinums. Rievas aizņem apmēram $2/3$ no rotora aploces. Speciālu palaišanas tinumu vai slāpētājtinumu šādām mašīnām neizveido, jo tā funkcijas veic masīvais rotors. Neizvirzīto polu rotorus izveido sinhronajām mašīnām ar rotācijas frekvenci 3000 min^{-1} , retāk — ar 1500 min^{-1} (ja maiņstrāvas frekvence $f = 50 \text{ Hz}$). Pie šādām mašīnām pieder turboģeneratori — sinhronie ģeneratori, kurus termoelektrostacijās darbina tvaika



a



b

5.6. zīm. Sinhronās mašīnas rotors ar neizvirzītiem poliem:

a — kopskatš, b — rotora šķērsriezums; 1 — kontaktgredzeni, 2 — bandāža, 3 — rotora serde, 4 — ventilators, 5 — vārpsta, 6 — ierosmes tinums.

turbīnas. Turbogeneratoru rotori ir samērā gari (līdz 8 m) ar relatīvi mazu diametru (līdz 1,5 m).

Mazjaudas (līdz 15 kW) sinhronajām mašīnām var būt apvērsta konstrukcija, t. i., ierosmes poli novietoti statorā, bet maiņstrāvas tinums rotorā. Pēc uzbūves šādas mašīnas ir līdzīgas līdzstrāvas mašīnām, kurās kolektors aizstāts ar kontaktgredzeniem.

5.2. ROTĒJOŠS MAGNETISKAIS LAUKS

Visu daudzfāzu maiņstrāvas mašīnu darbības pamatā ir rotējošs magnētiskais lauks. Rotējošo magnētisko lauku var iegūt divējādi: 1) griežot rotora polus, kuru tinumi baroti ar līdzstrāvu; 2) barojot speciāli izveidotu nekustīgu tinumu ar trīsfāzu maiņstrāvu. Pirmajā gadījumā rotoram pievada mehānisko enerģiju, bet otrajā — rotējošais magnētiskais lauks rodas bez mehāniskās enerģijas līdzdalības.

Noskaidrosim, kā ar trīsfāzu maiņstrāvu var radīt rotējošu magnētisko lauku, tādu pašu kā ar rotējošiem poliem. Aplūkosim trīsfāzu maiņstrāvas mašīnas vienkāršotu statora tinumu (5.7. zīm.), kuram katra fāze satur vienu spoli ar vienu vijumu jeb diviem vadiem A un X , B un Y , C un Z . Fāžu sākumi A , B , C telpā nobīdīti par 120° jeb $1/3$ no statora aploces, bet spoles malas — par 180° jeb $1/2$ no aploces.

Ja šādu tinumu baro ar trīsfāzu maiņstrāvu, tad atsevišķo fāžu strāvu momentānās vērtības ir vienādas ar strāvu vektoru projekcijām uz telpā nekustīgu asi (laika t asi) (5.7. zīm.).

5.7. zīmējumā *a* parādīti strāvu virzieni spolēs laika momentā $t_1=0$, kad $i_A=I_m$, $i_B=i_C=-I_m/2$. Par pozitīvo virzienu pieņemts virziens, kad strāva plūst no spoles sākuma uz beigām. Kā redzams no 5.7. zīmējuma *a*, strāvas statora tinuma fāzēs rada dipolu magnētisko lauku, kura ass sakrīt ar *A* fāzes asi.

Laika momentā $t_2=T/12$ strāvas $i_A=\sqrt{3}/2 I_m$, $i_B=0$, $i_C=-\sqrt{3}/2 I_m$ un magnētiskā lauka ass ir pagriezusies par 30° jeb par $1/12$ no statora aploces (5.7. zīm. *b*).

Izmainoties strāvu fāzēm vēl par 30° , kas atbilst laika momentam $t_3=2T/12$, kad $i_A=i_B=I_m/2$, $i_C=-I_m$, magnētiskā lauka ass ir pagriezusies par 60° (5.7. zīm. *c*) salīdzinājumā ar izejas stāvokli $t_1=0$.

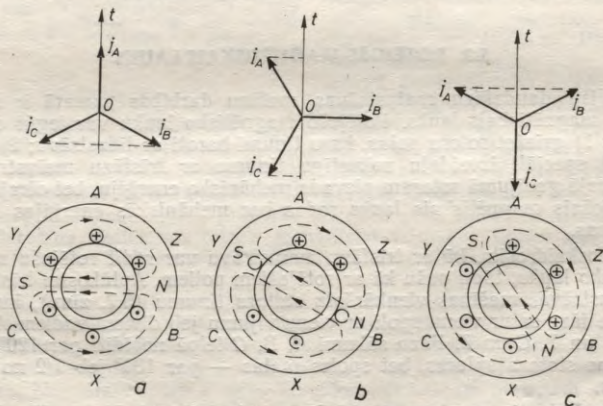
No iztirzātā var secināt, ka maiņstrāvas viena perioda laikā magnētiskais lauks pagriežas par 360° , t. i., izdara vienu pilnu apgriezīenu. Tas nozīmē, ka dipolu ($2p=2$) rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvence (min^{-1})

$$n_1=60f,$$

kur *f* — maiņstrāvas frekvence (Hz).

Magnētiskā lauka griešanās virziens sakrīt ar fāžu secību A—B—C—A... Griešanās virzienu var mainīt, izmainot strāvu pozitīvo maksimumu I_m secību spolēs. To realizē, apmainot vietām divus spoļu sākumiem pievienotos barošanas trīsfāžu tīkla vadus.

Lai ar tādas pašas frekvences maiņstrāvu iegūtu rotējošo magnētisko lauku ar mazāku rotācijas frekvenci, tad 3 spoļu vietā katrā fāzē jāizmanto $3k$ spoles, kur $k=1, 2, 3$ utt. Tas nozīmē, ka katrā



5.7. zīm. Trīsfāžu maiņstrāvas tinuma radītais dipolu magnētiskais lauks dažādos laika (*t*) momentos:

a — $t=0$, *b* — $t=T/12$, *c* — $t=2T/12$.

fāzē jāieslēdz 2, 3 vai vairākas virknē (vai paralēli) savienotas spoles, tās izvietojot pa statora aploci noteiktā likumsakarībā.

Cetrpolu ($2p=4$) rotējošo magnētisko lauku iegūst ar 6 spolēm, katrā fāzē ieslēdzot divas virknē (vai paralēli) savienotas spoles. Spoļu izvietojums rotējoša četrpolu lauka iegūšanai parādīts 5.8. zīmējumā. Attālus starp vienas spoles malām ir $1/4$ no aploces, un starp fāzu spoļu sākumiem ir 60° leņķis jeb $1/6$ no aploces. 5.8. zīmējumā parādīti arī laika momentam $t_1=0$ atbilstošie strāvu virzieni spolēs un četrpolu magnētiskais lauks. Noskaidrojot laika momentam $t_2=T/12$ atbilstošo magnētiskā lauka ānu, līdzīgi kā divpolu mašīnas gadījumā, var konstatēt, ka magnētiskais lauks pagriežies par 15° jeb $1/24$ no aploces. Tas nozīmē, ka maiņstrāvas viena perioda laikā četrpolu magnētiskais lauks pagriežas par $1/2$ no aploces un tā rotācijas frekvence ir divas reizes mazāka nekā divpolu laukam.

Visparīgā gadījumā rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvence (min^{-1})

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \quad (5.1)$$

kur f — maiņstrāvas frekvence (Hz).

Rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvenci, kas atbilst dotajai maiņstrāvas frekvencei, sauc par *sinhrono rotācijas frekvenci*.

Rotējošā magnētiskā lauka sinhronās rotācijas frekvences n_1 , dažādam polu pāru skaitam p , ja pievadītās maiņstrāvas frekvence $f=50$ Hz, ir šādas:

p	1	2	3	4	5	6
n_1	3000	1500	1000	750	600	500
(min^{-1})						

Tātad, ja $f=50$ Hz, maksimālā rotācijas frekvence ir 3000 min^{-1} .

5.3. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU TINUMU EDS

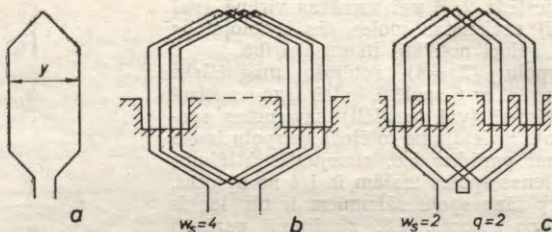
5.3.1. Vispārīgi norādījumi

Lai noteiktu tinuma EDS, noskaidrosim vispirms maiņstrāvas mašīnu tinumu galvenās īpatnības.

Katra tinuma pamatelements ir *vijums* (5.9. zīm. a), kas sastāv no diviem virknē savienotiem aktīvajiem vadiem. Vairāki vijumi



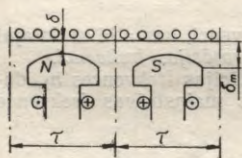
5.8. zīm. Cetrpolu rotējošais magnētiskais lauks.



5.9. zim. Maiņstrāvas mašīnu tinuma pamatelementi:
a – vijums, b – spole, c – spoļu grupa.

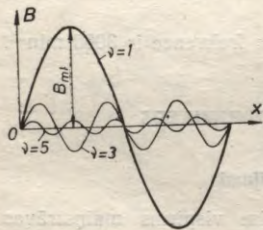
veido *spoli* (5.9. zīm. b), kuras aktīvās malas ievietotas rievās un kuras izolētas no rievas ar kopīgu izolāciju. Lai iegūtu pietiekami lielu fāzes vijumu skaitu, spoles jāizgatavo ar daudziem vijumiem, bet tad palielinās rievu un arī visas mašīnas izmēri. Tāpēc maiņstrāvas mašīnās parasti izveido sadalītu tinumu, t. i., palielina rievu skaitu un spoles katrā fāzē zem viena pola novieto vairākās rievās (5.9. zīm. c). Šīs spoles savieno virknē, tādējādi izveidojot *spoļu grupu* ar q spolēm. Parasti maiņstrāvas mašīnās $q=2 \dots 5$. Spoļu grupas savienojot virknē vai paralēli, izveidojas tinuma *fāze*.

Maiņstrāvas mašīnas tinuma pamatparametri ir rievu skaits Z , polu pāru skaits p , fāžu skaits m , tinuma solis y (attālums starp vienas spoles malām, kas izteikts ar rievu skaitu), *rievu skaits uz polu un fāzi*



$$q = \frac{Z}{2pm} \quad (5.2)$$

Maiņstrāvas mašīnas cenšas izveidot tā, lai tinumā inducētais EDS būtu sinusoidāls. Šim nolūkam nepieciešams radīt sinusoidālu magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā. Šādu sadalījumu var nodrošināt ar atbilstošu magnētiskās sistēmas konstrukciju, piemēram, izvīzīto polu sinhronajās mašīnās izveidojot īpašas formas polu kurpes tā, lai gaisa sprauga pola kurpes malā būtu lielāka nekā tās vidusdaļā (5.10. zīm.). Tomēr arī šajā gadījumā magnētiskās indukcijas likne līdztekus pirmajai jeb pamatharmoniskajai satur nepāra augstākās harmoniskās, kuru amplitūdas samazinās, palielinoties harmoniskās kārtas numuram v .



5.10. zim. Magnētiskās indukcijas sadalījums sinhronās mašīnas gaisa spraugā.

Nosakot maiņstrāvas mašīnu tinumu EDS, ievieš *elektrisko grādu* α_{el} jēdzienu: 360 elektriskie grādi atbilst magnētiskās indukcijas pamatharmoniskās vienam periodam jeb statora aploces lokam, kas viēnāds ar divkāršu pola iedaļu 2τ . Vispārīgā gadījumā viens ģeometriskais grāds α atbilst p elektriskajiem grādiem:

$$\alpha_{el} = p\alpha. \quad (5.3)$$

Noteiksim vispirms EDS, ko maiņstrāvas mašīnas tinumā inducē rotējošā magnētiskā lauka pirmā harmoniskā ($v=1$).

5.3.2. Vienā vadā inducējais EDS

Ja rotējošais magnētiskais lauks pārvietojas attiecībā pret vadu ar ātrumu v , tad vadā inducējas EDS

$$e_v = B l_0 v, \quad (5.4)$$

kur l_0 — mašīnas ekvivalentais garums (sk. 3.5.2.).

Magnētiskā lauka indukcijas pirmā harmoniskā gaisa spraugā gar statora aploci mainās sinusoidāli:

$$B = B_0 \sin \frac{\pi}{\tau} x, \quad (5.5)$$

kur $B_0 = B_{1m}$ — indukcijas pirmās harmoniskās amplitūdas vērtība;
 τ — pola iedaļa;
 x — koordināta, kura mērīta pa statora aploci.

Magnētiskā lauka lineārais ātrums (m/s)

$$v = \frac{\pi D n_1}{60}, \quad (5.6)$$

kur D — statora iekšējais diametrs (m);

n_1 — magnētiskā lauka rotācijas frekvence (min^{-1}).

Ievērojot, ka $\pi D = 2p\tau$, izteiksmes (5.6) vietā iegūstam

$$v = \frac{2\tau p n_1}{60}. \quad (5.7)$$

Bet, tā kā saskaņā ar izteiksmi (5.1) $f = p n_1 / 60$, tad

$$v = 2\tau f. \quad (5.8)$$

Indukcijas izmaiņu laikā jebkurā gaisa spraugas punktā var atrast, ja ievēro, ka vienmērīgā kustībā $x = vt$ jeb saskaņā ar izteiksmi (5.8), $x = 2\tau ft$. Ievietojot šo x vērtību izteiksmē (5.5), iegūstam, ka

$$B = B_0 \sin 2\pi ft = B_0 \sin \omega t. \quad (5.9)$$

Vadā inducētā EDS momentāno vērtību iegūst, ja izteiksmē (5.4) ievieto v un B no sakarībām (5.8) un (5.9):

$$e_v = 2f B_0 l_0 \tau \sin \omega t. \quad (5.10)$$

Tad vienā vadā inducētā EDS amplitūdas vērtība

$$E_{v,m} = 2fB_{\delta}l_{\delta}\tau$$

un efektīvā vērtība

$$E_v = \frac{E_{v,m}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}fB_{\delta}l_{\delta}\tau. \quad (5.11)$$

5.3.3. Vijumā un spolē inducētie EDS

Lai maiņstrāvas mašīnās samazinātu EDS augstākās harmoniskās, spoles parasti izveido ar saīsinātu soli ($y < \tau$), un spoles *relatīvais solis*

$$\beta = \frac{y}{\tau} \quad (5.12)$$

šajā gadījumā ir mazāks par vienu.

Vijuma divu aktīvo vadu EDS \dot{E}'_v un \dot{E}''_v (5.11. zīm.) ir vienādi pēc lieluma, bet nobīdīti fāzē par leņķi $\beta \cdot 180^\circ$. Vijuma EDS ir vienāds ar vadu EDS ģeometrisko starpību: $E_{v1j} = \dot{E}'_v - \dot{E}''_v$, un saskaņā ar 5.11. zīmējumā attēloto vektoru diagrammu

$$E_{v1j} = 2E_v \sin \beta \cdot 90^\circ. \quad (5.13)$$

Lielumu

$$k_v = \sin \beta \cdot 90^\circ \quad (5.14)$$

sauc par *tinuma soļa saīsinājuma koeficientu*, un tas rāda, cik reižu samazinās EDS spolei ar saīsinātu soli salīdzinājumā ar spoli, kurai ir pilns solis. Tinumam ar saīsinātu soli ($y < \tau$) $k_v < 1$, bet tinumam ar pilnu soli ($y = \tau$) $k_v = 1$.

Tā kā visi vijumi ω_s , kas veido spoli, magnētiskajā laukā atrodas vienādos apstākļos, tad spoles EDS

$$E_s = \omega_s E_{v1j}$$

jeb, ievērojot izteiksmes (5.11), (5.13) un (5.14),

$$E_s = 2\sqrt{2}f\omega_s k_v B_{\delta}l_{\delta}\tau. \quad (5.15)$$

Viena pola magnētiskā plūsma

$$\Phi = \int_0^{\tau} B l_{\delta} dx. \quad (5.16)$$

Ievērojot izteiksmi (5.5), pēc integrēšanas iegūstam, ka

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta}l_{\delta}\tau. \quad (5.17)$$

Ja lielumu $B_{\delta} I_{\delta} \tau$ no izteiksmes (5.17) ievieto izteiksmē (5.15), tad iegūstam

$$E_s = \pi \sqrt{2} f \omega_s k_y \Phi = 4,44 f \omega_s k_y \Phi. \quad (5.18)$$

5.3.4. Spoļu grupā un fāzē inducētie EDS

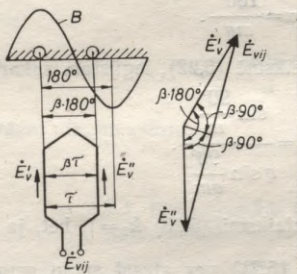
Spoļu grupas atsevišķu spoļu EDS ir nobīdīti fāzē par leņķi

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z}, \quad (5.19)$$

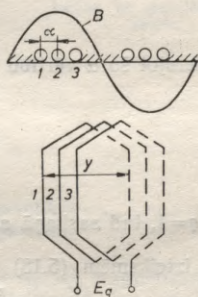
kas atbilst blakus novietoto spoļu nobīdei magnētiskajā laukā (5.12. zīm.). Tāpēc spoļu grupas EDS ir vienāds ar atsevišķu spoļu EDS ģeometrisku summu, kas mazāka par visu q spoļu EDS aritmētisko summu qE_s . Attiecību

$$k_p = \frac{E_q}{qE_s} \quad (5.20)$$

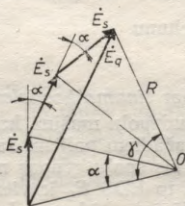
sauc par *tinuma sadalījuma koeficientu*, un tas rāda, cik reizi samazinās EDS sadalītā tinumā salīdzinājumā ar koncentrētu tinumu, kuram tāds pats kopējais vijumu skaits $q\omega_s$.



5.11. zīm. Vijuma EDS noteikšana.



5.12. zīm. Spoļu grupas EDS noteikšana.



Tādējādi saskaņā ar izteiksmi (5.20) spoļu grupas EDS

$$E_q = qE_s k_p. \quad (5.21)$$

Noteiksim tinuma sadalījuma koeficientu, izmantojot 5.12. zīmējumā attēloto vektoru diagrammu. Izmantosim palīglielumu — rādiusu R , ar kuru vilkta aploce caur spoļu EDS vektoru galapunktiem. Tad no vektoru diagrammas var atrast, ka

$$E_q = 2R \sin \frac{q\alpha}{2}, \quad E_s = 2R \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Ievietojot lielumus E_q un E_s izteiksmē (5.21), iegūstam, ka

$$k_p = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (5.22)$$

Var pierādīt, ka tinuma sadalījuma koeficients k_p ir atkarīgs no diviem tinuma pamatparametriem m un q . Tā kā saskaņā ar izteiksmi (5.2)

$$Z = 2pmq, \quad (5.23)$$

tad no izteiksmes (5.19) izriet, ka

$$\alpha = \frac{180^\circ}{mq}. \quad (5.24)$$

Ievietojot šo α vērtību izteiksmē (5.22), iegūstam sakarību

$$k_p = \frac{\sin \frac{90^\circ}{m}}{q \sin \frac{90^\circ}{qm}}. \quad (5.25)$$

Ja $q=1$, tad saskaņā ar izteiksmi (5.25) $k_p=1$, bet, ja $q>1$, tad $k_p < 1$.

No izteiksmēm (5.18) un (5.21) var atrast spoļu grupas EDS:

$$E_q = 4,44fq\omega_s k_w \Phi, \quad (5.26)$$

kur lielumu

$$k_w = k_y k_p \quad (5.27)$$

sauc par *tinuma koeficientu*.

Daudzpolu mašīnā katrā fāzē satur $2p$ spoļu grupas, kas atrodas zem dažādiem poliēm. Ja visās spoļu grupās ir vienāds spoļu skaits q , tad šīs spoļu grupas magnētiskajā laukā atrodas vienādos apstākļos un to EDS E_q ir vienādi pēc lieluma un sakrīt fāzē (vai ir pretējās fāzēs). Šādas spoļu grupas var savienot virknē tā, lai atsevišķo

spoļu grupu EDS summētos aritmētiski (sk. 5.4.3.). Iespējams arī spoles saslēgt paralēli vai jauktā slēgumā tā, lai atsevišķu paralēlo zaru EDS būtu vienādi pēc lieluma un sakristu fāzē. Tā, piemēram, ja $2p=4$ un visas spoļu grupas 1, 2, 3, 4 ir vienādas, tad iespējami trīs dažādi spoļu grupu slēgumi (5.13. zīm.): ar vienu, diviem un četriem paralēliem zariem. Fāzes EDS šajos gadījumos atbilstoši ir $4E_q$, $2E_q$ un E_q , t. i., atkarīgs no paralēlo zaru skaita a .

No teiktā var secināt, ka maiņstrāvas mašīnu tinuma fāzes EDS

$$E = \frac{2p}{a} E_q \quad (5.28)$$

Ievietojot šajā izteiksmē E_q no izteiksmes (5.26), iegūstam sakarību

$$E = 4,44f \frac{2pq}{a} \omega_s k_w \Phi$$

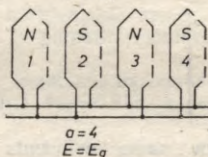
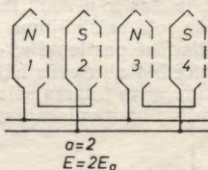
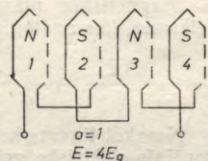
jeb

$$E = 4,44f \omega k_w \Phi, \quad (5.29)$$

kur lielumu

$$\omega = \frac{2pq\omega_s}{a} \quad (5.30)$$

sauc par fāzes vijumu skaitu.



5.13. zīm. Fāzes EDS atkarība no paralēlo zaru skaita.

5.3.5. EDS augstākās harmoniskās un to samazināšanas paņēmieni

EDS E_v , ko maiņstrāvas mašīnas tinumā inducē magnētiskā lauka augstākās harmoniskās, var noteikt no izteiksmes, kas analogiska sakarībai (5.29):

$$E_v = 4,44f_v \omega k_{w,v} \Phi_v \quad (5.31)$$

Magnētiskā lauka v -tās harmoniskās pola iedaļa τ_v ir v reizes mazāka par pamatharmoniskās pola iedaļu τ , un tāpēc augstākajām harmoniskajām ir v polu pāri (sk. 5.10. zīm.). Ja visas magnētiskā lauka harmoniskās telpā griežas ar vienādu ātrumu, kā tas ir, piemēram, sinhronajās mašīnās, tad EDS v -tās harmoniskās frekvence

$$f_v = v f \quad (5.32)$$

Magnētiskās plūsmas augstākās harmoniskās aprēķina no izteiksmes, kas analogiska izteiksmei (5.17):

$$\Phi_v = \frac{2}{\pi} B_{\delta, v} l_{\delta} \tau_v = \frac{2}{\pi v} B_{\delta, v} l_{\delta} \tau. \quad (5.33)$$

Nosakot tinuma koeficientu $k_{w, v}$, jāievēro, ka augstāko harmonisko kopējais elektrisko grādu skaits ir v reizju lielāks: ja pamatharmoniskajai tas ir $p \cdot 360^\circ$, tad augstākajām harmoniskajām — $vp \cdot 360^\circ$. Tāpēc soļa saīsinājuma dēļ spoles abās malās inducētais EDS ir nobīdīts fāzē par leņķi $v\beta \cdot 180^\circ$. Magnētiskās plūsmas v -tā harmoniskā inducē blakus rievās EDS, kuru fāzu nobīdes leņķis ir $v\alpha = v \cdot 180^\circ / (mq)$. Līdz ar to tinuma soļa saīsinājuma un sadalījuma koeficienti augstākajām harmoniskajām nosakāmi šādi:

$$k_{y, v} = \sin v\beta \cdot 90^\circ; \quad (5.34)$$

$$k_{p, v} = \frac{\sin \frac{v \cdot 90^\circ}{m}}{q \sin \frac{v \cdot 90^\circ}{mq}} \quad (5.35)$$

un tinuma koeficients

$$k_{w, v} = k_{y, v} k_{p, v}. \quad (5.36)$$

Tinuma fāzē inducē EDS efektīvā vērtība

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + \dots + E_v^2}. \quad (5.37)$$

Trīsfāzu tinuma EDS trešās harmoniskās un harmoniskās, kuru kārtas numurs dalās ar 3 (3, 9, 15...), visās tinuma fāzēs A, B, C jebkurā laika momentā ir vērstas vienā virzienā. Tāpēc, savienojot trīsfāzu tinumu zvaigznē, līnijas spriegums šīs harmoniskās nesatur. Savienojot trīsfāzu tinumu trīsstūrī, visu harmonisko, kuru kārtas numurs dalās ar 3, EDS summējas aritmētiski. Šo harmonisko summārais EDS rada strāvas trešo harmonisko, kas noslēdzas pa trīsstūra kontūru un izraisa papildzudumus tinumā. Tāpēc sinhronajiem generatoriem trīsstūra slēgumu parasti nelieto.

Augstākās harmoniskās nelabvēlīgi ietekmē tīkla un patērētāju darbību. Tāpēc maiņstrāvas mašīnas cenšas izveidot tā, lai inducētā EDS augstākās harmoniskās būtu minimālas.

Viens no paņēmieniem augstāko harmonisko samazināšanai ir magnētiskā lauka liknes formas uzlabošana, ko, piemēram, sinhronajās mašīnās var panākt, izveidojot speciālas formas polu kurpes (sk. 5.3.1., 7.3.1.). Tomēr šāds pasākums ne vienmēr dod apmierinošu rezultātu.

Efektīvs EDS augstāko harmonisko samazināšanas paņēmiens ir tinuma soļa saīsināšana, ar ko var panākt jebkuras EDS augstākās

harmoniskās likvidēšanu. Tā, piemēram, ja izvēlas $\beta = y/\tau = 4/5 = 0,8$, tad saskaņā ar formulu (5.34) 5. harmoniskajai

$$k_{y5} = \sin 5 \cdot \frac{4}{5} \cdot 90^\circ = \sin 360^\circ = 0$$

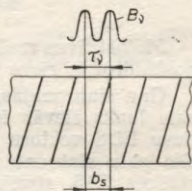
un tāpēc $E_5 = 0$.

Ja vēlams likvidēt 7. harmonisko, tad jāizvēlas $\beta = 6/7 = 0,857$.

Likvidēt vienlaikus visas augstākās harmoniskās ar tinuma soļa saīsināšanu nav iespējams. Tāpēc cenšas maksimāli samazināt lielākās no tām, kādas parasti ir 5. un 7. harmoniskā. Izvēloties $\beta = 0,8 \dots 0,86$, 5. un 7. harmoniskās kļūst pietiekami mazas. Tā, piemēram, ja $\beta = 0,83$, tad $k_{y5} = 0,233$, $k_{y7} = 0,294$, t. i., šīs harmoniskās samazinās 3...4 reizes. Tajā pašā laikā $k_{y1} = 0,965$, t. i., pamatharmoniskā samazinās nedaudz.

Arī izvēloties $q > 1$, var ievērojami samazināt augstākās harmoniskās. Tā, piemēram, ja $q = 3$, tad trīsfāzu mašīnā $k_{p5} = 0,217$, $k_{p7} = 0,177$, bet $k_{p1} = 0,96$.

Augstākās harmoniskās samazinās arī tad, ja izveido slīpas rievās (5.14. zīm.). Lai likvidētu ν -to harmonisko, jāizvēlas $b_s = 2\tau_\nu = 2\tau/\nu$, jo tad $E_\nu = 0$.



5.14. zīm. EDS augstāko harmonisko samazināšana mašīnā ar slīpām rievām.

5.4. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU TINUMI

5.4.1. Maiņstrāvas mašīnu tinumu pamattipi

Atkarībā no spoļu novietojuma rievās izšķir *vienslāņa* un *divslāņu tinumus*. Visbiežāk lieto divslāņu tinumu, kuram, tāpat kā līdzstrāvas mašīnu enkura tinumam, spoles viena mala atrodas rievās augšdaļā, bet otra — apakšdaļā. Divslāņu tinumā arī frontālie savienojumi novietoti divos slāņos. Šādi izveidojot savienojumus, var samazināt to izmērus un izgatavot tinumu no vienāda izmēra un vienādas formas spolēm. Bez tam divslāņu tinumā iespējams saīsināt soli par jebkuru rievu iedaļu skaitu.

Atkarībā no tā, kādā kārtībā tinuma spoles izvietotas rievās un savienotas savā starpā, izšķir cilpas un viļņa tinumu. Visbiežāk lieto cilpas tinumu.

Tinumu var izveidot ar jebkuru fāzu skaitu. Visbiežāk lieto trīsfāzu tinumu, retāk vienfāzes un divfāzu tinumu, bet atsevišķos gadījumos arī sešfāzu tinumu.

Atkarībā no rievu skaita uz polu un fāzi (q) izšķir *vesela skaitļa* (q — vesels skaitlis) un *daļskaitļa* (q — daļskaitlis) tinumus.

5.4.2. Rievu EDS vektoru zvaigzne

Maiņstrāvas mašīnu tīnumu shēmu izveidošanas principu vislabāk noskaidrot ar rievu EDS vektoru zvaigzni.

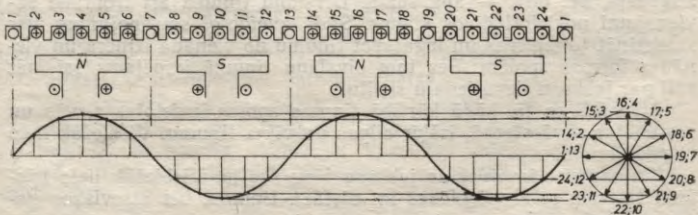
Gan sinhronajās, gan asinhronajās mašīnās rotējošais magnētiskais lauks rievās ievietotajos vados inducē EDS. Lai noskaidrotu rievu EDS vektoru zvaigznes konstruēšanas gaitu, aplūkosim izvirzīto polu sinhrono mašīnu ($2p=4$ un $Z=24$), kura izvērstā veidā attēlota 5.15. zīmējumā. Pieņemsim, ka katrā rievā ievietots viens vads un polu magnētiskā lauka sadalījums gaisa spraugā ir sinusoidāls.

Statora rievas attiecībā pret magnētisko lauku atrodas dažādos apstākļos, un tāpēc atsevišķu vadu EDS saskaņā ar izteiksmi (5.19) ir nobīdīti fāzē par leņķi

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360^\circ}{24} = 30^\circ.$$

Numurējot pēc kārtas statora rievas un piešķirot tādus pašus numurus vektoriem, kas atbilst šo rievu vados inducētajiem EDS, iegūst rievu EDS vektoru zvaigzni. Ja poli attiecībā pret nekustīgo statoru pārvietojas pa labi, tad EDS vektoru zvaigzne rotē pretī pulksteņa rādītāju kustības virzienam un vektoru projekcijas uz vertikālu laika asi attēlo rievu EDS momentānās vērtības. Rievu EDS vektoru zvaigzne satur Z vektorus, bet daži no šiem vektoriem var sakrist fāzē. Vispārīgā gadījumā staru skaits EDS vektoru zvaigznē ir Z/M , kur M — lielumu Z un p lielākais kopīgais dalītājs (aplūkojamā piemērā $M=2$).

Var atzīmēt, ka rievu EDS vektoru zvaigzni vienlaikus var uzskatīt arī par spoļu EDS vektoru zvaigzni, jo EDS spoļēs, kuru malas novietotas blakus rievās, ir nobīdīti fāzē par tādu pašu leņķi α kā EDS blakus rievu vados.



5.15. zīm. Maiņstrāvas mašīnas rievu EDS vektoru zvaigznes konstruēšana.

5.4.3. Trīsfāzu divslāņu cilpas tinums

Vesela skaitļa tinums. Noskaidrosim tinuma izveidošanas principu, aplūkojot konkrētu piemēru. Pieņemsim, ka $2p=4$ un $Z=24$. Tad

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

un pola iedaļa, kas izteikta ar rievu skaitu,

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Izvēloties saīsinātu soli $y=5$, relatīvais solis

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0,833.$$

Fāzu nobīdes leņķis starp EDS blakus rievās

$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{24} = 30^\circ.$$

Staru skaits 5.16. zīmējumā attēlotajā rievu EDS vektoru zvaigznē ($M=2$)

$$\frac{Z}{M} = \frac{24}{2} = 12,$$

bet staru skaits katrā fāzē

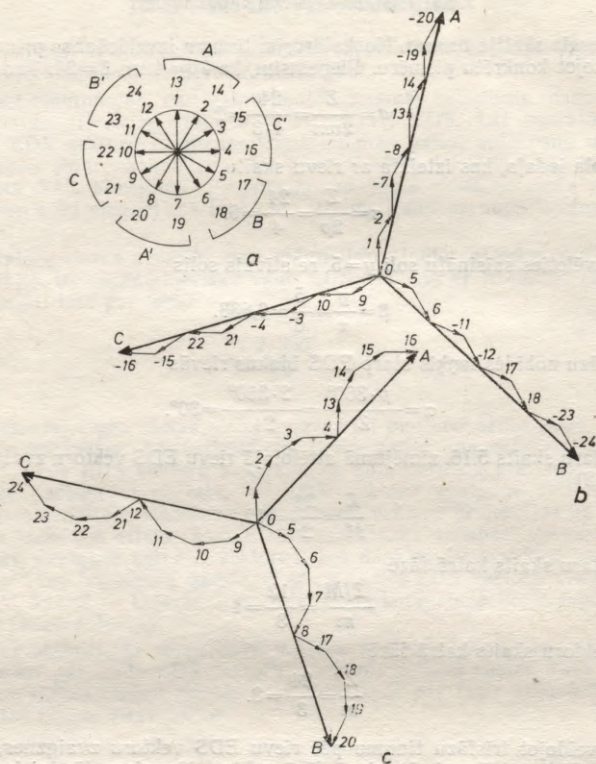
$$\frac{Z/M}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

un vektoru skaits katrā fāzē

$$\frac{Z}{m} = \frac{24}{3} = 8.$$

Izveidojot trīsfāzu tinumu pēc rievu EDS vektoru zvaigznes, jāievēro šādi noteikumi: 1) vienā fāzē vektori jāapvieno tā, lai iegūtu vislielāko fāzes EDS; 2) visu fāzu rezultējošiem EDS jābūt savstarpēji nobīdītiem par 120° . Pirmais noteikums ir vēlams, bet otrais — obligāts, jo, to ievērojot, iegūst simetrisku trīsfāzu tinumu.

Lai ievērotu pirmo noteikumu, katrā fāzē ir jāapvieno 8 vektori, kuru fāzu nobīde ir iespējami mazāka. To var panākt, ja, piemēram, apvieno vektorus 1, 2, 13, 14, kas atbilst fāzu zonai A (5.16. zīm. a), un vektorus 7, 8, 19, 20, kas atbilst fāzu zonai A', pie tam zonas A' vektorus ņem ar pretēju zīmi. Līdzīgi apvieno vektorus fāzu zonās B un B', C un C'. Tad iegūst fāzu EDS vektoru zvaigzni, kas attēlota 5.16. zīmējumā b. Veidojot tinuma shēmu atbilstoši rievu un fāzu EDS vektoru zvaigznei, piemēram, fāzei A, spoles, kuru sākumi atrodas fāzu zonas A rievās, jāsavieno virknē un tām pretslēgumā jāpievieno virknē savienotās fāzu zonas A' spoles. Var atzīmēt, ka jebkurš



5.16. zim. Rievu un fāzu EDS vektoru zvaigznes tinumam ar $2p=4$,
 $Z=24$, $m=3$:

a — rievu EDS vektoru zvaigzne, *b* — fāzu EDS vektoru zvaigzne ar divām fāzu zonām, *c* — fāzu EDS vektoru zvaigzne ar vienu fāzu zonu.

cits spoļu sadalījums pa vienas fāzes zonām dod mazāku rezultējošo fāzes EDS, par ko var pārliecināties no 5.16. zīmējumā *c* attēlotās fāzu EDS vektoru zvaigznes, kur katra fāze sastāv no vienas zonas ar 8 spolēm, bet zonas platumums ir divas reizes lielāks, t. i., fāzē *A* apvienoti vektori 1, 2, 3, 4, 13, 14, 15, 16, fāzē *B* — vektori 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20, fāzē *C* — vektori 9, 10, 11, 12, 21, 22, 23, 24.

Tinuma izvērstā shēma attēlota 5.17. zīmējumā. Seit visas spoļu grupas savienotas virknē un tāpēc paralēlo zaru skaits $a=1$. Aplūko-

tajā piemērā maksimālais paralēlo zaru skaits, kādu var izveidot tinumā, $a_{max}=4$. Vispārīgā gadījumā vesela skaitļa tinumam $a_{max}=2p$.

Daļskaitļa tinums. Pieņemsim $2p=4$ un $Z=15$. Tinuma galvenos parametrus noteiksim tāpat kā iepriekšējā piemērā vesela skaitļa tinumam:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{15}{4 \cdot 3} = 1 \frac{1}{4};$$

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{15}{4} = 3 \frac{3}{4} = 3,75.$$

Izvēloties saīsinātu soli $y=3$,

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{3}{3,75} = 0,8.$$

EDS fāzu nobīde blakus rievās

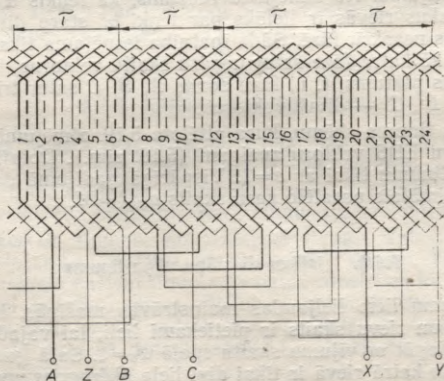
$$\alpha = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{15} = 48^\circ.$$

Staru skaits rievu EDS vektoru zvaigznē ($M=1$)

$$\frac{Z}{M} = \frac{15}{1} = 15,$$

staru skaits fāzē

$$\frac{Z/M}{m} = \frac{15}{3} = 5$$

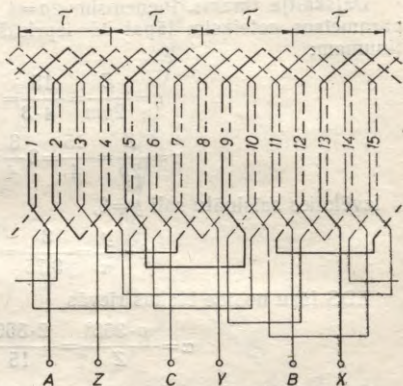


5.17. zīm. Trīs fāzu divslāņu cilpas tinuma izvērstā shēma ($2p=4$, $Z=24$, $m=3$, $q=2$, $y=5$, $\beta=5/6$).



5.18. zim. Rievu EDS vektoru zvaigzne tinumam ar $2p=4$, $Z=15$, $m=3$.

5.19. zim. Trīsfāzu divslāņu cilpas tinuma izvērstā shēma ($2p=4$, $Z=15$, $q=1\frac{1}{4}$, $y=3$, $\beta=0.8$).



un vektoru skaits fāzē

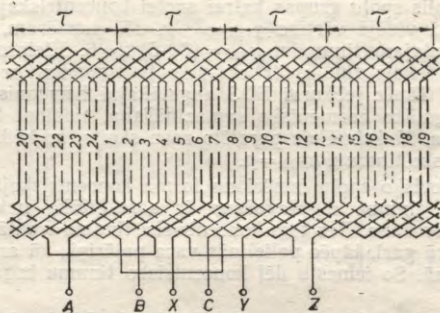
$$\frac{Z}{m} = \frac{15}{3} = 5.$$

Rievu EDS vektoru zvaigzne, kas atbilst dotajam piemēram, attēlota 5.18. zīmējumā. No zīmējuma redzams, ka leņķis α starp EDS vektoriem blakus rievās ir lielāks par leņķi α' starp diviem blakus vektoriem, kas nesakrīt fāzē. Šāda īpatnība iespējama tikai daļskaitļa tinumam. Tā kā katra fāze satur nepāru skaitu vektorus, tad fāžu zonām ir dažāds platums, t. i., fāžu zonas A , B , C satur trīs vektorus, bet zonas A' , B' , C' — divus vektorus.

Daļskaitļa tinuma shēmu, kura attēlota 5.19. zīmējumā, veido saskaņā ar rievu EDS vektoru zvaigzni (5.18. zīm.). Dotajā gadījumā var izveidot tinumu tikai ar $a=1$. Vispārīgā gadījumā daļskaitļa tinumam maksimālais paralēlo zaru skaits $a_{max}=M$.

5.4.4. Trīsfāzu divslāņu vijņa tinums

Vijņa tinumu lieto lieljaudas maiņstrāvas mašīnās, kur magnētiskā plūsma un rievu skaits ir pietiekami lieli, lai vajadzīgo spriegumu varētu iegūt ar vijumu skaitu spolē $\omega_s=1$. Šajā gadījumā divslāņu tinumam katrā rievā ir tikai divi liela šķersgriezuma stieņi, no kuriem vijumi izveidoti, salodējot stieņus frontālo savienojumu daļā. Šādu tinumu lieto arī asinhrono dzinēju fāžu rotoriem, un to sauc arī par *stieņu tinumu*.



5.20. zīm. Trīsfāzu divslāņu viļņa tinuma izvērstā shēma ($2p=4$, $Z=24$, $q=2$, $y=5$, $\beta=5/6$).

Stieņu tinumam ir vienkārši starpspoļu savienojumi, labs rievu aizpildījums, tam nav nepieciešama frontālo savienojumu izolācija, un tāpēc šādam tinumam ir samērā mazs vara un izolācijas materiālu patēriņš, kā arī tas ir vienkārši izgatavojams.

Viļņa tinumu statorā izveido ar saīsinātu soli ($y < \tau$), bet asinhrono dzinēju fāzu rotorā — parasti ar pilnu soli ($y = \tau$). Parasti viļņa tinumam rievu skaits uz polu un fāzi (q) ir vesels skaitlis.

5.20. zīmējumā attēlota trīsfāzu viļņa tinuma shēma ar tādiem pašiem parametriem kā cilpas tinumam (sk. 5.17. zīm.). Rievu sadalīšanai pa fāžu zonām var izmantot 5.16. zīmējumā attēlotās rievu un fāžu EDS vektoru zvaigznes.

5.4.5. Trīsfāzu vienslāņa tinumi

Vienslāņa tinumā katras spoles viena mala aizņem veselu rievu. Tāpēc spoļu grupu skaits katrā fāzē ir vienāds ar polu pāru skaitu p (divslāņu tinumā ar $2p$) un kopējais spoļu grupu skaits tinumā ir pm . Izšķir vienslāņa koncentriskos tinumus un šablontinumus.

Koncentriskais tinums. Koncentriskā tinuma katrā spoļu grupā spoles novietotas koncentriski, un to izmēri ir dažādi. Tinuma shēma mašīnai ar tādiem pašiem tinuma pamatparametriem kā divslāņu cilpas tinumam (sk. 5.17. zīm.) attēlota 5.21. zīmējumā *a*. Arī rievās un spoles pa fāžu zonām sadala tāpat kā divslāņu tinumam, un tāpēc aplūkotajā piemērā izmantojama 5.16. zīmējumā *a* attēlotā rievu EDS vektoru zvaigzne.

Spoļu frontālie savienojumi koncentriskajam tinumam radiālā virzienā jānovieto divās plaknēs, kā tas parādīts 5.21. zīmējumā *b*, un tāpēc šādu tinumu sauc arī par divplakņu tinumu.

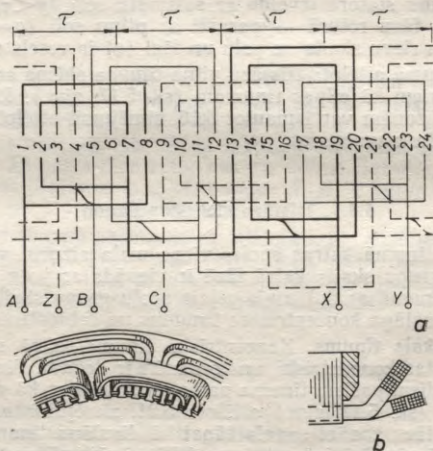
Tinuma solis spoļu grupas katrai spolei koncentriskajā tinumā ir dažāds, bet tā vidējā vērtība $y_{vid} = Z/2p$. Tā, piemēram, 5.21. zīmējumā a attēlotajam tinumam $y_{vid} = (7+5)/2 = 6$. Elektromagnētiskā ziņā koncentriskais tinums ir ekvivalents tinumam ar pilnu soli ($y = \tau$, $\beta = 1$). Tāpēc jebkurai EDS augstākajai harmoniskajai $k_{y,v} = \pm 1$ un augstāko harmonisko samazināšana, saīsinot tinuma soli, nav iespējama. Maksimālais paralēlo zaru skaits, ar kādu var izveidot koncentrisko tinumu, $a_{max} = p$.

Tā kā atsevišķo spoļu izmēri un forma koncentriskajā tinumā ir dažādi, šāda tinuma izgatavošana ir sarežģītāka nekā divslāņu tinuma izgatavošana. Bez tam koncentriskā tinuma frontālie savienojumi ir samērā gari, tāpēc palielinās vara patēriņš, kā arī elektriskie zudumi tinumā. So imeslu dēļ koncentrisko tinumu tagad lieto ļoti reti.

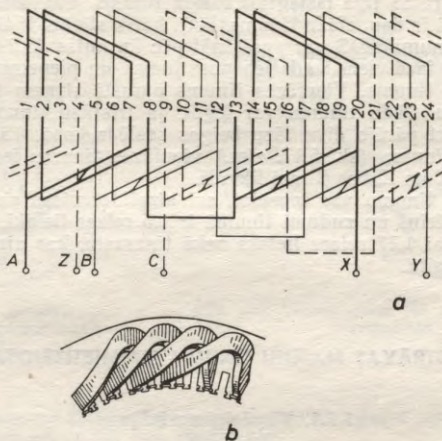
Sablontinums. Sablontinuma spolēm ir vienādi izmēri un forma. Lai atvieglotu spoļu ievietošanu rievās, tām ir trapecveida forma.

5.22. zīmējumā parādīta šablontinuma shēma un frontālo savienojumu forma. Tinumu parasti izveido ar pilnu soli ($y = \tau$), un tā maksimālais paralēlo zaru skaits $a_{max} = p$.

Sablontinumu plaši lieto mazjaudas asinhronajos dzinējos, ja tinuma spoles izgatavo no apaļiem vadiem ar mazu diametru (līdz



5.21. *zim.* Trisfāzu vienslāņa koncentriskā tinuma izvērsta shēma, ja $2p=4$, $Z=24$, $q=2$, $y_{vid}=6$ (a), un frontālo savienojumu konstruktīvais izveidojums (b).



5.22. zīm. Trīs fāzu šablontinuma izvērsta shēma, ja $2p=4$, $Z=24$, $q=2$, $y=6$ (a), un frontālo savienojumu konstruktīvais izveidojums (b).

2,5 mm). Šādas spoles ir viegli deformējamas, un tāpēc, tinumu ievietojot rievās, ir viegli izveidot nepieciešamo frontālo savienojumu formu. Pēdējā laikā arvien vairāk šablontinumu tīšana tiek automatizēta.

5.4.6. Tinumi ar fāzu skaitu $m \neq 3$

Divfāzu un sešfāzu tinumi. Divfāzu un sešfāzu tinumus izveido pēc tāda paša principa kā trīs fāzu tinumus.

Divfāzu tinuma fāzēs EDS ir savstarpēji nobīdīti par 90° . Salīdzinājumā ar trīs fāzu tinumu divfāzu tinumam ir četras fāzu zonas ar kopējo rievu skaitu $Z=2pmq=4pq$. Raksturīga divfāzu tinuma īpatnība ir tā, ka inducētais EDS satur trešo harmonisko, kuras amplitūda var būt samērā liela, it sevišķi, ja q ir neliels, kā tas ir mazjaudas mašīnās. EDS trešo harmonisko var likvidēt, izvēloties tinuma soli $y=2\tau/3$. Tad par apmēram 13% samazinās EDS pirmā harmoniskā, bet 5. un 7. harmoniskā nesamazinās. Divfāzu tinumu lieto tikai mazjaudas asinhronajos dzinējos un maiņstrāvas elektriskajās mikromašīnās.

Sešfāzu tinumā EDS atsevišķās fāzēs ir nobīdīti par 60° , tinumam ir 12 fāzu zonas ar kopējo rievu skaitu $Z=12pq$. Šādu tinumu lieto speciālas nozīmes maiņstrāvas mašīnās, piemēram, sinhronajos generatoros, kuri paredzēti taisngriežu iekārtu barošanai.

«Vāveres rata» tipa išslēgtais rotora tinums. «Vāveres rata» tipa tinums būtībā ir daudzfāzu tinums, kurā katrs stienis ir tinuma viena fāze. Šāda tinuma EDS var aprēķināt pēc formulas (5.29), ievietojot tajā $\omega = 1/2$ (fāzē viens vads jeb pusvijums) un pieņemot, ka $k_w = 1$.

Vienfāzes tinums. Vienfāzes tinums parasti aizņem tikai 2/3 no visām rievām. Šādu tinumu var iegūt, ja trīsfāzu tinumam likvidē vienu fāzi, bet pārējo divu fāžu beigas saslēdz kopā. Tā, piemēram, no trīsfāzu tinuma (sk. 5.17. zīm.) vienfāzes tinumu iegūst, ja savieno galus X un Z, bet B fāzi likvidē.

Vienfāzes tinumu var izveidot, arī aizpildot visas rievās. Tomēr tad vara patēriņš un zudumi tinumā ir 1,5 reizes lielāki, bet inducētais EDS tikai 1,17 reizes lielāks nekā tinumam, kas aizņem 2/3 no visa rievu skaita.

5.5. MAINSTRĀVAS MAŠĪNU TINUMU MAGNETIZĒJOŠAIS SPEKS

5.5.1. Vispārīgi norādījumi

Magnētiskais lauks, ko rada maiņstrāvas mašīnas tinuma strāvas, ir atkarīgs no tinuma izveidojuma un pamatparametriem, kā arī no magnētiskās ķēdes konfigurācijas un atsevišķu šīs ķēdes posmu magnētiskajām īpašībām. Tinuma radītā magnētiskā lauka aprēķina pamatuzdevums ir noteikt indukcijas sadalījumu gaisa spraugā, jo no šī sadalījuma ir atkarīgs inducētais EDS un mašīnas elektromagnētiskais moments.

Daudzos gadījumos ērtāk un vieglāk vispirms noskaidrot tinuma magnetizējošā spēka (MS) lielumu un sadalījumu un tad spriest par indukciju gaisa spraugā, kas atkarīga no gaisa spraugas platuma un mašīnas magnētiskās sistēmas piesātinājuma.

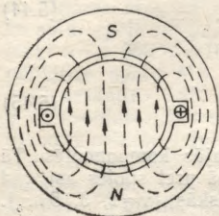
5.5.2. Vienas spoles MS

Aplūkosim vispirms vienkāršāko gadījumu, kad mašīnas ar vienmērīgu gaisa spraugu ($\delta = \text{const}$) rievās novietota spole ar pilnu soli ($y = \tau$) (5.23. zīm.). Spoles vados plūstot strāvai, izveidojas simetrisks divpolu magnētiskais lauks. Pilnās strāvas likums jebkurai magnētiskajai spēka līnijai:

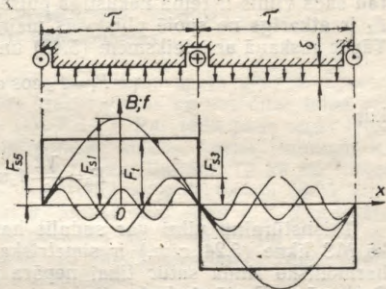
$$\oint H dl = i_s \omega_s, \quad (5.38)$$

kur i_s — strāva spolē;
 ω_s — spoles vijumu skaits.

Tā kā statora un rotora serdes tērauda magnētiskā caurlaidība μ ir daudzkārt lielāka par gaisa spraugas magnētisko caurlaidību μ_0 , var pieņemt, ka $\mu = \infty$. Tad pilnajai strāvai kā magnētiskā lauka



5.23. zīm. Simetriskas spoles magnētiskais lauks.



5.24. zīm. Vienas spoles MS un tā augstākās harmoniskās.

cēlonim jāpārvar tikai magnētiskā pretestība gaisa spraugā, un tā pēc vienādojumu (5.38) var vienkāršot:

$$2H\delta = i_s \omega_s, \quad (5.39)$$

kur H — magnētiskā lauka intensitāte gaisa spraugā.

No vienādojuma (5.39) iegūstam magnētisko indukciju gaisa spraugā:

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{i_s \omega_s}{2} \quad (5.40)$$

jeb

$$B = \frac{\mu_0}{\delta} f_s, \quad (5.41)$$

kur lielums

$$f_s = \frac{i_s \omega_s}{2} \quad (5.42)$$

ir spoles magnetizējošais spēks.

Jebkura spēka līnija ir saķēdēta ar vienu un to pašu pilno strāvu $i_s \omega_s$, tāpēc vienas spoles radīto indukcijas sadalījumu gaisa spraugā var attēlot ar taisnstūrīgu vilni (5.24. zīm.). Bet, tā kā saskaņā ar izteiksmi (5.41) $B \sim f_s$, tad indukcijas sadalījums citā mērogā attēlo spoles MS sadalījumu gaisa spraugā.

Ja spolē plūst sinusoidāla maiņstrāva

$$i_s = \sqrt{2} I_s \cos \omega t, \quad (5.43)$$

tad šāds vilnis ir telpā nekustīgs pulsējošs stāvvilnis, kura augstums F_t ir atkarīgs no spolē plūstošās maiņstrāvas momentānās vērtības. Tāpēc saskaņā ar izteiksmēm (5.42) un (5.43)

$$F_t = F_s \cos \omega t, \quad (5.44)$$

kur

$$F_s = \frac{\sqrt{2}}{2} I_s \omega_s. \quad (5.45)$$

Taisnstūrīgu vilni var sadalīt harmoniskajās komponentēs. Tā kā MS likne (5.24, zīm.) ir simetriska attiecībā pret spoles asi, tad harmonisko rinda satur tikai nepāra harmoniskās ($\nu=1, 3, 5, \dots$). Saskaņā ar Furjē rindu teoriju

$$f_{s1} = \frac{4}{\pi} F_t \cos \frac{\pi}{\tau} x; \quad (5.46)$$

.....

$$f_{s,\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} F_t \cos \frac{\nu\pi}{\tau} x \quad (5.47)$$

jeb, ievērojot izteiksmi (5.44),

$$f_{s1} = \frac{4}{\pi} F_s \cos \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x; \quad (5.48)$$

.....

$$f_{s,\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} F_s \cos \omega t \cos \frac{\nu\pi}{\tau} x. \quad (5.49)$$

No iztīrātā var secināt, ka spoles MS sastāv no bezgalīgas rindas augstāko harmonisko

$$f_s = \sum_{\nu=1,3,5,\dots} f_{s,\nu} = \sum_{\nu=1,3,5,\dots} F_{s,\nu} \cos \omega t \cos \frac{\nu\pi}{\tau} x, \quad (5.50)$$

kurās mainās sinusoidāli telpā $\left(\cos \frac{\nu\pi}{\tau} x \right)$ un laikā $(\cos \omega t)$ un kuru amplitūdas saskaņā ar izteiksmēm (5.45) un (5.49)

$$F_{s,\nu} = \frac{1}{\nu} \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} I_s \omega_s = 0,9 \frac{I_s \omega_s}{\nu}. \quad (5.51)$$

Tātad MS katra augstākā harmoniskā ir telpā nekustīgs sinusoidāls stāvvilnis, kura amplitūda sinusoidāli pulsē laikā, mainoties no $+F_{s,\nu}$ līdz $-F_{s,\nu}$.

5.5.3. Fāzes MS. Pulsējoša MS sadalīšana rotējošās komponentēs

Tinuma fāzi, kā zināms, veido atsevišķas spoļu grupas. Spoles, ko satur spoļu grupa, novietotas blakus rievās un nobīdītas telpā par leņķi $\alpha = p \cdot 360^\circ / Z = 180^\circ / (mq)$ (sk. 5.3.4.). Par tādu pašu leņķi telpā nobīdītas spoļu MS pirmo harmonisko līknes, kuras tinumam ar $q=3$ parādītas 5.25. zīmējumā *a* ar tievām līnijām. Tā kā šīs līknes ir sinusoidālas, tad spoļu MS var attēlot ar q vektoriem (5.25. zīm. *b*), kuri nobīdīti telpā par leņķi α . Sinusoidālo līkņu 1, 2, 3 ordinātu summa, kas 5.25. zīmējumā *a* parādīta ar resnu līniju, arī ir sinusoida, kas attēlo spoļu grupas MS sadalījumu telpā. Tāpēc spoļu grupas MS pirmās harmoniskās amplitūda

$$F_{q1} = qF_{s1}k_{p1}, \quad (5.52)$$

kur k_{p1} — tinuma sadalījuma koeficients pirmajai harmoniskajai ($v=1$).

Spoļu grupas atsevišķo spoļu MS augstākās harmoniskās telpā nobīdītas par leņķi $v\alpha$, un tāpēc to amplitūdas

$$F_{q,v} = qF_{s,v}k_{p,v}. \quad (5.53)$$

Ievērojot izteiksmi (5.51),

$$F_{q1} = 0,9I_s\omega_s q k_{p1}; \quad (5.54)$$

.....

$$F_{q,v} = 0,9 \frac{I_s\omega_s}{v} q k_{p,v}. \quad (5.55)$$

Daudzpolu mašīnā ($p > 1$) katra fāze satur $2p$ spoļu grupas, un tāpēc divslāņu tinuma fāzes vijumu skaits

$$\omega = \frac{2pq\omega_s}{a},$$

no kurienes

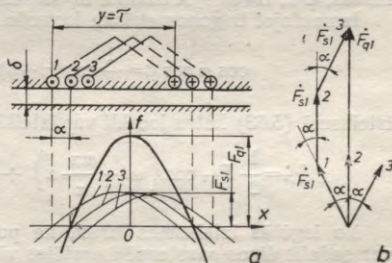
$$\omega_s = \frac{\omega a}{2pq}. \quad (5.56)$$

Spoles strāva

$$I_s = \frac{I}{a}, \quad (5.57)$$

kur a — tinuma paralēlo zaru skaits;
 I — fāzes strāva.

Ievietojot ω_s un I_s vērtības izteiksmēs (5.54) un (5.55) un ievērojot, ka



5.25. zīm. Spoļu grupas MS sadalījums telpā (a) un vektoru diagramma (b).

divslāņu tinuma magnetizējošo spēku rada rievās ievietotās divu spoļu malas, iegūstam fāzes MS pirmās un augstāko harmonisko amplitūdas:

$$F_{f1} = 0,9 \frac{\omega k_{p1}}{\rho} I; \quad (5.58)$$

$$F_{f,v} = 0,9 \frac{\omega k_{p,v}}{\nu \rho} I. \quad (5.59)$$

Ja tinums izveidots ar saīsinātu soli, tad fāzes MS harmonisko amplitūdas samazinās un, tās nosakot, jāievēro tinuma soļa saīsinājuma koeficients k_v :

$$F_{f1} = 0,9 \frac{\omega k_{p1} k_{v1}}{\rho} I = 0,9 \frac{\omega k_{w1}}{\rho} I; \quad (5.60)$$

$$F_{f,v} = 0,9 \frac{\omega k_{p,v} k_{v,v}}{\nu \rho} I = 0,9 \frac{\omega k_{w,v}}{\nu \rho} I, \quad (5.61)$$

kur

$$k_{w1} = k_{p1} k_{v1}; \quad k_{w,v} = k_{p,v} k_{v,v}. \quad (5.62)$$

Tāpat fāzes MS, tāpat kā vienas spoles MS (sk. izteiksmi (5.50)), sastāv no bezgalīgas rindas augstāko harmonisko:

$$f_f = \sum_{v=1,3,5,\dots} f_{f,v} = \sum_{v=1,3,5,\dots} F_{f,v} \cos \omega t \cos \frac{\nu \pi}{\tau} x, \quad (5.63)$$

kuras mainās sinusoidāli telpā un laikā.

Tā kā tinuma koeficientu $k_{w,v}$ izteiksmēs (5.61) un (5.62) aprēķina tāpat, kā nosakot EDS, tad MS augstākās harmoniskās var samazināt ar tādiem pašiem paņēmieniem kā EDS augstākās harmoniskās, t. i., izveidojot tinumu ar saīsinātu soli un $q > 1$.

Izmantojot trigonometrisko formulu

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta),$$

izteiksmē (5.63) katru locekli var izteikt šādi:

$$\check{f}_{f,v} = \frac{1}{2} F_{f,v} \cos \left(\omega t - \frac{\nu \pi}{\tau} x \right) + \frac{1}{2} F_{f,v} \cos \left(\omega t + \frac{\nu \pi}{\tau} x \right). \quad (5.64)$$

No iegūtās izteiksmes izriet, ka pulsējošu sinusoidālu stāvvilni var sadalīt divos savstarpēji pretējos virzienos rotējošos sinusoidālos viļņos, kuru amplitūdas ir vienādas ar pusi no pulsējošā viļņa amplitūdas. Izteiksmē (5.64) pirmais loceklis ir tiešais vilnis $\check{f}_{f,v}$, kas pār-

vietojas koordinātas x pozitīvajā virzienā, bet otrais loceklis — pretējais vilnis $f''_{f,v}$, kas pārvietojas x negatīvajā virzienā.

Noteiksim tiešā un pretējā MS viļņa ātrumu. Iedomāsimies, ka novērojam uz viļņa kādu punktu, kurā MS vērtība ir nemainīga. Tad šim punktam, ja tas atrodas uz tiešā viļņa,

$$\cos\left(\omega t - \frac{v\pi}{\tau} x\right) = \text{const}$$

jeb

$$\omega t - \frac{v\pi}{\tau} x = C,$$

kur C — nemainīgs lielums.

No pēdējās izteiksmes

$$x = \frac{\tau}{v\pi}(\omega t - C).$$

Diferencējot šo vienādojumu pēc t un ievērojot, ka $\omega = 2\pi f$, iegūstam tiešā viļņa ātrumu jebkurai harmoniskajai:

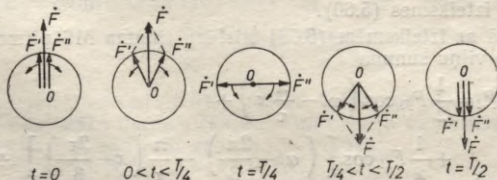
$$v'_v = \frac{v\omega}{v\pi} = \frac{2\tau f}{v}. \quad (5.65)$$

Līdzīgi var atrast, ka pretējā viļņa ātrums

$$v''_v = -\frac{2\tau f}{v}. \quad (5.66)$$

Tātad rotējoša MS jebkuras harmoniskās ātrums ir apgriezti proporcionāls šīs harmoniskās kārtas numuram v .

Telpā nekustīga pulsējoša viļņa sadalīšanu divos rotējošos var ilustrēt ar vektoru diagrammām, kuras MS pirmajām harmoniskajām dažādos laika momentos parādītas 5.26. zīmējumā. Sajās diagrammās MS tiešais un pretējais vilnis attēlots ar diviem nemainīga lieluma telpas vektoriem \vec{F}' un \vec{F}'' , kuri rotē pretējos virzienos ar leņķisko ātrumu $\Omega = 2\pi f/p$.



5.26. zīm. Pulsējoša MS sadalīšana divos rotējošos MS.

No zīmējuma redzams, ka divi rotējoši MS vektori dod telpā nekustīgu divas reizes lielāku vektoru un — otrādi — pulsējoša MS vektoru var sadalīt divos vektoros, kas rotē pretējos virzienos un kuru lielumi ir vienādi ar pusi no pulsējošā vektora lieluma.

5.5.4. Trīsfāzu tinuma MS

Trīsfāzu tinuma MS iegūst, summējot atsevišķu fāzu MS un ievērojot to savstarpējo nobīdi laikā un telpā.

Simetriska slodze. Aplūkosim vispirms trīsfāzu tinuma MS pirmo harmonisko, ko rada simetriska trīsfāzu strāva

$$\begin{aligned}i_A &= \sqrt{2}I \cos \omega t, \\i_B &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - 2\pi/3), \\i_C &= \sqrt{2}I \cos(\omega t - 4\pi/3).\end{aligned}\tag{5.67}$$

Pieņemsim, ka koordinātu sākuma punkts $x=0$ sakrīt ar A fāzes asi. Tad katras fāzes MS pirmo harmonisko attiecībā pret šīs fāzes asi var noteikt no izteiksmes (5.64), ievietojot tajā $v=1$ un aizstājot ωt izteiksmē B un C fāzei atbilstoši ar $\omega t - 2\pi/3$ un $\omega t - 4\pi/3$. Bez tam, lai ievērotu fāzu asu nobīdi telpā, B un C fāzei izteiksmē (5.64) x vietā atbilstoši jāievieto $x - 2\tau/3$ un $x - 4\tau/3$. Tad atsevišķu fāzu MS pirmās harmoniskās

$$\begin{aligned}\dot{i}_{A1} &= \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right), \\ \dot{i}_{B1} &= \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right] + \\ &+ \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right], \\ \dot{i}_{C1} &= \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right] + \\ &+ \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right],\end{aligned}\tag{5.68}$$

kur F_{f1} — fāzes MS pirmās harmoniskās amplitūda, kas noteikta pēc izteiksmes (5.60).

Saskaņā ar izteiksmēm (5.68) trīsfāzu tinuma MS pirmo harmonisko tiešo viļņu summa

$$\begin{aligned}\dot{i}'_1 &= \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \\ &+ \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right] + \\ &+ \frac{1}{2} F_{f1} \cos\left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right].\end{aligned}\tag{5.69}$$

Izpildot darbības kvadrātiekvāš, var pārliecināties, ka visi locekļi izteiksmē (5.69) ir vienādi un tāpēc

$$f'_1 = \frac{3}{2} F_{f1} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right). \quad (5.70)$$

Saskaņā ar izteiksmēm (5.68) trīsfāzu tinuma MS pirmo harmonisko pretējo viļņu summa

$$\begin{aligned} f''_1 = & \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) + \\ & + \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left[\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{2\tau}{3} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + \frac{\pi}{\tau} \left(x - \frac{4\tau}{3} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5.71)$$

Pārveidojot izteiksmes, kas atrodas kvadrātiekvāš, iegūstam sakarību

$$\begin{aligned} f''_1 = & \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) + \\ & + \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{4\pi}{3} \right) + \\ & + \frac{1}{2} F_{f1} \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (5.72)$$

Šis sakarības trīs locekļi ir sinusoidas jeb vektori, kuri savstarpēji nobīdīti par $2\pi/3$, un šādu vektoru summa jebkurā laika momentā ir vienāda ar nulli, tāpēc

$$f''_1 = 0. \quad (5.73)$$

Tādējādi trīsfāzu tinuma MS pirmās harmoniskās veido tikai tiešo vilni $f_1 = f'_1$, kas rada mašīnā rotējošu magnētisko lauku. Ievērojot izteiksmes (5.60) un (5.70), šī MS amplitūda

$$F_1 = \frac{3}{2} F_{f1} = 1,35 \frac{\omega k \omega_1}{p} I. \quad (5.74)$$

Vispārīgā gadījumā m fāzu tinumam

$$F_1 = \frac{m}{2} F_{f1} = 0,45 \frac{m \omega k \omega_1}{p} I. \quad (5.75)$$

Izmantojot izteiksmi (5.64), līdzīgā veidā var atrast trīsfāzu tinuma MS augstāko harmonisko tiešo un pretējo viļņu summu. Visas augstākās harmoniskās var sadalīt trīs grupās:

- 1) $v = 3k$ ($k = 1, 3, 5 \dots$; $v = 3, 9, 15 \dots$);
- 2) $v = 6k + 1$ ($k = 1, 2, 3 \dots$; $v = 7, 13, 19 \dots$);
- 3) $v = 6k - 1$ ($k = 1, 2, 3 \dots$; $v = 5, 11, 17 \dots$).

Var pierādīt, ka pirmās grupas harmonisko, t. i., harmonisko, kuru kārtas numurs dalās ar 3, tiešo un pretējo viļņu summa ir vienāda ar nulli, un tāpēc šādas harmoniskās trīsfāzu tinumā nepastāv.

Otrās grupas harmoniskās veido tikai MS tiešos viļņus, kuri pārvietojas tādā pašā virzienā kā pirmās harmoniskās MS vilnis ar ātrumu $v_v = v_1/v$.

Trešās grupas harmoniskās rada tikai pretējos viļņus, kas telpā pārvietojas ar ātrumu $v_v = -v_1/v$.

Saskaņā ar izteiksmēm (5.61) un (5.64) trīsfāzu tinuma MS augstāko harmonisko amplitūdas

$$F_v = \frac{3}{2} F_{1,v} = 1,35 \frac{\omega k_{w,v}}{v\rho} I, \quad (5.76)$$

bet vispārīgā gadījumā m fāzu tinumam

$$F_v = \frac{m}{2} F_{1,v} = 0,45 \frac{m\omega k_{w,v}}{v\rho} I. \quad (5.77)$$

Tādējādi simetriskas slodzes gadījumā trīsfāzu tinuma MS

$$i = \sum_{v=6k \pm 1} F_v \cos \left(\omega t \mp \frac{v\pi}{\tau} x \right), \quad (5.78)$$

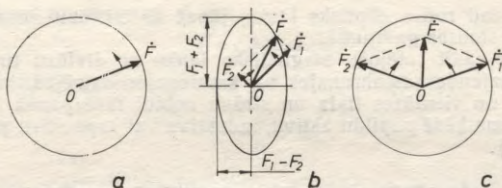
kur augšējā zīme attiecas uz MS tiešajām harmoniskajām, bet apakšējā — uz pretējām harmoniskajām.

Nesimetriska slodze. Trīsfāzu tinuma MS nesimetriskas slodzes gadījumā analizē, izmantojot simetrisko komponentu metodi, saskaņā ar kuru nesimetrisku fāzu strāvu sistēmu aizstāj ar trīs simetriskām sistēmām: tiešās, pretējās secības un nullsecības sistēmu.

Asinhronajās mašīnās tinumi slēgti zvaigznē ar izolētu nullpunktu vai trīsstūrī. Sinhronajos ģeneratoros tinums parasti slēgts zvaigznē, pie tam mazjaudas mašīnās nullpunkts ir izolēts, bet lieljaudas mašīnās tas iezemēts caur lielu pretestību, lai varētu izveidot drošu aizsardzību pret zemesslēgumiem. Tāpēc maiņstrāvas mašīnās nesimetriskas slodzes gadījumā nullsecības strāvas vispār nepastāv vai arī tās ir ļoti mazas un galvenokārt jāievēro tikai tiešās un pretējās secības strāvas.

Maiņstrāvas mašīnai darbojoties ar simetrisku slodzi, tās tinumā pastāv tikai tiešās secības strāvas I_1 . Tas nozīmē, ka iepriekš iztirzātās sakarības simetriskai slodzei vienlaikus ir spēkā tiešās secības strāvām, mašīnai darbojoties ar nesimetrisku slodzi.

Pretējās secības strāvas savstarpēji nobīdītas fāzē par 120° . Šīs strāvas, kuru fāzu secība ir pretēja, rada MS, kas rotē ar tādu pašu ātrumu kā tiešās secības strāvu MS, tikai pretējā virzienā. Nesimetriskas slodzes gadījumā mašīnā vienlaikus pastāv tiešās (F_1) un pretējās (F_2) secības MS, kuru pirmo harmonisko vektoru telpā rotē ar ātrumu Ω_1 savstarpēji pretējos virzienos (5.27. zīm. *b*) un rezultējošā MS F vektora galapunkts apraksta elipsi. Tāpēc šāda MS ražīto magnētisko lauku sauc par *eliptisku lauku*. Tas nozīmē, ka trīs-



5.27. zim. Riņķveida (a), eliptisks (b) un pulsējošs (c) MS.

fāzu tinums ar nesimetrisku slodzi arī rada rotējošu MS, tikai šī MS amplitūda periodiski mainās no vērtības $F_1 + F_2$ līdz vērtībai $F_1 - F_2$.

Ja pastāv tikai tiešās secības MS radītais magnētiskais lauks, kā tas ir simetriskas slodzes gadījumā, tad MS var attēlot ar rotējošu vektoru, kura amplitūda ir nemainīga (5.27. zīm. a), un šāda MS radīto lauku sauc par *riņķveida rotējošu magnētisko lauku*.

Nesimetriskas slodzes robežgadījumā, kad $F_1 = F_2$ (5.27. zīm. c), rodas *pulsējošs magnētiskais lauks*. Šādu lauku rada trīsfāzu tinuma viena fāze vai vienfāzes tinums (sk. 5.5.3.).

5.5.5. Rotējoša MS sadalīšana divos pulsējošos MS un divfāzu tinuma MS

Trīsfāzu tinuma rotējoša MS izteiksme pirmajai harmoniskajai saskaņā ar izteiksmi (5.78) ir šāda:

$$f_1 = F_1 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right). \quad (5.79)$$

Izmantojot trigonometrisku sakarību $\cos(\alpha - \beta) = \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta$, šīs izteiksmes vietā var iegūt izteiksmi

$$f_1 = F_1 \sin \omega \sin \frac{\pi}{\tau} x + F_1 \cos \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

vai

$$f_1 = F_1 \sin \omega t \sin \frac{\pi}{\tau} x + F_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.80)$$

Katrs no izteiksmes (5.80) locekļiem ir telpā sinusoidāli sadalīts un laikā sinusoidāli pulsējošs MS vilnis. So MS asis telpā nobīdītas par 90° elektriskajiem grādiem (jeb par $\tau/2$), un tie pulsē laikā ar 90° fāzu nobīdi.

No teiktā var secināt, ka riņķveida rotējošu magnētisko lauku var iegūt ar divfāzu tinumu, kuram fāzu asis telpā nobīdītas par $\tau/2$ un kuros plūst vienāda lieluma strāvas, kas nobīdītas fāzē par ceturtdaļperiodu.

Ja strāvas divfāzu tinuma fāzēs ir dažādas ($I_A \neq I_B$) vai arī ja fāzu nobīde starp tām nav vienāda ar 90° (nesimetriska divfāzu

sistēma), tad rodas eliptisks lauks, tāpat kā trīsfāzu tinuma nesimetriskas slodzes gadījumā.

Iespēju radīt rotējošu magnētisko lauku ar divfāzu tinumu izmanto mazjaudas asinhronajos un sinhronajos dzinējos, kuru tinumus baro no vienfāzes tīkla un strāvu nobīdi fāzē panāk, ieslēdzot viena tinuma ķēdē papildu aktīvu, induktīvu vai kapacitīvu pretestību (sk. 6.8.2.).

5.6. MAIŅSTRĀVAS MAŠĪNU INDUKTĪVĀS PRETESTĪBAS

Maiņstrāvas mašīnas tinuma MS rada periodiski mainīgu magnētisko lauku. Šāda lauka aina, ko rada statora tinums, shematiski attēlota 5.28. zīmējumā.

Magnētiskā lauka spēka līniju lielākā daļa veido galveno magnētisko plūsmu Φ , kura, šķērsojot gaisa spraugu, noslēdzas pa statora un rotora magnētiskajām serdēm un ir saķēdēta vienlaikus ar statora un rotora tinumiem. Neliela magnētiskās plūsmas daļa — izkliedes plūsma — noslēdzas tikai ap statora tinuma vadiem rievās ($\Phi_{\sigma,r}$) un frontālo savienojumu zonā ($\Phi_{\sigma,fr}$). Bez tam statora tinuma MS augstākās harmoniskās rada magnētiskās plūsmas, kuras noslēdzas galvenokārt gaisa spraugā un ir vāji saķēdētas ar rotora tinumu. Tāpēc augstāko harmonisko rezultējošo plūsmu arī pieskaita izkliedes plūsmai, un to sauc par *diferenciālo izkliedi*. Šāds nosaukums norāda uz to, ka diferenciālās izkliedes plūsma ir vienāda ar starpību starp visu tinuma radīto plūsmu un šīs plūsmas pirmo harmonisko.

Tādējādi magnētisko lauku maiņstrāvas mašīnā nosacīti var sadalīt *galvenajā magnētiskajā plūsmā un izkliedes plūsmā*. Izkliedes plūsmu savukārt var sadalīt trīs daļās: *rievu izkliedes plūsmā, frontālo savienojumu izkliedes plūsmā un diferenciālās izkliedes plūsmā*.

Galvenā magnētiskā plūsma, kas atkarīga no magnētiskā lauka indukcijas pirmās harmoniskās, statora tinumā inducē pašindukcijas EDS, kura skaitlisko vērtību var raksturot ar induktīvo pretestību X_m :

$$E = X_m I, \quad (5.81)$$

no kurienes

$$X_m = \frac{E}{I}. \quad (5.82)$$



5.28. zīm. Maiņstrāvas mašīnas statora tinuma magnētiskais lauks.

Saskaņā ar izteiksmi (5.29)

$$E = 4,44f\omega k_w \Phi. \quad (5.83)$$

Galvenā magnētiskā plūsma (sk. izteiksmi (5.17))

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_1 l_\delta \tau, \quad (5.84)$$

kur B_1 — magnētiskās indukcijas pirmās harmoniskās amplitūda. Saskaņā ar izteiksmēm (5.41) un (5.74) trīsfāzu tinumam

$$B_1 = \frac{\mu_0}{\delta} F_1 = 1,35 \frac{\mu_0}{\delta} \frac{\omega k_w}{p} I. \quad (5.85)$$

Izteiksme (5.85) ir pareiza mašīnai ar nepiesātinātu magnētisko sistēmu un vienmērīgu gaisa spraugu. Nosakot magnētiskās indukcijas pirmo harmonisko B_1 piesātinātai mašīnai ar nevienmērīgu gaisa spraugu (rotora un statora virsmā ir rievas), jāievēro piesātinājuma koeficients k_μ un gaisa spraugas koeficients k_δ (sk. 3.5.2.). Tad izteiksmes (5.85) vietā iegūstam izteiksmi

$$B_1 = 1,35 \frac{\mu_0}{k_\mu k_\delta \delta} \frac{\omega k_w}{p} I. \quad (5.86)$$

Ievērojot izteiksmes (5.82), ..., (5.84) un (5.86), var atrast, ka

$$X_m = 3,8f \frac{\mu_0 \tau l_\delta}{k_\mu k_\delta \delta} \frac{\omega^2 k_w^2}{p}. \quad (5.87)$$

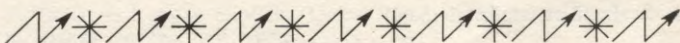
Pretestību X_m sauc par maiņstrāvas mašīnas *galveno induktīvo pretestību*, un pēc savas fizikālās būtības tā ir analogiska transformatora ekvivalentās shēmas magnetizēšanas zara pretestībai (sk. 4.4.5.).

EDS, ko statora tinumā inducē izkliedes plūsma, līdzīgā veidā var raksturot ar *izkliedes induktīvo pretestību* X_σ . Izkliedes induktīvo pretestību var aprēķināt pēc šādas formulas:

$$X_\sigma = 4\pi\mu_0 f \frac{\omega^2}{pq} l_\delta (\Lambda_r + \Lambda_{tr} + \Lambda_d), \quad (5.88)$$

kur Λ_r , Λ_{tr} , Λ_d — rievu izkliedes, frontālo savienojumu izkliedes un diferenciālās izkliedes magnētiskās vadītspējas koeficienti. Šos koeficientus parasti aprēķina pēc empīriskām formulām, pie tam Λ_r un Λ_{tr} ir atkarīgi no rievu un frontālo savienojumu ģeometriskajiem izmēriem, bet Λ_d — no tinuma relatīvā soļa $\beta = y/\tau$, rievu skaita uz polu un fāzi (q) un gaisa spraugas platuma δ .

Līdzīgi nosaka galveno un izkliedes induktīvo pretestību rotora tinumam.



6. ASINHRONĀS MAŠĪNAS

6.1. ASINHRONĀS MAŠĪNAS DARBĪBAS PRINCĪPS UN DARBA REŽĪMI

Pieslēdzot asinchronās mašīnas statora tinumu trīsfāzu tīklam, šajā tinumā plūstošās strāvas i_1 MS rada rotējošu magnētisko lauku — plūsmu Φ_1 , kas telpā griežas ar sinhrono rotācijas frekvenci

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (6.1)$$

Rotējošā magnētiskā lauka Φ_1 spēka līnijas šķēļ rotora tinumu un inducē tajā EDS e_2 , kas rotora noslēgtajā tinumā uztur strāvu i_2 . Pirmajā tuvinājumā var pieņemt, ka i_2 un e_2 sakrīt fāzē.

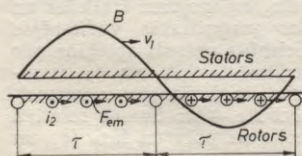
Inducētā EDS e_2 un tātad arī strāvas i_2 virzienu nosaka pēc labās rokas likuma (6.1. zīm.), ievērojot, ka rotora relatīvais griešanās virziens ir pretējs magnētiskā lauka griešanās virzienam. Rotora strāvas i_2 MS rada rotorā rotējošu magnētisko lauku — plūsmu Φ_2 . Tādējādi mašīnā izveidojas rezultējošais rotējošais lauks — plūsma Φ , kuru nosaka strāvu i_1 un i_2 kopīga darbība. Rezultējošā magnētiskā lauka un rotora strāvas mijiedarbības rezultātā rodas elektromagnētiskie spēki F_{em} , kuru virzienu nosaka pēc kreisās rokas likuma. Uz rotoru darbojas elektromagnētiskais griezes moments, kurš to griež magnētiskā lauka rotācijas virzienā ar rotācijas frekvenci n . Šajā gadījumā asinchronā mašīna darbojas *dzinēja režīmā*. Ar sinhrono rotācijas frekvenci n_1 rotors patstāvīgi nevar griezties, jo tad rotorā neinducējas EDS un strāvas, tātad nav arī griezes momenta.

Asinchronās mašīnas rotora relatīvā rotācijas frekvence attiecībā pret rotējošo magnētisko lauku jeb *slides rotācijas frekvence*

$$n_s = n_1 - n. \quad (6.2)$$

Šīs rotācijas frekvences attiecību pret sinhrono rotācijas frekvenci sauc par rotora *slīdi* s :

$$s = \frac{n_1 - n}{n}. \quad (6.3)$$



6.1. zīm. Asinchronās mašīnas darbības princips dzinēja režīmā.

Slīde ir viens no svarīgākajiem asinhronās mašīnas darbību raksturojošiem lielumiem, un to parasti izsaka procentos:

$$s (\%) = 100s.$$

No izteiksmes (6.3) rotora rotācijas frekvence

$$n = n_1(1-s). \quad (6.4)$$

Rotorā inducētā EDS frekvence ir proporcionāla relatīvajai rotācijas frekvencei n_s :

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p(n_1-n)}{60}.$$

Ievietojot šajā izteiksmē n un n_1 vērtības no sakarībām (6.1) un (6.4), pēc pārveidojumiem iegūstam

$$f_2 = \frac{spn_1}{60} = f_1s. \quad (6.5)$$

Tātad rotorā inducētā EDS un strāvas frekvence ir proporcionāla slīdei.

Asinhronajiem dzinējiem nominālā darba režīmā slīde ir neliela ($s=0,02 \dots 0,06$), tāpēc arī rotora strāvas frekvence ir maza. Tā, piemēram, ja $f_1=50$ Hz, tad $f_2=1 \dots 3$ Hz.

Rotora strāvas i_2 radītā rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret rotoru

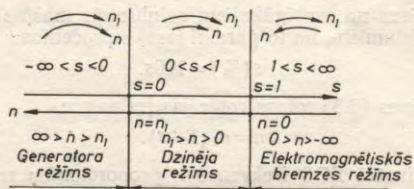
$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1s}{p} = n_1s. \quad (6.6)$$

Attiecībā pret nekustīgo statoru rotora magnētiskais lauks rotē ar rotācijas frekvenci $n+n_2$. Ievērojot izteiksmes (6.4) un (6.6),

$$n+n_2 = n_1(1-s) + n_1s = n_1. \quad (6.7)$$

Tādējādi rotora magnētiskā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret statoru jebkurā gadījumā ir vienāda ar statora lauka rotācijas frekvenci, t. i., statora un rotora magnētiskie lauki griežas sinhroni ar rotācijas frekvenci n_1 un veido asinhronās mašīnas rezultējošo rotējošo magnētisko lauku.

Ja asinhronās mašīnas rotoru ar ārēju mehānisku spēku griež rotējošā magnētiskā lauka virzienā ar rotācijas frekvenci, kas lielāka par sinhrono rotācijas frekvenci ($n > n_1$), tad rotors apsteidz magnētisko lauku. Šajā gadījumā rotora relatīvais ātrums maina virzienu, un salīdzinājumā ar 6.1. zīmējumā attēloto gadījumu tas ir pretējs. 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 preti ārējam mehāniskajam momentam. Asinhronā mašīna šajā gadījumā darbojas *ģeneratora režīmā*, un tās statora tinums atdod tīklā aktīvo jaudu.



6.2. zim. Asinhronās mašīnas darba režīmi.

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.

Seit minētos trīs asinhronās mašīnas darba režīmus viennozīmīgi var raksturot ar slīdes skaitlisko vērtību un zīmi, kā tas parādīts 6.2. zīmējumā. Šajā zīmējumā uz s un n skalas parādīti raksturīgie punkti: 1) $s=0$ ($n=n_1$) — rotors griežas ar sinhrono rotācijas frekvenci; 2) $s=1$ ($n=0$) — rotors nekustīgs (šis punkts atbilst dzinēja palaišanas sākumam).

6.2. ELEKTROMAGNĒTISKIE PAMATPROCESI ASINHRONAJĀS MAŠĪNĀS UN TO ANALĪZE

6.2.1. Asinhronās mašīnas darba režīma reducēšana uz transformatora darba režīmu

Asinhronajā mašīnā norisošie elektromagnētiskie procesi ir līdzīgi elektromagnētiskajiem procesiem transformatoros, jo starp rotoru un statoru, tāpat kā transformatorā starp primāro un sekundāro tinumu, pastāv tikai magnētiska saite.

Tā kā rotora strāvas frekvence ir atkarīga no slīdes (sk. izteiksmi (6.5)), tad, slīdej mainoties, mainās arī visi no frekvences atkarīgie rotora elektriskie lielumi — EDS, induktīvā pretestība, strāva. Šis apstāklis apgrūtina asinhronās mašīnas fizikālo procesu kvantitatīvu analīzi, piemēram, statora un rotora elektriskos lielumus nav iespējams attēlot kopīgā vektoru diagrammā. Tāpēc ir lietderīgi

rotējošu rotoru aizstāt ar enerģētiskā ziņā ekvivalentu nekustīgu rotoru, t. i., reducēt asinhronās mašīnas darba režīmu uz transformatora darba režīmu.

EDS, ko rezultējošā magnētiskā plūsma inducē rotējoša rotora vienā fāzē,

$$E_{2s} = 4,44f_2\omega_2k_{w2}\Phi, \quad (6.8)$$

kur Φ — galvenā magnētiskā plūsma;
 ω_2 — rotora fāzes vijumu skaits;
 k_{w2} — rotora tinuma koeficients.

Tā kā $f_2 = sf_1$, tad

$$E_{2s} = 4,44f_1\omega_2k_{w2}\Phi s$$

jeb

$$E_{2s} = sE_2, \quad (6.9)$$

kur E_2 — nekustīga rotora tinumā inducētais EDS.

Rotējoša rotora fāzes izkļiedes induktīvā pretestība

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 s$$

jeb

$$X_{2s} = sX_2, \quad (6.10)$$

kur L_2 — rotora izkļiedes induktivitāte;
 X_2 — nekustīga rotora induktīvā pretestība.

Rotējoša rotora pilnā pretestība

$$Z_{2s} = R_2 + jsX_2 \quad (6.11)$$

un rotora strāva, ievērojot izteiksmes (6.9) un (6.11),

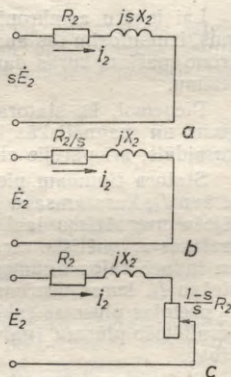
$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_2}. \quad (6.12)$$

Izteiksmei (6.12) atbilst rotora ekvivalentā shēma, kura attēlota 6.3. zīmējumā a.

Izdalot izteiksmē (6.12) saucēju un skaitītāju ar s , iegūstam

$$I_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}. \quad (6.13)$$

No pēdējās izteiksmes redzams, ka rotējoša rotora strāvu var noteikt ar ekvivalenta nekustīga rotora elektriskiem



6.3. zīm. Asinhronās mašīnas rotora ekvivalentās shēmas:

a — ja rotora EDS ir sE_2 un pretestība — $R_2 + jsX_2$, b — ja rotora EDS ir E_2 un pretestība $R_2/s + jX_2$, c — ja rotora EDS ir E_2 un pretestība $R_2 + \frac{1-s}{s}R_2 + jX_2$.

lielumiem, ja rotora patiesās aktīvās pretestības R_2 vietā ņem aktīvo pretestību R_2/s . Šajā gadījumā iegūstam 6.3. zīmējumā *b* attēloto rotora ekvivalento shēmu.

Ekvivalenta nekustīga rotora ķēdes aktīvo pretestību R_2/s var uzskatīt par rotora aktīvās pretestības R_2 un kaut kādas no slīdes atkarīgas pretestības summu:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2. \quad (6.14)$$

Šādai pretestībai atbilst ekvivalentā shēma, kas attēlota 6.3. zīmējumā *c*.

No teiktā var secināt, ka asinhronās mašīnas darbību var aplūkot tāpat kā ekvivalenta transformatora darbību, kurā primārais tinums ir statora tinums, bet sekundārais — rotora tinums un sekundārā tinuma ķēdē ieslēgta ekvivalenta pretestība $R_2 \frac{1-s}{s}$. Šajā pretestībā izdalītā elektriskā jauda ir vienāda ar asinhronās mašīnas attīstīto mehānisko jaudu (sk. 6.2.6.)

6.2.2. Spriegumu un strāvu vienādojumi

Lai iegūtu asinhronās mašīnas spriegumu un strāvu vienādojumus, izmantosim tās analogiju ar transformatoru un aplūkosim asinhrono mašīnu, kuras darba režīms reducēts uz transformatora darba režīmu.

Pieņemot, ka statora tinumam pievienots sinusoidāls maiņspriegums un magnētiskās indukcijas sadalījums gaisa spraugā ir sinusoidāls, arī pārējie elektriskie lielumi mainās sinusoidāli.

Statora tinumam pievienotais spriegums U_1 šajā tinumā izraisa strāvu I_1 , kura ar savu MS F_1 rada mašīnā magnētisko plūsmu (rotējošu magnētisko lauku). Lielākā šīs plūsmas daļa noslēdzas pa mašīnas magnētisko serdi, ir saķēdēta ar statora un rotora tinumiem un inducē šajos tinumos EDS E_1 un E_2 . EDS E_2 uztur rotora ķēdē strāvu I_2 , kuras virziens rotora tinumos ir tāds, ka šīs strāvas MS F_2 pretojas plūsmas saķēdējuma ar rotora tinumu izmaiņai. Tādējādi rezultējošo plūsmu (galveno plūsmu) rada MS F_1 un F_2 kopīga darbība.

Statora un rotora tinumu MS F_1 un F_2 bez galvenās magnētiskās plūsmas rada ar katru statora un rotora fāzi saķēdētas nelielas izkliedes plūsmas $\Phi_{\sigma 1}$ un $\Phi_{\sigma 2}$. Šīs izkliedes plūsmas inducē statora un rotora tinumos pašindukcijas EDS $E_{\sigma 1}$ un $E_{\sigma 2}$.

EDS, ko statora un nekustīga rotora tinumos inducē galvenā plūsma,

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 k_{w1} \Phi, \quad (6.15)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 \omega_2 k_{w2} \Phi. \quad (6.16)$$

$$k_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1 k_{w1}}{\omega_2 k_{w2}} \quad (6.17)$$

sauc par *asinchronās mašīnas sprieguma transformācijas koeficientu*. Eksperimentāli šo koeficientu var noteikt tikai mašīnai ar fāzu rotoru, izmērot statora un rotora fāzu spriegumus, ja statora tinumam pievienots simetrisks spriegums, bet rotora tinūms nav noslēgts.

Izkliedes plūsmu inducētos EDS nosaka līdzīgi kā transformatoram:

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jX_1 I_1; \quad (6.18)$$

$$\dot{E}_{\sigma 2} = -jX_2 I_2, \quad (6.19)$$

kur X_1 un X_2 — statora un nekustīga rotora fāzes izkliedes induktīvās pretestības (sk. 5.6.).

Asinchronās mašīnas sprieguma vienādojumus iegūstam, izmantojot otro Kirhhofa likumu un ievērojot iepriekš aplūkotos EDS, kuri darbojas statora un rotora ķēdē:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = I_1 R_1; \quad (6.20)$$

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = I_2 \frac{R_2}{s}. \quad (6.21)$$

Vienādojumus (6.20) un (6.21) pārveidojot un ievērojot izteiksmes (6.18) un (6.19), iegūstam sprieguma vienādojumus galīgā formā, kādā tos parasti izmanto asinchronās mašīnas procesu analizē:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 Z_1; \quad (6.22)$$

$$0 = \dot{E}_2 - I_2 \underline{Z}_{2s}, \quad (6.23)$$

kur $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ un $\underline{Z}_{2s} = R_2/s + jX_2$ — asinchronās mašīnas statora un rotora fāzes pilnās pretestības, pie tam ar \underline{Z}_{2s} šeit jāsaprot nekustīga rotora ekvivalenta pilnā pretestība.

Sprieguma kritums statora tinumā $I_1 Z_1$ normāli slogotai asinchronajai mašīnai nepārsniedz dažus procentus no pievadītā sprieguma. Tas nozīmē, ka statora EDS \dot{E}_1 līdzsvarošanai tiek patērēts gandrīz viss statora fāzei pievadītais spriegums \dot{U}_1 un tāpēc var pieņemt, ka $U_1 \approx E_1$.

Ja tīkla spriegums $U_1 = \text{const}$, tad jebkurai slodzei arī $E_1 \approx \text{const}$ un no izteiksmes (6.15) var secināt, ka galvenā magnētiskā plūsma $\Phi \approx \text{const}$ un tāpat arī $\Phi \sim U$. Tas nozīmē, ka asinchronajā mašīnā, tāpat kā transformatorā, magnētiskā plūsma Φ praktiski nav atkarīga no slodzes, bet tā ir proporcionāla statora fāzei pievadītajam spriegumam U_1 .

Tā kā asinhronās mašīnas tukšgaitā plūsmu Φ nosaka statora MS, bet slogotā mašīnā statora un rotora MS kopīga darbība, tad slogotas asinhronās mašīnas MS vienādojums ir šāds:

$$0,45 \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{p} I_o = 0,45 \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{p} I_1 + 0,45 \frac{m_2 \omega_2 k_{w2}}{p} I_2$$

jeb

$$m_1 \omega_1 k_{w1} I_o = m_1 \omega_1 k_{w1} I_1 + m_2 \omega_2 k_{w2} I_2, \quad (6.24)$$

kur ω_1 un ω_2 — statora un rotora fāzes vijumu skaits;

m_1 un m_2 — statora un rotora fāžu skaits;

k_{w1} un k_{w2} — statora un rotora tinumu koeficienti;

I_o — tukšgaitas strāva.

Atgādināsim, ka, aprēķinot išslēgtā rotora MS, vienādojumā (6.24) jāievieto $m_2 = Z_2$, $\omega_2 = 1/2$, $k_{w2} = 1$.

- Izdalot vienādojuma (6.24) abas puses ar $m_1 \omega_1 k_{w1}$, iegūstam izteiksmi

$$I_o = I_1 + \frac{m_2 \omega_2 k_{w2}}{m_1 \omega_1 k_{w1}} I_2$$

jeb

$$I_o = I_1 + \frac{I_2}{k_I}. \quad (6.25)$$

Vienādojumu (6.25) sauc par asinhronās mašīnas strāvu vienādojumu, bet lielumu

$$k_I = \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{m_2 \omega_2 k_{w2}} \quad (6.26)$$

par asinhronās mašīnas strāvas transformācijas koeficientu.

6.2.3. Rotora elektrisko lielumu reducēšana uz statora tinumu

Asinhrono mašīnu, tāpat kā transformatoru, darba režīmu analīzei plaši izmanto ekvivalentās shēmas, kurās magnētisko saiti starp statora un rotora tinumiem aizstāj ar elektrisko saiti. Bet statora un rotora ķēdes elektriski var saistīt tikai tad, ja to tinumos inducētie EDS ir vienādi. Šim noteikumam atbilst asinhronā mašīna, kuras rotors reducēts uz statora tinumu.

Tā kā saskaņā ar izteiksmi (6.17)

$$E_1 = k_U E_2,$$

tad reducētais rotora tinuma EDS

$$E'_2 = k_U E_2. \quad (6.27)$$

Reducēto rotora strāvu I' atrod, izmantojot nosacījumu, ka reāla un reducēta rotora MS pirmās harmoniskās ir vienādas, t. i., $F_2 = F'_2$.

Tā kā

$$F_2 = 0,45 \frac{m_2 \omega_2 k_{w2}}{p} I_2$$

un

$$F'_2 = 0,45 \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{p} I'_2,$$

tad

$$I'_2 = \frac{m_2 \omega_2 k_{w2}}{m_1 \omega_1 k_{w1}} I_2$$

jeb saskaņā ar izteiksmi (6.26)

$$I'_2 = \frac{I_2}{k_I}. \quad (6.28)$$

Reducēto rotora aktīvo pretestību R'_2 atrod, ievērojot nosacījumu, ka elektriskie zudumi reālā un reducētā rotorā ir vienādi, t. i.,

$$m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I'^2_2 R'_2,$$

no kurienes, ievērojot izteiksmes (6.17), (6.26) un (6.28), iegūstam sakarību

$$R'_2 = k_U k_I R_2. \quad (6.29)$$

Reducēto rotora induktīvo pretestību iegūst, ievērojot nosacījumu, ka fāzu nobīdes leņķim ψ_2 starp E_2 un I_2 reducētā un reālā rotorā jābūt tādām pašām, t. i.,

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X'_2}{R'_2},$$

no kurienes

$$X'_2 = k_U k_I X_2. \quad (6.30)$$

Var atzīmēt, ka trīsfāzu asinhronajā mašīnā ar fāzu rotoru $m_1 = m_2$ un tāpēc $k_U = k_I$. Tas nozīmē, ka šajā gadījumā visi asinhronās mašīnas rotora reducētie elektriskie lielumi ir aprēķināmi tāpat kā transformatora sekundārā tinuma reducētie lielumi.

6.2.4. Ekvivalentās shēmas

Izmantojot rotora lielumus, kas reducēti uz statora tinumu, asinhronās mašīnas spriegumu un strāvu vienādojumus (6.22), (6.23) un (6.25) var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + I_1 \underline{Z}_1; \quad (6.31)$$

$$0 = \dot{E}'_2 - I'_2 \underline{Z}'_{2s}; \quad (6.32)$$

$$I_o = I_1 + I'_2, \quad (6.33)$$

kur

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1; \quad (6.34)$$

$$\underline{Z}'_{2s} = \frac{R'_2}{s} + jX'_2 = R'_2 + jX'_2 + R'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (6.35)$$

Asinhronās mašīnas ekvivalento shēmu iegūst, izmantojot tās analogiju ar transformatoru. Tāpat kā transformatoram, var uzskatīt, ka spriegumam $-\dot{E}_1$ ir pievienota kaut kāda pilna pretestība $\underline{Z}_m = R_m + jX_m$, no kuras ir atkarīga tukšgaitas strāva I_o , t. i.,

$$-\dot{E}_1 = I_o \underline{Z}_m. \quad (6.36)$$

Pretestības \underline{Z}_m aktīvā komponente R_m raksturo magnētiskos zudumus, bet tās reaktīvā komponente X_m — reaktīvo jaudu, kura patērēta galvenās magnētiskās plūsmas radīšanai (sk. arī izteiksmi (5.87)).

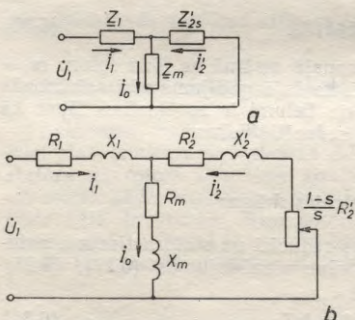
Tā kā $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, tad, ievērojot izteiksmi (6.36), sprieguma un strāvu vienādojumu (6.31), (6.33) var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U}_1 = I_o \underline{Z}_m + I_1 \underline{Z}_1; \quad (6.37)$$

$$0 = -I_o \underline{Z}_m - I'_2 \underline{Z}'_{2s}; \quad (6.38)$$

$$I_o = I_1 + I'_2. \quad (6.39)$$

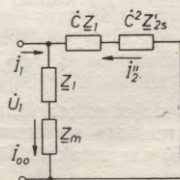
Šiem vienādojumiem atbilst asinhronās mašīnas *T veida ekvivalentā shēma*, kura attēlota 6.4. zīmējumā *a*, bet izvērstā veidā — 6.4. zīmējumā *b*.



6.4. zim. Asinhronās mašīnas T veida ekvivalentā shēma:

a — ar pilnajām pretestībām, *b* — ar aktīvajām un induktīvajām pretestībām.

Asinhrono mašīnu ekvivalentās shēmas parametri relatīvajās vienībās ir šādi: $R_{1*} \approx R'_{2*} = 0,01 \dots 0,07$; $X_{1*} \approx X'_{2*} = 0,08 \dots 0,15$; $R_{m*} = 0,08 \dots 0,35$; $X_{m*} = 2 \dots 4$.



6.5. zim. Asinhronās mašīnas Γ veida ekvivalentā shēma.

Asinhrono mašīnu darba režīmu analīzei T veida ekvivalentā shēma dažos gadījumos nav ērta, jo strāva magnetizēšanas zarā I_o ir atkarīga no slodzes, respektīvi, no slīdes. Tāpēc lieto arī Γ veida ekvivalento shēmu (6.5. zīm.), kurā I_{oo} ir no slodzes neatkarīga strāva — ideālās tukšgaitas strāva. Ar ideālu tukšgaitu saprot asinhronās mašīnas darba režīmu, kad $I_2=0$. Šāds režīms iespējams divos gadījumos: 1) rotora ķēde nav saslēgta; 2) rotors un magnētiskais lauks griežas sinhroni ($s=0$), jo tad saskaņā ar izteiksmi (6.35) $Z'_{2s}=\infty$.

Noteiksim Γ veida ekvivalentās shēmas parametrus un strāvas I_{oo} un I_o .

No T veida ekvivalentās shēmas (6.4. zīm. a) izriet, ka

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{\frac{Z'_{2s}Z_m}{Z_1 + \frac{Z'_{2s} + Z_m}{Z_1 Z'_{2s} + Z_1 Z_m + Z'_{2s} Z_m}}} \dot{U}_1 \quad (6.40)$$

un ideālās tukšgaitas strāva

$$I_{oo} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} \quad (6.41)$$

Tā kā strāva I_1 nemainās, tad saskaņā ar izteiksmēm (6.40), (6.41) un Γ veida ekvivalento shēmu

$$\begin{aligned} -I''_2 = -I_{oo} + I_1 &= \left(-\frac{1}{Z_1 + Z_m} + \frac{Z'_{2s} + Z_m}{Z_1 Z'_{2s} + Z_1 Z_m + Z'_{2s} Z_m} \right) \dot{U}_1 = \\ &= \frac{\dot{U}_1 Z_m^2}{(Z_1 + Z_m)(Z_1 Z'_{2s} + Z_1 Z_m + Z'_{2s} Z_m)} = \\ &= \frac{\dot{U}_1}{Z_1(1 + Z_1/Z_m) + Z'_{2s}(1 + Z_1/Z_m)^2} = \frac{\dot{U}_1}{C Z_1 + C^2 Z'_{2s}} \quad (6.42) \end{aligned}$$

kur

$$C = 1 + \frac{Z_1}{Z_m} \quad (6.43)$$

Izteiksmei (6.42) atbilst 6.5. zīmējumā attēlotā ekvivalentā shēma.

Salīdzinot T veida un Γ veida ekvivalentās shēmas, var atrast arī, ka

$$I''_2 = \frac{I'_2}{C} \quad (6.44)$$

Kā redzams no izteiksmes (6.43), koeficients \dot{C} ir kompleksss lielums. Tomēr, ievērojot, ka parasti asinhronajās mašīnās $Z_1 \ll Z_m$, $R_1 < X_1$, $R_m < X_m$, ar pietiekamu precizitāti šo koeficientu var aizstāt ar reālu lielumu:

$$c \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}. \quad (6.45)$$

Parasti $c = 1,02 \dots 1,08$.

6.2.5. Vektoru diagrammas

Dzinēja režīms. Asinhronā dzinēja vektoru diagrammu, kura parādīta 6.6. zīmējumā *a*, konstruē, izmantojot spriegumu un strāvu vienādojumus (6.37) ... (6.39) vai arī T veida ekvivalento shēmu (sk. 6.4. zīm.). Konstruācijas gaita, kā arī diagramma būtībā neatšķiras no transformatora vektoru diagrammas.

Ģeneratora režīms. Lai asinhronā mašīna no dzinēja režīma ($n < n_1$) pārietu ģeneratora režīmā, tad ar ārēju mehānisku spēku jāpalielina rotora rotācijas frekvence virs sinhronās rotācijas frekvences ($n > n_1$). Tad rotora slide saskaņā ar izteiksmi (6.3) kļūst negatīva.

Lai iegūtu asinhronā ģeneratora vektoru diagrammu, sadalīsim rotora strāvu I'_2 komponentēs. No izteiksmēm (6.32) un (6.35) izriet, ka

$$I'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{\frac{R'_2}{s} + jX'_2}. \quad (6.46)$$

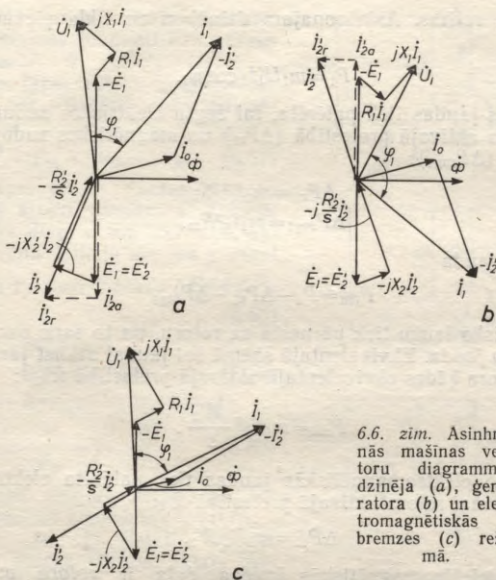
Pieņemot, ka $\dot{E}'_2 = E'_2$, un pareizinot izteiksmē (6.46) saucēju un skaitītāju ar saistītu kompleksu skaitli, t. i., ar $R'_2/s - jX'_2$, iegūstam

$$I'_2 = \frac{E'_2 \frac{R'_2}{s}}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2} - j \frac{E'_2 X'_2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + X'^2_2} = I'_{2a} - jI'_{2r}. \quad (6.47)$$

Dzinēja režīmā, kad $s > 0$, abas rotora strāvas I'_2 komponentes I'_{2a} un I'_{2r} ir pozitīvas. Reizinātājs $-j$ pie I'_{2r} nozīmē, ka vektors I'_{2r} attiecībā pret I'_{2a} pagriezts pulksteņa rādītāju kustības virzienā par 90° (6.6. zīm. *a*).

Ģeneratora režīmā $s < 0$ un saskaņā ar izteiksmi (6.47) tāpat kā iepriekš $I'_{2r} > 0$, bet strāvas aktīvā komponente I'_{2a} salīdzinājumā ar dzinēja režīmu ir pretēja virziena ($I'_{2a} < 0$), un tāpēc mainās arī statora strāvas virziens. Asinhronā ģeneratora vektoru diagramma, kura konstruēta, ievērojot minētās īpatnības, attēlota 6.6. zīmējumā *b*.

Kā redzams no diagrammas, ģeneratora režīmā $\varphi_1 > 90^\circ$ un statora aktīvā jauda $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0$. Tas nozīmē, ka mašīna nevis patērē aktīvo jaudu, kā tas ir dzinēja režīmā, bet atdod to tīklam.



6.6. zīm. Asinhronās mašīnas vektoru diagrammas dzinēja (a), ģenerators (b) un elektromagnētiskās bremzes (c) režīmā.

No diagrammas redzams arī, ka statora reaktīvā jauda $Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1$, mašīnai pārejot no dzinēja režīma ģenerators režīmā, savu virzienu nemaina. Tas nozīmē, ka asinhronais ģenerators, tāpat kā dzinējs, no tīkla patērē reaktīvo jaudu. Tāpēc asinhronā mašīna ģenerators režīmā var strādāt tikai paralēli ar tīklu, kurā ir reaktīvās jaudas avoti, piemēram, sinhronie ģeneratori, kondensatoru baterijas. Tas ir viens no asinhrono ģenerators būtiskiem trūkumiem, un tāpēc tos lieto tikai ļoti retos gadījumos.

Elektromagnētiskās bremzes režīms. Elektromagnētiskās bremzes režīmā asinhronās mašīnas rotors un magnētiskais lauks griežas pretējos virzienos ($n < 0$) un tad saskaņā ar izteiksmi (6.3) $s > 1$. Tas nozīmē, ka rotora strāvas I_2 aktīvajai un reaktīvajai komponentei ir tādi paši virzieni kā dzinēja režīmā. Tāpēc asinhronās mašīnas vektoru diagramma elektromagnētiskās bremzes režīmā (6.6. zīm. c) kvalitatīvi neatšķiras no vektoru diagrammas dzinēja režīmā.

6.2.6. Asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības, zudumi un lietderības koeficients

Izmantojot T veida ekvivalento shēmu (sk. 6.4. zīm. b), izsekosim enerģijas pārveidošanas procesam asinhronajā mašīnā dažādos tās darba režīmos.

Dzinēja režīms. Asinhronajam dzinējam no tikla pievadītā aktīvā jauda

$$P_1 = m_1 U_1' I_1 \cos \varphi_1. \quad (6.48)$$

Daļa šīs jaudas tiek patērēta, lai segtu elektriskos zudumus statora tinuma aktīvajā pretestībā (ΔP_{e1}) un magnētiskos zudumus statora serdē (ΔP_{mg1}):

$$\Delta P_{e1} = m_1 I_1'^2 R_1; \quad (6.49)$$

$$\Delta P_{mg1} = m_1 I_o'^2 R_m. \quad (6.50)$$

Pārējā jauda

$$P_{em} = P_1 - \Delta P_{e1} - \Delta P_{mg1} \quad (6.51)$$

ar magnētisko lauku tiek pārnesta uz rotoru, un to sauc par *elektromagnētisko jaudu*. Ekvivalentajā shēmā šai jaudai atbilst jauda, kura izdalās rotora ķēdes ekvivalentajā aktīvajā pretestībā R'_2/s :

$$P_{em} = m_1 I_2'^2 \frac{R'_2}{s}. \quad (6.52)$$

Daļa no elektromagnētiskās jaudas tiek patērēta elektrisko zudumu segšanai rotora aktīvajā pretestībā R'_2 :

$$\Delta P_{e2} = m_1 I_2'^2 R'_2. \quad (6.53)$$

Pārējā elektromagnētiskās jaudas daļa ir *rotora mehāniskā jauda* P_m :

$$P_m = P_{em} - \Delta P_{e2} \quad (6.54)$$

jeb saskaņā ar izteiksmēm (6.52) un (6.53)

$$P_m = m_1 I_2'^2 R'_2 \frac{1-s}{s}. \quad (6.55)$$

Tātad asinhronā dzinēja mehāniskā slodze tiek aizvietota ar enerģētiskā ziņā ekvivalentu elektrisku slodzi pretestības $R'_2 \frac{1-s}{s}$ veidā.

Lietderīgo mehānisko jaudu uz rotora vārpstas P_2 iegūst, ja no rotora pilnās mehāniskās jaudas atskaita mehāniskos zudumus ΔP_m , rotora magnētiskos zudumus ΔP_{mg2} un papildzudumus ΔP_p . Papildzudumu cēlonis ir magnētiskā lauka augstākās harmoniskās, kā arī magnētiskās plūsmas pulsācijas rotora un statora zobos. Šo zudumu aprēķināšana ir sarežģīta, tāpēc saskaņā ar Valsts standartu GOCT 183—74 papildzudumus aprēķina pēc aptuvenas formulas:

$$P_p = 0,005 P_N \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2. \quad (6.56)$$

Normālā darba režīmā frekvence, ar kādu mainās magnētiskais lauks rotora serdē, ir neliela ($f_2=1 \dots 3$ Hz), un tāpēc rotora magnētiskos zudumus var neievērot. Tādējādi atdotā jauda

$$P_2 = P_m - \Delta P_m - \Delta P_p. \quad (6.57)$$

Enerģijas pārvairošanas procesu uzskatāmi attēlo asinhronā dzinēja enerģētiskā diagramma (6.7. zīm. a).

Asinhronā dzinēja kopējie zudumi

$$\Delta P = \Delta P_{e1} + \Delta P_{mg1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_m + \Delta P_p \quad (6.58)$$

un atdotā jauda

$$P_2 = P_1 - \Delta P. \quad (6.59)$$

Dzinēja lietderības koeficients

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1}. \quad (6.60)$$

Nomināli slogotu asinhrono dzinēju lietderības koeficients $\eta=0,75 \dots 0,95$, pie tam, jo lielāka dzinēja jauda, jo lielāks tā nominālais lietderības koeficients.

No izteiksmēm (6.52), ..., (6.55) var iegūt šādas sakarības:

$$\Delta P_{e2} = s P_{em}; \quad (6.61)$$

$$P_m = (1-s) P_{em}, \quad (6.62)$$

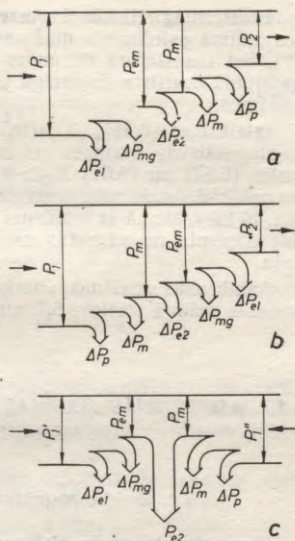
no kurām redzams, ka, palielinoties rotora slīdei, pieaug elektriskie zudumi, bet rotora mehāniskā jauda samazinās. Tāpēc, lai panāktu augstāku lietderības koeficientu, asinhronajam dzinējam jāstrādā ar mazu slīdi.

Ģeneratora režīms. Izteiksmes (6.48), ..., (6.55), (6.61) un (6.62) ir spēkā arī asinhronās mašīnas ģeneratora režīmam, ja ievēro, ka šajā režīmā $s < 0$.

Ģeneratora režīmā ekvivalentās shēmas (6.4. zīm. b) pretestības R'_2/s un $R'_2(1-s)/s$ mainās zīme, t. i., tās kļūst negatīvas, tātad mainās arī enerģijas virziens. Visus zudumus asinhronajā ģeneratorā sedz vārpstai pievadītais mehāniskā jauda.

Var atzīmēt, ka jēdziens «negatīva pretestība» šajā gadījumā jāsaprot kā ekvivalenta pretestība, kura ir elektriskās enerģijas avots, tāpat kā pozitīva pretestība ir elektriskās enerģijas patērētājs.

Asinhronā ģeneratora enerģētiskā diagramma attēlota 6.7. zīmējuma b.



6.7. zīm. Asinhronās mašīnas enerģētiskās diagrammas dzinēja (a), ģeneratora (b) un elektromagnētiskās bremzes (c) režīmā.

Elektromagnētiskās bremzes režīms. Elektromagnētiskās bremzes režīmā asinhronās mašīnas vārpstai pievadīta mehāniskā jauda P'' , bet tās statora tinumam — elektriskā jauda P'_1 . Mašīna šajā gadījumā neattīsta lietderīgu jaudu, tāpēc visa pievadītā jauda pāriet zudumos.

Izteiksmes (6.48), ..., (6.55), (6.61) un (6.62) ir spēkā arī elektromagnētiskās bremzes režīmam. Ja $s > 1$, tad saskaņā ar izteiksmēm (6.52) un (6.61) $P_{em} > 0$ un $\Delta P_{e2} > P_{em}$. Tas nozīmē, ka elektromagnētiskā jauda sedz tikai daļu no rotora elektriskajiem zudumiem. Bet, tā kā saskaņā ar izteiksmi (6.55) $P_m < 0$, tad šī mehāniskā jauda tiek uzņemta no vārpstas un sedz rotora elektrisko zudumu pārējo daļu.

Asinhronās mašīnas enerģētiskā diagramma elektromagnētiskās bremzes režīmā attēlota 6.7. zīmējumā *c*.

6.3. ASINHRONĀS MAŠĪNAS ELEKTROMAGNĒTISKAIS MOMENTS UN MEHĀNISKĀ RAKSTURLĪKNE

6.3.1. Elektromagnētiskā momenta atkarība no slīdes

Momentu, ko rada elektromagnētiskie spēki rotorā, var noteikt pēc formulas

$$M = \frac{P_m}{\Omega}, \quad (6.63)$$

kur P_m — rotora mehāniskā jauda;
 Ω — rotora leņķiskais ātrums.

Tā kā

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

tad, izmantojot izteiksmes (6.4) un (6.1),

$$\Omega = \frac{2\pi(1-s)n_1}{60} = \frac{2\pi(1-s)}{60} \frac{60f_1}{p} = \frac{\omega_1(1-s)}{p}, \quad (6.64)$$

kur $\omega_1 = 2\pi f_1$ — maiņstrāvas leņķiskā frekvence.

Ievietojot izteiksmē (6.63) P_m no izteiksmes (6.55) un Ω no izteiksmes (6.64), elektromagnētiskais moments

$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} I_2'^2 \frac{R_2'}{s}. \quad (6.65)$$

No Γ veida ekvivalentās shēmas (sk. 6.5. zīm.) un izteiksmēm (6.42), (6.44) var atrast, ka

$$I'_2 = cI''_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}} \quad (6.66)$$

Ievietojot šo I'_2 vērtību izteiksmē (6.65), iegūstam formulu

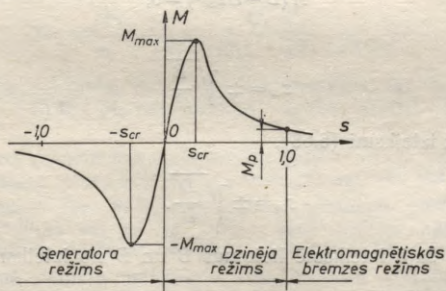
$$M = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + c \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2} \quad (6.67)$$

No izteiksmes (6.67) redzams, ka elektromagnētiskais moments jebkurai slīdes vērtībai ir proporcionāls sprieguma kvadrātam. Bez tam, jo mazākas ir pretestības R_1 , X_1 , X'_2 , jo lielāks elektromagnētiskais moments.

Ja $U_1 = \text{const}$, tad elektromagnētiskais moments ir atkarīgs tikai no slīdes.

Analizēsīm sakarību $M = f(s)$, izmantojot izteiksmi (6.67).

Ja $s > 0$, tad $M > 0$ (dzinēja un elektromagnētiskās bremzes režīms), bet, ja $s < 0$, tad arī $M < 0$ (ģeneratora režīms). Bez tam, ja $s = 0$ un $s = \pm\infty$, arī $M = 0$. Tas nozīmē, ka starp punktiem $s = -\infty$, 0 un $+\infty$ liknei $M = f(s)$ ir maksimums un minimums un mašīnas elektromagnētiskā momenta atkarību no slīdes attēlo 6.8. zīmējumā parādītā līkne.



6.8. zīm. Asinhronās mašīnas elektromagnētiskā momenta atkarība no slīdes.

6.3.2. Maksimālais elektromagnētiskais moments, kritiskā slīde un palaišanas moments

Analizējot asinhronās mašīnas momenta likni $M=f(s)$, var atrast maksimālo momentu M_{max} , šim momentam atbilstošo slīdi s_{cr} , ko sauc par kritisko slīdi, un palaišanas momentu M_p .

Kritiskās slīdes aprēķina formulu iegūst, izpētot momenta izteiksmi (6.67) maksimuma atrašanai. Šim nolūkam momenta pirmais atvasinājums pēc slīdes jāpielīdzina nullei. Mainīgā s vietā ērtāk aplūkot lielumu

$$z = \frac{1}{s} \quad (6.68)$$

un tad momenta izteiksmi (6.67) var uzrakstīt šādi:

$$M = \frac{Az}{B + Cz + Dz^2}, \quad (6.69)$$

kur

$$A = \frac{pm_1 U_1^2 R'_2}{\omega_1}; \quad B = R_1^2 + (X_1 + cX'_2)^2; \\ C = 2cR_1 R'_2; \quad D = c^2 R'^2_2. \quad (6.70)$$

Atvasinot izteiksmi (6.69) pēc z un pielīdzinot nullei, iegūstam vienādojumu, no kura var atrast $z_{cr} = 1/s_{cr}$ vērtības, t. i., vērtības, kurām atbilst momenta liknes ekstrēmās vērtības:

$$\left(\frac{dM}{dz} \right)_{z=z_{cr}} = \frac{A(B - Dz_{cr}^2)}{(B + Cz_{cr} + Dz_{cr}^2)^2} = 0. \quad (6.71)$$

Vienādojums (6.71) ir spēkā, ja

$$A(B - Dz_{cr}^2) = 0,$$

no kurienes

$$z_{cr} = \pm \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (6.72)$$

jeb, ievērojot izteiksmi (6.68),

$$s_{cr} = \pm \sqrt{\frac{D}{B}}. \quad (6.73)$$

Ievietojot šajā izteiksmē lielumus B un D no izteiksmēm (6.70), iegūstam

$$s_{cr} = \pm \frac{cR'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX'_2)^2}}. \quad (6.74)$$

Maksimālo momentu atrod, ja izteiksmē (6.69) ievieto z_{cr} no izteiksmes (6.72):

$$M_{max} = \pm \frac{A}{\pm C + 2\sqrt{BD}} \quad (6.75)$$

jeb, ievērojot izteiksmes (6.70),

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + cX'_2)^2}]} \quad (6.76)$$

Izteiksmēs (6.72), ..., (6.76) plusa zīme atbilst dzinēja, bet mīnusa zīme — generatora režīmam.

Kritiskās slīdes un maksimālā momenta aprēķina izteiksmes (6.74) un (6.76) var vienkāršot, ja neievēro samērā mazo statora tinuma aktīvās pretestības R_1 vērtību, t. i., ja pieņem, ka $R_1 = 0$. Tad

$$s_{cr} \approx \pm \frac{cR'_2}{X_1 + cX'_2}, \quad (6.77)$$

$$M_{max} \approx \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c (X_1 + cX'_2)}. \quad (6.78)$$

Analizējot iegūtās izteiksmes, var izdarīt šādus secinājumus: 1) maksimālā momenta vērtība nav atkarīga no rotora ķēdes aktīvās pretestības; 2) maksimālais moments ir proporcionāls sprieguma kvadrātam; 3) kritiskā slide ir proporcionāla rotora ķēdes aktivajai pretestībai.

Maksimālā momenta attiecība pret nominālo momentu raksturo asinhronā dzinēja *pārslodzes spēju*, kas dota dzinēja pasē. Vispārīga lietojuma asinhronajiem dzinējiem pārslodzes spēja $k_m = M_{max}/M_N = 1,7 \dots 3,0$ un kritiskā slide $s_{cr} = 0,06 \dots 0,15$.

Asinhronā dzinēja palaišanas momentu var noteikt pēc formulas (6.67), ievietojot tajā $s = 1$. Tad

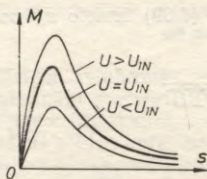
$$M_p = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}. \quad (6.79)$$

Vispārīga lietojuma asinhronajiem dzinējiem ar išslēgtu rotoru $M_p = (0,7 \dots 1,8)M_N$, pie tam mazākās vērtības atbilst lielākas jaudas dzinējiem.

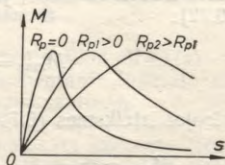
Asinhronā dzinēja momenta raksturliķni $M = f(s)$, ja $U_1 = U_{1N}$ un papildpretestība rotora ķēdē $R_p = 0$, sauc par *dabisko raksturliķni*.

Ja samazina (vai palielina) statora tinumam pievienoto spriegumu ($U_1 \neq U_{1N}$) vai arī ja rotora ķēdē ieslēdz papildpretestību ($R_p \neq 0$), dzinējs darbojas *mākslīgās raksturliķnes* režīmā.

Asinhronā dzinēja mākslīgās raksturliķnes dažādiem spriegumiem attēlotas 6.9. zīmējumā. Tā kā saskaņā ar izteiksmi (6.67) elektromagnētiskais moments ir proporcionāls sprieguma kvadrātam ($M \sim U_1^2$), asinhronais dzinējs ir jutīgs pret tikla sprieguma



6.9. zim. Asinhronā dzinēja elektromagnētiskā momenta raksturlienes dažādām sprieguma vērtībām.



6.10. zim. Asinhronā dzinēja elektromagnētiskā momenta raksturlienes dažādām rotora ķēdes aktīvās pretestības vērtībām.

svārstībām. Samazinot spriegumu, samaziņās arī dzinēja pārslodzes spēja, un šis apstāklis jāievēro asinhrono dzinēju ekspluatācijā.

Ieslēdzot rotora ķēdē papildpretestību, mainās kritiskā slīde, kura saskaņā ar izteiksmi (6.77) ir proporcionāla rotora ķēdes aktīvajai pretestībai $R_2 + R_p$, un tāpēc momenta maksimums tiek nobīdīts lielākas slīdes virzienā (6.10. zim.). Maksimālais moments šajā gadījumā, kā tas redzams no izteiksmes (6.78), nemainās.

6.3.3. Asinhronā dzinēja mehāniskā raksturliene un tās aprēķins no dzinēja pases datiem

Par asinhronā dzinēja mehānisko raksturlietni sauc raksturlietni, kura attēlo rotācijas frekvences atkarību no lietderīgā momenta uz dzinēja vārpstas, t. i., $n = f(M_2)$ vai arī $M_2 = f(n)$.

Lietderīgais moments M_2 ir mazāks par elektromagnētisko momentu M :

$$M_2 = M - M_o. \quad (6.80)$$

Momentu M_o sauc par tukšgaitas zudumu momentu, un tas ir atkarīgs no mehāniskajiem zudumiem ΔP_m un papildzudumiem ΔP_p , kuri tiek segti uz rotora mehāniskās jaudas rēķina:

$$M_o = \frac{\Delta P_m + \Delta P_p}{\Omega}. \quad (6.81)$$

Mehāniskie zudumi un papildzudumi asinhronajā dzinējā ir relatīvi mazi, tāpēc praktiskos aprēķinos pieņem, ka dzinēja elektromagnētiskais griezes moments ir vienāds ar vārpstas atdoto momentu ($M = M_2$). Tā kā starp lielumiem n un s pastāv lineāra sakarība (sk. izteiksmi (6.4)), tad dzinēja mehāniskā raksturliene $n = f(M)$ (6.11. zim.) ir citā koordinātu sistēmā attēlota momenta atkarība no slīdes $M = f(s)$.

Raksturliķni $M=f(s)$ un tātad arī $n=f(M)$ var aprēķināt no izteiksmes (6.67), ja zināmi dzinēja parametri. Tomēr šie parametri ne vienmēr ir pieejami, tāpēc praktiskām vajadzībām mehānisko raksturliķni iespējams noteikt, izmantojot aptuvenu formulu (Klosa formulu):

$$M \approx \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}}, \quad (6.82)$$

kuru var iegūt no izteiksmēm (6.67) un (6.76), pieņemot, ka $R_1=0$.

Izteiksme (6.82) ir ērti izmantojama, ja zināmi dzinēja pases dati: nominālā jauda P_N , nominālā rotācijas frekvence n_N un pārslodzes spēja $k_m = M_{max}/M_N$.

Mehāniskās raksturliķnes aprēķinu veic šādā secībā.

1. No formulas

$$s_N = \frac{n_1 - n_N}{n_1},$$

atrod nominālo slīdi.

2. Ievietojot izteiksmē (6.82) $s=s_N$, $M=M_N$ un izdalot abas pušes ar M_{max} , iegūstam sakarību

$$\frac{1}{k_m} = \frac{2}{\frac{s_N}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s_N}},$$

no kurienes

$$s_{cr} = s_N (k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}). \quad (6.83)$$

3. Aprēķina nominālo momentu:

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N}. \quad (6.84)$$

(Ja P_N izteikta kilovatos (kW) un n_N — apgriezios minūtē (min^{-1}), tad M_N vienība ir ņūtonmetrs (N·m).)

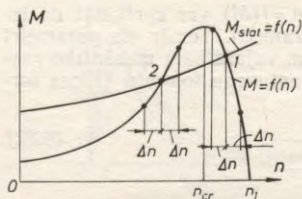
4. Atrod maksimālo momentu:

$$M_{max} = k_m M_N. \quad (6.85)$$

Tādējādi visi lielumi izteiksmē (6.82) ir zināmi un var aprēķināt momentu jebkurai slīdes s vai jebkurai rotācijas frekvences $n = (1-s)n_1$ vērtībai.

6.3.4. Asinhronā dzinēja darbības stabilitāte

Asinhronā dzinēja darbības stabilitāti nosaka dzinēja griezes momenta M un darbināmā mehānisma statiskā pretestības momenta atkarība no rotācijas frekvences n , t. i., raksturliķnes $M=f(n)$ un $M_{stat}=f(n)$.



6.11. zīm. Asinhronā dzinēja darbības stabilitātes noteikšana.

Pieņemsim, ka, dzinējam strādājot punktā 1, tā rotācijas frekvence kaut kādas iedarbes rezultātā pieaug par lielumu Δn . Tā kā šajā gadījumā $M < M_{stat}$, tad uz rotoru darbojas bremsējošs dinamiskais moments $M_{dyn} = M - M_{stat} < 0$, un dzinēja rotācijas frekvence samazinās līdz brīdim, kamēr atkal iestājas momentu līdzsvars punktā 1. Ja, dzinējam strādājot punktā 1, rotācijas frekvence samazinās par lielumu Δn , tad $M > M_{stat}$, uz dzinēja rotoru darbojas dzeņošs dinamiskais moments $M_{dyn} = M - M_{stat} > 0$ un rotors paātrinās, kamēr abi momenti punktā 1 līdzsvarojas. Tādējādi aplūkojamā gadījumā dzinēja darbība ir stabila.

Strādājot punktā 2, dzinēja stabila darbība nav iespējama. Ja rotācijas frekvence pieaug par Δn , tad $M > M_{stat}$, $M_{dyn} = M - M_{stat} > 0$, rotora rotācijas frekvence pakāpeniski pieaug vēl vairāk, kamēr iestājas momentu līdzsvars punktā 1. Ja turpretī, dzinējam strādājot punktā 2, rotācijas frekvence samazinās par Δn , tad $M < M_{stat}$, $M_{dyn} < 0$, rotora rotācijas frekvence pakāpeniski samazinās līdz nullei.

No teiktā var secināt, ka aplūkotajā gadījumā dzinēja mehāniskās raksturliktnes posmā $n_{cr} < n < n_1$ dzinēja darbība ir stabila, bet posmā $0 < n < n_{cr}$ tā ir nestabila.

Vispārīgā gadījumā asinhronā dzinēja, tāpat kā līdzstrāvas dzinēja (sk. 3.12.4.), stabila darbība ir iespējama, ja tiek ievērots nosacījums

$$\left| \frac{dM}{dn} < \frac{dM_{stat}}{dn} \right. \quad (6.86)$$

jeb

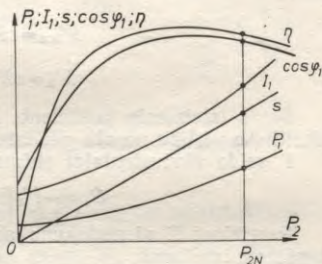
$$\left| \frac{dM_{dyn}}{dn} < 0. \right. \quad (6.87)$$

6.4. ASINHRONĀS MAŠĪNAS RIŅĶA DIAGRAMMA

6.4.1. Vispārīgi norādījumi

Lai spriestu par asinhronā dzinēja darbības īpašībām, svarīgi zināt ne tikai tā nominālos lielumus, bet arī to, kā atkarībā no slodzes P_2 mainās uzņemtā jauda P_1 , statora strāva I_1 , jaudas koeficients $\cos \varphi_1$, slīde s un lietderības koeficients η . Šādu informāciju var iegūt no asinhronā dzinēja *darba raksturliņķēm* (6.12. zīm.).

Mazjaudas dzinēju darba raksturliņķes var uzņemt eksperimentāli, pakāpeniski mainot slodzi uz dzinēja vārpstas. Uzņemot raksturliņķes, izmanto dažādas sloģošanas ierīces, ar kurām vienkāršāk var izmērīt slodzes momentu (mehāniska vai elektromagnētiska bremze, graduēts līdzstrāvas ģenerators u. tml.). Šādu raksturliņķu iegūšanas paņēmieni sauc par tiešu sloģošanu. Vidējas jaudas un it sevišķi lieljaudas asinhrono dzinēju tiešā sloģošana ir grūti realizējama un dažos gadījumos pat praktiski neiespējama, jo nepieciešamas sarežģītas un dārgas sloģošanas ierīces, kuru jauda atbilstu dzinēja jaudai. Bez tam, tieši sloģojot, barošanas tīkla jaudai jāsedz asinhronā dzinēja visa patērētā jauda. Tāpēc vidējas jaudas un lieljaudas asinhrono dzinēju darba raksturliņķes ērtāk iegūt netieši, izmantojot *riņķa diagrammu*. Šāds paņēmiens ir daudz vienkāršāks, jo riņķa diagrammas konstruēšanai pietiek ar rezultātiem, kuri iegūti no tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumiem, kad dzinējs no tīkla patērē tikai nelielu jaudu — tukšgaitas vai īsslēguma zudumu jaudu. No riņķa diagrammas iegūtās raksturliņķes ir pietiekami precīzas.



6.12. zīm. Asinhronā dzinēja darba raksturliņķes.

jo nepieciešamas sarežģītas un dārgas sloģošanas ierīces, kuru jauda atbilstu dzinēja jaudai. Bez tam, tieši sloģojot, barošanas tīkla jaudai jāsedz asinhronā dzinēja visa patērētā jauda. Tāpēc vidējas jaudas un lieljaudas asinhrono dzinēju darba raksturliņķes ērtāk iegūt netieši, izmantojot *riņķa diagrammu*. Šāds paņēmiens ir daudz vienkāršāks, jo riņķa diagrammas konstruēšanai pietiek ar rezultātiem, kuri iegūti no tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumiem, kad dzinējs no tīkla patērē tikai nelielu jaudu — tukšgaitas vai īsslēguma zudumu jaudu. No riņķa diagrammas iegūtās raksturliņķes ir pietiekami precīzas.

6.4.2. Riņķa diagrammas teorētiskais pamatojums

Mainoties asinhronās mašīnas slodzei, respektīvi, slīdei, statora un rotora strāvas maina savu skaitlisko vērtību un fāzi un to vektoru galapunkti apraksta noslēgtu līniju. Ja asinhronās mašīnas parametri R_1, X_1, R'_2, X'_2 ir nemainīgi un $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$, tad strāvu vektoru galapunktu ģeometriskā vieta ir riņķa līnija, kuru kopā ar dažām papildu konstrukcijām sauc par riņķa diagrammu.

Lai pamatotu riņķa diagrammu, izmantosim asinhronās mašīnas Γ veida ekvivalento shēmu (sk. 6.5. zīm.).

Izmantojot apzīmējumu

$$\underline{Z}'_{k,s} = c\underline{Z}'_1 + c^2\underline{Z}'_{2s}$$

un ievērojot, ka

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 &= R_1 + jX_1, \\ \underline{Z}'_{2s} &= R'_2/s + jX'_2, \end{aligned}$$

pretestību $\underline{Z}'_{h,s}$ var izteikt šādi:

$$\underline{Z}'_{h,s} = R'_{h,s} + jX'_{h,s}, \quad (6.88)$$

kur

$$R'_{h,s} = cR_1 + c^2 \frac{R'_2}{s}, \quad (6.89)$$

$$X'_{h,s} = cX_1 + c^2 X'_2. \quad (6.90)$$

Sajās izteiksmēs koeficients c pieņemts par reālu lielumu, kura skaitlisko vērtību nosaka pēc izteiksmes (6.45).

Γ veida ekvivalentajai shēmai var uzrakstīt šādu vienādojumu:

$$\dot{U}_1 = -I''_2 R'_{h,s} - jI''_2 X'_{h,s}. \quad (6.91)$$

Pareizinot šī vienādojuma abas puses ar $-j$ un izdalot ar $X'_{h,s}$, iegūstam izteiksmi

$$-j \frac{\dot{U}_1}{X'_{h,s}} = jI''_2 \frac{R'_{h,s}}{X'_{h,s}} - I''_2. \quad (6.92)$$

Vienādojuma (6.92) trīs locekļi ir vektori, kuri kompleksajā plaknē veido taisnleņķa trīsstūri $A_{oo}AD$, kurš noteiktai slīdes vērtībai attēlots 6.13. zīmējumā (vektors \dot{U}_1 sakrīt ar reālās ass virzienu). Sajā trīsstūrī pieņemtajā mērogā $\overline{A_{oo}A} = I''_2$, $\overline{AD} = I''_2 R'_{h,s}/X'_{h,s}$, $\overline{A_{oo}D} = \dot{U}_1/X'_{h,s}$.

Ja $U_1 = \text{const}$, tad jebkurai slīdes vērtībai atbilst arī $\overline{A_{oo}D} = \text{const}$. Mainoties slīdei, vektora $-I''_2$ galapunkts A apraksta riņķa līniju, jo leņķis A , kas balstās uz diametru, ir 90° .

Pretestību $\underline{Z}'_{h,s}$ var izteikt arī eksponenciālā formā:

$$\underline{Z}'_{h,s} = Z'_{h,s} e^{j\alpha} \quad (6.93)$$

un kompleksajā plaknē attēlot kā vektoru ar komponentēm $R'_{h,s}$ un $X'_{h,s}$. Tad iegūstam pretestību trīsstūri $A'A_{oo}D'$ (6.13. zīm.), kura malas pieņemtajā mērogā $\overline{A_{oo}A'} = Z'_{h,s}$, $\overline{D'A'} = R'_{h,s}$, $\overline{A_{oo}D'} = X'_{h,s}$.

No Γ veida ekvivalentās shēmas var secināt, ka

$$-I''_2 = \frac{U_1}{\underline{Z}'_{h,s}} = \frac{U_1}{Z'_{h,s}} e^{-j\alpha} = I''_2 e^{-j\alpha}. \quad (6.94)$$

Tas nozīmē, ka jebkurai slīdes vērtībai strāvas vektora $-I''_2$ modulis ir apgriezti proporcionāls pretestībai $Z'_{h,s}$ un šis vektors atrodas attiecībā pret reālo asi pretestības $\underline{Z}'_{h,s}$ vektora spoguļattēla virzienā.

ģeometriskā vieta nav riņķa līnija, bet sarežģītākas formas līkne. Tomēr tā diagrammas daļa, kas atbilst mazām slīdes vērtībām ($0 < s < s_N$), ir ļoti tuva riņķa līnijai, un tāpēc darba raksturlīknes no riņķa diagrammas var iegūt ar pietiekamu precizitāti.

6.4.3. Asinhronā dzinēja darba raksturlīkņu noteikšana no riņķa diagrammas

Lai asinhronās mašīnas riņķa diagrammu varētu izmantot darba raksturlīkņu noteikšanai, 6.13. zīmējumā attēloto strāvu diagrammu nepieciešams papildināt.

Saskaņā ar Γ veida ekvivalento shēmu (sk. 6.5. zīm.) statora strāva

$$I_1 = I_{00} + (-I''_2), \quad (6.95)$$

kur

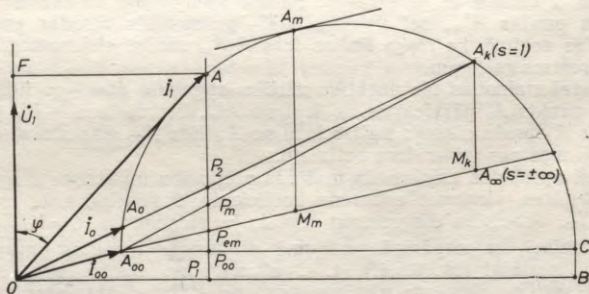
$$I_{00} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_m} \quad (6.96)$$

ir ideālās tukšgaitas strāva un tātad nav atkarīga no slīdes.

Ievērojot izteiksmi (6.95), iegūstam diagrammā punktu O (6.14. zīm.) un strāvas vektoru I_1 , kura galapunkts, mainoties slīdei, apraksta to pašu riņķa līniju, ko vektors $-I''_2$ (6.14. zīmējumā attēlota tikai diagrammas augšējā daļa, kura atbilst dzinēja režīmam).

Mehānisko zūdumu un papildzūdumu dēļ asinhronā dzinēja reālās tukšgaitas punkts A_0 atrodas nedaudz augstāk par ideālās tukšgaitas punktu A_{00} , un reālās tukšgaitas strāvu noteiktā mērogā attēlo nogrieznis $\overline{OA_0}$.

Noskaidrosim, kā, izmantojot riņķa diagrammu, var noteikt lielumus, kuri raksturo asinhronā dzinēja darbības procesu.



6.14. zīm. Asinhronā dzinēja riņķa diagramma.

No diagrammas statora strāva

$$I_1 = m_I \overline{OA}, \quad (6.97)$$

kur m_I — strāvas mērogs (A/cm).

Jaudas koeficientu $\cos \varphi_1$ iegūst kā attiecību

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{OF}}{\overline{OA}}. \quad (6.98)$$

Lai noteiktu pārējos lielumus, noskaidrosim vēl dažas sakarības asinhronā dzinēja riņķa diagrammā. Šim nolūkam vilksim perpendikulu no punkta A pret taisni OB . Tad

$$m_I \overline{AP}_1 = m_I \overline{OA} \cos \varphi_1 = I_1 \cos \varphi_1 \quad (6.99)$$

ir statora strāvas aktīvā komponente, un tāpēc dzinēja uzņemtā jauda

$$P_1 = m_I U_1 I_1 \cos \varphi_1 = m_I m_I U_1 \overline{AP}_1 = m_P \overline{AP}_1, \quad (6.100)$$

kur $m_P = m_I m_I U_1$ — jaudas mērogs (W/cm).

Lietderīgo jaudu riņķa diagrammā raksturo attālums no punkta A līdz taisnei, kas savieno riņķa līnijas punktus A_o (tukšgaita) un A_h (nobremzēts rotors), jo šajos punktos lietderīgā jauda ir vienāda ar nulli. Tāpēc

$$P_2 = m_P \overline{AP}_2. \quad (6.101)$$

Līniju $A_o A_h$ sauc par *lietderīgās jaudas līniju*.

Riņķa diagrammā attēlotas vēl šādas līnijas, kuras izmanto darba raksturliķņu noteikšanai: *tukšgaitas jaudas līnija* $A_o C$, *elektromagnētiskās jaudas līnija* $A_{oo} A_\infty$ un *mehāniskās jaudas līnija* $A_{oo} A_h$.

Izmantojot minētās līnijas, no riņķa diagrammas var noteikt elektromagnētisko jaudu

$$P_{em} = m_P \overline{AP}_{em}, \quad (6.102)$$

mehānisko jaudu

$$P_m = m_P \overline{AP}_m, \quad (6.103)$$

magnētiskos zudumus

$$\Delta P_{mg} = m_P \overline{P_{oo} P}_1, \quad (6.104)$$

elektriskos zudumus statora tinumā

$$\Delta P_{e1} = m_P \overline{P_{em} P_{oo}}, \quad (6.105)$$

elektriskos zudumus rotora tinumā

$$\Delta P_{e2} = m_P \overline{P}_m \overline{P}_{em}, \quad (6.106)$$

mehāniskos zudumus un papildzudumus

$$\Delta P_m + \Delta P_p = m_P \overline{P_2 P_m}. \quad (6.107)$$

Sakarības (6.102), ..., (6.107) var pamatot, izmantojot asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības (sk. izteiksmes (6.49), ..., (6.57) un 6.13. zīmējumā attēloto pretestību un strāvu diagrammu).

Tā kā saskaņā ar izteiksmi (6.61) $\Delta P_{e2} = s P_{em}$, no kurienes

$$s = \frac{\Delta P_{e2}}{P_{em}},$$

tad asinhronā dzinēja slīdi no riņķa diagrammas var noteikt, izmantojot attiecību

$$s = \frac{\overline{P_m P_{em}}}{A P_{em}}. \quad (6.108)$$

Lietderības koeficients no diagrammas

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\overline{A P_2}}{\overline{A P_1}}. \quad (6.109)$$

Elektromagnētiskā momenta noteikšanai var izmantot sakarību (6.63):

$$M = \frac{P_m}{\Omega}.$$

Tā kā $\Omega = (1-s)\Omega_1$, tad, ievērojot izteiksmi (6.62),

$$M = \frac{P_m}{(1-s)\Omega_1} = \frac{P_{em}}{\Omega_1}. \quad (6.110)$$

Ievietojot šajā izteiksmē P_{em} no izteiksmes (6.102), elektromagnētisko momentu no riņķa diagrammas var noteikt šādi:

$$M = \frac{m_P}{\Omega_1} \overline{A P_{em}} = m_M \overline{A P_{em}}, \quad (6.111)$$

kur $m_M = m_P / \Omega_1$ — momenta mērogs (N·m/cm).

Dzinēja palaišanas moments no diagrammas

$$M_p = m_M \overline{A_k M_k} \quad (6.112)$$

un maksimālais moments

$$M_{max} = m_M \overline{A_m M_m}, \quad (6.113)$$

kur punkts A_m ir pieskares, kas novilkta paralēli elektromagnētiskās jaudas līnijai, krustpunkts ar riņķa līniju.

6.4.4. Riņķa diagrammas konstruēšana pēc tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumu rezultātiem

Lai konstruētu riņķa diagrammu, jāzina riņķa līnijas divi punkti un tās centrs. Visvienkāršāk šos punktus var atrast pēc tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumu rezultātiem.

Tukšgaitas mēģinājumā nenoslogota dzinēja statora tinumam pievada spriegumu un izmēra dažādām šī sprieguma U_1 vērtībām atbilstošās tukšgaitas jaudas P_o un tukšgaitas strāvas I_o vērtības. Spriegumu maina $(0,5 \dots 1,1) U_{1N}$ robežās.

No iegūtajiem rezultātiem aprēķina jaudas koeficientu tukšgaitā:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{m_1 I_o U_1} \quad (6.114)$$

Lai izvairītos no gadījuma rakstura kļūdām, P_o , I_o un $\cos \varphi_o$ vērtības, kas atbilst nominālajam spriegumam, atrod no tukšgaitas raksturlīknēm $I_o = f(U_1)$; $P_o = f(U_1)$; $\cos \varphi_o = f(U_1)$. Vispārīga lietojuma asinhronajiem dzinējiem $I_o = (0,2 \dots 0,5) I_N$ un $\cos \varphi_o = 0,08 \dots 0,2$.

Reālās tukšgaitas režīmā $s \neq 0$, un tāpēc diagrammā jāatrod ideālās tukšgaitas punkts A_{oo} ($s=0$). Šim nolūkam nepieciešams sadalīt tukšgaitas zudumus.

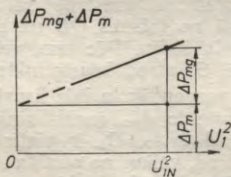
Reālās tukšgaitas režīmā zudumi

$$P_o = \Delta P_{mg} + \Delta P_m + m_1 I_o^2 R_1, \quad (6.115)$$

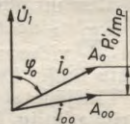
no kurienes jebkurai sprieguma U vērtībai atbilstošā magnētisko un mehānisko zudumu summa

$$\Delta P_{mg} + \Delta P_m = P_o - m_1 I_o^2 R_1. \quad (6.116)$$

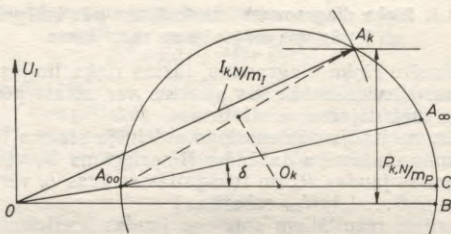
Tukšgaitas režīmā rotācijas frekvence praktiski nav atkarīga no sprieguma, tāpēc, mainot spriegumu U_1 , mehāniskie zudumi $\Delta P_m = \text{const}$, bet magnētiskie zudumi, tāpat kā transformatorā, proporcionāli sprieguma kvadrātam. Tāpēc, grafiski attēlojot sakarību $\Delta P_{mg} + \Delta P_m = f(U_1^2)$, iegūst taisni (6.15. zīm.). Turpinot šo taisni līdz ordinātu asi, vispirms atrod mehāniskos zudumus ΔP_m un pēc tam magnētiskos zudumus ΔP_{mg} , kas atbilst nominālajam spriegumam U_{1N} .



6.15. zīm. Asinhronā dzinēja mehānisko un magnētisko zudumu sadalīšana.



6.16. zīm. Ideālās tukšgaitas punkta noteikšana riņķa diagrammā.



6.17. zīm. Asinhronās mašīnas riņķa diagrammas konstruēšana.

Ideālās tukšgaitas punktu diagrammā nosaka šādi (6.16. zīm.). Leņķī φ_o attiecībā pret spriegumu U_1 atliek strāvas I_o vektoru un iegūst punktu A_o . No šī punkta jaudas mērogā vertikāli uz leju atliek lielumu $P'_o = \Delta P_m + m_1 I_o^2 R_1$ un iegūst ideālās tukšgaitas punktu A_{oo} .

Issléguma mēģinājumā dzinēja rotoru nobremzē, statora tinumam pievada pazeminātu spriegumu, izmēra issléguma jaudu P_k un statora strāvu I_1 . Sprieguma U_1 vērtību izvēlas tā, lai $I_1 \leq (1,0 \dots 1,2) I_N$.

Issléguma strāvu un jaudu, kas atbilst nominālajam spriegumam, aprēķina no šādām izteiksmēm:

$$I_{k,N} = \frac{U_{1N}}{U_1} I_1; \quad (6.117)$$

$$P_{k,N} = P_k \left(\frac{I_{k,N}}{I_1} \right)^2, \quad (6.118)$$

kur U_1 — dzinēja statoram pievadītais spriegums issléguma mēģinājumā;

I_1, P_k — strāva un jauda, kas noteiktas issléguma mēģinājumā ar samazinātu spriegumu $U_1 < U_{1N}$.

Issléguma punktu A_k riņķa diagrammā konstruē šādā secībā (6.17. zīm.). Vispirms jaudas mērogā no taisnes OB uz augšu atliek $P_{k,N}$ vērtību un novelk horizontālu līniju. Pēc tam, velkot loku ar rādiusu $I_{k,N}/m_I$ no centra punktā O , atrod krustpunktu A_k . No nogriežņa $\overline{A_{oo}A_k}$ viduspunkta, velkot perpendikulu līdz krustpunktam ar horizontālu līniju, kas vilkta no punkta A_{oo} , iegūst riņķa līnijas centru O_k . Tādējādi atrastie punkti A_{oo}, A_k, O_k ir pietiekami, lai konstruētu riņķa līniju. Punktu A_∞ atrod, velkot no punkta A_{oo} taisni leņķī δ attiecībā pret riņķa līnijas diametru. Šo leņķi var atrast no 6.13. zīmējumā attēlotajām strāvu un pretestību diagrammām:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{cR_1}{X'_k}. \quad (6.119)$$

6.5. TRĪSFĀZU ASINHRONO DZINĒJU PALAIŠANA

6.5.1. Palaišanas procesa vispārīgs raksturojums

Palaišanas procesam asinhrono dzinēju ekspluatācijā ir liela nozīme, jo no šī procesa norises atkarīgi ne tikai paša dzinēja, bet arī darbināmā mehānisma un barošanas tīkla darbības apstākļi.

Novērtējot asinhronā dzinēja palaišanas procesu, svarīgi ir šādi rādītāji: 1) palaišanas momenta attiecība pret nominālo momentu $k_p = M_p/M_N$; 2) palaišanas strāvas attiecība pret nominālo strāvu I_p/I_N ; 3) palaišanas ilgums; 4) enerģijas zudumi palaišanas laikā; 5) palaišanas vienkāršība; 6) palaišanas iekārtas izmaksas.

Vēlams, lai dzinēja palaišanas shēma un pats palaišanas process būtu vienkāršs un ekonomisks, dzinēja palaišanas moments — pietiekami liels, palaišanas strāva, palaišanas ilgums un enerģijas zudumi palaišanas laikā — iespējami mazi. Tomēr vienlaikus uzlabot visus minētos rādītājus nav iespējams, jo, piemēram, palaišanas strāvas samazināšana daudzos gadījumos ir saistīta ar palaišanas momenta samazināšanos. Tāpat arī dažādu palaišanas raksturojumu uzlabošana parasti palielina palaišanas iekārtas izmaksas. Tāpēc konkrētos apstākļos atkarībā no elektropiedziņas iekārtas darbības īpatnībām, no dzinēja tipa, barošanas tīkla jaudas un citiem faktoriem jāatrod optimālākais risinājums.

Aplūkosim vispirms svarīgākās sakarības, kas raksturo asinhronā dzinēja palaišanas procesu.

Ja neievēro tukšgaitas strāvu, tad $I_1 \approx I'_2$ un saskaņā ar izteiksmi (6.66)

$$I_1 \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{cR'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}} \quad (6.120)$$

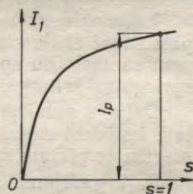
Strāvas I_1 atkarība no slīdes saskaņā ar izteiksmi (6.120) parādīta 6.18. zīmējumā.

Palaišanas strāvu iegūst, ievietojot izteiksmē (6.120) $s=1$:

$$I_p = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}} \quad (6.121)$$

jeb

$$I_p = \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}, \quad (6.122)$$



6.18. zīm. Asinhronā dzinēja statora strāvas atkarība no slīdes.

kur $R_k = R_1 + cR'_2$ un $X_k = X_1 + cX'_2$ — asinhronā dzinēja īsslēguma pretestības.

Palaišanas moments (sk. izteiksmi (6.79))

$$M_p = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{U_1^2 R'_2}{(R_1 + cR'_2)^2 + (X_1 + cX'_2)^2} = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{U_1^2 R'_2}{R_k^2 + X_k^2} \quad (6.123)$$

Lielumi I_p/I_N un $k_p = M_p/M_N$ tiešās palaišanas gadījumam doti asinhronā dzinēja pasē. Vispārīga lietojuma asinhronajiem dzinējiem ar īsslēgtu rotoru $I_p/I_N = 4,0 \dots 7,0$, $k_p = 0,7 \dots 1,8$.

6.5.2. Īsslēgtu asinhrono dzinēju palaišana

Tiešā palaišana. Asinhronos dzinējus ar īsslēgtu rotoru parasti palaiž, tieši pieslēdzot pilnam tikla spriegumam (6.19. zīm. a). Tiešā palaišana ir visvienkāršākais, ekonomiskākais un tāpēc visizplatītākais palaišanas paņēmieni. Bez tam šādu palaišanu var arī viegli automatizēt.

Tiešās palaišanas trūkums ir dzinēja lielā palaišanas strāva. Tā nav bīstama pašam dzinējam, jo palaišana parasti noris ļoti ātri, bet tikai ierobežo palaišanas biežumu. Palaišanas strāva tiklā rada sprieguma kritumu, un tāpēc visi tiklam pievienotie patērētāji īslaicīgi saņem samazinātu spriegumu. Tādējādi nominālā jauda īsslēgtam asinhronajam dzinējam, kuru tieši var pieslēgt tiklam, ir atkarīga no tikla, respektīvi, transformatoru apakšstacijas jaudas: jo tā lielāka, jo lielākas jaudas dzinēju drīkst pieslēgt tiklam tieši, neizraisot tajā lielu sprieguma pazemināšanos. Mūsdienu rūpniecības uzņēmumu lieljaudas tīkliem pieslēdz asinhronos dzinējus, kuru nominālā jauda ir vairāki simti kilovatu.

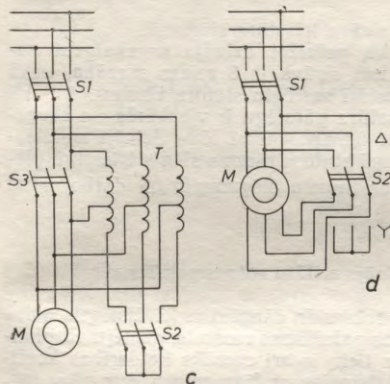
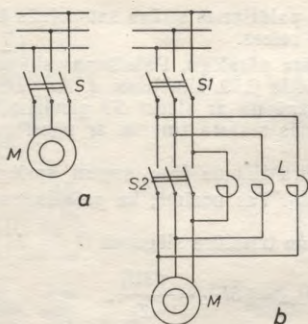
Dzinējiem, kurus nedrīkst tieši pieslēgt tiklam, ir jāsamazina palaišanas strāva. To panāk ar dažādām statora tinuma ķēdē ieslēgtām strāvu ierobežojošām ierīcēm: reaktoru (spoli ar tērauda serdi), auto-transformatoru, kā arī ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu vai ieslēdzot statora ķēdē reostatu. Tomēr palaišana ar reostatu statora ķēdē nav ekonomiska, jo lielām strāvām paredzētās aktīvās pretestības patērē ļoti daudz enerģijas.

Palaišana ar reaktoru. Reaktoru L īsslēgta asinhronā dzinēja palaišanai slēdz statora ķēdē (6.19. zīm. b). Tad statora tinums saņem samazinātu spriegumu, jo caurplūstošā strāva reaktorā rada sprieguma kritumu.

Dzinēju palaižot, vispirms ieslēdz slēdzi $S1$. Kad rotors iegriezies, tad, ieslēdzot slēdzi $S2$, reaktoru šuntē, un tādējādi statora tinums ir pievienots pilnam spriegumam.

Šajā gadījumā saskaņā ar izteiksmi (6.122) dzinēja palaišanas strāva

$$I_{p,L} = \frac{U_1}{\sqrt{R_k^2 + (X_k + X_L)^2}}, \quad (6.124)$$



6.19. zim. Shēmas išlēgto asinhiro dzinēju palaišanai:

a — tieši, b — ar reaktoru, c — ar autotransformatoru, d — ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu.

palaišanai parādīta 6.19. zīmējumā c. Palaišanas procesu realizē šādā secībā. Ieslēdzot slēdžus S1 un S2, dzinējs no autotransformatora saņem pazeminātu spriegumu. Kad rotors sasniedz noteiktu ātrumu, slēdzi S2 izslēdz un dzinējs barošanu saņem no autotransformatora tinuma daļas, kura šajā gadījumā darbojas kā reaktors. Pēc tam ieslēdz slēdzi S3, reizē ar to statora tinumu pievienojot pilnam spriegumam.

Palaišanas sākumā dzinēja statora tinums saņem spriegumu, kurš k (k — autotransformatora transformācijas koeficients) reizes mazāks

kur X_L — reaktora induktīvā pretestība. Tā ir daudzkārt lielāka par reaktora aktīvo pretestību ($X_L \gg \gg R_L$), kuru tāpēc var neievērot.

Tādējādi, palaižot dzinēju ar reaktoru, tā palaišanas strāva samazinās

$$\frac{I_p}{I_{p,L}} = \frac{\sqrt{R_k^2 + (X_k + X_L)^2}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (6.125)$$

reizes. Tikpat reizi samazinās spriegums uz dzinēja spaiļēm, bet palaišanas moments, kas ir proporcionāls sprieguma kvadrātam, salīdzinājumā ar tiešo palaišanu samazinās

$$\frac{M_p}{M_{p,L}} = \frac{R_k^2 + (X_k + X_L)^2}{R_k^2 + X_k^2} \quad (6.126)$$

reizes.

Aplūkotais palaišanas paņēmieni ar reaktoru ir ekonomisks, jo reaktora induktīvā pretestība aktīvo jaudu nepatērē.

Palaišana ar autotransformatoru. Trīsfāzu autotransformatora ieslēgšanas shēma asinchronā dzinēja

par tikla spriegumu. Sakarā ar to palaišanas strāva samazinās k reizes, bet palaišanas moments — k^2 reizes.

Palaišana ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu. Palaišanas shēma ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu parādīta 6.19. zīmējumā *d*. Ar pārslēgu *S2* statora tinumu savieno zvaigznē un ar slēdzi *S1* pievieno tikla spriegumam. Pēc rotora iegriešanās statora tinumu ar pārslēgu *S2* savieno trīsstūrī.

Zvaigznes slēgumā katra statora tinuma fāze saņem spriegumu $U_1/\sqrt{3}$, bet trīsstūra slēgumā — U_1 . Tas nozīmē, ka palaišanas moments samazinās 3 reizes.

Palaišanas strāvas zvaigznes un trīsstūra slēgumā

$$I_{D,Y} = \frac{U_1}{\sqrt{3}Z_h}, \quad I_{D,\Delta} = \sqrt{3}I_{t,\Delta} = \frac{\sqrt{3}U_1}{Z_h},$$

kur $Z_h = \sqrt{R_h^2 + X_h^2}$;

$I_{t,\Delta}$ — statora tinuma fāzes strāva trīsstūra slēgumā.

No izklāstītā var secināt, ka, palaižot dzinēju ar zvaigznē saslēgtu statora tinumu, palaišanas strāva ir 3 reizes mazāka, nekā palaižot to pašu dzinēju ar trīsstūrī saslēgtu statora tinumu.

Palaišana ar zvaigznes trīsstūra pārslēgu ir vienkārša un ekonomiska. Tomēr šo paņēmieni var izmantot tikai tādu dzinēju palaišanai, kuriem normālā darba režīmā statora tinums slēgts trīsstūrī, piemēram, ja 380/220 V dzinējs ar tinuma slēgumu Y/Δ darbojas no 220 V sprieguma tikla.

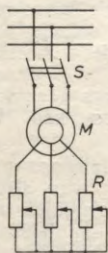
6.5.3. Asinhrono dzinēju ar fāzu rotoru palaišana

Asinhronie dzinēji ar fāzu rotoru ir dārgāki nekā īsslēgtie asinhronie dzinēji, tiem nepieciešams palaišanas reostats, dzinēju ekspluatācija komplicētāka. Bieži vien tiem ir arī zemāks lietderības koeficients un $\cos \varphi$. So iemeslu dēļ dzinējus ar fāzu rotoru lieto tikai tur, kur savu īpašību dēļ nav izmantojami īsslēgtie asinhronie dzinēji, t. i., smagiem palaišanas apstākļiem, kad nepieciešams liels palaišanas moments un nav pieļaujamas lielas palaišanas strāvas vai arī dzinēji jāpalaiž biežāk, nekā tas pieļaujams īsslēgtajiem dzinējiem.

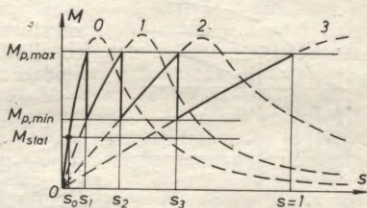
Asinhronajiem dzinējiem ar fāzu rotoru palaišanas strāvu samazina ar rotora ķēdē ieslēgtu papildpretestību — trīsfāzu palaišanas reostatu (6.20. zīm.). Palaišanas reostata katras fāzes pretestība ir sadalīta vairākās pakāpēs. Palaišanas reostats paredzēts īslaicīgam darba režīmam.

Ieslēdzot rotora ķēdē reostatu ar pretestību R_R , dzinēja palaišanas strāva samazinās, un saskaņā ar izteiksmi (6.122) palaišanas sākuma momentā tās vērtība

$$I_D = \frac{U_1}{\sqrt{(R_h + cR'_R)^2 + X_h^2}}, \quad (6.127)$$



6.20. zīm. Shēma asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru palaišanai.



6.21. zīm. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru momenta izmaiņa, palaižot to ar vairākpakāpju reostatu.

kur R'_R — palaišanas reostata fāzes pretestība, kas reducēta uz statora tinumu.

Ieslēdzot papildu reostatu rotora ķēdē, vienlaikus palielinās arī palaišanas moments, jo saskaņā ar izteiksmi (6.77) palielinās kritiskā slīde:

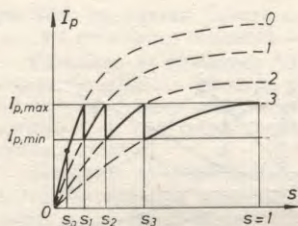
$$s_{cr} = \frac{c(R'_2 + R'_R)}{X_1 + cX'_2}, \quad (6.128)$$

t. i., momenta maksimums pārvietojas lielākās slīdes virzienā. Izvēloties noteiktu reostata pretestības R'_R vērtību, var panākt, ka palaišanas moments ir vienāds ar maksimālo momentu. Šo pretestības vērtību atrod no izteiksmes (6.128), ievietojot tajā $s_{cr} = 1$. Tad

$$R'_R = \frac{X_1 + cX'_2}{c} - R'_2. \quad (6.129)$$

Palaišanas reostata pakāpes aprēķina tā, lai palaišanas momenta vislielākā vērtība $M_{p,max}$ būtu vienāda vai nedaudz mazāka par dzinēja maksimālo momentu, bet lielāka par statisko pretestības momentu, t. i., $M_{stat} < M_{p,max} \leq M_{max}$ (6.21. zīm.). Bez tam arī minimālajam palaišanas momentam $M_{p,min}$ jābūt lielākam par statisko pretestības momentu ($M_{p,min} > M_{stat}$).

Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru palaišanas procesa norise, palaižot ar vairākpakāpju reostatu, paskaidrota 6.21. zīmējumā. Pirms dzinēja palaišanas iestata maksimālo reostata pretestību, kura nodrošina palaišanas momentu $M_{p,max}$. Statora tinumam pievienojot tīkla spriegumu, dzinējs sāk darboties mākslīgās raksturlieknes 3 režīmā un tā slīde samazinās. Kad griezes moments $M = M_{p,min}$ ($s = s_3$), izslēdz palaišanas reostata pirmo pakāpi. Tad dzinēja darbība pāriet mākslīgās raksturlieknes 2 režīmā un tā slīde turpina samazināties.



6.22. zīm. Asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru strāvas izmaiņa palaišanas procesa laikā.

bas atrod, ņemot par pamatu $M_{p,min}$ (minimāli pieļaujamo momentu) vai arī $I_{p,max}$ (maksimāli pieļaujamo palaišanas strāvu). So pretestību aprēķinu sīkāk apskata elektropiedziņas kursā.

6.5.4. Isslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturlīknēm

Iepriekš (sk. 6.2.6.) tika noskaidrots, ka asinhronajiem dzinējiem, lai sasniegtu augstu lietderības koeficientu, jāstrādā ar mazu slīdi ($s=0,02 \dots 0,06$), un tāpēc rotora aktīvajai pretestībai R_2 jābūt iespējami mazai. Bet dzinējam ar mazu rotora aktīvo pretestību ir arī mazs palaišanas moments, un tāpēc slogotu dzinēju nevar palaist. Lai panāktu pietiekami lielu palaišanas momentu, rotora aktīvā pretestība R_2 ir jāpalielina. Šim nolūkam nepieciešams izveidot tādus asinhronos dzinējus, kuriem rotora aktīvā pretestība palaišanas sākumā būtu liela, bet nominālā darba režīmā — maza. Sādas īpašības ir dziļrievu un dubultrievu rotoriem, kuros izmanto strāvas «izspiešanas» efektu.

Asinhronie dzinēji ar dziļrievu rotoru. Dziļrievu rotoram ir taisnstūrveida pusslēgtas rievas, kuru dziļums ir $8 \dots 10$ reizes lielāks par to platumu. Rievās ievietoti vara vai alumīnija stieņi, kuri rotora galos ar gredzeniem saslēgti īsi.

Statora tinumu pieslēdzot tīklam, inducētais EDS rotora stieņos uztur strāvas, un ap katru stieni izveidojas izkliedes lauks, kas noslēdzas šķērsām rievai (6.23. zīm. a). Stieņa daļa, kas atrodas rievas apakšā, saķēdēta ar ievērojami lielāku izkliedes plūsmu nekā rievas augšdaļā. Tāpēc stieņa apakšējiem slāņiem ir lielāka induktīvā pretestība, bet virzienā uz augšu tā samazinās, jo $X \sim L \sim \Psi/i$. Šī iemesla dēļ dzinēja palaišanas sākumā, kad $s=1$ un rotora frekvence $f_2=f_1$, induktīvā pretestība stieņa strāvu «sablīvē» tā augšdaļā (6.23. zīm. b likne 1). Līdz ar to stieņa augšdaļā strāvas blīvums j ir vislielākais un stieņa augšdaļas pilnā pretestība galvenokārt ir at-

Izslēdzot pēc kārtas palaišanas reostata pārējās pakāpes, dzinēja darbība pakāpeniski pāriet dabiskās raksturlīknes 0 režīmā ($R_R=0$), un rezultātā dzinēja rotors sasniedz slodzei atbilstošo slīdi s_0 , kad $M=M_{stat}$.

Strāvas izmaiņu palaišanas procesa laikā (6.22. zīm.) var atrast no izteiksmes (6.120), aizstājot tajā R'_2 ar $R'_2+R'_R$ (R'_R — palaišanas reostata reducētā pretestība, kas atbilst dažādām palaišanas reostata pakāpēm).

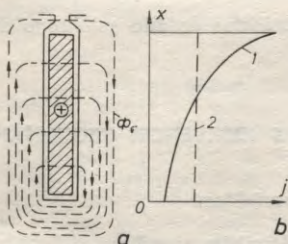
Palaišanas reostata pakāpju skaitu un atsevišķo pretestību vērtības atrod, ņemot par pamatu $M_{p,min}$ (minimāli pieļaujamo momentu) vai arī $I_{p,max}$ (maksimāli pieļaujamo palaišanas strāvu). So pretestību aprēķinu sīkāk apskata elektropiedziņas kursā.

karīga no aktīvās pretestības. Tādējādi, dzinēju palaižot, strāvas «izspiešanas» rezultātā rotora stieņu šķērsgriezums ir izmantots nepilnīgi un šāda parādība ir līdzvērtīga rotora aktīvās pretestības palielinājumam. Bet palielināta rotora aktīvā pretestība rada tādu pašu efektu kā rotora ķēdē ieslēgts palaišanas reostats: palaišanas moments palielinās, bet palaišanas strāva samazinās. Rotora rotācijas frekvencei palielinoties, strāvas frekvence rotorā samazinās un reizē ar to samazinās stieņu induktīvā pretestība. Ja rotora rotācijas frekvence ir tuva nominālajai, tad rotora strāvas frekvence ir ļoti maza (1...3 Hz), un tāpēc stieņu apakšējo slāņu induktīvā pretestība ir visai niecīga. Tā rezultātā strāva stieņa šķērsgriezumā sadalās gandrīz vienmērīgi (6.23. zīm. *b* svītrlinija 2), un stieņa aktīvā pretestība ir maza.

Asinhronajiem dzinējiem ar dziļrievu rotoru parasti $M_p/M_N = 1,0 \dots 1,4$ un $I_p/I_N = 3,5 \dots 6,0$.

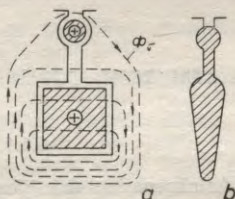
Asinhronie dzinēji ar dubultrievu rotoru. Lai vēl vairāk uzlabotu palaišanas parametrus, lieto asinhronos dzinējus ar dubultrievu rotoru. Dubultrievu rotora katrā rievā ievietoti divi stieņi (6.24. zīm. *a*). Rievu augšdaļā novietotie stieņi ir ar mazāku šķērsgriezumu un izgatavoti no materiāla ar samērā lielu īpatnējo pretestību (misiņš vai bronza). Stieņi, kas atrodas rievas apakšdaļā, ir izgatavoti no vara, un tiem ir lielāks šķērsgriezums nekā augšējiem stieņiem. Tāpēc augšējo stieņu aktīvā pretestība ir ievērojami lielāka nekā apakšējiem stieņiem. Abu stieņu rindu gali saslēgti īsi ar gredzeniem, tā izveidojot divus koncentriskus neatkarīgus «vāveres rātus». Lieto arī viengabala lietus alumīnija stieņus (6.24. zīm. *b*) ar mazu augšējo un lielāku apakšējo šķērsgriezumu.

Katras stieņu sistēmas induktīvā pretestība ir atkarīga no izkliedes plūsmas, kas saķēdēta ar šiem stieņiem. Dzinēja palaišanas sākumā apakšējiem stieņiem ir relatīvi liela induktīvā pretestība, un



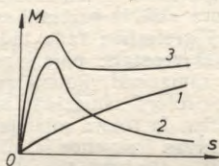
6.23. zīm. Strāvas sablīvēšanās dziļrievu rotora stieņos:

a — rievas izkliedes magnētiskais lauks, *b* — strāvas blīvuma sadalījums pa rievas augstumu.

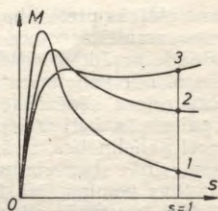


6.24. zīm. Dubultrievu rotora rievu formas:

a — ar diviem stieņiem rotora rievā, *b* — ar viengabala lietū alumīnija stienī.



6.25. zim. Dubultrievu asinhronā dzinēja momenta atkarība no slīdes.



6.26. zim. Momentu atkarība no slīdes asinhronajiem dzinējiem:

1 — ar parastā tipa īsslēgtu rotoru, 2 — ar dziļtrievu rotoru, 3 — ar dubultrievu rotoru.

tāpēc strāva plūst galvenokārt tikai augšējos jeb palaišanas stieņos, kuriem ir liela aktīvā un maza inductīvā pretestība. Rotoram iegriežoties, strāvas frekvence tajā samazinās un reizē ar to samazinās abu «vāveres ratu» inductīvās pretestības. Ja dzinēja rotācijas frekvence tuva nominālajai, stieņu pilnās pretestības praktiski vienādas ar to aktīvajām pretestībām. Tā kā strāvas stieņos sadalās apgriezti proporcionāli to pretestībām, tad nomināli slēgtā dubultrievu dzinējā rotora strāva plūst galvenokārt tikai apakšējos stieņos jeb darba stieņos.

6.25. zīmējumā attēlota dubultrievu dzinēja momenta raksturlikne (likne 3), kuru var uzskatīt par divu īsslēgtu dzinēju rezultējošo raksturlikni: likne 1 atbilst dzinējam ar lielu rotora aktīvo pretestību (palaišanas stieņi) un likne 2 — dzinējam ar mazu rotora aktīvo pretestību (darba stieņi).

Asinhronajiem dzinējiem ar dubultrievu rotoru parasti $M_p/M_N = 1,2 \dots 2,0$ un $I_p/I_N = 4,0 \dots 6,0$.

6.26. zīmējumā salīdzinājumam parādītas dažādu asinhrono dzinēju momenta raksturliknes.

6.6. ASINHRONO DZINĒJU ROTĀCIJAS FREKVENCES REGULĒŠANA

6.6.1. Vispārīgi norādījumi

Asinhronajiem dzinējiem bez priekšrocībām piemīt arī būtisks trūkums — ierobežotas rotācijas frekvences regulēšanas iespējas salīdzinājumā ar līdzstrāvas dzinējiem.

Asinhronā dzinēja rotora rotācijas frekvence (sk. izteiksmi (6.4))

$$n = n_1(1 - s), \quad (6.130)$$

kur sinhronā rotācijas frekvence (rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvence)

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (6.131)$$

No izteiksmēm (6.130) un (6.131) izriet, ka asinhrono dzinēju rotācijas frekvenci var regulēt divējādi: 1) mainot rotējošā magnētiskā lauka rotācijas frekvenci n_1 , ko panāk ar frekvences f_1 vai polu pāru skaita izmaiņu; 2) mainot rotora slīdi, ja $n_1 = \text{const}$.

6.6.2. Isslēgtu asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana

Rotācijas frekvences regulēšana, izmainot statora tinumam pievadītā sprieguma frekvenci. Ja regulē rotācijas frekvenci, izmainot frekvenci, nepieciešamas speciālas ierīces — frekvences pārveidotāji. No frekvences pārveidotājiem visperspektīvākie ir pusvadītāju (tiristoru) pārveidotāji, jo tiem ir augsts lietderības koeficients, mazi izmēri un ar tiem iespējams rotācijas frekvenci regulēt nepārtraukti un plašā diapazonā (līdz 10:1 un vairāk). Tomēr šādu pārveidotāju shēmas ir komplicētas, un tām nepieciešama kvalificēta apkalpošana. Bez tam ar tiristoru frekvences pārveidotājiem nevar nodrošināt sinusoidālu spriegumu, un tāpēc jaudas zudumi dzinējā, izmantojot šādus pārveidotājus, palielinās. Rotācijas frekvences regulēšanai izmanto arī elektromāšīnu frekvences pārveidotājus, tomēr tie ekonomiski sevi attaisno tikai tad, ja rotācijas frekvence vienlaikus jāregulē lielai dzinēju grupai, kuri strādā vienā režīmā, piemēram, tekstilrūpniecībā, velmēšanas iekārtās.

Sakarā ar pusvadītāju pārveidotāju attīstību asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanu, izmainot frekvenci, izmanto arvien plašāk.

Mainot frekvenci, ir jāievēro, ka vienlaikus mainās arī dzinēja magnētiskā plūsma Φ , jo

$$U_1 \approx E_1 = 4,44f_1\omega_1 k_{w1}\Phi. \quad (6.132)$$

Tas nozīmē, ka, samazinot frekvenci, ja $U_1 = \text{const}$, magnētiskā plūsma palielinās, bet, palielinot frekvenci, tā samazinās.

Ievērojama plūsmas palielināšana nav pieļaujama, jo, magnētiskajai plūsmai pārsniedzot nominālā režīma vērtību, magnētiskā sistēma piesātinās un strauji palielinās magnetizēšanas strāva. Arī plūsmas samazināšanās, ja tā ir saistīta ar frekvences palielināšanu, nav vēlama, jo tad samazinās dzinēja pārslodzes spēja. Tāpēc gandrīz vienmēr ir lietderīgi rotācijas frekvenci regulēt tā, lai $\Phi = \text{const}$. To panāk, ja, mainot frekvenci, vienlaikus regulē arī spriegumu U_1 tā, lai

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const}. \quad (6.133)$$

Asinhronā dzinēja maksimālo momentu nosaka šāda aptuvena sakarība (sk. izteiksmi (6.78)):

$$M_{max} = \frac{\rho m_1 U_1^2}{2\omega_1 c (X_1 + cX'_2)} \quad (6.134)$$

Tā kā $\omega_1 = 2\pi f_1$ un $X \sim f_1$, tad

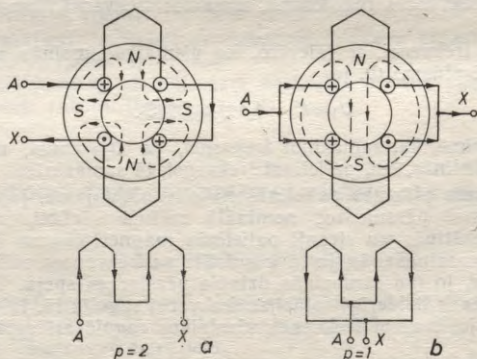
$$M_{max} \sim \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (6.135)$$

Tādējādi, ja frekvenci regulē, ievērojot nosacījumu (6.133), dzinēja maksimālais moments, respektīvi, pārslodzes spēja, nemainās.

Rotācijas frekvences regulēšana, mainot polu pāru skaitu. Šim nolūkam asinhronā dzinēja statora tinumu izveido tā, lai šādu izmaiņu varētu realizēt, pārslēdzot spoļu grupas, vai arī statorā izveido divus atsevišķus tinumus, kuriem atbilst dažāds polu pāru skaits. Asinhronos dzinējus ar maināmu polu skaitu sauc par *daudzātrumu dzinējiem*, un tos izgatavo 2, 3 vai 4 dažādām rotācijas frekvencēm.

Daudzātrumu dzinējus izgatavo tikai ar išslēgtu rotoru, jo išslēgta rotora polu skaits vienmēr atbilst statora polu skaitam. Dzinējiem ar fāzu rotoru būtu jāmaina arī polu skaits rotorā, kas ļoti sarežģītu pārslēgšanas aparāturu un paša dzinēja konstrukciju.

Divātrumu dzinēja statora tinuma polu pāru skaita izmaiņš principā vienai fāzei parādīts 6.27. zīmējumā. Statora fāzes tinums sastāv no divām vienādām daļām, kuras saslēdzot virknē (6.27. zīm. a) izveidojas 4 poli, bet, saslēdzot paralēli, — 2 poli. Tādējādi sinhrono rotācijas frekvenci iespējams izmainīt attiecībā 1:2.



6.27. zīm. Statora tinuma pārslēgšana no četriem poliem (a) uz diviem poliem (b).

Trīsātrumu dzinējam ir divi neatkarīgi tinumi, no kuriem viens ir parastais (vienam ātrumam), bet otrs sekcionēts (diviem ātrumiem). Cetrātrumu dzinējā ir divi neatkarīgi sekcionēti tinumi, kurus attiecīgi savienojot, var iegūt, piemēram, šādas sinhronās rotācijas frekvences n_1 : 1500; 1000; 750; 500 min^{-1} .

Daudzātrumu dzinēju katrai ātruma pakāpei ir savi nominālie dati, kuri norādīti dzinēja pasē.

Rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni, mainot polu pāru skaitu, ir ļoti vienkāršs un ekonomisks, jo regulēšana nav saistīta ar papildu zudumiem. Tomēr daudzātrumu dzinēji ir dārgāki, tiem komplicētāka vadības aparātūra un lielāki izmēri nekā parastajiem išslēgtajiem dzinējiem, pie tam rotācijas frekvenci var regulēt tikai lēcienveidīgi.

Daudzātrumu dzinējus izmanto tur, kur pieļauj rotācijas frekvences lēcienveida regulēšanu, piemēram, ventilatoru, sūkņu, elevatoru, metālgriešanas mašīnu piedziņai. Šajos gadījumos daudzātrumu dzinēji daļēji vai pilnīgi aizstāj reduktoru.

Visas tinumu shēmas ar pārslēdzamu polu pāru skaitu nosacīti var iedalīt divās grupās: shēmas ar konstantu momentu un shēmas ar konstantu jaudu.

Aplūkosim sīkāk praksē visbiežāk izmantojamās shēmas.

Tinumu pārslēgšanas shēma ar konstantu momentu parādīta 6.28. zīmējumā. Ja tīkla spriegums U_1 paliek nemainīgs, tad, pieņemot, ka lietderības koeficients η un $\cos \varphi$, pārslēdzot tinumu no zvaigznes (Υ) dubultzvaigznē ($\Upsilon \Upsilon$), neizmainās, dzinēja mehāniskā jauda uz vārpstas

$$P = 3U_1 I_1 \eta \cos \varphi, \quad (6.136)$$

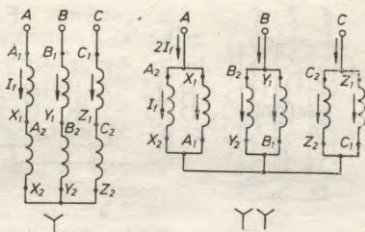
$$P = 3U_1 2I_1 \eta \cos \varphi. \quad (6.137)$$

No šīm izteiksmēm izriet, ka $P/P = 2$. Bet, tā kā rotācijas frekvence arī palielinās divkārt, tad griezes moments paliek nemainīgs.

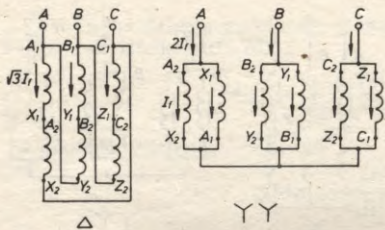
Tinumu pārslēgšanas shēmā ar konstantu jaudu (6.29. zīm.) tinumu no trīsstūra (Δ) pārslēdz dubultzvaigznē ($\Upsilon \Upsilon$). Tad

$$P_{\Delta} = 3U_1 \sqrt{3} I_1 \eta \cos \varphi, \quad (6.138)$$

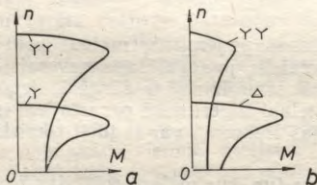
$$P = 3U_1 2I_1 \eta \cos \varphi, \quad (6.139)$$



6.28. zīm. Statora tinumu pārslēgšanas shēma ar konstantu momentu.



6.29. zim. Statora tinuma pārslēgšanas shēma ar konstantu jaudu.



6.30. zim. Asinhronā dzinēja mehāniskās raksturlieknes dažādām pārslēgšanas shēmām:

a — ar konstantu momentu, *b* — ar konstantu jaudu.

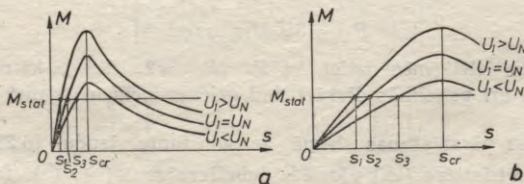
nepieciešams, lai rotora tinumam būtu palielināta aktīvā pretestība (6.31. zim. *b*). Tomēr tad saskaņā ar izteiksmi (6.61) palielinās rotora elektriskie zudumi un silšana un samazinās lietderības koeficients. Minēto trūkumu dēļ un arī tāpēc, ka nepieciešama iekārta sprieguma regulēšanai, šādu rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni lieto tikai mazjaudas dzinējiem. Sprieguma regulēšanai var

no kurienes $P/P_{\Delta} = 2/\sqrt{3} = 1,15$, t. i., jauda praktiski neizmainās, un tātad mainās dzinēja griezes moments.

Mehāniskās raksturlieknes dzinējiem ar pārslēdzamu polu skaitu parādītas 6.30. zīmējumā.

Rotācijas frekvences regulēšana, mainot spriegumu. Tā kā asinhronā dzinēja griezes moments ir proporcionāls sprieguma kvadrātam ($M \sim U_1^2$), tad, samazinot spriegumu, izmainās arī raksturlieknes $M=f(s)$ veids (6.31. zim.).

Ja statistiskais pretestības moments M_{stat} ir nemainīgs, tad dažādiem spriegumiem atbilst dažādas slīdes vērtības. No 6.31. zīmējuma redzams, ka slīdi iespējams regulēt nelielā diapazonā, t. i., $s_1 < s < s_{cr}$. Regulēšanas diapazona paplašināšanai



6.31. zim. Momenta raksturlieknes asinhronajam dzinējam ar normālu (*a*) un palielinātu (*b*) rotora aktīvo pretestību, ja rotācijas frekvenci regulē, izmainot pievadīto spriegumu.

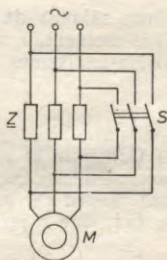
izmantot autotransformatoru, kā arī regulējamu aktīvu vai induktīvu pretestību statora ķēdē.

Rotācijas frekvences regulēšana, mainot spriegumu, ir izmantojama arī dzinējiem ar fāzu rotoru. Šajā gadījumā rotora ķēdē parasti slēdz papildu reostatu.

Rotācijas frekvences regulēšana ar impulsa metodi. Principiālā shēma rotācijas frekvences regulēšanai ar impulsa metodi parādīta 6.32. zīmējumā. Šādu regulēšanu realizē, dzinējam periodiski pieslēdzot un atslēdzot spriegumu vai periodiski šuntējot pretestību, kura ieslēgta statora ķēdē. Sūntēšanai var izmantot kontaktorus, tomēr daudz efektīvāki ir tiristoru bezkontaktu slēdži. Asinhronajiem dzinējiem ar fāzu rotoru impulsa metodi var realizēt, periodiski pārtraucot un saslēdzot rotora ķēdi.

Rotācijas frekvences regulēšanas impulsa metodes būtība ir tāda, ka dzinējā nepārtraukti noris pārejas process. Tā, piemēram, ieslēgtā slēdža S stāvoklī dzinēja rotācijas frekvence palielinās, bet izslēgtā stāvoklī samazinās. Tādējādi atkarībā no impulsu garuma un biežuma (frekvences) dzinēja rotors griežas ar noteiktu nemainīgu vidējo rotācijas frekvenci.

Rotācijas frekvences regulēšanu ar impulsa metodi sīkāk aplūko elektriskās piedziņas kursā.



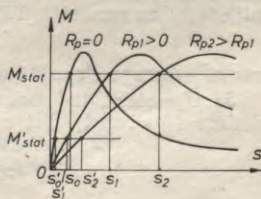
6.32. zim. Principiālā shēma rotācijas frekvences regulēšanai ar impulsa metodi.

6.6.3. Asinhrono dzinēju ar fāzu rotoru rotācijas frekvences regulēšana

Asinhronajiem dzinējiem ar fāzu rotoru var izmantot visus tos pašus rotācijas frekvences regulēšanas paņēmienus, kurus lieto dzinējiem ar īsslēgtu rotoru. Tomēr praksē šos paņēmienus iepriekš minēto dažādo trūkumu dēļ dzinējiem ar fāzu rotoru lieto ļoti reti. Šeit aplūkosim rotācijas frekvences regulēšanas paņēmienus, kurus lieto tikai dzinējiem ar fāzu rotoru.

Rotācijas frekvences regulēšana, mainot rotora ķēdes aktīvo pretestību. Rotācijas frekvenci var regulēt ar rotora ķēdē ieslēgtu trīsfāzu regulēšanas reostatu (sk. 6.20. zīm.), tikai reostats šajā gadījumā jāparedz ilgstošam darba režīmam. Regulēšanas princips paskaidrots 6.33. zīmējumā.

Palielinot rotora ķēdes aktīvo pretestību, kā zināms, momenta rakstur-



6.33. zim. Asinhronā dzinēja momenta raksturlieknes, ja rotācijas frekvenci regulē, izmaiņot rotora ķēdes aktīvo pretestību.

liknes sākuma daļa kļūst lēzenāka un noteiktam statistiskajam pretestības momentam atbilstošā slide izmainās.

No izteiksmes (6.65) var atrast, ka

$$s = \frac{pm_1}{\omega_1} \frac{I_2'^2}{M} R_2'. \quad (6.140)$$

Dzinējam ar nemainīgu statisko pretestības momentu $M_{stat} = M = \text{const}$, mainoties rotora ķēdes pretestībai, rotora strāva I_2 mainās maz. Tāpēc var uzskatīt, ka izteiksmē (6.140) lielums $I_2'^2/M \approx \text{const}$, un tad slide ir proporcionāla rotora ķēdes aktīvajai pretestībai:

$$\frac{s_1}{s} = \frac{R_2' + R_p'}{R_2'} = \frac{R_2 + R_p}{R_2}, \quad (6.141)$$

kur s_1 un s — slides vērtības, kas atbilst rotora pretestībām $R_2 + R_p$ un R_2 .

No izteiksmes (6.141) var atrast rotora ķēdē ieslēdzamās pretestības vērtību, kura nodrošina slīdi s_1 :

$$R_p = R_2 \left(\frac{s_1}{s} - 1 \right). \quad (6.142)$$

Kaut gan aplūkotais rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieni ir vienkāršs un dod iespēju rotācijas frekvenci regulēt plašā diapazonā, tomēr tas ir ļoti neekonomisks, jo saskaņā ar izteiksmi (6.61) jaudas zudumi rotora ķēdē ir proporcionāli slīdei. Ja, piemēram, ar regulēšanas reostatu rotācijas frekvenci samazina divas reizes, tad rotora ķēdē zudumu veidā izdalās gandrīz puse no statoram pievadītās jaudas. Tāpēc šo paņēmieni lieto tikai īslaicīgai rotācijas frekvences regulēšanai, piemēram, celtnu un transporta mehānismu piedziņai. Jāatzīmē vēl arī tas, ka rotācijas frekvences regulēšanas diapazons ir atkarīgs no dzinēja slodzes: jo mazāks slodzes moments, respektīvi, slide, jo šaurāks regulēšanas diapazons (sk. 6.33. zīm.).

Rotācijas frekvences regulēšana ar papildu EDS rotora ķēdē. Saskaņā ar asinhronā dzinēja darbības principu tā elektromagnētiskais moments rodas rotora strāvas I_2 un magnētiskās plūsmas Φ mijiedarbības rezultātā. Tāpēc

$$M = c_M I_2 \Phi, \quad (6.143)$$

kur c_M — proporcionalitātes koeficients.

Ja $U_1 = \text{const}$, tad magnētiskā plūsma praktiski nav atkarīga no slodzes ($\Phi \approx \text{const}$), bet saskaņā ar izteiksmi (6.12) rotora strāva

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}}. \quad (6.144)$$

Dzinēja normālā darba režīmā slide ir neliela ($0 < s < s_{cr}$). Tāpēc $R_2^2 \gg (sX_2)^2$ un var pieņemt, ka $(sX_2)^2 \approx 0$. Tad no izteiksmes (6.144)

$$I_2 = \frac{sE_2}{R_2}. \quad (6.145)$$

Pievadot rotora ķēdei papildu EDS $\pm \Delta E$, rotora strāva

$$I_2 = \frac{s_1 E_2 \pm \Delta E}{R_2}, \quad (6.146)$$

kur s_1 — rotora slide pēc ΔE pievadīšanas.

Ja regulēšanas laikā statiskais pretestības moments uz vārpstas nemainās, tad arī rotora strāva praktiski ir nemainīga, jo, tā kā $\Phi \approx \text{const}$, tad saskaņā ar izteiksmi (6.143) $M_{stat} = M \sim I_2$. Tāpēc no izteiksmēm (6.145) un (6.146) izriet, ka

$$sE_2 = s_1 E_2 \pm \Delta E,$$

no kurienes

$$s_1 = s \mp \frac{\Delta E}{E_2}. \quad (6.147)$$

Tas nozīmē, ka, pievadot rotora ķēdei papildu EDS ΔE , kurš sakrīt fāzē ar E_2 , rotora slide samazinās (rotācijas frekvence palielinās), bet, pievadot ΔE , kurš ir pretējā fāzē attiecībā pret E_2 , slide palielinās (rotācijas frekvence samazinās).

Jāatzīmē, ka, regulējot rotācijas frekvenci ar papildu EDS rotora ķēdē, jaudas zudumi un lietderības koeficients praktiski neizmainās, kas ir viena no šāda regulēšanas paņēmiena priekšrocībām.

Tomēr, neraugoties uz aplūkojamā ātruma regulēšanas paņēmiena šķietamo vienkāršību un ekonomiskumu, tā praktiska realizācija ir diezgan sarežģīta, jo EDS ΔE frekvencei ir jābūt tādai pašai kā E_2 frekvencei. Bet, tā kā rotora frekvence ir atkarīga no slodzes, respektīvi, slides, tad rotora barošanai nepieciešamas speciālas iekārtas, kuras automātiski nodrošina jebkurai slodzei atbilstošu ΔE frekvenci. Šim nolūkam izmanto trīsfāzu maiņstrāvas kolektormašīnas (sk. 8.2.3.), kā arī dažādas elektrisko mašīnu kaskādes ar vienkura pārveidotājiem, maiņstrāvas kolektormašīnām, sinhronajām mašīnām, jonu vai pusvadītāju pārveidotājiem. Šādas elektrisko mašīnu kaskādes sīkāk aplūko elektriskās piedziņas kursā.

6.7. ASINHRONO MAŠĪNU SPECIĀLI DARBA REŽĪMI

6.7.1. Asinhrono dzinēju darbība apstākļos, kas atšķiras no nominālajiem

Darbība ar paaugstinātu un pazeminātu frekvenci. Asinhrono dzinēju ekspluatācijā var būt gadījumi, kad barojošā tikla frekvence atšķiras no nominālās. Tas novērojams mazjaudas autonomās elektroapgādes sistēmās, kā arī barojot asinhronos dzinējus no dažādiem frekvences pārveidotājiem.

Noskaidrosim frekvences izmaiņas ietekmi uz asinhronā dzinēja darbību, pieņemot, ka $U_1 = U_{1N} = \text{const}$, $M = M_{stat} = \text{const}$.

Ja neievēro nelielo sprieguma kritumu statora tinumā, tad

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 k_{\omega_1} \Phi, \quad (6.148)$$

no kurienes var secināt, ka, mainot frekvenci, izmainās arī magnētiskā plūsma Φ . Bet, tā kā saskaņā ar izteiksmi (6.143)

$$M \sim I_2 \Phi, \quad (6.149)$$

tad plūsmas izmaiņa izraisa arī rotora strāvas I_2 un ar to saistītās statora strāvas izmaiņu.

Tā kā normālā režīmā asinhronā dzinēja magnētiskā sistēma ir piesātināta, tad frekvences samazināšana un tai atbilstošā plūsmas palielināšanās izraisa ievērojamu magnetizēšanas strāvas pieaugumu. Līdz ar to palielinās statora strāva un zudumi un samazinās dzinēja $\cos \varphi$.

Palielinot frekvenci, magnētiskā plūsma samazinās, bet tad saskaņā ar sakarību (6.149) pieaug rotora strāva I_2 un arī statora strāva I_1 .

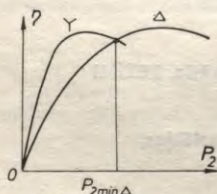
No teiktā var secināt, ka frekvences samazināšana, tāpat kā palielināšana, asinhronajiem dzinējiem nav vēlama, jo dzinēja enerģētiskie raksturojumi pasliktinās.

Teiktais pilnīgi attiecas tikai uz dzinējiem, ja tie strādā ar slodzi, kas tuva nominālajai. Nepilnīgi slogotiem dzinējiem frekvences izmaiņas ietekme nav tik ievērojama un dažos gadījumos šāda izmaiņa var pat uzlabot dzinēja enerģētiskos raksturojumus.

Darbība ar paagstinātu un pazeminātu spriegumu. Ja, izmainoties spriegumam, $f_1 = f_{1N} = \text{const}$, tad saskaņā ar izteiksmi (6.148) tas izraisa tādas pašas parādības kā frekvences izmaiņa. Tikai šajā gadījumā, spriegumam samazinoties, samazinās arī magnētiskā plūsma, un otrādi. Tas nozīmē, ka asinhronajiem dzinējiem, strādājot ar slodzi, kas tuva nominālajai, sprieguma samazināšana vai palielināšana arī nelabvēlīgi ietekmē tā darba raksturlieknes.

Ja turpretī dzinējs ir nepilnīgi slogots ($P_2 = (0,3 \dots 0,5) P_N$), tad

sprieguma samazināšana tā enerģētiskos raksturojumus var uzlabot. Šāda īpatnība izskaidrojama ar to, ka magnētiskās plūsmas samazināšanās dēļ strauji samazinās magnetizēšanas strāva un tāpēc uzlabojas dzinēja $\cos \varphi$. Bez tam, pazeminot spriegumu, samazinās arī magnētiskie zudumi, kuri proporcionāli U_1^2 (sk. 6.4.4.). Kaut gan, ja $M = \text{const}$, sprieguma samazināšana izraisa rotora strāvas I_2 palielināšanos, tomēr sakarā ar dzinēja nepilnīgu noslodzi šī strāva var arī nesasniegt nominālā režīma vērtību. Minēto iemeslu dēļ nepilnīgi slogotam asinhronajam dzinējam, barojot to ar samazinātu spriegumu, lietderības koeficients var palielināties.



6.34. *zim.* Asinhronā dzinēja lietderības koeficienta atkarība no slīdes dažādiem statora tinuma slēgumiem.

Ekspluatācijas apstākļos dažādu iemeslu dēļ asinhronie dzinēji var būt maz noslogoti. Ja šādiem dzinējiem statora tinums normāli ir slēgts trīsstūrī, tad lietderības koeficienta un $\cos \varphi$ uzlabošanai var būt lietderīga tinuma pārslēgšana zvaigznē. Tad fāzes spriegums un reizē ar to magnētiskā plūsma samazinās $\sqrt{3}$ reizes, magnetizēšanas strāva — 2...2,5 reizes, bet rotora strāva palielinās 3 reizes.

Slodzi $P_{2min \Delta}$, ar kuru darbojoties statora tinumu lietderīgi pārslēgt no trīsstūra zvaigznē, var atrast no raksturliķnēm $\eta = f(P_2)$ (6.34. zīm.). Šis raksturliķnes var iegūt eksperimentāli vai aprēķinot.

6.7.2. Asinhronā mašīna ar nobremzētu rotoru

Indukcijas regulators. Trīsfāžu asinhrono mašīnu ar nobremzētu fāžu rotoru var lietot sprieguma regulēšanai, t. i., to var izmantot par autotransformatoru, kura sekundāro spriegumu U_2 var nepārtraukti mainīt noteiktās robežās. Šim nolūkam asinhronās mašīnas statora un rotora tinumus saslēdz tā, kā tas parādīts 6.35. zīmējumā. Šādi tiklam pieslēgto asinhrono mašīnu ar nobremzētu rotoru sauc par indukcijas regulatoru jeb pagriežamo autotransformatoru, jo mašīnas statora un rotora tinumi veido autotransformatora slēguma shēmu: rotora tinums ir primārais tinums, bet statora un rotora tinumi kopā veido sekundāro ķēdi, kurai pievienots patērētājs — slozdes pretestība Z_{sl} .

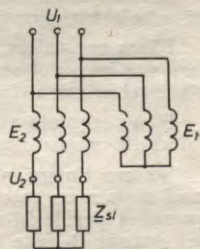
Indukcijas regulatora rotora tinumā plūstošā trīsfāžu strāva rada rotējošu magnētisko lauku, kas statora un rotora tinumos inducē EDS E_2 un E_1 , pie tam šo EDS skaitliskās vērtības nav atkarīgas no rotora stāvokļa attiecībā pret statoru.

Tā kā statora tinums ir ieslēgts starp tīklu un patērētāju, tad, neņemot vērā nelielos sprieguma kritumus statora un rotora tinumos, $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ un sekundārais spriegums \dot{U}_2 ir tīkla sprieguma \dot{U}_1 un statora tinumā inducētā EDS \dot{E}_2 geometriskā summa:

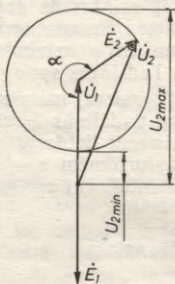
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2. \quad (6.150)$$

Indukcijas regulatora rotoru pagriežot, mainās rotora un statora tinumu savstarpējais stāvoklis un reizē ar to fāžu nobīde starp spriegumu \dot{U}_1 un EDS \dot{E}_2 .

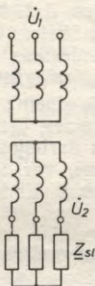
Indukcijas regulatora vektoru diagramma vienai fāzei parādīta 6.36. zīmējumā. No zīmējuma redzams, ka, pagriežot rotoru par leņķi α (šeit α izteikts elektriskajos grādos), atbilstoši pagriežas vektors \dot{E}_2 , pie tam, leņķim α mainoties no 0 līdz 360 grādiem, vektora \dot{E}_2 galapunkts apraksta aploci. Tāpēc, griežot rotoru, sekundāro spriegumu var mainīt nepārtraukti no maksimālās vērtības $U_{2max} = U_1 + E_2$ līdz minimālajai vērtībai $U_{2min} = U_1 - E_2$. Ja asinhronās mašīnas



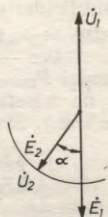
6.35. zīm. Indukcijas regulatora shēma.



6.36. *zim.* Indukcijas regulatora sprieguma vektoru diagramma.



6.37. *zim.* Fāzes regulatora shēma.



6.38. *zim.* Fāzes regulatora vektoru diagramma.

sprieguma transformācijas koeficients $k_V = 1$, tad spriegumu U_2 var regulēt no 0 līdz $2U_1$.

Indukcijas regulatora rotora pagriešanai izmanto gliemežpār vadu, kas vienlaikus arī nobremzē rotoru.

Aplūkotajā indukcijas regulatorā mainās ne tikai sekundārā sprieguma skaitliskā vērtība, bet arī tā fāze. Bez tam uz rotora nobremzēšanas ierīci darbojas samērā liels griezes moments. Minētos trūkumus var novērst, ja lieto dubultotu indukcijas regulatoru. Šāds regulators sastāv no divām vienādām mašīnām, kuras nostiprinātas uz kopīgas vārpstas. Ar attiecīgu tinuma slēgumu šādam regulatoram var panākt mainīgu pēc skaitliskās vērtības, bet nemainīgu pēc fāzes sekundāro spriegumu U_2 .

Indukcijas regulatorus lieto sprieguma regulēšanai laboratorijās, kā arī elektriskajos tīklos.

Fāzes regulators. Trīsfāzu asinhrono mašīnu ar nobremzētu rotoru var izmantot arī, lai izmainītu sekundārā sprieguma fāzi attiecībā pret primāro (tikla) spriegumu.

Fāzes regulatora statora tinumu pieslēdz maiņstrāvas tīklam, bet rotora tinums baro patērētāju (6.37. *zim.*).

Statora tinumā plūstošā strāva rada rotējošu magnētisko lauku, kurš statora un rotora tinumu fāzēs inducē EDS E_1 un E_2 . Rotoru pagriežot par leņķi α , rotora EDS E_2 skaitliskā vērtība nemainās, bet mainās E_2 fāze attiecībā pret E_1 un tātad arī U_2 fāze attiecībā pret U_1 (6.38. *zim.*).

Fāzes regulatorus lieto galvenokārt laboratorijās.

6.7.3. Asinhronais frekvences pārveidotājs

Asinhronais frekvences pārveidotājs (6.39. zīm.) sastāv no asinhronās mašīnas ar fāzu rotoru ($M1$) un dzinēja $M2$, kurš mehāniski savienots ar $M1$ vārpstu. Asinhronās mašīnas $M1$ statora tinums pievienots trīsfāzu tīklam, kura frekvence ir f_1 , bet fāzu rotora tinums baro patērētāju ar frekvenci f_2 .

Parasti par dzinēju $M2$ izmanto īsslēgtu asinhrono dzinēju. Ja frekvenci f_2 nepieciešams regulēt, tad īsslēgta asinhronā dzinēja vietā var izmantot līdzstrāvas dzinēju ar nepārtraukti regulējamu rotācijas frekvenci.

Ja neievēro zudumus, tad jauda P_1 , ko asinhronā mašīna $M1$ uzņem no tīkla, ir vienāda ar tās elektromagnētisko jaudu P_{em} :

$$P_1 = P_{em}, \quad (6.151)$$

un jauda P_{M2} , ko uzņem no tīkla dzinējs $M2$, ir vienāda ar mehānisko jaudu P_m uz dzinēja vārpstas, t. i.,

$$P_{M2} = P_m. \quad (6.152)$$

Asinhronās mašīnas rotora ķēdē izdalītā elektriskā jauda

$$P_2 = sP_{em} = sP_1. \quad (6.153)$$

No izteiksmēm (6.151), ..., (6.153) izriet, ka

$$P_1 = \frac{P_2}{s}, \quad (6.154)$$

$$P_{M2} = P_2 - P_1 = (s-1)P_1 = \frac{s-1}{s}P_2. \quad (6.155)$$

Atkarībā no slīdes s skaitliskās vērtības un zīmes asinhronā mašīna $M1$ var strādāt dzinēja, ģeneratora vai elektromagnētiskās bremzes režīmā.

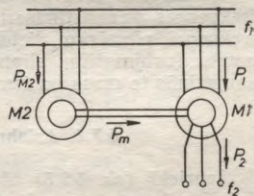
Ja neievēro dzinēja $M2$ slīdi ($s_{M2}=0$), tad dzinēja un tātad arī asinhronās mašīnas rotora rotācijas frekvence

$$n = \pm \frac{60f_1}{p_{M2}}, \quad (6.156)$$

kur p_{M2} — dzinēja polu pāru skaits, pie tam plusa zīme atbilst $M1$ dzinēja un ģeneratora režīmam, bet mīnusa zīme — elektromagnētiskās bremzes režīmam.

Ja asinhronās mašīnas $M1$ polu pāru skaits ir p_{M1} , tad tās magnētiskā lauka rotācijas frekvence

$$n_1 = \frac{60f_1}{p_{M1}} \quad (6.157)$$



6.39. zīm. Asinhronā frekvences pārveidotāja shēma.

un, ievērojot izteiksmi (6.156), rotora slide

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{p_{M2} - (\pm p_{M1})}{p_{M2}}, \quad (6.158)$$

bet rotora frekvence

$$f_2 = s f_1 = \frac{p_{M2} - (\pm p_{M1})}{p_{M2}} f_1. \quad (6.159)$$

Ja $0 < s < 1$, tad $n_1 > n$ un saskaņā ar izteiksmēm (6.154), (6.155) un (6.159) $P_1 > 0$, $P_{M2} < 0$, $f_2 < f_1$. Tas nozīmē, ka asinhronā mašīna $M1$ strādā dzinēja režīmā, bet dzinējs $M2$ — generatora režīmā. Šāds režīms iespējams, ja $p_{M2} > p_{M1}$.

Ja $s > 1$, tad $P_1 > 0$, $P_{M2} > 0$, $f_2 > f_1$. Šajā gadījumā asinhronā mašīna $M1$ strādā elektromagnētiskās bremzes režīmā, bet dzinējs $M2$ dzinēja režīmā. Šāds režīms iespējams, ja neatkarīgi no abu mašīnu polu pāru skaita asinhronās mašīnas $M1$ un dzinēja $M2$ magnētisko lauku rotācijas virzieni ir pretēji.

Ja $s < 0$, tad $P_1 < 0$, $P_{M2} > 0$. Tas nozīmē, ka asinhronā mašīna $M1$ strādā generatora režīmā, bet dzinējs $M2$ — dzinēja režīmā. Šāds režīms iespējams, ja $p_{M2} < p_{M1}$, pie tam atkarībā no p_{M2} un p_{M1} attiecības frekvenci var paaugstināt ($f_2 > f_1$) vai arī pazemināt ($f_2 < f_1$).

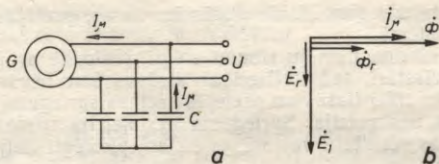
Frekvences pārveidotājos parasti izmanto tikai asinhronās mašīnas $M1$ dzinēja (frekvences pazemināšanai) un elektromagnētiskās bremzes (frekvences paaugstināšanai) režīmus.

Ja, piemēram, $f_1 = 50$ Hz, $p_{M2} = 2$ un $p_{M1} = 1$, tad no formulām (6.158), (6.159), (6.154) un (6.155) asinhronās mašīnas dzinēja režīmā $s = 0,5$, $f_2 = 25$ Hz, $P_1 = 2P_2$, $P_{M2} = -P_2$, bet elektromagnētiskās bremzes režīmā $s = 1,5$, $f_2 = 75$ Hz, $P_1 = 0,667P_2$, $P_{M2} = 0,333P_2$. (Iegūtās P_1 un P_{M2} vērtības var precizēt, ja ievēro asinhronās mašīnas $M1$ un dzinēja $M2$ lietderības koeficientus.)

Asinhronos frekvences pārveidotājus parasti lieto rūpnieciskās frekvences paaugstināšanai līdz 100...200 Hz. Šādu paaugstinātu frekvenci, piemēram, lietderīgi izmantot dažādu rokas elektroinstrumentu (urbjmašīnu, slīpmašīnu u. c.) barošanai, jo tad ievērojami samazinās to masa un izmēri.

6.7.4. Asinhronais generators ar pašierosmi

Iepriekš (sk. 6.2.5) tika noskaidrots, ka asinhronā mašīna, darbojoties generatora režīmā, patērē no tīkla reaktīvu strāvu magnētiskā lauka radīšanai, t. i., asinhronā mašīna generatora režīmā var strādāt tikai paralēli ar maiņstrāvas tīklu, kurā ir reaktīvās jaudas avoti, piemēram, sinhronie generatori.



6.40. zīm. Pašierosmes asinhronā ģeneratora shēma (a) un vienkāršota vektoru diagramma (b).

Ja asinhronās mašīnas statora tinuma spailēm paralēli pieslēdz kondensatoru bateriju (6.40. zīm. a), mašīna var darboties arī autonomi bez ierosmes no maiņstrāvas tīkla, t. i., ar pašierosmi.

Pašierosināšanās ir iespējama, ja mašīnas rotora serdē ir paliekošā magnētiskā plūsma Φ_r . Asinhronā ģeneratora pašierosināšanās process daudzējādā ziņā ir līdzīgs pašierosināšanās procesam līdzstrāvas ģeneratorā (sk. 3.11.3.). Rotoram griežoties, paliekošā magnētiskā plūsma Φ_r šķēļ statora tinumu un inducē tajā nelielu EDS \dot{E}_r , kurš atpaliek fāzē no plūsmas Φ_r par 90° (6.40. zīm. b). EDS \dot{E}_r radītā strāva I_μ plūst caur kondensatoru un \dot{E}_r apsteidz fāzē par 90° . Šīs strāvas virziens statora tinumā ir tāds pats kā magnetizēšanas strāvas virziens asinhronajā ģeneratorā, ja tā statora tinums pieslēgts maiņstrāvas tīklam. Strāva I_μ rada mašīnā magnētisko plūsmu Φ , kura, summējoties ar paliekošo magnētisko plūsmu Φ_r , palielina statora tinuma EDS. Tas izraisa jaunu I_μ pieaugumu un tālāku EDS palielināšanos utt. Statora tinuma EDS E_1 vērtība procesa beigās ir atkarīga no tērauda piesātinājuma pakāpes, statora tinuma prettestības un kondensatoru kapacitātes. Mainoties rotora rotācijas frekvencei, izmainās arī ģeneratora spriegums un tā frekvence.

Sloojot asinhrono ģeneratoru, tā spriegums samazinās, pie tam lielāku sprieguma samazināšanos izraisa induktīva rakstura slodze. Lai slodzes izmaiņa neietekmētu spriegumu, nepieciešams palielināt kondensatoru kapacitāti. Šis apstāklis būtiski sarežģī asinhronā ģeneratora ekspluatāciju. Bez tam, lai nodrošinātu nominālo spriegumu, kondensatoru baterijas jaudai jābūt samērā lielai (70...100% no ģeneratora jaudas). Tāpēc praksē šādus ģeneratorus kondensatoru baterijas dārguma un samērā lielo izmēru dēļ lieto ļoti reti.

6.7.5. Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi

Asinhrono dzinēju ekspluatācijā nesimetriskos režīmos var izraisīt barošanas tīkla sprieguma nesimetrija un rotora ķēdes nesimetrija. Nesimetrisko režīmu analīzei izmanto simetrisko komponentu metodi saskaņā ar kuru nesimetrisku spriegumu un strāvu

sistēmu sadala trīs simetriskās sistēmās: tiešās, pretējās secības un nullsecības sistēmā.

Tā kā asinhronā dzinēju tinumi slēgti zvaigznē ar izolētu nullpunktu vai trīsstūrī, tad nullsecības strāvas šeit nevar parādīties. Tāpēc jāaplūko tikai tiešās un pretējās secības spriegumi un strāvas.

Sprieguma nesimetrija. Sprieguma nesimetrija trīsfāzu tīklā var rasties avārijas rezultātā vai arī, ja tīklam pieslēgti lieljaudas vienfāzes patērētāji.

Pieņemsim, ka trīsfāzu spriegums, kas pievienots trīsfāzu asinhronā dzinēja statora tinumam, ir nesimetrisks un satur tiešās (U_{11}) un pretējās (U_{12}), secības komponentes.

Tiešās secības spriegums U_{11} uztur statora tinumā tiešās secības strāvas I_{11} . Šīs strāvas rada tiešās secības magnētisko lauku (tiešo lauku), kurš rotē ar rotācijas frekvenci

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (6.160)$$

un inducē rotorā tiešās secības strāvas I_{21} . Strāvas I_{11} un I_{21} rada rezultējošo tiešo lauku. Rotorā slīde attiecībā pret šo lauku (tiešās secības slīde)

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (6.161)$$

kur n — rotora rotācijas frekvence, kuru pieņem par pozitīvu, ja rotors griežas tiešā lauka rotācijas virzienā.

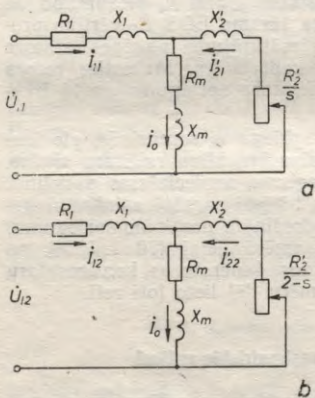
Tiešās secības strāvām atbilst ekvivalentā shēma (6.41. zīm. a), kura ir identiska 6.4. zīmējumā attēlotajām ekvivalentajām shēmām.

Tiešās secības rotora strāvu un tiešā lauka mijiedarbības rezultātā rodas tiešās secības griezes moments (sk. izteiksmi (6.67)):

$$M_1 = \frac{pm_1}{\omega_1} \times$$

$$\times \frac{U_{11}^2 \frac{R'_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{cR'_2}{s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2} \quad (6.162)$$

Pretējās secības spriegums U_{12} uztur statora tinumā pretējās secības strāvas I_{12} . Šīs strāvas rada pretējās secības magnētisko lauku (pretējo lauku), kurš rotē ar tādu



6.41. zīm. Asinhronā dzinēja ekvivalentās shēmas tiešās (a) un pretējās (b) secības strāvām.

pašu rotācijas frekvenci kā tiešais lauks, tikai pretējā virzienā, t. i., pretējais lauks rotē ar rotācijas frekvenci

$$n_2 = -n_1 = -\frac{60f_1}{p} \quad (6.163)$$

un inducē rotora tinumā pretējās secības strāvas I_{22} . Statora un rotora pretējās secības strāvas I_{12} un I_{22} rada rezultējošo pretējo lauku. Rotora slīde attiecībā pret šo lauku (pretējās secības slīde)

$$s_2 = \frac{n_2 - n}{n_2} = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1}. \quad (6.164)$$

Ievietojot izteiksmē (6.164) rotora rotācijas frekvenci, kas izteikta ar tiešās secības slīdi, t. i., lielumu

$$n = (1-s)n_1, \quad (6.165)$$

iegūstam izteiksmi

$$s_2 = \frac{n_1 + (1-s)n_1}{n_1} = 2-s. \quad (6.166)$$

Pretējās secības strāvām atbilstošā ekvivalentā shēma (6.41. zīm. b) no tiešās secības strāvu ekvivalentās shēmas (6.41. zīm. a) atšķiras ar to, ka slīdes $s_1 = s$ vietā ir slīde $s_2 = 2-s$.

Pretējās secības strāvu un pretējā lauka mijiedarbības rezultātā rodas pretējās secības griezes moments M_2 , kuru nosaka līdzīgi tiešās secības momentam, ievērojot pretējās secības strāvu ekvivalento shēmu:

$$M_2 = -\frac{pm_1}{\omega_1} \cdot \frac{U_{12}^2 \frac{R'_2}{2-s}}{\left(R_1 + \frac{cR'_2}{2-s}\right)^2 + (X_1 + cX'_2)^2}. \quad (6.167)$$

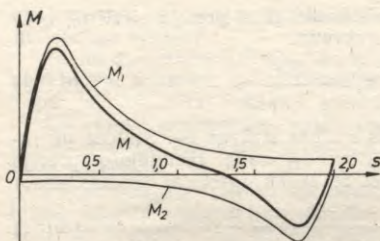
Mīnusa zīme šajā izteiksmē norāda to, ka slīdes vērtībām $s_2 > 0$ moments M_2 darbojas pretējā lauka rotācijas virzienā un tāpēc attiecībā pret momentu M_1 tas ir negatīvs.

Rezultējošais moments, kas darbojas uz asinhronā dzinēja rotoru,

$$M = M_1 + M_2. \quad (6.168)$$

Jāatzīmē, ka rotora ķēdes parametri R'_2 un X'_2 tiešās un pretējās secības strāvām vispārējā gadījumā ir dažādi, jo dažādas ir šo strāvu frekvences rotorā (tiešās secības strāvām $f_{21} = sf_1$, pretējās secības strāvām $f_{22} = (2-s)f_1$), un tāpēc dažādi šo parametru vērtības ietekmē strāvas «izspiešanas» efekts. Šis apstāklis jāņem vērā praktiskajos aprēķinos dzinējiem ar išslēgtu rotoru.

6.42. zīmējumā attēlota momentu M_1 , M_2 un M atkarība no slīdes gadījumam, kad $U_{12} = 0,7U_{11}$. No zīmējuma redzams, ka pretējās secības strāvu ietekmē griezes moments samazinās un tāpēc palielinās



6.42. zim. Asinhronā dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes, barojot ar nesimetrisku spriegumu.

rotora slīde un zudumi. Šī iemesla dēļ barošanas sprieguma ilgstoša nesimetrija nav vēlama, bet atsevišķos gadījumos tā vispār nav pieļaujama.

Jāatzīmē, ka bez momentiem M_1 un M_2 rodas arī vēl momenti, kuru cēlonis ir rotora tiešās secības strāvu mijiedarbība ar pretējo lauku un rotora pretējās secības strāvu mijiedarbība ar tiešo lauku. Tomēr šie momenti dzinēja darbību neietekmē, jo tie pulsē ar frekvenci $2f_1$ un to vidējā vērtība ir vienāda ar nulli.

Rotora ķēdes nesimetrija. Rotora ķēdes nesimetrija asinhronajiem dzinējiem ar fāzu rotoru iespējama, ja ir suku aparāta defekti (slikts kontakts, sukas nevienādi piespiestas slīdgredzeniem u. tml.), kā arī, ja rotora ķēdes reostata pretestības atsevišķās fāzēs nav vienādas. Isslēgtajiem dzinējiem rotora ķēdes nesimetrija var būt, ja bojāti viens vai vairāki rotora stieņi.

Aplūkosim rotora ķēdes nesimetrijas ietekmi uz asinhronā dzinēja darbību, pieņemot, ka rotorā ir trīsfāzu tinums un statoram pievienots simetrisks trīsfāzu spriegums U_1 .

Spriegums U_1 uztur statora tinumā tiešās secības strāvu I_{11} ar frekvenci f_1 . Tiešais lauks, ko rada šī strāva, inducē rotora tinumā EDS E_2 ar frekvenci $f_2 = sf_1$. Tā kā rotora ķēdes reostata pretestības atsevišķās fāzēs ir dažādas, tad rotora strāvu sistēma ir nesimetriska un satur tiešās (I_{21}) un pretējās (I_{22}) secības komponentes.

Statora un rotora tiešās secības strāvas I_{11} un I_{21} veido rezultējošo tiešo lauku, kurš rotē telpā ar sinhrono rotācijas frekvenci n_1 . Tiešā lauka un tiešās secības rotora strāvu mijiedarbības rezultātā rodas tiešās secības griezes moments M_1 , kura raksturs ir tāds pats kā griezes momentam normālā darba režīmā.

Rotora pretējās secības strāvas I_{22} ar frekvenci $f_2 = sf_1$ rada lauku (rotora pretējo lauku), kurš attiecībā pret rotoru griežas ar rotācijas frekvenci $n_{2r} = sn_1$ pretēji rotora tiešajam laukam. Tā kā pats rotors telpā griežas ar rotācijas frekvenci $n = (1-s)n_1$, tad rotora pretējā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret statoru

$$n_2 = n - n_{2r} = (1-s)n_1 - sn_1 = (1-2s)n_1. \quad (6.169)$$

Šis lauks inducē statora tinumā pretējās secības strāvas I_{12} ar frekvenci

$$f_{21} = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(1-2s)n_1}{60} = (1-2s)f_1, \quad (6.170)$$

kuras noslēdzas pa statora tinumu caur barošanas tīklu. Tā kā barošanas tīklā nav sprieguma un EDS avotu ar frekvenci f_{21} un tīkla pretestība salīdzinājumā ar tinuma pretestību ir maza, tad var uzskatīt, ka statora tinums attiecībā pret strāvām I_{12} ir īsslēgts.

Statora un rotora pretējās secības strāvas I_{12} un I_{22} rada rezultējošo pretējo lauku. Šī lauka un rotora strāvu mijiedarbības rezultātā rodas pretējās secības griezes moments M_2 un rezultējošais moments, kas darbojas uz rotoru,

$$M = M_1 + M_2. \quad (6.171)$$

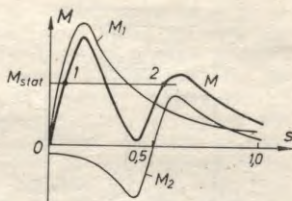
Noskaidrosim momentu M_1 , M_2 un M atkarību no slīdes.

Ja $0,5 < s < 1$, tad saskaņā ar izteiksmi (6.169) $n_2 < 0$, t. i., rezultējošais pretējais lauks attiecībā pret statoru rotē pretēji tiešās secības laukam. Bet moments M_2 šajā gadījumā darbojas tiešā virzienā ($M_2 > 0$), tāpēc arī pats rotors griežas pretēji lauka griešanās virzienam. Šāda parādība ir saistīta ar to, ka dzinēja rotora griešanās virziens, ja to baro no rotora puses, ir pretējs lauka griešanās virzienam. To var izskaidrot, pieņemot, ka rotors ir nobremzēts, bet stators var griezties. Tādā gadījumā stators griežas lauka virzienā. Bet, tā kā stators īstenībā ir nobremzēts, tad rotoram jāgriežas pretēji lauka rotācijas virzienam.

Ja $0 < s < 0,5$, tad saskaņā ar izteiksmi (6.169) $n_2 > 0$, t. i., pretējais lauks griežas tiešā virzienā, un tāpēc $M_2 < 0$.

Ja $s = 0,5$, tad $n_2 = 0$, pretējais lauks attiecībā pret statoru ir nekustīgs un tāpēc $I_{12} = 0$, $M_2 = 0$.

6.43. zīmējumā parādīts momentu M_1 , M_2 un M izmaiņas raksturs atkarībā no slīdes. Apgabalā, kur $s \approx 0,5$, rezultējošā momenta liknei ir «iekritums». Šī «iekrituma» dēļ atkarībā no statiskā pretestības momenta M_{stat} dzinēja rotors palaišanas laikā var «iestrēgt» ar rotācijas frekvenci $n \approx 0,5n_1$, t. i., turpināt strādāt stabilas darbības punktā 2, nesasniedzot normālo rotācijas frekvenci punktā 1. Šajā gadījumā rotora strāvas var sasniegt nepieļaujami lielas vērtības. Ja kāda no rotora fāzēm ir pārtraukta, tad rezultējošais moments M apgabalā, kur $s \approx 0,5$, var kļūt negatīvs un dzinējs nesasniedz normālo rotācijas frekvenci pat tad, ja to palaiž tukšgaitā.

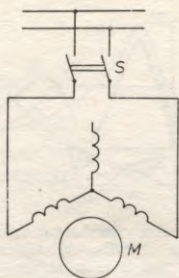


6.43. zīm. Asinhronā dzinēja momenta atkarība no slīdes, ja rotora ķēdē ir nesimetrija.

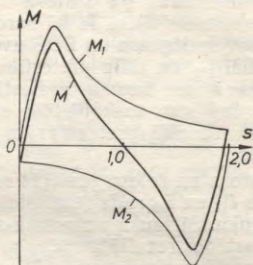
6.8. VIENFĀZES ASINHRONIE DZINĒJI

6.8.1. Vienfāzes dzinēju darbības īpatnības

Vienfāzes asinhrono dzinēju galvenā priekšrocība ir iespēja tos barot no vienfāzes maiņstrāvas tīkla. Tāpēc tos plaši izmanto mazjaudas mehānismu elektropiedziņai mājāsaimniecībā, medicīnā,



6.44. zim. No trīsfāzu asinhronā dzinēja izveidota vienfāzes dzinēja shēma.



6.45. zim. Vienfāzes asinhronā dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes.

automātikas shēmās u. tml. Vienfāzes dzinējus izgatavo ar nelielu jaudu (līdz 5...10 kW).

Vienfāzes asinhronā dzinēja statorā ir vienfāzes tinums, bet rotorā īsslēgts tinums — tāds pats kā trīsfāzu dzinējiem. Vienfāzes dzinēju var iedomāties kā trīsfāzu dzinēju, kuram viena fāze pārtraukta (6.44. zim.). Rievas, kurās ievietots vienfāzes dzinēja statora tinums, parasti aizņem 2/3 no statora aploces (sk. 5.4.6.).

Kā zināms (sk. 5.5.3.), tad vienfāzes strāva statora tinumā rada pulsējošu magnētisko lauku, kuru var sadalīt divos rotējošos laukos ar vienādiem, savstarpēji pretējiem rotācijas virzieniem. Šo lauku rotācijas frekvences

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (6.172)$$

$$n_2 = -\frac{60f_1}{p}, \quad (6.173)$$

un tie inducē rotora tinumā EDS, kuri uztur tiešās (I_{21}) un pretējās (I_{22}) secības strāvas. Magnētisko lauku un tiem atbilstošo strāvu mijiedarbībā rodas griezes momenti M_1 un M_2 , kuri darbojas savstarpēji pretējos virzienos.

No teiktā var secināt, ka vienfāzes dzinēja darbība ir analogiska trīsfāzu dzinēja darbībai ar nesimetrisku spriegumu, ja tiešās un pretējās secības spriegumi ir vienādi ($U_{11} = U_{12}$) (sk. 6.7.5.). Tiešās secības momentu M_1 aprēķina no izteiksmes (6.162) slīdei $s_1 = s$, bē pretējās secības momentu M_2 — no izteiksmes (6.167) slīdei $s_2 = 2 - s$. Uz vienfāzes dzinēja rotoru darbojas rezultējošais moments $M = M_1 + M_2$, kura atkarība no slīdes parādīta 6.45. zīmējumā.

Ja rotors ir nekustīgs ($n=0, s=1$), tad momenti M_1 un M_2 ir vienādi pēc lieluma, bet darbojas pretējos virzienos. Tāpēc vienfāzes

asinhronā dzinēja palaišanas moments ir vienāds ar nulli, t. i., rotors pats nevar sākt griezties. Iegriežot rotoru vienā vai otrā virzienā, rezultējošais griezes moments $M \neq 0$, rotors turpina griezties šajā virzienā patstāvīgi un dzinēju var slogot. Līdzīga parādība novērojama arī trīsfāzu dzinēju darbībā. Ja viens no statora tinuma pievadiem ir pārtraukts, tad dzinēju nevar palaist. Ja turpretī pievadu pārtrauc, dzinējam griežoties, tad tas turpina darboties kā vienfāzes dzinējs. Šāda parādība izskaidrojama ar to, ka rotora tiešās un pretējās secības strāvu frekvences ir ļoti atšķirīgas ($f_{21} = sf_1$, $f_{22} = (2-s)f_1$), t. i., $f_{22} \gg f_{21}$. Ja, piemēram, $f_1 = 50$ Hz un $s = 0,05$, tad $f_{21} = 2,5$ Hz un $f_{22} = 97,5$ Hz. Bet, tā kā rotora induktīvā pretestība X_2 ir proporcionāla rotora strāvas frekvencei, tad dzinēja režīmā induktīvā pretestība X_{22} rotora pretējās secības strāvām ir daudzkārt lielāka nekā induktīvā pretestība X_{21} tiešās secības strāvām, t. i., $X_{22} \gg X_{21}$. Tas nozīmē, ka rotora pretējās secības strāva I_{22} ir maza, un tāpēc mazs ir arī pretējās secības moments M_2 .

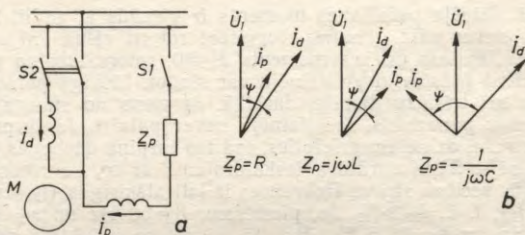
Pēc savām īpašībām vienfāzes asinhronais dzinējs ir tuvs trīsfāzu dzinējam, kurš strādā ar lielu sprieguma nesimetriju. Tāpēc vienfāzes dzinēju enerģētiskie rādītāji ir sliktāki nekā trīsfāzu dzinējiem ($\cos \varphi = 0,6 \dots 0,7$; $\eta = 0,4 \dots 0,7$). Tas ir saistīts ar pretējās secības lauka ietekmi, kurš samazina griezes momentu, palielina zudumus un samazina lietderības koeficientu. Vienfāzes dzinējiem ar tādiem pašiem izmēriem kā trīsfāzu dzinējiem jauda nepārsniedz $50 \dots 60\%$ no trīsfāzu dzinēju jaudas.

6.8.2. Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi

Vienfāzes dzinēji ar palaišanas tinumu. Iepriekš tika noskaidrots, ka vienfāzes dzinējs, kura statorā ir tikai viens tinums, neattīsta palaišanas momentu. Lai šāds dzinējs bez ārējas mehāniskas iegriešanas pats varētu sākt griezties, tad palaišanas laikā dzinēja pulsējoša magnētiskā lauka vietā ir jārada rotējošs lauks. To panāk, dzinēja statorā bez galvenā (darba) tinuma ievietojot vēl palaišanas tinumu, kas parasti aizņem $1/3$ no statora rievām. Palaišanas un darba tinumu izveido tā, ka šo tinumu asis telpā ir nobīdītas par 90° elektriskajiem grādiem. Lai tinumu MS palaišanas laikā radītu rotējošu magnētisko lauku, tad strāva palaišanas tinumā (I_p) jānobīda fāzē pret strāvu darba tinumā (I_d). To panāk, palaišanas tinumam virknē ieslēdzot elementu Z_p , kas raža fāzu nobīdi: rezistoru R , droseli L vai kondensatoru C (6.46. zīm.).

Vislabākos palaišanas apstākļus (lielāku palaišanas momentu un mazāku palaišanas strāvu) nodrošina palaišanas tinuma ķēdē ieslēgts kondensators C , ar kuru starp tinumu strāvām var panākt 90° fāzu nobīdes leņķi. Ja pie tam vēl darba un palaišanas tinuma MS ir vienādi, tad dzinēja palaišanas sākumā iegūst riņķveida rotējošu magnētisko lauku, kas nodrošina vislielāko palaišanas momentu.

Ja palaišanas tinuma ķēdē ieslēgts rezistors R vai droseli L , tad fāzu nobīdes leņķis starp tinumu strāvām ir mazāks par 90° , magnētiskais lauks ir eliptisks un tāpēc arī mazāks palaišanas moments.



6.46. zim. Vienfāzes asinhronā dzinēja ar palaišanas tinumu slēguma shēma (a) un vektoru diagrammas (b).

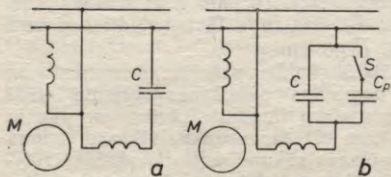
Kad rotora rotācijas frekvence sasniedz 70...80% no nominālās rotācijas frekvences, palaišanas tinumu ar slēdzi *S1* atslēdz no tīkla (parasti automātiski), jo šis tinums paredzēts tikai īslaicīgam režīmam: tas izgatavots no tieva vada ar daudziem vijumiem, lai iegūtu pietiekami lielu *MS*.

Vienfāzes asinhronā dzinēja palaišanu, izmantojot kondensatoru, lieto samērā reti (tikai tad, ja nepieciešams liels palaišanas moments), jo kondensatora izmēri parasti ir relatīvi lieli. Palaišanai, izmantojot drošeli *L*, ir vissliktākie rādītāji, tāpēc šādu palaišanas paņēmieni gandrīz nekad nelieto. Vislētākā un visvienkāršākā ir palaišana, izmantojot rezistoru.

Asinhronais kondensatoru dzinējs. Asinhronā kondensatoru dzinēja statora rievās ir ievietoti divi darba tinumi, kuru asis telpā nobīdītas par 90 elektriskajiem grādiem. Katrs tinums aizņem pusi no statora rievām, pie tam viena tinuma ķēdē ieslēgts kondensators (6.47. zīm. a).

Abu tinumu jaudas parasti ir vienādas, bet vijumu skaits dažāds. Kaut arī dzinēja abus statora tinumus baro no vienfāzes tīkla, būtībā tas ir divfāzu dzinējs, kurā fāzu nobīde starp abu tinumu strāvām tiek panākta ar kondensatoru *C*.

Kondensatora *C* kapacitāte, kura izraudzīta tā, lai nodrošinātu



6.47. zim. Asinhronā kondensatoru dzinēja slēguma shēmas:

a — bez palaišanas kondensatora, b — ar palaišanas kondensatoru.

riņķveida rotējošo lauku nominālajā režīmā, parasti ir nepietiekama vajadzīgā palaišanas momentā radīšanai. Tāpēc nepieciešamības gadījumā paralēli kondensatoram *C* ieslēdz kondensatoru *C_p* (6.47. zīm. b), kurš darbojas tikai palaišanas laikā. Palaišanas kondensatora *C_p* kapacitāti izvēlas tik lielu,

lai dzinēja palaišanas sākumā rotējošais magnētiskais lauks būtu tuvs riņķveida laukam.

Kondensatoru dzinējiem ir augstāks lietderības koeficients un $\cos \varphi$ nekā vienfāzes dzinējiem (nominālajā režīmā $\eta = 0,65 \dots 0,75$, $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,95$). Tos izgatavo ar jaudu līdz 1000 W.

Trīsfāzu asinhrono dzinēju darbība no vienfāzes tīkla. Ja nav pieejams trīsfāzu tīkls, tad trīsfāzu asinhrono dzinēju var pieslēgt arī vienfāzes tīklam un darbināt kā kondensatoru dzinēju. Praksē visbiežāk izmantojamās šādu dzinēju slēgumu shēmas parādītas 6.48. zīmējumā.

Kondensators C (darba kondensators) ieslēgts pastāvīgi, bet kondensators C_p (palaišanas kondensators) — tikai palaišanas laikā.

Kondensatoru C un C_p kapacitātes, kuras nodrošina vislabākos palaišanas un darba apstākļus, var aprēķināt, ja zināmi dzinēja parametri (aktīvās un induktīvās pretestības). Šo kondensatoru kapacitātes vērtības var noteikt arī eksperimentāli tā, lai dotajai slodzei atbilstošā darba strāva un palaišanas strāva būtu minimālas.

Aptuveniem aprēķiniem praksē var izmantot empīriskas formulas. Ja frekvence ir 50 Hz, tad 6.48. zīmējuma a shēmai

$$C = 2800 \frac{I_N}{U_N}, \quad (6.174)$$

6.48. zīmējuma b shēmai

$$C = 4800 \frac{I_N}{U_N}. \quad (6.175)$$

Ja formulās (6.174) un (6.175) strāvas vērtību ievieto ampēros un sprieguma vērtību — voltos, tad kapacitātes vērtību iegūst mikrofarados.

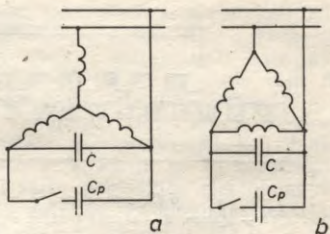
Palaišanas kondensatora kapacitāti izvēlas pēc šādas sakarības: $C_p = (2,5 \dots 3,0) C$.

Ja dzinēju iespējams palaist tukšgaitā vai nedaudz slogotu, tad palaišanas kondensators parasti nav vajadzīgs.

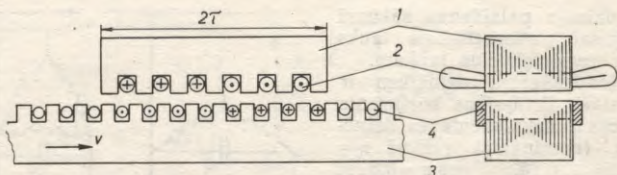
6.9. SPECIĀLAS NOZĪMES ASINHRONĀS MAŠĪNAS

6.9.1. Lineārais asinhronais dzinējs

Lineārā asinhronā dzinēja uzbūve parādīta 6.49. zīmējumā. Tā statoram, kas salikts no elektrotehniskā tērauda skārdiem, ir paralēlskaldņa forma. Statora pamatnē izveidotajās rievās ievietots trīsfāzu



6.48. zīm. Trīsfāzu asinhronā dzinēja pieslēgšana vienfāzes tīklam, ja statora tinums savienots zvaigznē (a) un trīsstūrī (b).



6.49. zīm. Lineārā asinhronā dzinēja uzbūve:

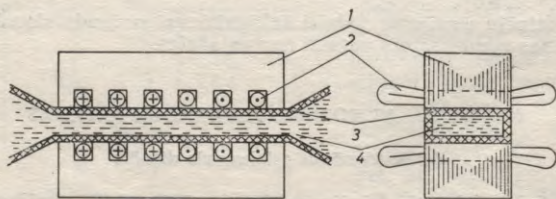
1 — stators, 2 — statora trīsfāzu tinums, 3 — slīdnis, 4 — īsslēgtais tinums.

tinums. Lineārā dzinēja kustīgajai daļai — slīdnim — arī ir paralēlskaldņa forma, un tā virsmā, kas atrodas pret statoru, izveidotas rievas ar īsslēgta tinuma stieņiem.

Lineārā asinhronā dzinēja darbības princips ir tāds pats kā parastā tipa asinhronajam dzinējam ar īsslēgtu rotoru. Skrejošais magnētiskais lauks, kas pārvietojas telpā ar ātrumu v_1 , inducē slīdņa īsslēgtajā tinumā strāvu. Šīs strāvas un skrejošā magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā uz slīdni darbojas elektromagnētiskie spēki, kuri to pārvieto lauka kustības virzienā ar ātrumu $v < v_1$.

Lineārā dzinēja slīdni var izveidot arī kā masīvu (tērauda vai čuguna) ķermeni, kurš vienlaikus veic magnētvida un tinuma funkcijas, un elektromagnētiskie spēki rodas magnētiskā lauka un masīvā slīdņa ķermenī (darba ķermenī) inducēto virpuļstrāvu mijiedarbības rezultātā. Lineāros asinhronos dzinējus izveido arī ar divpusīgu statoru. Šāds stators sastāv no divām simetriskām daļām, kas novietotas viena pret otru un atdalītas ar spraugu, pa kuru pārvietojas slīdnis.

Lineāros asinhronos dzinējus lieto tādu mehānismu elektropiedziņai, kuri darbojas virzes kustībā (aizbīdņi, celtnu mehānismi, lentes konveijeri, virzuļi u. tml.). Lielaudas lineāros dzinējus sāk lietot arī par vilces dzinējiem elektrificētajā transportā. Šajā gadījumā par darba ķermeni izmanto nekustīgu sliedi vai metālisku ceļa klātni. Stators, kas novietots kustīgajā sastāvā, pārvieto sastāvu elektromagnētisko spēku darbības virzienā, t. i., šajā gadījumā pretēji magnētiskā lauka kustības virzienam.



6.50. zīm. Elektromagnētiskā sūkņa uzbūve:

1 — statora serde, 2 — statora tinums, 3 — kanāls, 4 — šķidrās metāls.

Pēc sava darbības principa līdzīgs lineārajam asinhronajam dzinējam ir indukcijas tipa *elektromagnētiskais sūknis*, kas ir viens no magnetohidrodinamisko mašīnu paveidiem. Elektromagnētiskais sūknis no lineārā dzinēja atšķiras ar to, ka darba ķermeņi tajā ir šķidrums metāls, kas elektromagnētisko spēku ietekmē pārvietojas pa kanālu starp divpusīga statora divām daļām (6.50. zīm.). Elektromagnētiskos sūkņus lieto šķidra metāla transportēšanai, kodolreaktoru dzesēšanai ar šķidru metālu (nātriju, kāliju un to sakausējumiem), kā arī metalurģijā. Pēdējā laikā paplašinās elektromagnētiskā sūkņa tipa ierīču izmantošana dažādās tehnoloģiskās iekārtās (maisītāji, separatori, šķidrums plūsmas regulatori u. tml.).

6.9.2. Asinhronie servodzinēji

Asinhronā servodzinēja statora rievās ievietoti divi neatkarīgi tinumi: ierosmes tinums 1 un vadības tinums 2 (6.51. zīm.), kuru asis telpā nobīdītas par 90 elektriskajiem grādiem. Ierosmes ķēde visā darba laikā pieslēgta vienfāzes maiņstrāvas tīklam ar spriegumu $U = \text{const}$. Ierosmes ķēdē ieslēgtais kondensators C rada fāzu nobīdi starp ierosmes un vadības strāvām. Vadības tinumu 2 pievieno vadības spriegumam U_v , kura skaitliskā vērtība vai fāze pret ierosmes spriegumu U_f var tikt mainīta. Asinhronais servodzinējs būtībā ir divfāzu dzinējs, un tā darbības princips ir tāds pats kā parastajam asinhronajam dzinējam.

Servodzinējs sāk darboties tikai tad, kad tam pievada vadības spriegumu U_v , t. i., elektrisko signālu, jo tikai tad rodas rotējošais magnētiskais lauks. Vadības signālu pārtraucot ($U_v = 0$), dzinēja rotors apstājas. Asinhronos servodzinējus vada, mainot vai nu vadības sprieguma U_v skaitlisko vērtību (amplitūdas vadība), vai šī sprieguma fāzi pret ierosmes spriegumu U_f (fāzes vadība). Šo izmaiņu rezultātā izmainās dzinēja elektromagnētiskais griezes moments un tātad arī rotācijas frekvence.

Servodzinēja darba režīmu raksturo signāla koeficients α . Dzinējam ar amplitūdas vadību

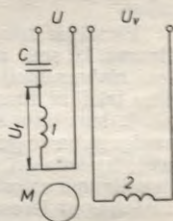
$$\alpha = \frac{U_v}{U_f}, \quad (6.176)$$

ar fāzes vadību

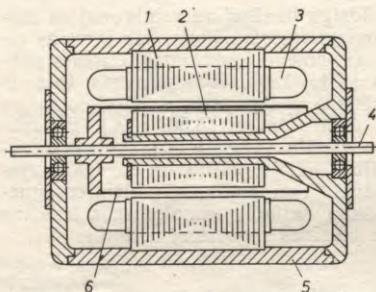
$$\alpha = \sin \beta, \quad (6.177)$$

kur β — fāzu nobīdes leņķis starp spriegumiem U_v un U_f .

Asinhrono servodzinēju darba specifika ir saistīta ar daudzām īpašām prasībām: servodzinējam nav pieļaujama pašgaita (rotora griešanās pēc vadības signāla pārtraukšanas), tā darbībai jābūt stabilai visā rotācijas frekvences



6.51. zīm. Asinhronā servodzinēja slēguma shēma.



6.52. zīm. Asinhronā servodzinēja ar dobu nemagnētisku rotoru konstrukcija:

1 — ārējais stators, 2 — iekšējais stators, 3 — tinums, 4 — vārpsta, 5 — korpuss, 6 — dobs plānsienu rotors.

diapazonā, vadības jaudai jābūt mazai, mehāniskajām un regulēšanas raksturlielņiem $n=f(M)$, $n=f(\alpha)$ jābūt lineārām, rotoram jābūt ar mazu inerci. To panāk, izveidojot speciālas konstrukcijas rotorus ar palielinātu aktīvo pretestību.

Atkarībā no rotora konstrukcijas izšķir asinhronos servodzinējus ar dobu nemagnētisku rotoru, ar dobu feromagnētisku rotoru un ar parastā tipa īsslēgto rotoru. Tos izgatavo ar frekvenci 50...1000 Hz. Visvairāk lieto servodzinējus ar dobu nemagnētisku rotoru

(6.52. zīm.), jo tiem ir mazs inerces moments un tāpēc lielāka ātrdarbība. Tomēr šiem dzinējiem ir samērā zems lietderības koeficients (20...40%), tāpēc tur, kur ātrdarbībai nav būtiskas nozīmes, galvenokārt lieto servodzinējus ar parastā tipa īsslēgto rotoru, retāk dzinējus ar dobu feromagnētisku rotoru.

6.9.3. Selsini

Selsinus lieto *sinhronās saites sistēmās*, lai nodrošinātu mehāniski nesaistītu vārpstu vienlaicīgu pagriešanos par vienu un to pašu leņķi vai šo vārpstu sinhronu griešanos.

Izšķir vienfāzes un trīsfāžu selsinus. Trīsfāžu selsini konstruktīvi neatšķiras no asinhronajiem dzinējiem ar fāžu rotoru, un tos izmanto relatīvi lielu jaudu gadījumā. Seit aplūkosim vienfāzes selsinus, kuros lieto visvairāk un kuru konstrukcijā un darbībā ir noteiktas īpatnības.

Vienfāzes selsinu statorā izveidoti divi izvīrīti poli ar vienfāzes tinumu, ko sauc par *ierosmes tinumu*. Cilindriskā rotora rievās ievietots *sinhronizācijas tinums*, kas izveidots tāpat kā maiņstrāvas mašīnu trīsfāžu tinums, t. i., sastāv no trīs atsevišķiem tinumiem (fāzēm), kuru asis savstarpēji nobīdītas par 120°. Šie tinumi savienoti zvaigznē un to gali ar sukām pievienoti trīs kontaktgredzeniem. Ļoti bieži izmanto arī selsinus ar sinhronizācijas tinumu statorā un ierosmes tinumu rotorā, kā arī bezkontakta selsinus, kuros abi — sinhronizācijas un ierosmes — tinumi novietoti statorā.

Ja selsina statora ierosmes tinumu pievieno vienfāzes maiņstrāvas tīklam, tad mašīnā rodas pulsējošs magnētiskais lauks, kas rotora sinhronizācijas tinuma fāzēs inducē EDS E_1 , E_2 un E_3 . Šie EDS

sakrīt fāzē, bet to skaitliskās vērtības ir atkarīgas no katras fāzes ass stāvokļa pret ierosmes tinuma asi:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{max} \cos \Theta_d; \\ E_2 &= E_{max} \cos (\Theta_d - 120^\circ); \\ E_3 &= E_{max} \cos (\Theta_d - 240^\circ), \end{aligned} \quad (6.178)$$

kur E_{max} — EDS vērtība sinhronizācijas tinuma fāzē, ja šīs fāzes ass sakrīt ar ierosmes tinuma asi;

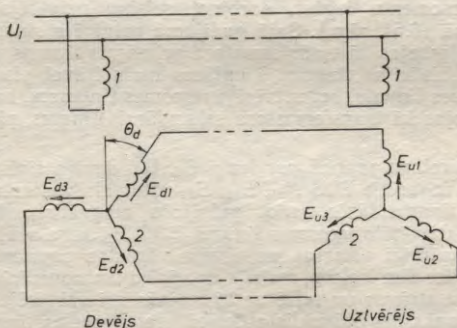
Θ_d — leņķis starp ierosmes tinuma un sinhronizācijas tinuma 1. fāzes asi (6.53. zīm.).

Pagriežot selsina rotoru attiecībā pret statoru, mainās leņķis Θ_d un tātad arī sinhronizācijas tinuma fāzēs inducētie EDS, t. i., katram rotorā stāvoklim atbilst noteikta lieluma EDS E_1 , E_2 un E_3 .

Vienkāršākā gadījumā sinhronās saites sistēma, ko izmanto mehānismā vārpstas pagriezienu leņķa pārvadišanai attālumā, sastāv no diviem vienādiem selsiniem — *devēja* un *uztvērēja*, kuri savienoti ar trīsvādu sakaru līniju (6.53. zīm.). Ja devēja rotoru pagriež par leņķi Θ_d , tad arī uztvērēja rotors pagriežas par tādu pašu leņķi. Abu rotoru sinhronu pagriešanos nodrošina sinhronizācijas tinumi.

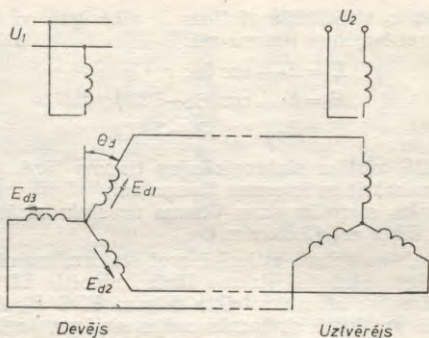
Selsinu darbība indikatora režīmā. Ja abu selsinu sinhronizācijas tinumu fāzu ass pret saviem ierosmes tinumiem pagrieztas vienādi ($\Theta_d = \Theta_u$), tad EDS, kas inducējas abu selsinu sinhronizācijas tinumu attiecīgajās fāzēs, ir vienādi ($E_{d1} = E_{u1}$, $E_{d2} = E_{u2}$, $E_{d3} = E_{u3}$). Bet, tā kā abu mašīnu vienāda nosaukuma fāzēs šo EDS virzieni ir pretēji, tad sakaru līnijā un sinhronizācijas tinumos strāvas neplūst, t. i., rotorī šajā gadījumā ir saskaņotā stāvoklī.

Ja selsina devēja rotoram pievienotais mehānisms pagriež tā rotoru no saskaņotā stāvokļa par kaut kādu leņķi Θ_d tā, ka $\Theta_d \neq \Theta_u$, tad saskaņā ar izteiksmi (6.178) izmainās devēja EDS E_{d1} , E_{d2} un



6.53. zīm. Selsinu indikatora režīma shēma:

1 — ierosmes tinums, 2 — sinhronizācijas tinums.



6.54. zīm. Selsinu transformatora režīma shēma.

E_{d3} , abu selsinu rotoru EDS līdzsvars izjūk, un sinhronizācijas tinumos, kas savienoti ar sakaru līniju, plūst strāvas. Šo strāvu un ierosmes tinumu magnētisko lauku mijiedarbības rezultātā rodas griezes (sinhronizējošais) moments, kas uztvērēja rotoru pagriež tā, lai tas nonāktu saskaņotā stāvoklī ar devēja rotoru, t. i., stāvoklī, kad $\theta_d = \theta_u$.

Selsinu indikatora režīmu izmanto kontrolei un signalizācijai automātikas un telemehānikas sistēmās. Šajā gadījumā selsina uztvērēja vārpstai ir pievienots rādītājs, kura stāvoklis norāda ar selsina devēja vārpstu savienotā mehānisma stāvokli.

Selsinu darbība transformatora režīmā. Indikatora režīmā selsinam uztvērējam ir mazs sinhronizējošais moments. Lielāku sinhronizējošo momentu iegūst, darbinot selsinu uztvērēju transformatora režīmā (6.54. zīm.). Šajā gadījumā uztvērēja sinhronizācijas tinumu, kas darbojas kā transformatora primārais tinums, savieno ar devēja sinhronizācijas tinumu. Vienfāzes maiņstrāvai pievieno tikai devēja ierosmes tinumu, bet uztvērēja ierosmes tinumam, kas šajā gadījumā darbojas kā transformatora sekundārais tinums, pievieno pastiprinātāju.

Ja devēja rotoru pagriež par leņķi θ_d , tad devēja sinhronizācijas tinuma fāzēs inducētie EDS E_{d1} , E_{d2} , E_{d3} uztur strāvas uztvērēja sinhronizācijas tinuma fāzēs, radot pulsējošu magnētisko lauku. Šis lauks inducē uztvērēja ierosmes tinumā EDS E_2 , kura skaitliskā vērtība ir viennozīmīgi atkarīga no devēja vārpstas pagrieziena leņķa θ_d , jo, mainoties šim leņķim, mainās uztvērēja sinhronizācijas tinuma atsevišķo fāzu strāvas un reizē ar to mainās arī uztvērēja pulsējošā magnētiskā lauka ass stāvoklis attiecībā pret ierosmes tinumu.

Transformatora režīmā uztvērēja izejas spriegumu U_2 pievada pastiprinātājam. Tas baro vadības tinumu servodzinējā, kas pagriež

darba mehānisma un ar to savienoto uztvērēja rotoru saskaņotā stāvoklī, kad $E_2=0$ un $U_2=0$.

Vienfāzes selsinus transformatora režīmā izmanto automātiskās regulēšanas sistēmās, konkrēti, sekošanas sistēmās, kuras nepātraukti seko kāda fizikāla lieluma izmaiņām un atkarībā no tām izpilda dažādas operācijas.

6.10. PADOMJU SAVIENĪBĀ RAŽOTO ASINHRONO DZINĒJU PAMATTIPI

Padomju Savienībā asinhronos dzinējus izgatavo vienotās sērijās. Asinhrono dzinēju sērijas projektē centralizēti, bet to ražošanā piedalās ļoti daudzas elektromašīnbūves rūpnīcas. Novecojušās sērijas, kuru tehniski ekonomiskie raksturojumi neatbilst mūsdienu tehnikas līmenim, pakāpeniski nomaina ar jaunām sērijām.

1978. gadā ar jaudu no 0,06 kW līdz 400 kW un rotācijas frekvenci no 500 min^{-1} līdz 3000 min^{-1} sāka izgatavot jaunus — 4A sērijas asinhronos dzinējus. Sērija 4A minētajam jaudu diapazonam nomainījusi sēriju A2, kas bija izstrādāta un apgūta 60. gados. Atšķirībā no iepriekšējām sērijām 4A sērijas dzinēja gabarītmēri un uzstādīšanas izmēri pilnībā atbilst Starptautiskās Elektrotehniskās komisijas rekomendācijām, tādējādi nodrošinot to savstarpējo apmaiņamību ar ārzemju firmu ražotajiem dzinējiem. Augstvērtīgāku elektrotehnisko materiālu, jaunu konstruktīvo risinājumu un progresīvas tehnoloģijas izmantošana ir nodrošinājusi šo dzinēju augstāku ekspluatācijas drošuma pakāpi nekā A2 sērijas dzinējiem, kā arī devusi iespēju ietaupīt 24% elektrotehniskā tērauda, 25% tinumu vara, 20% čuguna lējumu, 10% alumīnija un 30% tērauda velmējumu. Dzinēju masa samazinājusies vidēji par 22%.

Pamatizpildījumā 4A sērijas asinhronos dzinējus izgatavo ar īs slēgtu rotoru un 50 Hz frekvenci ilgstošam darba režīmam, un tie paredzēti vispārīgai lietošanai mērenos klimatiskajos apstākļos. Pēc aizsardzības veida pret apkārtējās vides iedarbību 4A sērijas pamatizpildījuma dzinējus izgatavo kā aizsargātas un slēgtas konstrukcijas mašīnas. Dzinējus izgatavo saskaņā ar standarta jaudu skalu, kas ir vienāda visām rotācijas frekvencēm: 0,06; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11,0; 15,0; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 315; 400 kW.

4A sērijas pamatizpildījuma asinhrono dzinēju raksturīgākie parametri doti 6.1. tabulā. Sajā tabulā ietverti tikai katrai rotācijas frekvencei atbilstošie vismazākās un vislielākās jaudas dzinēji. Dzinēja tipa apzīmējumā burtiem un cipariem attiecīgā secībā ir šāda nozīme:

4 — sērijas numurs;

A — asinhronais;

H, A, X — burti, kas apzīmē konstruktīvās īpatnības (H — aizsargāta konstrukcija; A — alumīnija korpuss un gultņu vairogī; X — alumīnija korpuss un čuguna gultņu vairogī);

50 ... 355 — rotācijas ass augstums (mm);

S, L, M — burti, kas apzīmē montāžas izmērus, ja dzinējiem ar vienādu rotācijas ass augstumu atbilst dažādi montāžas izmēri;

A, B — magnētvasda garuma apzīmējums (A — pirmais garums; B — otrais garums), ko uzrāda tikai tad, ja dzinēji ar vienādiem montāžas izmēriem, ir ar dažādām jaudām;

2, 4, 6, 8, 10, 12 — polu skaits;

Y — klimatisko apstākļu raksturojums;

3 — novietojuma kategorijas apzīmējums, kas raksturo vidi, kādā paredzēta dzinēja darbība.

Tā, piemēram, dzinēja tipa apzīmējums 4AA56A2Y3 norāda, ka tas ir 4A sērijas slēgtas konstrukcijas asinhronais dzinējs, kura korpuss un gultņi vairogi izgatavoti no alumīnija, rotācijas ass augstums ir 56 mm, tam ir pirmā garuma magnētvasds, tas ir divpolu dzinējs, paredzēts darbībai rajonos ar mērenu klimatu, tam ir trešā novietojuma kategorija (paredzēts uzstādīšanai telpās ar apkuri).

6.1. tabula

4A SĒRIJAS PAMATIZPILDIJUMA ASINHRONO DZINEJU (AR ISSLĒGTU ROTORU) TEHNISKIE DATI

Dzinēja tips	P_N (kW)	n_1 (min ⁻¹)	η (%)	cos Φ_1	$\frac{M_{max}}{M_N}$	$\frac{M_D}{M_N}$	$\frac{I_D}{I_N}$
4A50A2Y3	0,9	3000	60,0	0,70	2,2	2,0	5,0
4A355M2Y3	315,0	3000	93,0	0,91	1,9	1,0	7,0
4A50A4Y3	0,06	1500	50,0	0,60	2,2	2,0	5,0
4A355M4Y3	315,0	1500	94,5	0,92	1,9	1,0	7,0
4AA63A6Y3	0,18	1000	56,0	0,62	2,2	2,0	4,0
4A355M6Y3	200,0	1000	94,0	0,90	1,9	1,0	7,0
4A71B8Y3	0,25	750	56,0	0,65	1,7	1,6	3,5
4A355M8Y3	160,0	750	93,5	0,85	1,9	1,0	6,5
4A280S10Y3	37,0	600	91,0	0,78	1,8	1,0	6,0
4A355M10Y3	110,0	600	93,0	0,83	1,8	1,0	6,0
4A315S12Y3	45,0	500	90,5	0,75	1,8	1,0	6,0
4A355S12Y3	90,0	500	92,0	0,76	1,8	1,0	6,0

4A sērijas asinhronos dzinējus izgatavo ar šādiem spriegumiem: 220/380 V (ar jaudu līdz 0,37 kW); 220/380 V un 380/660 V (ar jaudu no 0,55 kW līdz 110 kW); 380/660 V (ar jaudu no 132 kW līdz 400 kW). Dzinēju statora tinumam ir seši izvadi, kurus atkarībā no tīkla sprieguma slēdz zvaigznē vai trīsstūrī.

Līdztekus vispārēja lietojuma dzinējiem 4A sērijā paredzētas arī vairākas modifikācijas, kuru raksturīgās īpatnības norādītas 6.2. tabulā.

Sērijā 4A ietilpst arī speciāla izveidojuma dzinēji (darbībai tropiska klimata apstākļos, ķīmiski izturīgi, mitrumdroši, darbībai ar 60 Hz frekvenci u. c.). Visu modifikāciju un speciāla izveidojuma

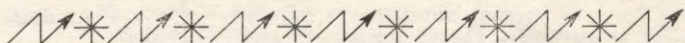
4A SERIJAS ASINHRONO DZINĒJU MODIFIKĀCIJAS

Modifikācijas veids	Apstākļi, kādos paredzēta dzinēja darbība
Ar palielinātu palaišanas momentu	Mehānismu piedziņai ar palielinātu pretestības momentu palaišanas brīdī (kompresori, drupinātāji, maisītāji u. tml.)
Ar palielinātu slīdi	Mehānismu piedziņai ar palielinātu inerces momentu, ar pulsejošu slodzi, ar biežu palaišanu un reversu
Ar uzlabotiem enerģētiskajiem rādītājiem (η ; $\cos \varphi$) Ar fāzu rotoru	Mehānismu piedziņai, kuri darbojas nepārtraukti
Daudzātrumu	Apstākļos, kad tīkla jauda ir nepietiekama īsslēgtu dzinēju palaišanai, kā arī piedziņai, ja nepieciešama rotācijas frekvences nepārtraukta regulēšana
	Mehānismu piedziņai ar rotācijas frekvences pakāpņveida regulēšanu (metālgriešanas mašīnas, celtņi, transporta mehānismi u. tml.)

dzinēju (izņemot dzinējus ar fāzu rotoru) galvenie izmēri sakrīt ar pamatizpildījuma dzinēju atbilstošajiem izmēriem.

4A sērijā ar jaudu no 200 kW līdz 1250 kW un rotācijas frekvenci no 500 min^{-1} līdz 3000 min^{-1} paredzēts izgatavot četru gabarītu asinhronos dzinējus (pēc to pilnīgas ieviešanas ražošanā), kuri atšķiras ar statora serdes ārējo diametru un rotācijas ass augstumu. Minētās grupas dzinējiem ir noteikta šāda jaudu skala: 200; 250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250 kW.

Jaudas diapazonā no 200 kW līdz 2000 kW ar rotācijas frekvenci no 250 min^{-1} līdz 1000 min^{-1} un spriegumu 6000 V izgatavo 5 gabarītu dzinējus. Tie galvenokārt ir vaļējas konstrukcijas dzinēji.



7. SINHRONĀS MAŠĪNAS

7.1. SINHRONO MAŠĪNU DARBĪBAS PRINCIPS

Ja ierosinātas sinhronās mašīnas rotoru griež ar rotācijas frekvenci n , tad rotora polu magnētiskā plūsma šķēļ statora tinuma vadus un inducē tinuma fāzēs EDS ar frekvenci

$$f_1 = \frac{pn}{60}. \quad (7.1)$$

Pievienojot statora tinumam simetrisku slodzi, šajā tinumā plūst simetriska trīsfāzu strāva un sinhronā mašīna šajā gadījumā darbojas *ģeneratora režīmā*.

Slogota ģeneratora statora trīsfāzu strāva rada rotējošu magnētisko lauku, kurš pēc sava rakstura ir tāds pats kā magnētiskais lauks asinhronajā mašīnā. Statora (enkura) magnētiskā lauka rotācijas virziens sakrīt ar rotora griešanās virzienu, un šī lauka rotācijas frekvence

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (7.2)$$

Ievietojot šajā izteiksmē frekvences f_1 vērtību no izteiksmes (7.1), iegūstam, ka

$$n_1 = n. \quad (7.3)$$

Tas nozīmē, ka statora magnētiskais lauks un rotors telpā rotē ar vienādām rotācijas frekvencēm (sinhroni). Statora un rotora magnētiskie lauki ir viens pret otru nekustīgi un veido sinhronās mašīnas rezultējošo magnētisko lauku, kas saķēdēts ar statora un rotora tinumiem.

Sinhronā mašīna var darboties *dzinēja režīmā*, ja statora tinumam no tikla pievada maiņstrāvu un rotora ierosmes tinumu tāpat kā ģeneratoram baro ar līdzstrāvu. Šajā gadījumā statora rotējošais magnētiskais lauks «velk līdzi» rotora polus, pie tam rotors rotē tajā pašā virzienā un ar tādu pašu rotācijas frekvenci kā statora magnētiskais lauks. Rotora rotācijas frekvence ir atkarīga no maiņstrāvas frekvences un no polu skaita (sk. izteiksmi (7.2)).

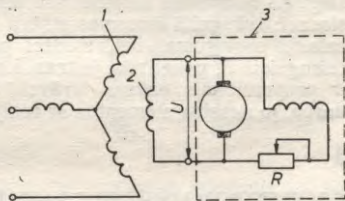
7.2. SINHRONO MAŠĪNU IEROSINĀŠANA

Sinhronās mašīnas ierosmes tinumu baro no dažādiem regulējamiem līdzstrāvas avotiem. Visos gadījumos sinhronās mašīnas ierosmes sistēmai jānodrošina iespēja regulēt ierosmes strāvu nepieciešamā diapazonā atbilstoši mašīnas darba režīma izmaiņām. Lai nodrošinātu sinhronās mašīnas stabilu darbību pēkšņa režīma izmaiņas gadījumā (avārijas sistēmā, slodzes atslēgšana un pieslēgšana u. tml.), ierosmes sistēmām jābūt ātrdarbīgām. Bez tam šīm sistēmām jābūt drošām un lētām.

Praksē lieto dažādas sinhrono mašīnu ierosmes sistēmas. Lielākā daļa no tām paredzēta automātiskai ierosmes regulēšanai. Šeit aplūkosim tikai raksturīgāko ierosmes sistēmu principiālās shēmas.

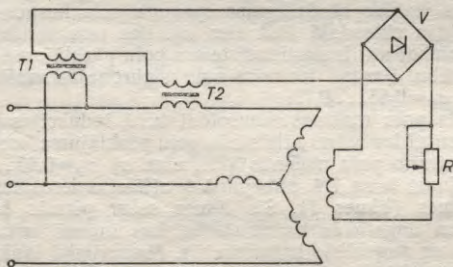
Visbiežāk izmanto sinhronās mašīnas ar mašīnerosinātāju, kura shēma attēlota 7.1. zīmējumā. Ierosmes tinumu baro neliels līdzstrāvas ģenerators — *ierosinātājs*, kas nostiprināts uz sinhronās mašīnas vārpstas un rotē kopā ar to. Ierosinātāja jauda ir 0,3...0,5% no sinhronās mašīnas nominālās jaudas. Par ierosinātāju parasti lieto līdzstrāvas paralēlas ierosmes ģeneratoru. Sinhronās mašīnas ierosmes strāvu regulē ar reostatu R , kas ieslēgts ierosinātāja ierosmes tinuma ķēdē. Regulēšanas gaitā mainās ierosinātāja enkura spriegums U un tāpat arī sinhronās mašīnas ierosmes tinuma strāva.

Mazjaudas, kā arī lēngaitas ļoti lielas jaudas sinhronajās mašīnās mašīnerosinātāji ir relatīvi lieli, neekonomiski un arī nepietiekami



7.1. zīm. Sinhronās mašīnas ar mašīnerosinātāju elektriskā shēma:

1 — enkura tinums, 2 — sinhronās mašīnas ierosmes tinums, 3 — ierosinātājs.



7.2. zīm. Sinhronās mašīnas ar pašierosmi principiālā shēma.

ātrdarbīgi. Bez tam ierosinātāja kolektora mezgls samazina sinhronās mašīnas darbības drošumu ekspluatācijā.

Minētos trūkumus daļēji vai pilnīgi var novērst, ja izmanto ierosmes sistēmas, kurās ierosmes tinumu baro tieši no enkura tinuma spailēm ar kompaundējošu transformatoru un taisngriežu starpniecību (sinhronā mašīna ar pašierosmi). Šādas ierosmes sistēmas principiālā shēma attēlota 7.2. zīmējumā. Transformatoru $T1$ un $T2$ slēgums nodrošina automātisku ierosmes strāvas izmaiņu, mainoties slodzei: tukšgaitā ierosmes strāva ir atkarīga no sinhronās mašīnas enkura sprieguma, bet, slodzei palielinoties, spriegums, kas baro taisngriezi V , palielinās, jo transformatora $T2$ sekundārais spriegums ir proporcionāls enkura strāvai. Šāda ierosmes sistēma ir droša darbā, jo nesatur elementus ar rotējošām daļām.

7.3. ELEKTROMAGNĒTISKIE PAMATPROCESI SINHRONAJĀS MAŠĪNĀS UN TO ANALĪZE

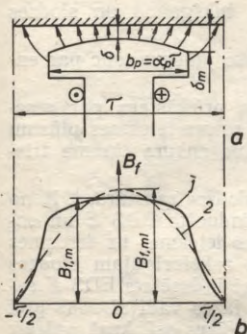
7.3.1. Sinhronās mašīnas tukšgaitas režīms

Par sinhronās mašīnas tukšgaitu sauc režīmu, kad enkura ķēdē strāva neplūst ($I=0$). Tukšgaitā magnētisko plūsmu mašīnā rada tikai ierosmes tinuma strāva. Lielākā šīs plūsmas daļa noslēdzas caur gaisa spraugu un ir saķēdēta ar enkura tinumu. To sauc par galveno magnētisko plūsmu. Bez galvenās plūsmas pastāv arī polu izkliedes plūsma, kas saķēdēta tikai ar ierosmes tinumu un enerģijas pārveidošanā nepiedalās.

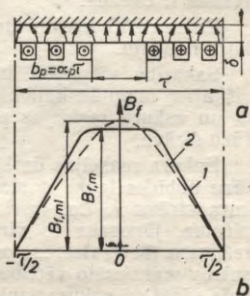
Rotoram griežoties, galvenā magnētiskā plūsma inducē enkura tinumā EDS. Lai inducētais EDS būtu iespējami tuvs sinusoidālam, jāpanāk, lai arī indukcijas sadalījums gaisa spraugā gar enkura aploci būtu tuvs sinusoidālam (sk. 5.3.1.). Izvirzīto polu mašīnās sinusoidai tuvu indukcijas sadalījumu nodrošina īpašas formas polu kurpes, kuras izveido tā, lai gaisa sprauga pola kurpes malā būtu lielāka nekā tās vidusdaļā (7.3. zīm. *a*). Bez tam indukcijas līknes formu var uzlabot arī, izvēloties noteiktu polu pārklājuma koeficienta $\alpha_p = b_p/\tau$ vērtību. Parasti izvirzīto polu sinhronajās mašīnās $\delta_m/\delta = 1,0 \dots 2,5$; $\alpha_p = 0,65 \dots 0,75$.

Neizvirzīto polu mašīnās sinusoidai tuvu indukcijas sadalījumu var iegūt, vienīgi izvēloties atbilstošu polu pārklājuma koeficientu α_p . Parasti neizvirzīto polu mašīnās (7.4. zīm. *a*) $\alpha_p = 0,25 \dots 0,40$.

7.3. zīmējumā *b* un 7.4. zīmējumā *b* attēlotas ierosmes lauka sadalījuma līknes (līknes 1). Šīs līknes satur pirmās harmoniskās (līknes 2) un augstākās harmoniskās, kas inducē enkura tinumā EDS pirmās un augstākās harmoniskās. Magnētiskā lauka augstāko harmonisko amplitūdas ir relatīvi mazas. Bez tam, izveidojot enkura tinumu ar saīsinātu soli ($y < \tau$) un ar rievu skaitu uz polu un fāzi $q > 1$, inducētā EDS augstākās harmoniskās iespējams ievē-



7.3. zīm. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas pola raksturīgie izmēri (a) un magnētiskais lauks (b).



7.4. zīm. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas pola raksturīgie izmēri (a) un magnētiskais lauks (b).

rojami samazināt (sk. 5.3.5.). Tāpēc, analizējot pamatprocesus sinhronajās mašīnās, var ievērot tikai EDS pirmo harmonisko un par galveno magnētisko plūsmu pieņemt magnētisko plūsmu Φ , kas ir atkarīga no ierosmes lauka magnētiskās indukcijas pirmās harmoniskās.

Ierosmes lauka formu raksturo ar koeficientu

$$k_f = \frac{B_{f,m1}}{B_{f,m}} \quad (7.4)$$

kur $B_{f,m1}$ — ierosmes lauka magnētiskās indukcijas pirmās harmoniskās amplitūdas vērtība;

$B_{f,m}$ — ierosmes lauka magnētiskās indukcijas maksimālā vērtība (7.3. zīm. b, 7.4. zīm. b).

Koeficientu k_f sauc par *ierosmes lauka formas koeficientu*, un tā vērtības atkarībā no mašīnas ģeometriskajiem izmēriem b_p/τ , δ_m/δ , δ/τ dotas rokasgrāmatās un literatūrā par elektrisko mašīnu projektēšanu. Izvirzīto polu sinhronajām mašīnām $k_f = 0,95 \dots 1,15$, neizvirzīto polu mašīnām $k_f = 0,96 \dots 1,06$.

Enkura tinuma fāzē inducēto EDS aprēķina pēc izteiksmes (sk. 5.3.4.)

$$E = 4,44 f w k_w \Phi. \quad (7.5)$$

7.3.2. Sinhronās mašīnas simetriskas slodzes režīms

Enkura reakcija. Ja sinhronās mašīnas enkura tinumā plūst simetriska slodzes strāva, tad rezultējošo magnētisko lauku mašīnā rada ierosmes un enkura tinumu MS kopīga darbība. Šī iemesla

dēļ magnētiskā plūsma sinhronajā mašīnā tukšgaitas un slodzes režīmā ir dažāda.

Enkura MS ietekmi uz mašīnas magnētisko plūsmu sauc par enkura reakciju.

Sakarību vieglākai izpratnei izmantosim priekšstatu par atsevišķajām magnētiskajām plūsmām, t. i., par rotora ierosmes plūsmu Φ un enkura reakcijas plūsmu Φ_a , kuru rada enkura tinuma trīs-fāzu strāva.

Enkura reakcijas darbība ir atkarīga no slodzes rakstura, t. i., no fāzu nobīdes leņķa ψ starp enkura tinumā inducēto EDS E un enkura strāvu I . Lai izsekotu enkura plūsmas ietekmei uz ierosmes plūsmu, jānosaka to virzieni telpā katram raksturīgajam slodzes režīmam. Te jāatceras, ka enkura tinuma fāzē inducētais EDS E sasniedz maksimālo vērtību momentā, kad šīs fāzes vadi atrodas pret pola vidu un enkura lauka ass sakrīt ar tās fāzes asi, kurā pašreiz ir strāvas maksimālā vērtība. EDS virzienu nosaka pēc labās rokas likuma, bet magnētiskā lauka spēka līniju virzienu — pēc labās skrūves likuma.

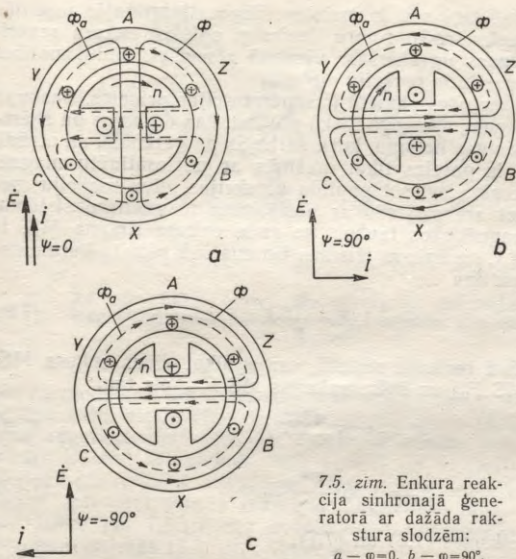
Noskaidrosim enkura reakcijas darbību sinhronajā ģeneratorā trīs raksturīgos slodzes režīmos: $\psi=0$; $\psi=90^\circ$ un $\psi=-90^\circ$. Pieņemsim, ka rotors griežas pulksteņa rādītāju kustības virzienā.

Ja $\psi=0$ (7.5. zīm. a), tad enkura strāva I sakrīt fāzē ar inducēto EDS E , t. i., strāva un EDS katrā fāzē vienlaikus sasniedz maksimālās vērtības. Kā redzams no zīmējuma, enkura lauka magnētiskās spēka līnijas ir perpendikulāras polu asij, un tāpēc šajā gadījumā enkura reakciju sauc par *enkura šķērsreakciju*. Enkura šķērsreakcijas darbības rezultātā magnētiskā indukcija zem vienas pola malas palielinās, bet zem otras samazinās.

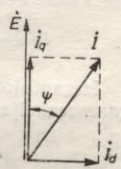
Ja $\psi=90^\circ$ (7.5. zīm. b), tad enkura strāva I atpaliek fāzē no EDS E par 90° . Tāpēc fāzē A strāvas maksimālā vērtība ir momentā, kad rotora polu ass pagriezusies rotācijas virzienā par 90° attiecībā pret šīs ass 7.5. zīmējumā a attēloto stāvokli. Šajā gadījumā, kā tas redzams no zīmējuma, enkura lauka magnētiskās spēka līnijas sakrīt ar polu asi, bet attiecībā pret ierosmes lauka spēka līnijām tās ir pretēja virziena. Tādējādi enkura reakcija samazina ierosmes plūsmu, un tāpēc šāda rakstura enkura reakciju sauc par *atmagnetizējošu enkura garenreakciju*.

Ja $\psi=-90^\circ$ (7.5. zīm. c), tad strāva I apsteidz fāzē EDS E par 90° . Tāpēc A fāzē strāvas maksimālā vērtība ir momentā, kad rotora polu ass atrodas 90° pirms šīs ass 7.5. zīmējumā a attēlotā stāvokļa. Šajā gadījumā enkura lauka magnētiskās spēka līnijas vērstas pa polu asi un to virziens sakrīt ar ierosmes lauka spēka līniju virzienu. Enkura reakcija palielina ierosmes magnētisko plūsmu, un šāda rakstura enkura reakciju sauc par *magnetizējošu enkura garenreakciju*.

Vispārīgā gadījumā leņķim ψ var būt jebkura vērtība ($-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$). Tā kā enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas ietekme



7.5. zīm. Enkura reakcija sinhronajā ģeneratorā ar dažāda rakstura slodzēm:
 a - $\varphi=0$, b - $\varphi=90^\circ$,
 c - $\varphi=-90^\circ$.



7.6. zīm. Enkura strāvas sadalīšana komponentēs.

uz mašīnas magnētisko plūsmu izpaužas dažādi, tad enkura strāvu lietderīgi sadalīt komponentēs (7.6. zīm.):

$$I_d = I \sin \psi; \quad (7.6)$$

$$I_q = I \cos \psi. \quad (7.7)$$

Strāvu I_d sauc par *enkura strāvas garenkomponenti*, un tā rada atmagnetizējošu vai magnetizējošu reakciju garenass virzienā, bet strāvu I_q — par *enkura strāvas šķērskomponenti*, un tā rada enkura reakciju šķērsass virzienā. (Par *garenasi* (d) sauc līniju, kas sakrīt ar polu asi, bet par *šķērsasi* (q) — līniju, kura attiecībā pret polu asi nobīdīta par 90 elektriskajiem grādiem.)

Enkura reakcijas magnētiskie lauki un to inducētie EDS. Izvirzīto polu sinhronajā mašīnā rotors ir magnētiski nesimetrisks, jo magnētiskā pretestība plūsmai, kas darbojas šķērsass virzienā, ir lielāka nekā magnētiskā pretestība plūsmai garenass virzienā. Tāpēc vienāda lieluma MS, darbojoties garenass un šķērsass virzienā, rada dažāda lieluma enkura reakcijas magnētiskās plūsmas. Bez tam rotoram ir arī elektriska nesimetrija, jo gan izvirzīto, gan neizvirzīto polu mašīnās ierosmes tinuma ass sakrīt ar garenasi, t. i., ierosmes tinums rada plūsmu polu garenass virzienā. Minētie apstākļi apgrūrina sinhronās mašīnas darba procesu kvantitatīvu analīzi, it sevišķi

tādos režīmos, kad leņķis ψ ir mainīgs. Tāpēc sinhronajās mašīnās ar magnētiski nesimetrisku rotoru lietderīgi aplūkot enkura reakcijas darbību garenass un šķērsass virzienā atsevišķi. Šādu analīzes paņēmieni sauc par *divu reakciju metodi*.

Divu reakciju metodes pamatā ir superpozīcijas princips. Saskaņā ar šo principu pieņem, ka magnētiskā plūsma, kas darbojas pa šķērsasi, neietekmē plūsmas lielumu, kura darbojas pa garenasi, un otrādi. Šāds paņēmieni ir pareizs tikai mašīnās ar nepiesātinātu magnētisko sistēmu. Tomēr, ieviešot papildu korekcijas, divu reakciju metodi var izmantot arī mašīnās ar piesātinātu magnētisko sistēmu.

Aplūkosim magnētiskos laukus, ko rada enkura tinuma MS. Ir zināms (sk. 5.5.4.), ka enkura trīsfāzu tinuma MS pirmās harmoniskās amplitūdas vērtība

$$F_a = 1,35 \frac{\omega k_w}{\rho} I. \quad (7.8)$$

Izmantojot divu reakciju metodi, var aplūkot divus enkura MS: garenreakcijas MS F_{ad} un šķērsreakcijas MS F_{aq} , pie tam

$$F_{ad} = 1,35 \frac{\omega k_w}{\rho} I_d, \quad (7.9)$$

$$F_{aq} = 1,35 \frac{\omega k_w}{\rho} I_q \quad (7.10)$$

jeb, ievērojot izteiksmes (7.6) un (7.7),

$$F_{ad} = F_a \sin \psi, \quad (7.11)$$

$$F_{aq} = F_a \cos \psi. \quad (7.12)$$

Garenreakcijas MS liknes maksimums sakrīt ar garenasi, bet šķērsreakcijas MS liknes maksimums — ar šķērsasi (7.7. zīm. liknes 1).

Ja gaisa spraugas platums pa visu enkura aploci būtu nemainīgs, tad MS F_{ad} un F_{aq} radītu sinusoidālu indukcijas sadalījumu gaisa spraugā (7.7. zīm. liknes 2) ar amplitūdām $B_{ad,m}$ un $B_{aq,m}$, pie tam (sk. izteiksmi (5.86))

$$B_{ad,m} = \frac{\mu_0}{k_{\mu,d} k_\delta} F_{ad}, \quad (7.13)$$

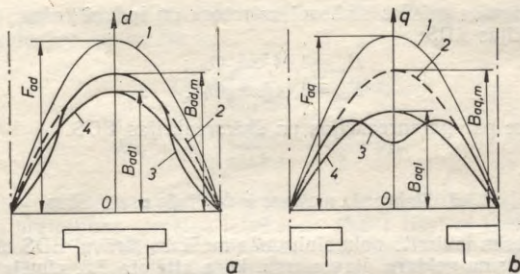
$$B_{aq,m} = \frac{\mu_0}{k_{\mu,q} k_\delta} F_{aq}, \quad (7.14)$$

kur δ — gaisa sprauga;

k_δ — gaisa spraugas koeficients, ar kuru tiek ievērots tas, ka enkura virsma ir rievota (sk. 3.5.2.);

$k_{\mu,d}$, $k_{\mu,q}$ — piesātinājuma koeficienti pa garenasi un šķērsasi, kuri vispārīgā gadījumā ir dažādi.

Istenībā indukcijas sadalījums ir nesinusoidāls (7.7. zīm. liknes 3), jo gaisa spraugas platums gar enkura aploci nav visur vienāds. Tāpēc magnētiskās indukcijas liknes satur pirmo un augstā-



7.7. zīm. Enkura garenreakcijas (a) un šķērsreakcijas (b) magnētiskā lauka indukcijas līknes izvērīto polu sinhronajā mašīnā.

kās harmoniskās, kuras griežas sinhroni ar rotoru un inducē enkura tinumā EDS pirmo un augstākās harmoniskās. Magnētiskās indukcijas augstākās harmoniskās ir relatīvi mazas. Bez tam, izveidojot enkura tinumu ar saīsinātu soli ($y < \tau$) un ar rievu skaitu uz polu un fāzi $q > 1$, EDS augstākās harmoniskās ievērojami samazinās. Tāpēc, aplūkojot enkura reakcijas magnētisko lauku tāpat kā ierosmes lauku (sk. 7.3.1.), var ievērot tikai magnētiskās indukcijas pirmās harmoniskās (7.7. zīm. līknes 4).

Magnētiskās indukcijas pirmās harmoniskās samazinājumu, kura cēlonis ir izvērīto polu rotors ar nevienādu gaisa spraugu gar enkura aploci, var raksturot ar *enkura reakcijas lauka formas koeficientiem* k_{ad} un k_{aq} :

$$k_{ad} = \frac{B_{ad1}}{B_{ad,m}}; \quad (7.15)$$

$$k_{aq} = \frac{B_{aq1}}{B_{aq,m}}; \quad (7.16)$$

kuru vērtības ir atkarīgas no mašīnas ģeometriskajiem izmēriem b_p/τ , δ_m/δ , δ/τ un dotas speciālā literatūrā par elektrisko mašīnu projektēšanu un aprēķināšanu.

No 7.7. zīmējuma var secināt, ka $k_{ad} < 1$, $k_{aq} < 1$ un $k_{ad} > k_{aq}$. Nevērīto polu sinhronajām mašīnām, kurās gaisa spraugas platums gar enkura aploci ir nemainīgs, $k_{ad} = k_{aq} = 1$.

Enkura reakcijas lauks rada magnētisko plūsmu pa garenasi Φ_{ad} un pa šķērsasi Φ_{aq} :

$$\Phi_{ad} = \frac{2}{\pi} B_{ad1} \tau l_\delta = \frac{2}{\pi} k_{ad} B_{ad,m} \tau l_\delta; \quad (7.17)$$

$$\Phi_{aq} = \frac{2}{\pi} B_{aq1} \tau l_\delta = \frac{2}{\pi} k_{aq} B_{aq,m} \tau l_\delta, \quad (7.18)$$

kur l_δ — enkura ekvivalentais garums.

Šis plūsmas griežas sinhroni ar rotoru un inducē enkura tinumā pašindukcijas EDS:

$$E_{ad} = 4,44fwk_w\Phi_{ad}; \quad (7.19)$$

$$E_{aq} = 4,44fwk_w\Phi_{aq}, \quad (7.20)$$

kurus sauc par garenreakcijas un šķērsreakcijas EDS.

7.3.3. Sinhronās mašīnas induktīvās pretestības

Aplūkosim izvīzīto polu sinhronās mašīnas strāvu, EDS un magnētisko plūsmu vektoru diagrammu, kura attēlota 7.8. zīmējumā aktīvi induktīva rakstura slodzei ($0 < \psi < 90^\circ$).

Diagrammā attēloti enkura strāva I un tās komponentes I_d un I_q ; ierosmes tinuma plūsma $\dot{\Phi}$, enkura reakcijas plūsma pa garenasi $\dot{\Phi}_{ad}$ un pa šķērsasi $\dot{\Phi}_{aq}$, pie tam $\dot{\Phi}_{ad}$ un $\dot{\Phi}_{aq}$ sakrīt fāzē ar attiecīgajām strāvām I_d un I_q ; EDS \dot{E} , ko inducē ierosmes plūsma $\dot{\Phi}$, enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas EDS \dot{E}_{ad} un \dot{E}_{aq} , ko inducē plūsmas $\dot{\Phi}_{ad}$ un $\dot{\Phi}_{aq}$, pie tam EDS \dot{E} , \dot{E}_{ad} un \dot{E}_{aq} atpaliek fāzē attiecīgi no $\dot{\Phi}$, $\dot{\Phi}_{ad}$ un $\dot{\Phi}_{aq}$ par 90° . Bez tam diagrammā attēlots arī rezultējošās plūsmas vektors

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_{ad} + \dot{\Phi}_{aq} \quad (7.21)$$

un šis rezultējošās plūsmas inducētā EDS \dot{E}_δ vektors

$$\dot{E}_\delta = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}. \quad (7.22)$$

No vektoru diagrammas redzams, ka EDS \dot{E}_{ad} atpaliek fāzē no strāvas I_d un EDS \dot{E}_{aq} — no strāvas I_q par 90° . Bez tam $E_{ad} \sim \Phi_{ad} \sim F_{ad} \sim I_d$ un $E_{aq} \sim \Phi_{aq} \sim F_{aq} \sim I_q$. Tāpēc enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas EDS var izteikt kā

$$\dot{E}_{ad} = -jX_{ad}I_d, \quad (7.23)$$

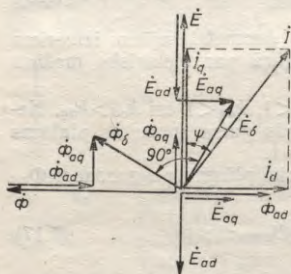
$$\dot{E}_{aq} = -jX_{aq}I_q. \quad (7.24)$$

Pretestību X_{ad} sauc par enkura garenreakcijas induktīvo pretestību, bet pretestību X_{aq} — par enkura šķērsreakcijas induktīvo pretestību. So pretestību skaitliskās vērtības saskaņā ar izteiksmēm (7.23) un (7.24) aprēķina šādi:

$$X_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d}, \quad (7.25)$$

$$X_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q}. \quad (7.26)$$

Ievietojot šajās izteiksmēs E_{ad} un E_{aq} no izteiksmēm (7.19) un (7.20)



7.8. zīm. Sinhronās mašīnas strāvu, EDS un magnētisko plūsmu vektoru diagramma.

un ievērojot sakarības (7.17), (7.18), (7.13), (7.14), (7.9), (7.10), pēc pārveidojumiem iegūst, ka

$$X_{ad} = 3,8f \frac{\mu_0 \tau l \delta}{k_{\mu,d} k_{\delta} \delta} \frac{\omega^2 k_w^2}{p} k_{ad}, \quad (7.27)$$

$$X_{aq} = 3,8f \frac{\mu_0 \tau l \delta}{k_{\mu,q} k_{\delta} \delta} \frac{\omega^2 k_w^2}{p} k_{aq}. \quad (7.28)$$

Iegūtās sakarības atšķiras no maiņstrāvas mašīnas galvenās induktīvās pretestības aprēķina izteiksmes (5.87) tikai ar koeficientiem k_{ad} un k_{aq} , jo izvīrziro polu mašīnās magnētiskās indukcijas pirmā harmoniskā samazinās proporcionāli šiem koeficientiem.

Kā redzams no izteiksmēm (7.27) un (7.28), enkura reakcijas induktīvās pretestības ir atkarīgas no gaisa spraugas δ : jo lielāka gaisa sprauga, jo mazākas ir šo pretestību vērtības. Lai ierobežotu enkura reakcijas ietekmi, pretestību X_{ad} un X_{aq} vērtības nedrīkst pārsniegt noteiktas robežas. Tāpēc salīdzinājumā ar asinhronajām mašīnām sinhronās mašīnas izveido ar relatīvi lielu gaisa spraugu. Tomēr šeit jāievēro, ka gaisa spraugas palielināšana ir saistīta ar ierosmes tinuma palielināšanu, kā rezultātā mašīna kļūst dārgāka.

Enkura reakcijas induktīvās pretestības ir atkarīgas arī no mašīnas magnētiskās sistēmas piesātinājuma: mašīnās ar nepiesātinātu magnētisko sistēmu $k_{\mu,d} = k_{\mu,q} = 1$, bet, palielinoties piesātinājumam $k_{\mu,d} > 1$, $k_{\mu,q} > 1$ un induktīvās pretestības samazinās.

Tā kā $k_{ad} > k_{aq}$ (sk. 7.3.2.), tad $X_{ad} > X_{aq}$. Neizvīrziro polu sinhronajās mašīnās $k_{ad} = k_{aq} = 1$ un tāpēc $X_{ad} = X_{aq}$. Tas nozīmē, ka neizvīrziro polu sinhronajās mašīnās enkura reakcijas darbību var raksturot ar vienu pretestību, kuru turpmāk apzīmēsim ar X_{ad} .

Slogotā sinhronajā mašīnā enkura strāva rada ne tikai plūsmas Φ_{ad} un Φ_{aq} , bet arī izkliedes plūsmu Φ_{σ} , kas noslēdzas ap enkura tinuma vadiem, neskarot rotoru. Šī plūsma ir proporcionāla enkura strāvai I un sakrīt ar to fāzē. Izkliedes plūsma inducē enkura tinumā izkliedes EDS E_{σ} , kas no Φ_{σ} atpaliek fāzē par 90° (7.9. zīm.). Saskaņā ar 7.9. zīmējuma attēloto vektoru diagrammu EDS \dot{E}_{σ} var izteikt šādi:

$$\dot{E}_{\sigma} = -jX_{a,\sigma} I, \quad (7.29)$$

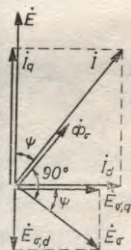
kur $X_{a,\sigma}$ — enkura tinuma izkliedes induktīvā pretestība.

Tā kā izkliedes plūsma noslēdzas galvenokārt gaisā, tad pretestība $X_{a,\sigma}$ nav atkarīga no piesātinājuma.

Izkliedes EDS \dot{E}_{σ} var sadalīt divās komponentēs: $\dot{E}_{\sigma,d}$ un $\dot{E}_{\sigma,q}$ (7.9. zīm.), pie tam

$$E_{\sigma,d} = E_{\sigma} \sin \psi = X_{a,\sigma} I \sin \psi = X_{a,\sigma} I_d, \quad (7.30)$$

$$E_{\sigma,q} = E_{\sigma} \cos \psi = X_{a,\sigma} I \cos \psi = X_{a,\sigma} I_q. \quad (7.31)$$



7.9. zīm. Vektoru diagramma sinhronās mašīnas izkliedes EDS noteikšanai.

No 7.8. un 7.9. zīmējumiem redzams, ka $\dot{E}_{\sigma,d}$ un \dot{E}_{ad} , tāpat kā $\dot{E}_{\sigma,q}$ un \dot{E}_{aq} sakrīt fāzē, tāpēc šos EDS var summēt aritmētiski:

$$E_{ad} + E_{\sigma,d} = X_{ad}I_d + X_{a,\sigma}I_d = (X_{ad} + X_{a,\sigma})I_d = X_d I_d; \quad (7.32)$$

$$E_{aq} + E_{\sigma,q} = X_{aq}I_q + X_{a,\sigma}I_q = (X_{aq} + X_{a,\sigma})I_q = X_q I_q. \quad (7.33)$$

Pretestības

$$X_d = X_{a,\sigma} + X_{ad}, \quad (7.34)$$

$$X_q = X_{a,\sigma} + X_{aq} \quad (7.35)$$

sauc par *sinhronajām induktīvajām pretestībām*, pie tam X_d ir *garenlauka sinhronā induktīvā pretestība*, bet X_q — *šķērslauka sinhronā induktīvā pretestība*. Neizvirzīto polu sinhronajām mašīnām $X_d = X_q$. (Turpmāk neizvirzīto polu mašīnas sinhrono induktīvo pretestību apzīmēsim ar X_d .)

Lai salīdzinātu dažādas jaudas sinhrono mašīnu induktīvās pretestības, lietderīgi tās izteikt relatīvajās vienībās. So pretestību skaitliskās vērtības dotas 7.1. tabulā.

7.1. tabula

SINHRONO MAŠĪNU PARAMETRI

Parametri	Izvirzīto polu mašīnām	Neizvirzīto polu mašīnām
R_{a*}	0,002...0,02	0,002...0,008
X_{ad*}	0,5...1,5	1,1...2,5
X_{aq*}	0,3...0,9	1,1...2,5
$X_{a,\sigma*}$	0,1...0,3	0,08...0,25
X_{d*}	0,6...1,8	1,2...2,8
X_{q*}	0,4...1,2	1,2...2,8
X'_{d*}	0,2...0,5	0,2...0,4
X''_{d*}	0,15...0,35	0,12...0,3
X_{2*}	0,15...0,8	0,12...0,3
X_{0*}	0,02...0,25	0,02...0,1
T_a (s)	0,03...0,5	0,04...0,4
T'_{d} (s)	0,6...3,0	0,4...1,6
T''_{d} (s)	0,02...0,08	0,03...0,15

7.3.4. Sinhronās mašīnas vektoru diagrammas

Izvirzīto polu sinhronā mašīna. Aplūkosim sinhrono mašīnu, kura darbojas ģenerators režīmā. Sinhronā ģenerators enkura tinuma fāzes spriegums U ir vienāds ar tinumā inducēto EDS summu mīnus sprieguma kritums enkura tinuma aktivajā pretestībā R_a . Ievērojot iepriekš aplūkotos EDS, sinhronā ģenerators sprieguma vienādojumu var uzrakstīt šādi:

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma} - R_a I. \quad (7.36)$$

Izsakot enkura reakcijas un izkliedes EDS ar strāvu un atbilstošu induktīvo pretestību reizinājumiem (sk. izteiksmes (7.23), (7.24) un (7.29)), vienādojuma (7.36) vietā iegūstam vienādojumu

$$| \quad \dot{U} = \dot{E} - jX_{ad}I_d - jX_{aq}I_q - jX_{a,\sigma}I - R_a I. \quad (7.37)$$

Sprieguma vienādojumam (7.37) atbilst vektoru diagramma, kura attēlota 7.10. zīmējumā gadījumam, kad ģenerators strādā ar aktīvi induktīva rakstura slodzi ($\varphi > 0$). Izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammu sauc arī par Blondela diagrammu.

Leņķi Θ starp vektoriem \dot{E} un \dot{U} sauc par *slodzes leņķi*, jo šis leņķis ir atkarīgs no ģeneratora slodzes

$$P = mUI \cos \varphi, \quad (7.38)$$

par ko var pārliecināties no vektoru diagrammas. Ja, piemēram, $U = \text{const}$ un $I = \text{const}$, tad, samazinoties leņķim φ , palielinās enkura strāvas šķērskomponente I_q un atbilstoši tam palielinās arī sprieguma kritums $X_{aq}I_q$ un leņķis Θ .

7.10. zīmējumā attēlotajā vektoru diagrammā parādītas arī dažas papildu konstrukcijas un lielumi, kuri dod priekšstatu par raksturīgām sakarībām izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammā un kurus atsevišķos gadījumos izmanto vektoru diagrammas konstruēšanai. Tā, piemēram, \dot{E}_δ ir EDS, ko inducē rezultējošā plūsma, t. i., plūsma $\dot{\Phi}_\delta$ (sk. arī 7.3.3.), bet $\dot{E}_{\delta,d}$ — EDS, ko inducē ģenerators rezultējošā plūsma, t. i., plūsma $\dot{\Phi}_{\delta,d} = \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_{ad}$.

Praksē izmanto vēl arī izvirzīto polu sinhronās mašīnas cita veida vektoru diagrammu, ko sauc par *vienkāršoto vektoru diagrammu*. To iegūst, ja ievēro, ka $I = I_d + I_q$, un vienādojumā (7.37) sprieguma kritumu $X_{a,\sigma}I$ aizstāj ar ekvivalentu lielumu $(X_{a,\sigma}I_d + X_{a,\sigma}I_q)$. Bez tam sinhronās mašīnas enkura tinuma aktīvā pretestība R_a ir ļoti maza, un sprieguma kritums $R_a I$ parasti nepārsniedz 1% no enkura pilnā sprieguma U , tāpēc enkura tinuma aktīvo pretestību var neievērot, t. i., pieņemt, ka $R_a = 0$. Tad, ievērojot izteiksmes (7.34) un (7.35), sinhronā ģenerators sprieguma vienādojumu var uzrakstīt šādi:

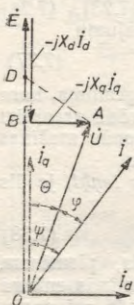
$$\dot{U} = \dot{E} - jX_d I_d - jX_q I_q. \quad (7.39)$$

Šim vienādojumam atbilst vektoru diagramma, kura attēlota 7.11. zīmējumā. Šāda veida diagrammu parasti izmanto, analizējot sinhronās mašīnas darba režīmus elektriskajās sistēmās.

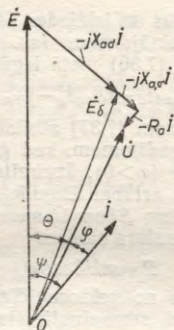
Var atzīmēt dažas raksturīgas sakarības sinhronās mašīnas vektoru diagrammās. Ja no punkta A (sk. 7.10. zīm.) konstruē strāvas vektoram I perpendikulāru nogriezni līdz krustpunktam ar vektoru \dot{E} vai līdz krustpunktam ar šī vektora turpinājumu, tad nogrieznis



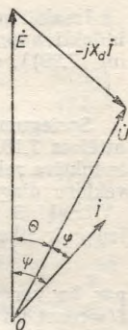
7.10. zīm. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagramma (Blondela diagramma).



7.11. zīm. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas vienkāršota vektoru diagramma.



7.12. zīm. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagramma.



7.13. zīm. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas vienkāršota vektoru diagramma.

\overline{AD} pieņemtajā mērogā ir vienāds ar lielumu $X_{aq}I$. To var pamatot, ja aplūko taisnleņķa trīsstūri ABD , kuram leņķis pie virsotnes A ir vienāds ar leņķi ψ , un tāpēc

$$\overline{AD} = \frac{\overline{AB}}{\cos \psi} = \frac{X_{aq}I_q}{\cos \psi} = X_{aq}I. \quad (7.40)$$

Līdzīgi var pierādīt, ka 7.11. zīmējumā attēlotajā vektoru diagrammā $\overline{AD} = X_q I$.

Neizvirzīto polu sinhronā mašīna. Neizvirzīto polu sinhronajā mašīnā $X_{aq} = X_{ad}$ un $X_q = X_d$. Tāpēc šeit nav nepieciešams enkura strāvu I sadalīt komponentēs I_d un I_q .

Aizstājot sprieguma vienādojumā (7.37) pretestību X_{aq} ar X_{ad} un ievērojot, ka $I_d + I_q = I$, iegūstam vienādojumu

$$\dot{U} = \dot{E} - jX_{ad}I - jX_{a,q}I - R_a I, \quad (7.41)$$

kuram atbilst 7.12. zīmējumā attēlotā vektoru diagramma.

Aizstājot vienādojumā (7.39) pretestību X_q ar X_d , iegūst vienādojumu

$$\dot{U} = \dot{E} - jX_d I \quad (7.42)$$

un šim vienādojumam atbilstošu neizvirzīto polu sinhronās mašīnas vienkāršotu vektoru diagrammu (7.13. zīm.).

Vektoru diagrammu konstruēšana, ievērojot magnētiskās ķēdes piesātinājumu. Sinhrono mašīnu projektēšanā un ekspluatācijā izvirzās uzdevums noteikt ierosmes strāvu, kura nodrošina doto darba

režīmu ($U, I, \cos \varphi$), kā arī aprēķināt dažādas sinhrono mašīnu raksturlieknes. Šim nolūkam izmanto vektoru diagrammas, ievērojot, ka enkura reakcijas induktīvās pretestības ir atkarīgas no magnētiskās sistēmas piesātinājuma.

Precīzi ievērot piesātinājuma ietekmi ir ļoti sarežģīti, tāpēc praksē izmanto tuvinātas metodes, kas balstās uz vairākiem pieņēmumiem. Var pieņemt, ka izvirzīto polu sinhronajā mašīnā pretestība X_{aq} nav atkarīga no magnētiskās sistēmas piesātinājuma, jo magnētiskā plūsma Φ_{aq} , no kuras ir atkarīga šīs pretestības vērtība, noslēdzas caur relatīvi lielu gaisa spraugu (starppolu telpu) (sk. 7.5. zīm. a).

Nosakot garenreakcijas induktīvās pretestības X_{ad} vērtību, kas atbilst piesātinātai magnētiskajai sistēmai, var izmantot mašīnas magnetizēšanas likni $\Phi = f(F)$. Bet, tā kā tinumā inducētais EDS ir tieši proporcionāls magnētiskajai plūsmai, tad ērtāk lietot likni $E = f(F)$, t. i., tukšgaitas raksturliekni. Šeit jāievēro, ka sinhronās mašīnas ierosmes un enkura tinumi ir izveidoti dažādi. Bez tam dažādas ir arī ierosmes un enkura reakcijas lauku formas, ko raksturo ar lauku formas koeficientiem k_t, k_{ad}, k_{aq} . Tāpēc vienāda lieluma ierosmes un enkura tinuma MS rada dažāda lieluma magnētisko plūsmu pirmās harmoniskās. Tukšgaitas raksturliekne raksturo enkura EDS E atkarību no ierosmes tinuma MS F_f . Lai noteiktu rezultējošo magnētisko plūsmu, kuru mašīnā rada ierosmes un enkura tinumu MS kopīga darbība, enkura MS jāreducē uz ierosmes tinumu. Reducēšanas būtība ir tāda, ka enkura tinuma MS aizstāj ar ekvivalentu ierosmes tinuma MS, t. i., tādu ierosmes MS, kurš rada tikpat lielu magnētiskās indukcijas pirmo harmonisko kā reālais enkura MS.

Izvirzīto polu sinhronajai mašīnai reducēšanu veic, izmantojot šādas sakarības:

$$F_{ad}k_{ad} = F'_{ad}k_t; \quad (7.43)$$

$$F_{aq}k_{aq} = F'_{aq}k_t, \quad (7.44)$$

kur F'_{ad} un F'_{aq} — enkura garenreakcijas un šķērsreakcijas MS, kas reducēti uz ierosmes tinumu;
 k_{ad}, k_{aq}, k_t — enkura reakcijas un ierosmes lauku formas koeficienti (sk. 7.3.1., 7.3.2.).

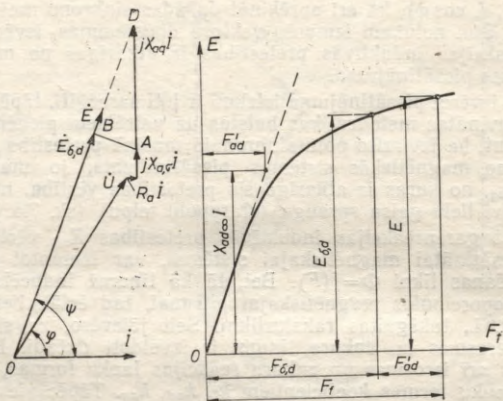
No izteiksmēm (7.43) un (7.44) iegūstam sakarības

$$F'_{ad} = \frac{k_{ad}}{k_t} F_{ad} = k_d F_{ad}, \quad (7.45)$$

$$F'_{aq} = \frac{k_{aq}}{k_t} F_{aq} = k_q F_{aq}. \quad (7.46)$$

Koeficientus k_d un k_q sauc par *enkura reakcijas koeficientiem*.

Neizvirzīto polu sinhronajām mašīnām $k_{ad} = k_{aq} = 1$ un tāpēc $k_d = k_q = 1/k_t$. Šī iemesla dēļ, reducējot enkura MS uz ierosmes tinumu, neizvirzīto polu mašīnām nav nepieciešams to sadalīt



7.14. zīm. Izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammas konstruēšana.

komponentēs F_{ad} un F_{aq} , t. i., aprēķinos var izmantot reducēto pilno enkura MS

$$F'_a = k_d F_a. \quad (7.47)$$

Izmantojot vektoru diagrammu, noteiksim ierosmes tinuma MS izvirzīto polu sinhronajai mašīnai, ja doti U , I , $\cos\varphi$ un tukšgaitas raksturliktne $E = f(F)$.

Vektoru diagrammu (7.14. zīm.) konstruē šādā secībā.

1. Atliek vektorus \dot{U} un I .
2. Vektoram \dot{U} pieskaita sprieguma kritumu enkura tinuma aktīvajā pretestībā ($R_a I$) un izkļieds induktīvajā pretestībā ($jX_{a,\sigma} I$).
3. No punkta A perpendikulāri strāvas I vektoram atliek nogriezni $\overline{AD} = X_{aq} I$.
4. Velkot līniju no punkta O caur punktu D , atrod vektora \dot{E} virzienu un līdz ar to leņķi ψ .
5. No izteiksmēm (7.6) un (7.7) atrod enkura strāvas komponentes I_d un I_q .
6. Velkot perpendikulu no punkta A līdz taisnei OD , atrod EDS $E_{\delta,d}$ un pēc tam no tukšgaitas raksturliktnes rezultējošo MS pa garenasi $F_{\delta,d}$.
7. Aprēķina reducēto enkura garenreakcijas MS:

$$F'_{ad} = k_d F_{ad} = 1,35 \frac{\omega k_w}{p} I_d k_d. \quad (7.48)$$

8. Ierosmes tinuma MS \dot{F}_f nosaka, izmantojot sakarību

$$\dot{F}_{\delta,d} = \dot{F}_f + \dot{F}'_{ad}. \quad (7.49)$$

Atkarībā no slodzes rakstura enkura garenreakcijas MS darbojas pretī vai saskaņoti ar ierosmes tinuma MS. Tāpēc vispārīgā gadījumā izteiksmes (7.49) vietā var rakstīt, ka

$$F_{\delta,d} = F_f \mp F'_{ad}, \quad (7.50)$$

no kurienes

$$F_f = F_{\delta,d} \pm F'_{ad}, \quad (7.51)$$

kur plusa zīme atbilst aktīvi induktīvai slodzei, bet mīnusa zīme — aktīvi kapacitīvai slodzei.

9. No tukšgaitas raksturliknes atbilstoši atrastajai MS F_f vērtībai nosaka EDS E un tā lielumu atliek vektoru diagrammā.

Izmantojot iegūto vektoru diagrammu, var noteikt arī ģenerātorā sprieguma izmaiņu, pārejot no slodzes uz tukšgaitas režīmu. Ja ģenerātorā spriegums ir U , tad pēc slodzes atslēgšanas tas kļūst vienāds ar E . Sprieguma izmaiņu parasti izsaka procentos no nominālā sprieguma U_N . Ja vektoru diagramma konstruēta nominālajam darba režīmam, tad sprieguma procentuālā izmaiņa

$$\Delta U (\%) = \frac{E - U_N}{U_N} 100. \quad (7.52)$$

No vektoru diagrammas var noteikt arī piesātinātas sinhronās mašīnas enkura garenreakcijas induktīvo pretestību X_{ad} . Tā kā $E - E_{\delta,d} = X_{ad}I$, tad

$$X_{ad} = \frac{E - E_{\delta,d}}{I}. \quad (7.53)$$

Izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammu var konstruēt arī nedaudz citādā veidā. Ja, piemēram, ir zināma nepiesātinātas sinhronās mašīnas garenreakcijas induktīvā pretestība $X_{ad\infty}$ (izteiksmē (7.27) $k_{u,d} = 1$), tad enkura garenreakcijas MS F'_{ad} var noteikt no nepiesātinātas mašīnas tukšgaitas raksturliknes. Šādu raksturlikni (svītrlinija 7.14. zīmējumā) iegūst, velkot pieskari tukšgaitas raksturliknes sākuma lineārajai daļai.

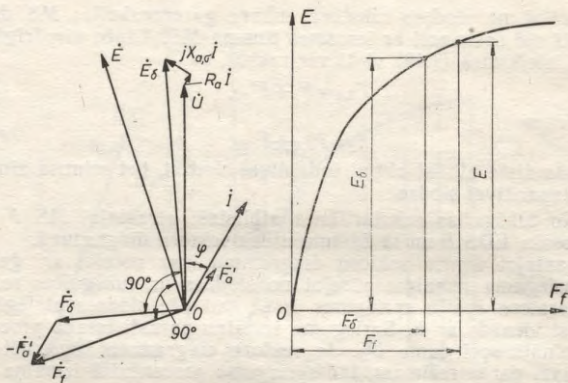
Lai noteiktu ierosmes tinuma MS neizvirzīto polu sinhronajai mašīnai, izmanto Potjē diagrammu, kas ir neizvirzīto polu sinhronās mašīnas spriegumu diagramma, papildināta ar MS diagrammu (7.15. zīm.).

Diagrammu konstruē šādā secībā.

1. Atliek vektorus \dot{U} un I .
2. Pieskaitot sprieguma vektoram \dot{U} sprieguma kritumus $R_a I$ un $jX_{a,\sigma}I$, atrod rezultējošo EDS \dot{E}_δ .
3. No tukšgaitas raksturliknes atrod rezultējošo MS F_δ .
4. Aprēķina enkura reakcijas MS F'_a .
5. Izmantojot sakarību $F_\delta = F_f + F'_a$, atrod ierosmes tinuma MS:

$$F_f = F_\delta - F'_a. \quad (7.54)$$

Šim nolūkam konstruē MS diagrammu, kurā vektors F_δ atpauk fāzē no vektora \dot{E}_δ par 90° , bet vektors F'_a sakrīt fāzē ar strāvas I vektoru.



7.15. zīm. Neizvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammas konstruēšana.

6. No tukšgaitas raksturliknes atrod EDS E , kuru pēc tam atliek vektoru diagrammā, ievērojot, ka E atpaliek fāzē no F_f par 90° .

Procentuālo sprieguma izmaiņu neizvirzīto polu mašīnai nosaka tāpat kā izvirzīto polu mašīnai.

7.4. SINHRONĀ ĢENERATORA RAKSTURLĪKNES

7.4.1. Vispārīgi norādījumi

Sinhronā ģenerators raksturliknes attēlo sakarības starp spriegumu U , enkura strāvu I un ierosmes strāvu I_f , ja frekvence $f_1 = \text{const}$ un $\cos \varphi = \text{const}$.

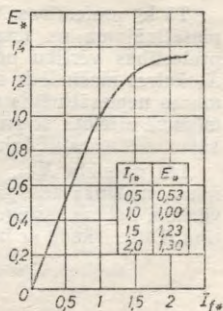
Sinhronā ģenerators raksturliknes var iegūt eksperimentāli, kā arī aprēķinu ceļā, izmantojot vektoru diagrammas. Raksturliknes izvirzīto un neizvirzīto polu sinhronajām mašīnām kvalitatīvi neatšķiras. Lai salīdzinātu dažādas jaudas sinhrono mašīnu raksturliknes, tās bieži attēlo relatīvajās vienībās.

7.4.2. Tukšgaitas raksturlikne

Tukšgaitas raksturlikne raksturo sakarību $E = U = f(I_f)$, ja $I = 0$. Ja dažādu sinhrono ģenerators raksturliknes attēlo relatīvajās vienībās, tad šīs raksturliknes cita no citas atšķiras ļoti

maz. Tāpēc, lai vienkāršotu dažādu režīmu aprēķinus energosistēmās, kur strādā daudz sinhrono ģeneratoru, pieņem, ka visiem hidroģeneratoriem, tāpat kā visiem turboģeneratoriem, tukšgaitas raksturliknes relatīvajās vienībās ir vienādas un atbilst reālo mašīnu vidējām raksturliņķēm. Šādas raksturliknes sauc par *normālajām tukšgaitas raksturliņķēm*.

7.16. zīmējumā attēlota hidroģeneratora normālā tukšgaitas raksturliņķe, kuru ar pietiekamu precizitāti var izmantot visām izvirsīto polu sinhronajām mašīnām (izņemot speciālas nozīmes mašīnas). Par bāzes lielumiem relatīvo vienību sistēmā pieņemti nominālais fāzes spriegums U_N un ierosmes strāva $I_{f,0,N}$, kura tukšgaitā nodrošina nominālo spriegumu. Tad EDS un ierosmes strāva relatīvajās vienībās



7.16. zīm. Hidroģeneratora normālā tukšgaitas raksturliņķe.

$$E_* = \frac{E}{U_N}, \quad (7.55)$$

$$I_{f*} = \frac{I_f}{I_{f,0,N}} \quad (7.56)$$

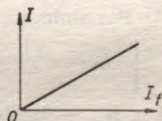
7.4.3. Īsslēguma raksturliņķe

Īsslēguma raksturliņķe attēlo sakarību $I=f(I_f)$, ja $U=0$ simetriska trīsfāzu īsslēguma režīmā.

Tā kā enkura tinuma aktīvā pretestība ir neliela, tad, pieņemot, ka $R_a=0$, īsslēguma strāva ir tīri induktīva. Tāpēc $\psi=90^\circ$, $I_q=0$, $I_d=I$ un sašķaņā ar vienādojumu (7.39)

$$\dot{E} = jX_d I. \quad (7.57)$$

Tādējādi īsslēguma režīmā darbojas tikai enkura garenreakcija, kas atmagnetizē mašīnu, magnētiskā sistēma ir nepiesātināta, un īsslēguma raksturliņķe (7.17. zīm.) tāpēc ir taisne.



7.17. zīm. Sinhronā ģeneratora īsslēguma raksturliņķe.

7.4.4. Garenlauka sinhronās induktīvās pretestības eksperimentāla noteikšana

Izmantojot eksperimentāli uzņemtās īsslēguma un tukšgaitas raksturliņķes, var noteikt sinhronās mašīnas garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d .

Tā kā pretestības X_d vērtība ir atkarīga no magnētiskās sistēmas piesātinājuma un tāād no darba režīma, tad parasti nosaka šīs pretestības vērtību nepiesātinātai mašīnai $X_{d\infty}$, kura atšķirībā no X_d katrai mašīnai ir nemainīgs lielums. Nosakot pretestību $X_{d\infty}$, izmanto nepiesātinātas mašīnas tukšgaitas raksturlielni, kura 7.18. zīmējumā attēlota ar svītrlīniju un ir pieskare tukšgaitas raksturlieknes sākuma lineārajai daļai.

Lai noteiktu $X_{d\infty}$, dotajai ierosmes strāvai $I_f = \overline{OA}$ no nepiesātinātas mašīnas tukšgaitas raksturlieknes atrod atbilstošo EDS E_∞ vērtību, bet no išslēguma raksturlieknes — atbilstošo strāvas I vērtību. Tad saskaņā ar izteiksmi (7.57)

$$X_{d\infty} = \frac{E_\infty}{I}. \quad (7.58)$$

Ja izteiksmē (7.58) EDS E_∞ vietā ņem EDS $E = \overline{AB}$, tad iegūst piesātinātas mašīnas induktīvo pretestību X_d , kura atbilst dotajai ierosmes strāvai $I_f = \overline{OA}$:

$$X_d = \frac{E}{I}, \quad (7.59)$$

pie tam

$$X_d = \frac{X_{d\infty}}{k_\mu} \quad (7.60)$$

kur k_μ — piesātinājuma koeficients.

7.4.5. Išslēguma attiecība

Par sinhronās mašīnas išslēguma attiecību sauc lielumu

$$k_{i.a} = \frac{I_{h.o}}{I_N}, \quad (7.61)$$

kur $I_{h.o}$ — išslēguma strāva, ja ierosmes strāva ir $I_{f.o,N}$, kas tukšgaitā dod nominālo spriegumu ($E = U_N$);

I_N — nominālā strāva.

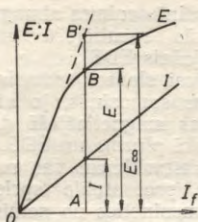
Saskaņā ar izteiksmi (7.57), ja $E = U_N$, un 7.19. zīmējumu

$$I_{h.o} = \frac{U_N}{X_d}. \quad (7.62)$$

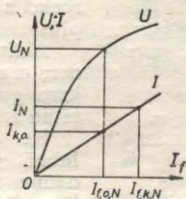
No izteiksmēm (7.62) un (7.61) izriet, ka

$$k_{i.a} = \frac{U_N}{X_d I_N} = \frac{1}{X_{d*}}, \quad (7.63)$$

kur X_{d*} — garenreakcijas induktīvā pretestība relatīvajās vienībās.



7.18. zim. Garenreakcijas sinhronās induktīvās pretestības X_d noteikšana.



7.19. zim. Issléguma attiecības noteikšana.

Issléguma attiecību var noteikt arī, ja zināmas ierosmes strāvu $I_{f,o,N}$ un $I_{f,h,N}$ vērtības (7.19. zim.). Tad

$$k_{i.a} = \frac{I_{f,o,N}}{I_{f,h,N}} \quad (7.64)$$

Tā kā $X_{d*} = 0,6 \dots 2,8$ (sk. 7.3.3.), tad no izteiksmes (7.63) var secināt, ka issléguma strāva sinhronajās mašīnās ir neliela un bieži pat mazāka par nominālo strāvu. Šāda sinhronās mašīnas īpatnība izskaidrojama ar enkura reakcijas atmagnetizējošo darbību issléguma režīmā.

Issléguma attiecība $k_{i.a}$ ir viens no sinhronās mašīnas raksturīgiem parametriem. Tā raksturo sinhronās mašīnas pārslodzes spēju (sīkāk sk. 7.5.7.), kā arī mašīnas izmērus un izmaksas. Jo lielāka issléguma attiecība (mazāka pretestība X_d), jo lielāka ir pārslodzes spēja. Bet, tā kā sinhronajām mašīnām ar palielinātu issléguma attiecību ir arī lielāka gaisa sprauga, jo $X_d \sim 1/\delta$ (sk. 7.3.3.), tad šādām mašīnām ir lielāki izmēri un tās ir dārgākas.

Izvirzīto polu sinhronajām mašīnām $k_{i.a} = 0,6 \dots 1,6$, neizvirzīto polu mašīnām $k_{i.a} = 0,4 \dots 1,0$.

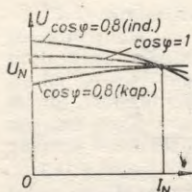
7.4.6. Ārējās raksturliķnes

Ārējās raksturliķnes attēlo sakarību $U = f(I)$, ja $I_f = \text{const}$ un $\cos \varphi = \text{const}$.

Sinhronā ģeneratora ārējās raksturliķnes dažāda rakstura slodzēm attēlotas 7.20. zīmējumā. Ierosmes strāvu, kura nodrošina nominālo režīmu ($U = U_N$, $I = I_N$), sauc par nominālo ierosmes strāvu.

Ja slodze ir aktīva ($\cos \varphi = 1$), tad, samazinot slodzes strāvu, ģeneratora spriegums palielinās, jo samazinās sprieguma kritums enkura tinumā un enkura reakcijas darbība.

Ja slodze ir aktīvi induktīva, kā tas parasti ir praksē, tad, slodzi samazinot, spriegums palielinās straujāk nekā aktīvās slodzes



7.20. zīm. Synchronā ģenerators ārējās raksturliķnes.

gadījumā, jo samazinās enkura atmagnetizējošā reakcija (palielinās rezultējošā magnētiskā plūsma un rezultējošais EDS).

Aktīvi kapacitīvai slodzei samazinoties, ģenerators spriegums samazinās, jo vājinās enkura garenreakcijas magnetizējošā darbība un tātad arī magnētiskā plūsma un EDS.

No ārējām raksturliķnēm var noteikt synchronā ģenerators procentuālo sprieguma izmaiņu, slodzei samazinoties no nominālās vērtības līdz tukšgaitai, ja ierosmes strāva paliek nemainīga:

$$\Delta U (\%) = \frac{U - U_N}{U_N} 100, \quad (7.65)$$

kur U — spriegums tukšgaitā.

Autonomi strādājošā ģenerators procentuālā izmaiņa aktīvi induktīvai slodzei ar $\cos \varphi = 0,8$ parasti ir 25...35%, pie tam lielākās vērtības atbilst neizvirzīto polu synchronajām mašīnām, kurām parasti ir lielāka induktīvā pretestība X_d .

7.4.7. Regulēšanas raksturliķnes

Regulēšanas raksturliķnes attēlo sakarību $I_f = f(I)$, ja $U = \text{const}$ un $\cos \varphi = \text{const}$. No tām redzams, kā jāregulē ģenerators ierosmes strāva, lai, mainoties slodzei, spriegums uz enkura tinuma spailēm paliktu nemainīgs.

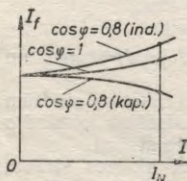
Synchronā ģenerators regulēšanas raksturliķnes dažāda rakstura slodzēm parādītas 7.21. zīmējumā.

Palielinoties induktīva rakstura slodzei, jāpalielina arī ierosmes strāva, jo tai jākompensē enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība.

Aktīvas slodzes gadījumā enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība ir vāja, un tāpēc, palielinoties slodzei, ierosmes strāva jāpalielina mazākā mērā.

Palielinoties kapacitīva rakstura slodzei, ierosmes strāva jāsamazina, jo enkura reakcija magnetizē mašīnu.

Parasti synchronajos ģeneratoros lieto automātiskus sprieguma regulatorus, kuri nodrošina ierosmes strāvas izmaiņu atkarībā no slodzes atbilstoši regulēšanas raksturliķnēm.



7.21. zīm. Synchronā ģenerators regulēšanas raksturliķnes.

7.4.8. Slodzes raksturlikne

Slodzes raksturlikne attēlo sakarību $U=f(I_f)$, ja $I=\text{const}$ un $\cos\varphi=\text{const}$. No dažādām sinhronā ģenerators slodzes raksturliknēm praktiska nozīme ir induktīvās slodzes raksturliknei, kura atbilst tīri induktīvai slodzei ($\cos\varphi=0$). Parasti šādu raksturlikni uzņem gadījumam, kad strāva $I=I_N$.

Ja neievēro enkura tinuma aktīvo pretestību, tad induktīvās slodzes gadījumā $\psi=\varphi=90^\circ$, $I_q=0$, $I_d=I$ un saskaņā ar vienādojumu (7.39)

$$\dot{U} = E - jX_d I \quad (7.66)$$

jeb

$$U = E - X_d I. \quad (7.67)$$

Tas nozīmē, ka induktīvās slodzes raksturlikne (7.22. zīm. likne 2) atrodas zem tukšgaitas raksturliknes (likne 1). Punkts A atbilst simetriskam trīsfāzu īsslēgumam, kad $I=I_N$ un $U=0$.

Izmantojot eksperimentāli noteiktas tukšgaitas un induktīvās slodzes raksturliknes, var atrast garenlauka sinhrono induktīvo pretestību X_d . Šim nolūkam uz induktīvās slodzes raksturliknes atliek nominālo spriegumu $U_N = \overline{A'N}$, atrod ierosmes strāvu $I_f = \overline{ON}$ un no tukšgaitas raksturliknes šaj ierosmes strāvai atbilstošo EDS $E = \overline{MN}$. Tad saskaņā ar izteiksmi (7.67) var atrast, ka

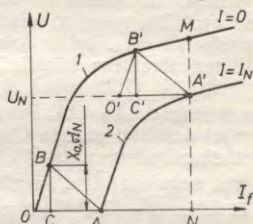
$$X_d = \frac{E - U_N}{I_N} = \frac{\overline{MN} - \overline{A'N}}{I_N} = \frac{\overline{MA'}}{I_N}. \quad (7.68)$$

7.4.9. Reaktīvais trīsstūris un izkliedes induktīvās pretestības eksperimentāla noteikšana

Izmantojot tukšgaitas un slodzes eksperimentālās raksturliknes un reaktīvo trīsstūri, var atrast enkura tinuma izkliedes induktīvo pretestību $X_{a,\sigma}$.

Par sinhronās mašīnas reaktīvo trīsstūri sauc trīsstūri CBA (7.22. zīm.), kura vertikālā katete BC ir vienāda ar sprieguma kritumu $X_{a,\sigma} I_N$, bet horizontālā katete CA — ar enkura reakcijas MS . Reaktīvo trīsstūri var uzkonstruēt, ja zināmi šādi lielumi: 1) ierosmes strāva $I_{f,h,N} = \overline{OA}$, kura īsslēguma režīmā nodrošina nominālo strāvu I_N ; 2) pretestība $X_{a,\sigma}$; 3) tukšgaitas raksturliknes sākuma lineārā daļa.

Var uzskatīt, ka ierosmes strāva $I_{f,h,N} = \overline{OA}$ īsslēguma režīmā sastāv no divām komponentēm: $I'_f = \overline{OC}$ un $I''_f = \overline{CA}$. Ierosmes strāvas



7.22. zīm. Sinhronā ģenerators slodzes raksturlikne un reaktīvais trīsstūris.

komponente I'_f išslēguma režīmā rada magnētisko plūsmu, kura inducē enkura tinumā EDS $E_{\sigma} = X_{a,\sigma} I_N$, bet komponente I''_f kompensē enkura garenreakcijas MS atmagnetizējošo darbību. Enkura reakcijas MS un sprieguma kritums $X_{a,\sigma} I_N$ jebkurā induktīvās slodzes raksturlieknes apgabalā ir nemainīgi, jo abi šie lielumi ir proporcionāli enkura strāvai. Tāpēc, pārvietojot reaktīvo trīsstūri sev paralēli tā, lai virsotne B slidētu pa tukšgaitas raksturliekni, punkts A vienmēr atradīsies uz induktīvās slodzes raksturlieknes. Izmantojot šo apstākli, reaktīvo trīsstūri var uzkonstruēt arī tad, ja nav zināma pretestība $X_{a,\sigma}$, bet ir dotas tukšgaitas un induktīvās slodzes raksturlieknes. Reaktīvo trīsstūri tādā gadījumā konstruē šādā secībā. No punkta A' (7.22. zīm.), kas atbilst nominālajam spriegumam, atliek nogriezni $\overline{O'A'} = \overline{OA}$. Paralēli tukšgaitas raksturlieknes sākuma lineārajai daļai no punkta O' velk taisni līdz krustpunktam ar tukšgaitas raksturliekni (punkts B'). Pēc tam, velkot no punkta B' perpendikulu pret nogriezni $\overline{O'A'}$, iegūst reaktīvā trīsstūra katetes $B'C'$ un $C'A'$. Tā kā $\overline{B'C'} = X_{a,\sigma} I_N$, tad no šejienes izriet, ka

$$X_{a,\sigma} = \frac{\overline{B'C'}}{I_N}.$$

7.5. SINHRONO MAŠĪNU PARALĒLA DARBĪBA

7.5.1. Vispārīgi norādījumi

Sinhronais ģenerators var darboties divējādos apstākļos: vai nu barot atsevišķu tīklu ar tam pieslēgtajiem patērētājiem (autonoma darbība), vai arī barot kopīgu tīklu, kuram pieslēgti citi ģeneratori (paralēla darbība). Pirmais darbības veids praksē sastopams reti. Elektrostacijās vienmēr ir uzstādīti vairāki ģeneratori, kuri paralēli baro kopīgo tīklu. Atkarībā no pieprasītās jaudas darbina tādu ģeneratoru skaitu, kurš nodrošina katra ģeneratora pilnīgu noslodzi. Atsevišķas elektrostacijas savukārt pieslēgtas kopīgai enerģosistēmai. Enerģosistēmas nepārtraukti paplašina, apvienojot mazākas sistēmas. Tādējādi mūsdienu enerģosistēmās paralēli darbojas liels skaits sinhrono ģeneratoru. Ar šādu enerģijas apgādes sistēmu tiek nodrošināts elektrostaciju augstāks lietderības koeficients un samazināta nepieciešamā jaudas rezerve, kā arī rasta iespēja efektīvi manevrēt ar sezonas un diennakts energoresursiem.

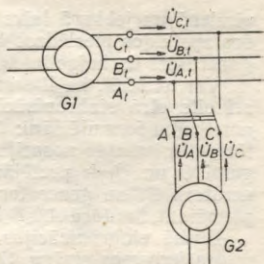
7.5.2. Sinhrono ģeneratoru pieslēgšana paralēlai darbībai

Pieslēdzot sinhrono ģeneratoru tīklam paralēlai darbībai ar citiem ģenerаторiem, jāpanāk, lai pieslēgšanas brīdī nerastos lielas strāvas, kas var nelabvēlīgi ietekmēt ģeneratora, primārā dzinēja, kā arī visas enerģosistēmas darbību. Tāpēc, pieslēdzot ģeneratoru

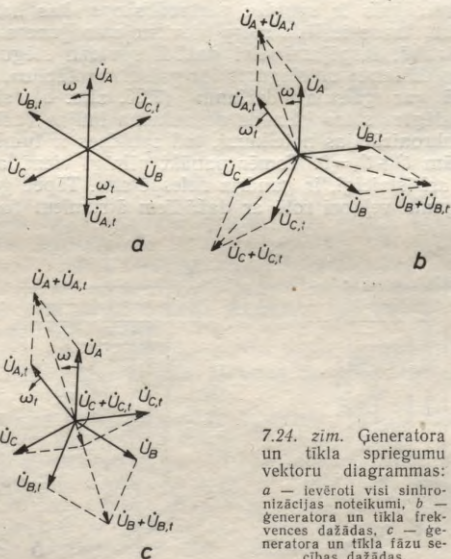
tīklam, vispirms attiecīgi jāierēgulē tā režīms un pareizi jāizvēlas ieslēgšanas moments. Šo operāciju kopumu sauc par *sinhronizāciju*.

Sinhronizācijas noteikumi. Lai ģeneratoru pieslēdzot paralēlai darbībai, nodrošinātu vislabākos apstākļus, ir jāievēro sinhronizācijas noteikumi: 1) pieslēdzamā ģeneratora spriegumam U jābūt skaitliski vienādam ar tīkla spriegumu U_t ; 2) pieslēdzamā ģeneratora un tīkla spriegumiem jābūt pretējās fāzēs ($\dot{U} = -\dot{U}_t$); 3) ģeneratora frekvencei jābūt vienādai ar tīkla frekvenci ($f = f_t$); 4) ģeneratora fāzu secībai jāatbilst tīkla fāzu secībai.

7.23. zīmējumā attēlotajā shēmā visi tīklā strādājošie ģeneratori aizvietoti ar vienu ekvivalentu ģeneratoru $G1$, kurš uztur tīklā spriegumu U_t . Tīklam paralēli pieslēdz ģeneratoru $G2$. Ja ievēroti visi sinhronizācijas noteikumi, tad ģeneratora un tīkla spriegumu vektori (7.24. zīm. a) rotē ar vienādu ātrumu vienā un tajā pašā



7.23. zīm. Sinhronā ģeneratora un tīkla paralēlās darbības shēma.



7.24. zīm. Ģeneratora un tīkla spriegumu vektoru diagrammas: a — ievēroti visi sinhronizācijas noteikumi, b — ģeneratora un tīkla frekvences dažādas, c — ģeneratora un tīkla fāzu secības dažādas.

virzienā un jebkurā laika momentā ir vienādi un pretējās fāzēs. Šādos apstākļos pieslēdzot ģeneratoru tīklam, tā enkura strāva $I=0$ un ģenerators darbojas tukšgaitā.

Var atzīmēt, ka literatūrā par elektriskajām mašīnām sastopams arī cits otrā sinhronizācijas noteikuma traktējums. Daži autori šo noteikumu formulē šādi: $\dot{U} = \dot{U}_t$ (tīkla un ģeneratora spriegumi sakrīt fāzē). Ja izmanto nosacījumu $\dot{U} = -\dot{U}_t$, tad ar to ir jāsaprot, ka spriegumi \dot{U} un \dot{U}_t ir pretējās fāzēs kontūros, ko veido ekvivalentā ģeneratora $G1$ un ģeneratora $G2$ (sk. 7.23. zīm.) attiecīgo fāzu tinumi, piemēram, kontūrā AA_1B_1BA .

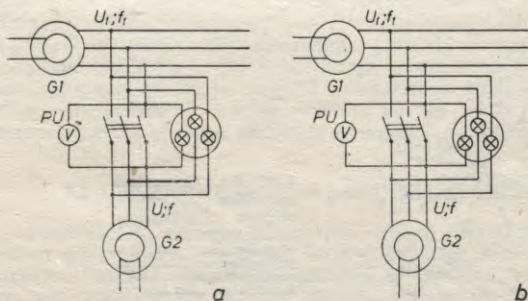
Pirmā sinhronizācijas noteikuma izpildi panāk, regulējot ģeneratora ierosmes strāvu. Sprieguma frekvenci un fāzi pirmā un trešā noteikuma izpildīšanai var izmainīt, regulējot primārā dzinēja rotācijas frekvenci. Ja ģeneratora fāzu secība neatbilst tīkla fāzu secībai, tad jāapmaina vietām divi ģeneratora spailēm pievienotie vadi.

Nepareiza sinhronizācija var izraisīt nopietnas avārijas. Ja, piemēram, pieslēgšanas momentā ģeneratora un tīkla spriegumi sakrīt fāzē, tad šāds gadījums atbilst isslēgumam ar divkāršu spriegumu, un tāpēc enkura tinumā plūstošās strāvas var sasniegt nepieļaujami lielas vērtības.

Sinhronizācijas paņēmieni. Praksē izmanto precīzās sinhronizācijas un pašsinhronizācijas metodes. Precīzo sinhronizāciju realizē ar dažāda veida *sinhronoskopiem* un *sinhronizatoriem*.

Visvienkāršākais ir spuldžu sinhronoskops, kas sastāv no trīs kvēlspuldzēm, kuras ieslēdz starp pievienojamo ģeneratoru un tīklu noteiktā kārtībā. Iespējami divi dažādi spuldžu slēgumi: slēgums ar «gaismas dzišanu» un slēgums «ar gaismas rotāciju».

Slēgumā «ar gaismas dzišanu» (7.25. zīm. a) sinhronoskopa spuldzes ieslēgtas starp vienāda nosaukuma līnijas vadiem. Ja ievēroti visi sinhronizācijas noteikumi, tad spuldzes ir tumšas, jo spriegums uz tām $\dot{U} + \dot{U}_t = 0$. Tomēr panākt pilnīgi vienādas frekvences $f = f_t$, kaut arī īslaicīgi, ir gandrīz neiespējami. Tāpēc ģeneratora un tīkla sprieguma vektori rotē ar dažādiem ātrumiem ($\omega \neq \omega_t$) un to



7.25. zīm. Shēmas sinhronā ģeneratora pieslēgšanai paralēlai darbībai: a — slēgums ar «gaismas dzišanu», b — slēgums ar «gaismas rotāciju».

savstarpējais stāvoklis katrā laika momentā ir citāds. 7.24. zīmējumā *b* attēlots viens no šādiem vektoru stāvokļiem.

Ja $f \neq f_t$ (7.26. zīm. *a*), tad spriegums $u + u_t$, kuram pieslēgta katra spuldze, pulsē ar frekvenci $f - f_t$ (svītrlīnija 7.26. zīmējumā *b*). Sakarā ar to sinhronoskopa trīs spuldzes vienlaikus iedegas un vienlaikus nodziest: kad u un u_t sakrīt fāzē, spuldzēm ir maksimālais spilgtums, bet, kad u un u_t ir pretējās fāzēs, spuldzes ir tumšas. Ja slēgumā «ar gaismas dzišanu» spuldzes neiedegas un nenodziest vienlaikus, tad ģenerators fāzu secība neatbilst tīkla fāzu secībai (sk. 7.24. zīm. *c*).

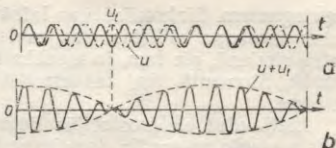
Jo ģenerators frekvence ir tuvāka tīkla frekvencei, jo lēnāk mainās spuldžu spilgtums. Laika posmā, kad spuldzes nedeg, ģenerators ar slēdzi jāpieslēdz tīklam. Ģenerators frekvence jāieregulē tā, lai spuldzes nedegtu 3...5 s. Bet, tā kā spuldzes nodziest jau, saasniedzot spriegumu (0,2...0,3) U_N , tad ģenerators pieslēgšanas momenta precīzai noteikšanai izmanto nullvoltmetru *PU*, kas pievienots paralēli vienai no spuldzēm. Ģeneratoru pieslēdz momentā, kad voltmetra rādītājs atrodas uz skalas nullpunkta.

Biežāk sinhronizācijai lieto spuldžu slēgumu «ar gaismas rotāciju» (sk. 7.25. zīm. *b*), jo ar šādu slēgumu ērtāk fiksēt ieslēgšanas momentu. Slēgumā «ar gaismas rotāciju» viena spuldze ieslēgta tāpat kā iepriekš, bet divas pārējās ieslēgtas starp dažāda nosaukuma līnijas vadiem. Ja ievēroti visi sinhronizācijas noteikumi, tad slēguma shēmā «ar gaismas rotāciju» spuldze, kas ieslēgta starp vienāda nosaukuma fāzēm, ir tumša, bet pārējās divas deg ar vienādu spilgtumu. Ja $f \neq f_t$, tad spuldzes pēc kārtas iedegas un dziest. Tā kā sinhronoskopā spuldzes izvietotas pa aploci, tad rodas rotējošas gaismas iespajds. Ja $f < f_t$, tad gaisma rotē vienā virzienā, bet, ja $f > f_t$, — pretējā virzienā. Ģeneratoru pieslēdz, kad izbeidzas gaismas rotācija vai arī tās frekvence kļūst pietiekami maza (periods 3...5 s), pie tam slēdzi noslēdz momentā, kad nullvoltmetra rādītājs atrodas uz nulles iedaļas.

Ja slēgumā «ar gaismas rotāciju» visas spuldzes iedegas un nodziest vienlaikus, tas liecina, ka tīkla un ģenerators fāzu secība nav vienāda.

Sinhronizāciju ar spuldžu sinhronoskopu un nullvoltmetru lieto, pieslēdzot tīklam galvenokārt mazjaudas ģeneratorus.

Lieljaudas ģeneratoriem izmanto elektromagnētiskos sinhronoskopus, kuru darbības pamatā ir rotējošā magnētiskā lauka princips. Elektromagnētiskais sinhronoskops izveidots līdzīgi trīsfāzu asinhronajam dzinējam ar fāzu rotoru. Sinhronoskopa statora tinumu pieslēdz tīkla spriegumam, bet rotora tinumu — ģenerators



7.26. zīm. Spriegumu u , u_t un $u + u_t$ izmaiņa, ja $f \neq f_t$:
a — spriegumi u un u_t , *b* — spriegums $u + u_t$.

spriegumam. Sinhronizācijas laikā atkarībā no ģeneratora frekvences sinhronoskopa rādītājs, kas savienots ar tā rotoru, rotē vienā vai otrā virzienā, pie tam, jo mazāka frekvenču starpība, jo rādītājs rotē lēnāk. Momentā, kad tas atrodas skalas vidū, ģeneratoru pieslēdz tīklam.

Lieljaudas elektrostacijās lieto arī automātiskos sinhronizatorus, kas atvieglo personāla darbību un palīdz novērst avārijas, kuras var rasties personāla kļūdainas rīcības rezultātā. Šādi sinhronizatori automātiski regulē ģenerators spriegumu un rotācijas frekvenci un automātiski pieslēdz ģeneratoru tīklam, kad ir nodrošināta sinhronizācijas noteikumu izpilde.

Precīzās sinhronizācijas trūkums ir tas, ka ģeneratoru nevar pieslēgt ātri, sevišķi tad, ja spriegums un frekvence tīklā svārstās, piemēram, avārijas režīmā. Tāpēc pēdējā laikā bieži izmanto pašsinhronizāciju, kuras būtība ir šāda. Neierosinātu ģeneratoru iegriež līdz rotācijas frekvencei, kas tuva sinhronajai rotācijas frekvencei (atšķirība ne lielāka par 2%), pieslēdz tīklam un nekavējoties pievieno tam ierosmi. Pieslēgšanas momentā novērojams enkura strāvas trieciens, kas var daudzkārt pārsniegt strāvas nominālo vērtību. Saskaņā ar Padomju Savienībā pastāvošajām normām pašsinhronizācijas metodi atļauj izmantot tad, ja strāvas trieciens nepārsniedz $3,5 I_N$.

7.5.3. Sinhronās mašīnas paralēla darbība ar lielas jaudas tīklu

Pēc pieslēgšanas kopīgā tīklam ģenerators darbojas paralēli ar energosistēmai pievienotiem ļoti daudziem ģeneratoriem. Tāpēc energosistēmas jauda ir daudzkārt lielāka par atsevišķa ģenerators jaudu. Sakarā ar to sistēmas spriegums un frekvence nav atkarīga no atsevišķa ģenerators darbības, un pieslēgtā ģenerators spriegums un frekvence vienmēr ir vienādi ar tīkla spriegumu un frekvenci ($U = U_t = \text{const}$, $f = f_t = \text{const}$), pie tam ģenerators un tīkla spriegumi ir pretējās fāzēs.

Aplūkosim neizvirzīto polu sinhrono mašīnu, kura darbojas paralēli ar lielas jaudas tīklu. Saskaņā ar vienkāršoto vektoru diagrammu (sk. 7.13. zīm.) un vienādojumu (7.42)

$$I = \frac{E - \dot{U}}{jX_d} = \frac{\Delta \dot{U}}{jX_d} \quad (7.69)$$

Reaktīvās jaudas izmaiņa. Pieņemsim, ka, pieslēdzot sinhrono ģeneratoru tīklam, ir ievēroti visi sinhronizācijas noteikumi. Tad $\dot{U} = -\dot{U}_t$ jeb $E = \dot{U} = -\dot{U}_t$ (7.27. zīm. a) un saskaņā ar izteiksmi (7.69) ģenerators darbojas tukšgaitā ($I = 0$).

Palielinot ierosmes strāvu (mašīnu pārierosinot), $E > U$ un enkura tinumā plūst strāva I , kura atpaliek fāzē no $\Delta \dot{U}$ un tāpat arī no sprieguma \dot{U} par 90° , bet tīkla spriegumu \dot{U}_t apsteidz par 90° (7.27. zīm. b). Tas nozīmē, ka šajā gadījumā attiecībā pret tīklu sinhronā mašīna darbojas kā kondensators, t. i., atdod tīklā reaktīvo jaudu.

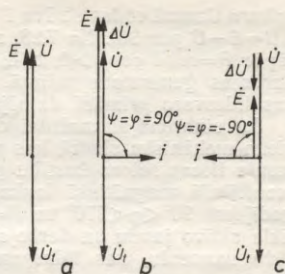
Samazinot ierosmes strāvu (mašīnu nepilnīgi ierosinot), $E < U$ un enkura strāva apsteidz spriegumu \dot{U} , bet atpaliēk fāzē no \dot{U}_t (7.27. zīm. c). Šajā gadījumā sinhronā mašīna attiecībā pret tiklu darbojas kā induktivitāte, t. i., uzņēms no tīkla reaktīvo jaudu.

Tādējādi ierosmes strāvas izmaiņa sinhronajā mašīnā rada tikai reaktīvās jaudas izmaiņu.

Sinhronās mašīnas, kuras paredzētas reaktīvās jaudas regulēšanai un darbojas bez aktīvas slodzes, sauc par *sinhronajiem kompensatoriem* (sk. 7.6.2.).

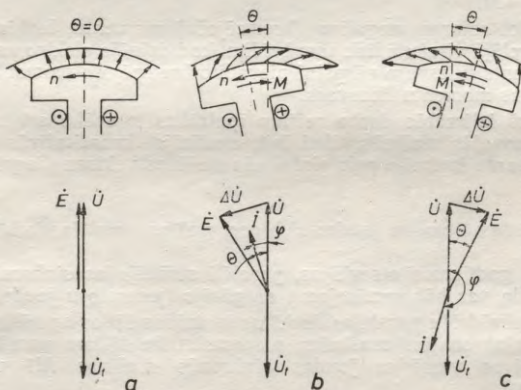
Aktīvās jaudas izmaiņa. Kā jau atzīmēts, sinhrono mašīnu tīklam pieslēdz tukšgaitas režīmā, kad $I = 0$ un $E = U$. Mašīnā tad pastāv tikai ierosmes tinuma magnētiskais lauks. Šajā gadījumā slodzes leņķis $\Theta = 0$ (7.28. zīm. a), mašīna no tīkla jaudu neuzņēms un jaudu tīklā neatdod.

Palielinot primārā dzinēja griezes momentu (palielinot tvaika vai ūdens padevi turbīnai), rotora kustība paātrinās, t. i., rotora pola ass apsteidz rezultējošā magnētiskā lauka asi par leņķi Θ , kas vienlaikus ir leņķis starp vektoriem \dot{E} un \dot{U} (7.28. zīm. b). Mašīnas



7.27. zīm. Vektoru diagrammas sinhronajām mašīnām ar dažādām ierosmēm:

a — ar pilnu ierosmi, b — ar pārierosmi, c — ar nepilnīgu ierosmi.



7.28. zīm. Sinhronās mašīnas vektoru diagrammas, darbojoties paralēli ar tīklu tukšgaitā (a), ģeneratora režīmā (b) un dzinēja režīmā (c).

enkura tinumā rodas strāva I (sk. izteiksmi (7.69)), kura atpaliēk no $\Delta U = E - U$ par 90° . No 7.28. zīmējumā b redzams, ka $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$, tāpēc $P = mUI \cos \varphi > 0$, t. i., mašīna atdod tīklam aktīvo jaudu un darbojas ģeneratora režīmā. Mašīna attīsta bremsējošu momentu, kas līdzsvaro primārā dzinēja griezes momenta pieaugumu.

Ja, sinhronajai mašīnai darbojoties tukšgaitā, tās vārpstai pievieno mehānisku slodzi, kas rada bremsējošu momentu, tad šis moments tiecas rotora kustību palēnināt. Rotora pola ass atpaliēk no rezultējošā magnētiskā lauka ass par leņķi Θ (7.28. zīm. c). Šajā gadījumā $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ un $P = mUI \cos \varphi < 0$, t. i., mašīna patērē no tīkla aktīvo jaudu un darbojas dzinēja režīmā. Sinhronā mašīna attīsta momentu, kas līdzsvaro vārpstai pievienoto bremsējošo momentu.

Kā redzams no 7.28. zīmējuma b un c , ģeneratora režīmā vektors U atpaliēk no E ($\Theta > 0$), bet dzinēja režīmā U apsteidz E ($\Theta < 0$). No teiktā var secināt, ka tīklam pievienotās sinhronās mašīnas aktīvo jaudu var regulēt, mainot primārā dzinēja jaudu vai momentu.

Elektromagnētiskā momenta rašanos sinhronās mašīnas ģeneratora un dzinēja režīmā var izskaidrot arī ar magnētisko spēka līniju deformāciju (sk. 7.28. zīm.).

Svarīgi atzīmēt, ka, izmainot mehānisko momentu uz sinhronās mašīnas vārpstas, tai piemīt spēja līdz zināmām robežām saglabāt sinhronismu ar tīklu ($n = n_1 = \text{const}$). Tā, piemēram, ja vārpstai pievada pozitīvu mehānisku momentu $M_m > 0$, rotors paātrinās un slodzes leņķis Θ sāk palielināties. Tai pašā laikā mašīna slogojas ar aktīvo jaudu P un attīsta bremsējošu elektromagnētisko momentu M . Pie tam Θ , P un M pieaug tik ilgi, kamēr iestājas momentu līdzsvars $M_m = M$.

Pievadot rotoram negatīvu (bremssējošu) momentu, leņķis Θ palielinās pretējā virzienā līdz tam brīdim, kad dzinēja elektromagnētiskais moments līdzsvaro vārpstai pievadīto bremsējošo momentu, t. i., kad iestājas momentu līdzsvars.

Iepriekš iztīrītās darba režīmu īpatnības ir spēkā arī izvirzīto polu sinhronajās mašīnās, tikai šeit, analizējot kvantitatīvās sakarības, jāizmanto izvirzīto polu sinhronās mašīnas vektoru diagrammas.

7.5.4. Samērojamas jaudas sinhrono mašīnu paralēla darbība

Dažos gadījumos atsevišķas, paralēli strādājošas sinhronās mašīnas jauda var būt samērojama ar pārējo ģeneratoru jaudu.

Lai noskaidrotu paralēlas darbības īpatnības šādos apstākļos strādājošām sinhronajām mašīnām, pieņemsim, ka tīklam paralēli pieslēgtas divas vienādas jaudas sinhronās mašīnas $M1$ un $M2$ (7.29. zīm.).

7.30. zīmējumā attēlotas neizvirzīto polu sinhrono mašīnu $M1$ un $M2$ vektoru diagrammas gadījumam, kad abas mašīnas darbojas ģeneratora režīmā ar vienādu aktīvo jaudu $P_1 = P_2 = 0,5P = \text{const}$, ne-

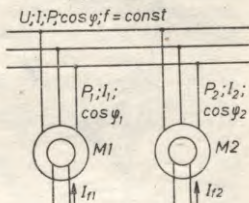
mainīgu kopējo reaktīvo jaudu $Q = Q_1 + Q_2 = \text{const}$ un nemainīgu spriegumu $U = U_1 = U_2 = \text{const}$. Diagrammās attēloti trīs raksturīgi režīmi: 1) $\varphi_1 = \varphi_2 > 0$, $Q_1 = Q_2 > 0$; 2) $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 = 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 = 0$; 3) $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 < 0$, $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$.

Pirmajā gadījumā abu ģeneratoru ierosmes strāvas ir vienādas ($I_{f1} = I_{f2}$) un abas mašinas dod tiklā vienādu reaktīvo jaudu. Otrajā gadījumā $I_{f1} > I_{f2}$, mašīna $M2$ ir slogota tikai ar aktīvo jaudu, bet visu reaktīvo jaudu tiklā dod mašīna $M1$. Trešajā gadījumā mašīna $M1$ atdod reaktīvo jaudu gan tiklam, gan arī nepilnīgi ierosinātai mašīnai $M2$.

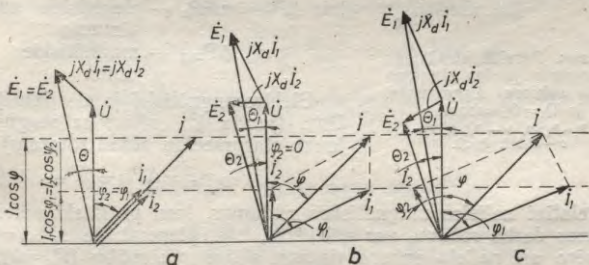
Tādējādi, ja paralēli darbojas samērojamas jaudas mašīnas, tad, samazinot vai palielinot vienas mašīnas ierosmes strāvu, attiecīgi jāpalielina vai jāsamazina ierosmes strāva pārējām mašīnām, lai spriegums tiklā nemainītos ($U_t = \text{const}$).

Lai izmainītu aktīvās jaudas sadalījumu starp paralēli strādājošām samērojamas jaudas sinhronajām mašīnām $M1$ un $M2$, jāizmaina griezes moments, kas pievadīts to vārpstām.

7.31. zīmējumā attēlotas sinhrono mašīnu $M1$ un $M2$ vektoru diagrammas gadījumam, kad tās strādā ar vienādu reaktīvo jaudu $Q_1 = Q_2 = 0,5Q = \text{const}$ un nemainīgu kopējo aktīvo jaudu $P = P_1 + P_2 = \text{const}$. Diagrammās attēloti trīs raksturīgi režīmi: 1) $\varphi_1 = \varphi_2 > 0$, $P_1 = P_2 > 0$ (abas mašīnas darbojas ģeneratora režīmā un atdod tiklā vienādu aktīvo jaudu); 2) $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 = 90^\circ$, $P_1 > 0$, $P_2 = 0$ (visu aktīvo jaudu tiklā sedz tikai mašīna $M1$); 3) $\varphi_1 > 0$, $\varphi_2 > 90^\circ$, $P_1 > 0$, $P_2 < 0$ (mašīna $M1$, darbojoties ģeneratora režīmā, atdod aktīvo jaudu gan tiklam, gan arī mašīnai $M2$, kas darbojas dzinēja režīmā).

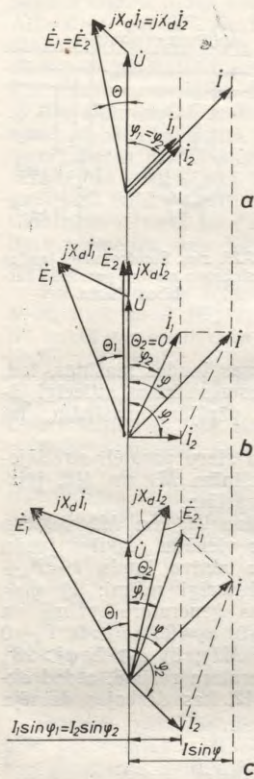


7.29. zīm. Samērojamas jaudas sinhrono mašīnu paralēlās darbības shēma.



7.30. zīm. Paralēli strādājošu samērojamas jaudas sinhrono mašīnu vektoru diagrammas, ja $P_1 = P_2 = \text{const}$:

a - $Q_1 = Q_2 > 0$, b - $Q_1 > 0$, $Q_2 = 0$, c - $Q_1 > 0$, $Q_2 < 0$.



7.31. zīm. Paralēli strādājošu samērojamas jaudas sinhrono mašīnu vektoru diagrammas, ja $Q_1 = Q_2 = \text{const}$;
 $a - P_1 = P_2 > 0$, $b - P_1 > 0$, $P_2 = 0$,
 $c - P_1 > 0$, $P_2 < 0$.

Tādējādi, ja paralēli darbojas samērojamas jaudas sinhronās mašīnas, tad, samazinot vai palielinot pievadīto mehānisko momentu vienas mašīnas vārpstai, attiecīgi jāpalielina vai jāsamazina pievadītais moments otras mašīnas vārpstai, lai frekvence būtu nemainīga ($f = \text{const}$). Lai, regulējot aktīvo jaudu, saglabātu arī nemainīgu spriegumu ($U = \text{const}$), atbilstoši momenta izmaiņai jāmaina arī abu mašīnu ierosmes strāvas. Tas redzams no 7.31. zīmējumā atēlotajām vektoru diagrammām, kur dažādajām aktīvajām jaudām atbilst dažādas abu mašīnu EDS E_1 un E_2 vērtības, kuras ir atkarīgas no ierosmes strāvām I_{f1} un I_{f2} .

7.5.5. Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments

Sinhronās mašīnas elektriskā jauda

$$P = mUI \cos \varphi. \quad (7.70)$$

Ja mašīna darbojas ģeneratora režīmā, tad elektromagnētiskā jauda (jauda, ko rotors ar magnētiskā lauka starpniecību atdod enkuram)

$$P_{em} = P + \Delta P_{el} + \Delta P_{mg}, \quad (7.71)$$

kur $\Delta P_{el} = mI^2 R_a$ — elektriskie zudumi tinumā;

ΔP_{mg} — magnētiskie zudumi.

Elektromagnētiskā jauda dzinēja režīmā (jauda, ko enkurs ar magnētiskā lauka starpniecību atdod rotoram)

$$P_{em} = P - \Delta P_{el} - \Delta P_{mg}. \quad (7.72)$$

Relatīvi nelielos magnētiskos zudumus, kuri praktiski neietekmē mašīnas darba režīmu, var neievērot, t. i., pieņemt, ka $\Delta P_{mg} = 0$. Ja neievēro arī nelielo enkura tinuma aktīvo pretestību ($R_a = 0$), tad $\Delta P_{el} = 0$ un saskaņā ar izteiksmēm (7.71) un (7.72) $P_{em} = P$. Šādiem nosacījumiem sinhronās mašīnas elektromagnētiskās jaudas noteikšanai jebkurā režīmā var izmantot izteiksmi (7.70).

Aplūkosim izvirzīto polu sinhrono mašīnu, kura darbojas ģenerātorā režīmā, un izmantosim tās vienkāršotu vektoru diagrammu (sk. 7.11. zīm.), kurā pieņemts, ka $R_a=0$. Saskaņā ar šo diagrammu $\varphi=\psi-\Theta$ un

$$P = mUI \cos(\psi - \Theta) = mU(I \cos \psi \cos \Theta + I \sin \psi \sin \Theta). \quad (7.73)$$

Tā kā $I_d = I \sin \psi$ un $I_q = I \cos \psi$ (sk. izteiksmes (7.6) un (7.7)), tad

$$P = mUI_q \cos \Theta + mUI_d \sin \Theta. \quad (7.74)$$

No vektoru diagrammas (sk. 7.11. zīm.) var atrast šādas sakarības:

$$E = X_d I_d + U \cos \Theta; \quad X_q I_q = U \sin \Theta,$$

no kurienes

$$I_d = \frac{E - U \cos \Theta}{X_d}, \quad (7.75)$$

$$I_q = \frac{U \sin \Theta}{X_q}. \quad (7.76)$$

Ievietojot strāvu I_d un I_q vērtības izteiksmē (7.74), iegūstam, ka

$$P = \frac{mU^2}{X_q} \sin \Theta \cos \Theta + \frac{mEU}{X_d} \sin \Theta - \frac{mU^2}{X_d} \sin \Theta \cos \Theta$$

jeb, ievērojot, ka $\sin 2\Theta = 2 \sin \Theta \cos \Theta$,

$$\left| \begin{array}{l} P = \frac{mEU}{X_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\Theta. \end{array} \right. \quad (7.77)$$

Sinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments

$$M = \frac{P}{\Omega}, \quad (7.78)$$

kur Ω — rotora leņķiskais ātrums.

Ievērojot izteiksmi (7.77), elektromagnētiskais moments

$$M = \frac{mEU}{\Omega X_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{\Omega 2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\Theta. \quad (7.79)$$

Tā kā sinhronās mašīnas stacionārā darba režīmā $\Omega = \Omega_1 = \text{const}$, tad sakarību $P = f(\Theta)$ un $M = f(\Theta)$ raksturs ir līdzīgs.

7.5.6. Sinhronās mašīnas leņķa raksturlīknes

Ja spriegums U un EDS E ir nemainīgi, tad saskaņā ar izteiksmēm (7.77) un (7.79) sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments ir atkarīgi tikai no slodzes leņķa Θ . Sakarības $P = f(\Theta)$ un $M = f(\Theta)$ sauc par sinhronās mašīnas leņķa raksturlīknēm, un to grafiskais attēls ir periodiska rakstura līknes.

7.32. zīmējumā attēlota izvirsīto polu sinhronās mašīnas leņķa raksturlikne vienam periodam ($-180^\circ < \theta < 180^\circ$). Leņķa raksturliknes posms, kurā $P > 0$ ($0 < \theta < 180^\circ$), atbilst ģeneratora režīmam, bet posms, kurā $P < 0$ ($-180^\circ < \theta < 0$), — dzinēja režīmam.

Izvirsīto polu sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda sastāv no divām komponentēm:

$$P = P' + P'', \quad (7.80)$$

kur (sk. izteiksmi (7.77))

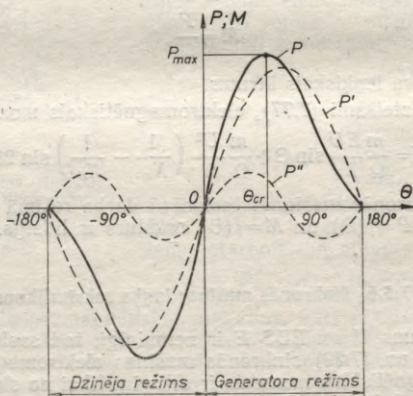
$$P' = \frac{mUE}{X_d} \sin \theta, \quad (7.81)$$

$$P'' = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (7.82)$$

Jauda P' ir izvirsīto polu sinhronās mašīnas jaudas galvenā komponente, un tā ir atkarīga no sprieguma U un EDS E , ko enkura tinumā inducē ierosmes strāvas radītais magnētiskais lauks. Jaudas P' leņķa raksturlikne $P' = f(\theta)$ ir sinusoīda (7.32. zīm.). Jauda P'' ir papildjauda, kura atkarīga no sprieguma U , bet nav atkarīga no EDS E , respektīvi, ierosmes strāvas. Jaudas P'' leņķa raksturlikne ir sinusoīda ar divreiz mazāku periodu.

Neizvirsīto polu sinhronajā mašīnā $X_d = X_q$, un tāpēc saskaņā ar izteiksmēm (7.80), ..., (7.82) $P'' = 0$, $P = P'$, t. i., neizvirsīto polu sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda

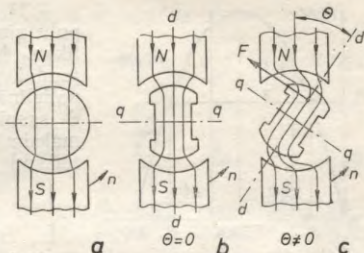
$$P = \frac{mEU}{X_d} \sin \theta. \quad (7.83)$$



7.32. zīm. Sinhronās mašīnas leņķa raksturliknes.

Izvirzīto polu sinhronā mašīna var atļūstīt jaudu arī tad, ja tā darbojas bez ierosmes ($E=0, I_f=0$). Šādu mašīnu sauc par *sinhrono reaktīvo mašīnu*. Saskaņā ar izteiksmēm (7.80), ..., (7.82) sinhronajā reaktīvajā mašīnā $P'=0, P=P''$, un tāpēc tās elektromagnētiskā jauda

$$P = \frac{mU^2}{2} \times \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\Theta. \quad (7.84)$$



7.33. zīm. Sinhronās reaktīvās mašīnas darbības principa izskaidrojums: *a* — mašīna ar cilindrisku rotoru, *b* — mašīna ar izvirzītiem poliem, ja $\Theta=0$, *c* — mašīna ar izvirzītiem poliem, ja $\Theta \neq 0$.

Šāda mašīna var darboties gan ģenerators, gan arī dzinēja režīmā.

Tā kā sinhronajā reaktīvajā mašīnā $I_f=0$, tad šeit pastāv tikai enkura strāvas radītais magnētiskais lauks (enkura reakcijas lauks), kas magnetizē rotoru.

Sinhronās reaktīvās mašīnas darbības princips paskaidrots 7.33. zīmējumā, kur uzskatāmības dēļ enkura rotējošais magnētiskais lauks aizstāts ar rotējošiem poliem.

Ja rotors ir cilindrisks (7.33. zīm. *a*), tad $X_d=X_q$ un magnētiskās ķēdes pretestība nav atkarīga no rotora stāvokļa. Šajā gadījumā rotors jebkurā stāvoklī atrodas līdzsvarā un mašīna neattīsta elektromagnētisko momentu un jaudu.

Ja rotoram ir izvirzīti poli, tas vienmēr tiecas nostāties tā, lai magnētiskās ķēdes pretestība būtu vismazākā. Ja šāds rotors nav slogots ar mehānisku momentu ($M_m=0$), tad $\Theta=0$ (7.33. zīm. *b*) un arī elektromagnētiskais moments, kas darbojas uz rotoru, $M=0$ un tātad arī $P=0$.

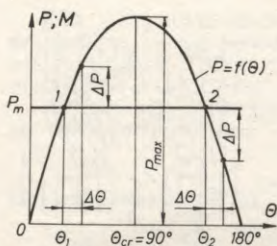
Ja rotors slogots ar mehānisku momentu $M_m \neq 0$, tad rotora ass attiecībā pret rotējošā magnētiskā lauka asi nobīdās, $\Theta \neq 0$ (7.33. zīm. *c*), un mašīna attīsta elektromagnētisko momentu un jaudu.

Izvirzīto polu sinhronā mašīna, darbojoties bez ierosmes (sinhronā reaktīvā mašīna), ir neekonomiska, jo patērē no tīkla ievērojamu reaktīvo jaudu, bet tajā pašā laikā attīsta nelielu aktīvo jaudu.

Praksē izmanto nelielas jaudas sinhronos reaktīvos dzinējus (sk. 7.9.1.).

7.5.7. Sinhronās mašīnas statiskā stabilitāte un pārslodzes spēja

Aplūkosim vispirms neizvirzīto polu sinhrono mašīnu, kura darbojas ģenerators režīmā paralēli ar lielas jaudas tīklu ($U=\text{const}, f=\text{const}$), un pieņemsim, ka ierosmes strāva $I_f=\text{const}$.



7.34. zim. Sinhronās mašīnas statiskās stabilitātes noteikšana.

P_m , t. i., $P = P_m$. Jauda P_m nav atkarīga no leņķa θ , tāpēc 7.34. zīmējumā tā attēlota ar horizontālu līniju, kas krusto raksturliedzi $P = f(\theta)$ punktos 1 un 2. Šajos punktos primārā dzinēja un ģeneratora jauda ir līdzsvarā.

Pieņemsim, ka ģeneratoram strādājot punktā 1, leņķis θ kaut kādas ārējas iedarbes ietekmē īslaicīgi palielinās par lielumu $\Delta\theta$. Tad $P > P_m$ un uz rotoru darbojas bremsējošs elektromagnētiskais moments

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\Omega}, \quad (7.86)$$

kurš tiecas rotoru atgriezt izejas stāvoklī. Leņķis θ samazinās līdz brīdim, kamēr atkal iestājas jaudu un momentu līdzsvars punktā 1, kur $\theta = \theta_1$.

Ja ģeneratoram strādājot punktā 1, leņķis θ īslaicīgi samazinās, tad $P < P_m$, un uz rotoru darbojas dzenošs moments. Leņķis θ palielinās tik ilgi, kamēr jaudas un momentu līdzsvars atkal iestājas punktā 1.

Ja ģenerators strādā punktā 2, tad, leņķim θ palielinoties par lielumu $\Delta\theta$, $P < P_m$, un rotora kustība paātrinās. Tā rezultātā leņķis θ palielinās vēl vairāk, jauda P samazinās un ģenerators «izkrit» no sinhronisma, t. i., zaudē saiti starp tīkla frekvenci un rotora rotācijas frekvenci. Ģeneratoram «izkritot» no sinhronisma, tā enkura strāva sasniedz nepieļaujami lielu vērtību, un automātiskā aizsardzības aparātūra ģeneratoru atslēdz no tīkla.

Ja ģeneratoram strādājot punktā 2, leņķis θ samazinās, tad $P > P_m$, uz rotoru darbojas bremsējošs moments un leņķis θ turpina samazināties tik ilgi, kamēr iestājas jaudu un momentu līdzsvars punktā 1 ($\theta = \theta_1$).

No teiktā var secināt, ka raksturliedzes $P = f(\theta)$ posmā no 0 līdz 90° neizvirzīto polu sinhronā ģeneratora darbība ir stabila, bet posmā no 90° līdz 180° tā ir nestabila. Līdzīgi var pierādīt, ka neizvirzīto polu sinhronā dzinēja darbība ir stabila, ja $0 > \theta > -90^\circ$, un nestabila, ja $-90^\circ > \theta > -180^\circ$.

7.34. zīmējumā attēlota neizvirzīto polu sinhronās mašīnas, leņķa raksturliedze. No raksturliedzes redzams, ka, jaudai palielinoties no vērtības $P = 0$, palielinās arī slodzes leņķis θ . Leņķim θ sasniedzot 90° , ģenerators attīsta maksimālo jaudu P_{max} . Saskaņā ar izteiksmi (7.83)

$$P_{max} = \frac{mEU}{X_d}. \quad (7.85)$$

Sinhronajam ģeneratoram darbojoties stacionārā režīmā ($\theta = \text{const}$), tīklam atdotā jauda P līdzsvarojas ar primārā dzinēja attīstīto mehānisko jaudu

Vispār sinhronās mašīnas darbība ir stabila, ja

$$\frac{\Delta P}{\Delta \Theta} > 0, \quad (7.87)$$

un nestabila, ja

$$\frac{\Delta P}{\Delta \Theta} < 0. \quad (7.88)$$

Sinhronās mašīnas stabilās darbības robežu raksturo mašīnas maksimālā jauda P_{max} . Slodzes leņķi Θ_{cr} , kas atbilst šai jaudai, sauc par *kritisko slodzes leņķi*. Neizvirzīto polu sinhronajā mašīnā vienmēr $\Theta_{cr} = 90^\circ$, bet izvirzīto polu mašīnā $\Theta_{cr} < 90^\circ$ (sk. 7.32. zīm.).

Izvirzīto polu sinhronās mašīnas kritiskā slodzes leņķa skaitlisko vērtību var noteikt, izpētot izteiksmi (7.77) maksimuma atrašanai. Šim nolūkam atrod funkcijas $P = f(\Theta)$ pirmo atvasinājumu pēc Θ un pielīdzina to nullei. Atrisinot iegūto vienādojumu, var atrast, ka

$$\Theta_{cr} = \arccos \frac{\sqrt{A^2 + 8B^2} - A}{4B}, \quad (7.89)$$

kur

$$A = \frac{mEU}{X_d}; \quad (7.90)$$

$$B = mU^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (7.91)$$

Izvirzīto polu sinhronās mašīnas maksimālā jauda

$$P_{max} = \frac{mEU}{X_d} \sin \Theta_{cr} + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\Theta_{cr}. \quad (7.92)$$

Reaktīvajā sinhronajā mašīnā $\Theta_{cr} = 45^\circ$ un maksimālā jauda

$$P_{max} = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (7.93)$$

Attiecību

$$k_m = \frac{P_{max}}{P_N} = \frac{M_{max}}{M_N}, \quad (7.94)$$

ja $U = U_N$ un $I_f = I_{f,N}$, sauc par sinhronās mašīnas *statisko pārslozdes spēju*. Neizvirzīto polu sinhronajās mašīnās saskaņā ar izteiksmēm (7.83) un (7.85)

$$k_m = \frac{1}{\sin \Theta_N},$$

kur Θ_N — slodzes leņķis nominālās slodzes režīmā.

Parasti sinhronajās mašīnās $\Theta_N = 20 \dots 35^\circ$ un $k_m = 1,7 \dots 3,0$.

Sinhronās mašīnas maksimālā jauda ir tieši proporcionāla tīkla spriegumam U un EDS E , kurš atkarīgs no ierosmes strāvas, bet apgriezti proporcionāla pretestībai X_d . Ši iemesla dēļ sinhronajās mašīnās izveido lielāku gaisa spraugu δ nekā asinhronajās mašīnās, reizē ar to palielinot isslēguma attiecību k_{i-a} , jo $X_d \sim 1/\delta$, $X_d \sim 1/k_{i-a}$ (sk. 7.3.3. un 7.4.5.).

7.5.8. Sinhronizējošā jauda un sinhronizējošais moments

Iepriekš tika noskaidrots, ka, slodzes leņķim Θ izmainoties zināmās robežās, sinhronā mašīna spēj saglabāt sinhronismu ar tīklu. Šāda sinhronās mašīnas īpašība ir izskaidrojama ar to, ka slodzes leņķa izmaiņa par lielumu $\Delta\Theta$ rada jaudu ΔP . Jaudu ΔP sauc par sinhronizējošo jaudu, un šai jaudai saskaņā ar izteiksmi (7.86) atbilst sinhronizējošais moments, kurš tiecas rotoru atgriezt līdzsvara stāvoklī. Nelielām slodzes leņķa Θ izmaiņām sinhronizējošā jauda ΔP un sinhronizējošais moments ΔM ir proporcionāli leņķim $\Delta\Theta$:

$$\Delta P = P_{sh,m} \Delta\Theta; \quad (7.95)$$

$$\Delta M = M_{sh,m} \Delta\Theta, \quad (7.96)$$

kur $P_{sh,m}$ un $M_{sh,m}$ — *īpatnējā sinhronizējošā jauda un īpatnējais sinhronizējošais moments*.

No izteiksmēm (7.95) un (7.96) izriet, ka

$$P_{sh,m} = \frac{\Delta P}{\Delta\Theta}, \quad M_{sh,m} = \frac{\Delta M}{\Delta\Theta}$$

jeb robežgadījumā

$$P_{sh,m} = \frac{dP}{d\Theta}; \quad (7.97)$$

$$M_{sh,m} = \frac{dM}{d\Theta}. \quad (7.98)$$

Saskaņā ar izteiksmēm (7.77), (7.79), (7.97) un (7.98) izvirsīto polu sinhronās mašīnas īpatnējā sinhronizējošā jauda un īpatnējais sinhronizējošais moments

$$P_{sh,m} = \frac{mEU}{X_d} \cos \Theta + mU^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\Theta, \quad (7.99)$$

$$M_{sh,m} = \frac{mEU}{\Omega X_d} \cos \Theta + \frac{m}{\Omega} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\Theta. \quad (7.100)$$

Neizvirsīto polu sinhronajā mašīnā $X_d = X_q$ un tāpēc

$$P_{sh,m} = \frac{mEU}{X_d} \cos \Theta, \quad (7.101)$$

$$M_{sh,m} = \frac{mEU}{\Omega X_d} \cos \Theta. \quad (7.102)$$

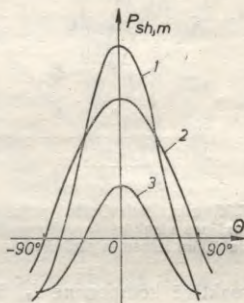
Sinhronajā reaktīvajā mašīnā $E=0$ un

$$P_{sh,m} = mU^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\Theta, \quad (7.103)$$

$$M_{sh,m} = \frac{m}{\Omega} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cos 2\Theta. \quad (7.104)$$

7.35. zīmējumā attēlotas īpatnējās sinhronizējošās jaudas leņķa raksturlienes atbilstoši izteiksmēm (7.99), (7.101) un (7.103). No zīmējuma, kā arī no sakarībām (7.87) un (7.88) var secināt, ka sinhronās mašīnas darbība ir stabila, ja $P_{sh,m} > 0$ un $M_{sh,m} > 0$. Uz stabilitātes robežas ($\Theta = \Theta_{cr}$) $P_{sh,m} = 0$ un $M_{sh,m} = 0$.

Īpatnējā sinhronizējošā jauda un īpatnējais sinhronizējošais moments ir atkarīgi no tīkla sprieguma U un EDS E . Ja pazeminās tīkla spriegums (piemēram, avārijas išslēguma gadījumā), tad sinhronās mašīnas stabilitāte samazinās un mašīna var «izkrist» no sinhronisma. To novērs ar ātrdarbīgiem ierosmes regulatoriem, kas, spriegumam U samazinoties, strauji palielina ierosmes strāvu (ierosmes forsēšana).



7.35. zīm. Īpatnējās sinhronizējošās jaudas leņķa raksturlienes:

1 — izvērzīto polu mašīnai, 2 — neizvērzīto polu mašīnai, 3 — reaktīvajai mašīnai.

7.5.9. Sinhronās mašīnas U veida raksturlienes

Iepriekš (sk. 7.5.3.) tika noskaidrots, ka ierosmes strāvas izmaiņa sinhronajai mašīnai, kas strādā paralēli ar tīklu tukšgaitas režīmā ($P=0$), izraisa reaktīvās strāvas un reaktīvās jaudas izmaiņu. Palielinot ierosmes strāvu (pārierosme), rodas induktīva strāva un mašīna tīklam atdod reaktīvo jaudu. Ierosmes strāvu samazinot (nepilnīga ierosme), rodas kapacitīva strāva un mašīna patērē no tīkla reaktīvo jaudu.

Noskaidrosim tagad, kā atkarībā no ierosmes strāvas I_f mainās enkura strāva sinhronajā mašīnā, kura slogota ar nemainīgu aktīvo jaudu ($P = \text{const}$) un darbojas paralēli ar lielas jaudas tīklu ($U = \text{const}$, $f = \text{const}$). Vienkāršības dēļ aplūkosim neizvērzīto polu mašīnu un pieņemsim, ka tā darbojas ģeneratora režīmā.

Ja ģeneratora aktīvā jauda $P = mUI \cos \varphi = \text{const}$, tad arī enkura strāvas aktīvā komponente $I_a = I \cos \varphi = \text{const}$. Tāpēc, ja maina ierosmes strāvu, tātad arī EDS E , sinhronā ģeneratora vektoru diagrammā (7.36. zīm.) strāvas vektora I galapunkts pārvietojas pa taisni AB , kas perpendikulāra vektoram U . Tādējādi, mainot ierosmes strāvu slogotā sinhronajā mašīnā, mainās tikai enkura strāvas

7.6. SINHRONIE DZINĒJI UN KOMPENSATORI

7.6.1. Sinhronie dzinēji

Sinhrono dzinēju īpatnības. Iepriekš iztīrītās sinhrono mašīnu pamatsakarības ir attiecināmas arī uz sinhronajiem dzinējiem. Noskaidrosim šeit vēl dažas sinhronajiem dzinējiem raksturīgas īpatnības.

Sinhronajiem dzinējiem salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem ir vairākas būtiskas priekšrocības.

Visvērtīgākā sinhrono dzinēju īpašība ir tā, ka šie dzinēji var strādāt ar $\cos \varphi = 1$, bet, strādājot ar pārierosmi, tie pat var atdot reaktīvo jaudu tīklā. Tādējādi sinhronie dzinēji var uzlabot tīkla jaudas koeficientu, samazināt sprieguma kritumu un zudumus tīklā.

Sinhronie dzinēji ir mazāk jutīgi pret tīkla sprieguma izmaiņām, jo to maksimālais moments, kas raksturo dzinēja pārslodzes spēju, ir proporcionāls sprieguma pirmajai pakāpei ($M_{max} \sim U$), turpretī asinhronajiem dzinējiem $M_{max} \sim U^2$. Bez tam momenta samazināšanās, kas var rasties tīkla sprieguma pazemināšanās rezultātā, sinhronajos dzinējos iespējams kompensēt ar ierosmes strāvas, respektīvi, EDS E palielināšanu.

Parasti sinhronajiem dzinējiem ir nedaudz augstāks lietderības koeficients nekā asinhronajiem dzinējiem.

Tomēr sinhrono dzinēju konstrukcija ir sarežģītāka nekā asinhronajiem dzinējiem ar īsslēgtu rotoru. Bez tam sinhronajiem dzinējiem ir nepieciešams līdzstrāvas avots ierosmes tinuma barošanai. Tāpēc sinhronie dzinēji ir dārgāki nekā asinhronie dzinēji. Arī sinhrono dzinēju palaišana ir komplicētāka, un to rotācijas frekvences regulēšanas iespējas salīdzinājumā ar asinhronajiem dzinējiem ir daudz ierobežotākas, jo rotācijas frekvences regulēšana iespējama, tikai izmainot barošanas sprieguma frekvenci.

Neraugoties uz minētajiem trūkumiem, sinhronie dzinēji ar jaudu $P_N > 200 \dots 300$ kW vienmēr ir ekonomiski izdevīgāki nekā asinhronie dzinēji tādās iekārtās, kur nav nepieciešama rotācijas frekvences regulēšana un bieža palaišana.

Sinhronā dzinēja vektoru diagrammas. Sinhronā dzinēja vektoru diagrammu var konstruēt saskaņā ar spriegumu vienādojumu (7.37):

$$\dot{U} = \dot{E} - jX_{ad}\dot{I}_d - jX_{aq}\dot{I}_q - jX_{a,\sigma}\dot{I} - R_a\dot{I}. \quad (7.105)$$

Diagrammas konstruēšanas gaita ir tāda pati kā sinhronajam ģeneratoram, tikai šeit jāievēro, ka sinhronajam dzinējam $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ (sk. 7.5.3.).

7.38. zīmējuma kreisajā pusē attēlota sinhronā dzinēja vektoru diagramma, kas atbilst vienādojumam (7.105).

Praksē parasti sinhronajam dzinējam izmanto nedaudz pārveidotu vektoru diagrammu (7.38. zīm. labajā pusē), kuru iegūst, ja

sprieguma vienādojumā spriegumu \dot{U} aizstāj ar spriegumu $-\dot{U}_t$ (tikla spriegumu). Tad vienādojuma (7.105) vietā iegūstam, ka

$$\dot{U}_t = -\dot{E} + jX_{ad}I_d + jX_{aq}I_q + jX_{a,\sigma}I + R_a I. \quad (7.106)$$

Vektoru diagrammas 7.38. zīmējumā atbilst pārierosinātam sinhronajam dzinējam ($E > U$). Šīs diagrammas ir līdzvērtīgas, jo pirmajā gadījumā (7.38. zīm. kreisajā pusē) tiklam atdotā jauda $P = mUI \cos \varphi < 0$, bet otrajā gadījumā (7.38. zīm. labajā pusē) no tikla patērētā jauda $P = mUI \cos \varphi > 0$.

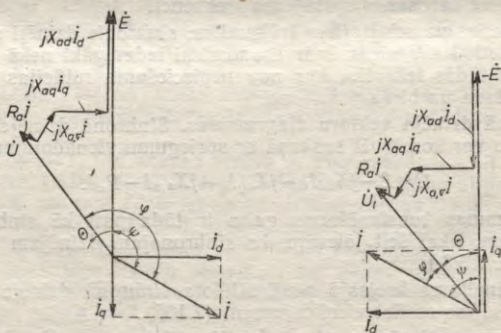
Sinhronā dzinēja darba raksturlieknes. Sinhronā dzinēja darba raksturlieknes attēlo enkura strāvas I , pievadītās jaudas P_1 , jaudas koeficienta $\cos \varphi$ un lietderības koeficienta η atkarību no dzinēja atdotās jaudas P_2 , ja $U = \text{const}$, $f = \text{const}$, $I_f = \text{const}$. Darba raksturlieknes var iegūt eksperimentāli, kā arī aprēķinot.

Sinhronā dzinēja darba raksturlieknes parādītas 7.39. zīmējumā. Līknes $\cos \varphi = f(P_2)$ raksturs ir atkarīgs no dzinēja ierosmes. Parasti sinhronie dzinēji paredzēti darbam ar pārierosmi, pie tam nominālā režīmā $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,9$. Slodzei samazinoties, samazinās arī $\cos \varphi$, bet, tā kā pārierosinātai mašīnai $\varphi < 0$, dzinējs tiklam atdod reaktīvo jaudu un tikla $\cos \varphi$ uzlabojas.

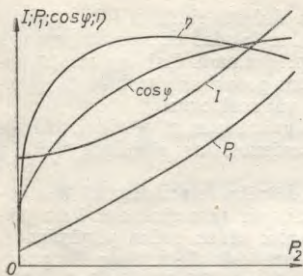
Sinhronā dzinēja pārējās darba raksturlieknes kvalitatīvi neatšķiras no līdzstrāvas un asinhrono dzinēju darba raksturlieknēm, bet dzinēja U veida raksturlieknes ir tādas pašas kā sinhronajam ģeneratoram.

Sinhrono dzinēju palaišana. Sinhrono dzinēju nevar palaist, to tieši pieslēdzot tiklam, jo dzinēja rotors inerces dēļ nevar uzreiz sekot magnētiskajam laukam, kura rotācijas frekvence jau palaišanas sākumā ir vienāda ar sinhrono rotācijas frekvenci.

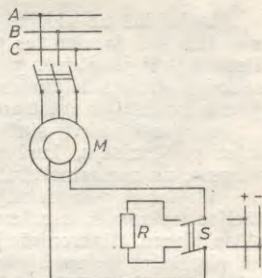
Visbiežāk lieto sinhrono dzinēju *asinhrono palaišanu*. Šim nolūkam polu korpēs izveidots *palaišanas tinums* vai arī izveidotas



7.38. zīm. Sinhronā dzinēja vektoru diagrammas.



7.39. zim. Sinchronā dzinēja darba raksturliiknes.



7.40. zim. Sinchronā dzinēja asinchronās palaišanas principiālā shēma.

masīvas polu kurpes (sk. 5.1.3.). Pieslēdzot enkura tinumu trīsfāzu tīklam, rodas rotējošs magnētiskais lauks, kurš šķēļ palaišanas tinuma stienus un inducē tajos EDS. Tā kā stieņi ir īsslēgti, tad inducētais EDS uztur tajos strāvas. Strāvu un rotējošā magnētiskā lauka mijiedarbības rezultātā rodas griezes moments, kurš rotoru iegriež līdz rotācijas frekvencei, kas nedaudz mazāka par sinhrono rotācijas frekvenci ($n \approx 0,95n_1$).

Sinchronā dzinēja asinchronās palaišanas principiālā shēma attēlota 7.40. zīmējumā. Pirms enkura tinuma pieslēgšanas tīklam ierosmes tinumu ar pārslēgu S atslēdz no līdzstrāvas avota un noslēdz ar izlādes rezistoru R , kura pretestība 8...12 reizes lielāka par ierosmes tinuma pretestību. Pēc tam enkura tinumu pieslēdz tīklam un, kad rotora rotācijas frekvence vairs nepalielinās, ierosmes tinumu ar pārslēgu pievieno līdzstrāvas avotam. Reizē ar to rodas ierosmes lauks un sinchronais elektromagnētiskais griezes moments palielina rotora rotācijas frekvenci līdz sinchronajai, t. i., «ievēl» rotoru sinchronismā. Palaišana parasti ir automatizēta.

Dzinēja palaišanas laikā tā ierosmes tinumu, kuram ir liels vijumu skaits, nedrīkst atstāt nesaslēgtu, jo palaišanas sākumā, kad rotors ir nekustīgs, rotējošais magnētiskais lauks ierosmes tinumā inducē lielu EDS, kas 20...30 reizes var pārsniegt tinuma normālo darba spriegumu un tāpēc ir bīstams ierosmes tinuma izolācijai. Tāpat, dzinēju palaižot, nav vēlams ierosmes tinumu saslēgt īsi, jo ierosmes tinumā tad inducējas relatīvi liela vienfāzes maiņstrāva, kura rada bremsējošu momentu. Šī momenta dēļ rotors palaišanas procesa laikā var «iestrēgt» ar rotācijas frekvenci $n \approx 0,5n_1$, īpaši tad, ja palaiž slogotu dzinēju. Var atzīmēt, ka līdzīga parādība novērojama asinchronajos dzinējos ar nesimetriju rotora ķēdē (sk. 6.7.4.).

Lai iegūtu lielāku palaišanas momentu, palaišanas tinuma stienus atšķirībā no slāpētājtinuma stieņiem izgatavo no materiāla ar palielinātu īpatnējo pretestību.

Mazjaudas un vidējas jaudas (līdz dažiem simtiem kW) sinhronos dzinējus, ja vien tas pieļaujams tīkla jaudas dēļ, palaiž, enkura tinumu tieši pieslēdzot pilnam tīkla spriegumam. Lai ierobežotu palaišanas strāvas lieljaudas dzinējiem, tos palaiž ar pazeminātu spriegumu, izmantojot autotransformatorus vai reaktorus.

Iespējami arī citi sinhronā dzinēja palaišanas paņēmieni: izmantojot palīgdzinēju, kurš mehāniski savienots ar sinhronā dzinēja vārpstu, un samazinot frekvenci.

Palaižot ar palīgdzinēju, sinhronā dzinēja rotoru iegriež līdz rotācijas frekvencei, kas tuva sinhronajai, pēc tam sinhronizē un pieslēdz tīklam. Sinhronizācijai var izmantot tādus pašus paņēmienus, kā pieslēdzot tīklam sinhrono generatoru (sk. 7.5.2.). Ar šo paņēmieni nav lietderīgi palaist slogotu sinhrono dzinēju, jo tad palīgdzinēja jaudai jābūt relatīvi lielai. Palaižot tukšgaitā, palīgdzinēja jauda nepārsniedz 10% no sinhronā dzinēja jaudas.

Palaišanai, samazinot frekvenci, nepieciešams autonomas maiņsprieguma avots ar regulējamu frekvenci. Palaišanas sākumā ieregulē nelielu frekvenci ($f=2 \dots 5$ Hz). Tad enkura magnētiskā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret nekustīgo rotoru ir neliela un elektromagnētiskais griezes moments spēj «ievilkt» rotoru sinhronismā. Pēc tam frekvenci pakāpeniski palielina līdz nominālajai vērtībai. Lai palielinātu palaišanas momentu, ierosmes strāvai palaišanas laikā jābūt iespējami lielākai.

Sinhrono dzinēju palaišanu, izmantojot palīgdzinēju un samazinot frekvenci, pēdējā laikā lieto ļoti reti.

7.6.2. Sinhronie kompensatori

Sinhronais kompensators ir sinhronā mašīna, kura darbojas bez aktīvas slodzes un paredzēta reaktīvās jaudas regulēšanai elektriskajās sistēmās. Tas būtībā ir sinhronais dzinējs, kas darbojas tukšgaitā, patērējot no tīkla nelielu aktīvo jaudu zudumu segšanai.

Sinhronos kompensatorus lieto tīkla jaudas koeficienta uzlabošanai un sprieguma regulēšanai rajonos ar lielu rūpnieciskās slodzes koncentrāciju.

Normālā režīmā sinhronais kompensators darbojas ar pārierosmi un atdod tīklā reaktīvo jaudu, kura kompensē asinhrono dzinēju un transformatoru pieprasīto reaktīvo jaudu. Tāpēc, uzstādot sinhronos kompensatorus elektropārvades līnijas beigās, rodas iespēja atslotot sistēmu (elektropārvades līnijas, transformatorus, generatorus) no reaktīvās jaudas. Tādējādi var samazināt jaudas zudumus un sprieguma kritumu tīklā, kā arī uzturēt tīklā nemainīgu spriegumu, ja mainās patērētāju slodze.

Patērētāju minimālās slodzes periodos, kad spriegums tīklā paaugstinās, sinhrono kompensatoru dažreiz izmanto sprieguma pazemināšanai. Sajā gadījumā kompensators strādā ar nepilnīgu ierosmi, uzņem no tīkla reaktīvo jaudu un strāvu, kas izraisa tīklā papildu sprieguma kritumu. Jāatzīmē gan, ka šāds režīms nav ekono-

misks, jo tas saistīts ar zudumu palielināšanos tīklā un tāpēc lietderīgāk izmantot transformatorus ar slodzes režīmā regulējamu spriegumu.

Tā kā sinhronais kompensators darbojas bez aktīvas slodzes, tad stabilitātes problēma šajā gadījumā zaudē nozīmi. Tāpēc sinhronos kompensatorus izgatavo ar mazāku gaisa spraugu (lielāku pretestību X_d) nekā generatorus un dzinējus. Tādējādi iespējams samazināt ierosmes tinumu un mašīnas izmaksas.

Sinhronajiem kompensatoriem parasti lieto asinhrono palaišanu.

7.7. SINHRONO ĢENERATORU NESIMETRISKA SLODZE

7.7.1. Vispārīgi norādījumi

Sinhrono generatoru nesimetrisku slodzi rada lieljaudas vienfāzes patērētāji, kā arī nesimetriski īsslēgumi elektriskajos tīklos.

Sinhrono generatoru, tāpat kā transformatoru un asinhrono mašīnu, nesimetrisko režīmu analīzei izmanto simetrisko komponentu metodi, saskaņā ar kuru nesimetrisku trīsfāzu strāvu vai spriegumu sistēmu aizvieto ar trīs simetriskām sistēmām: tiešās, pretējās secības un nullsecības sistēmu. Katru sistēmu raksturo savī parametri: aktīvās (R_1, R_2, R_0), induktīvās (X_1, X_2, X_0) un pilnās (Z_1, Z_2, Z_0) pretestības. Sinhronajās mašīnās aktīvās pretestības salīdzinājumā ar induktīvajām pretestībām ir mazas. Tāpēc daudzos gadījumos tās var neņemt vērā, t. i., pieņemt, ka strāvu simetriskās komponentes ir atkarīgas tikai no induktīvajām pretestībām.

7.7.2. Nesimetrisko režīmu parametri

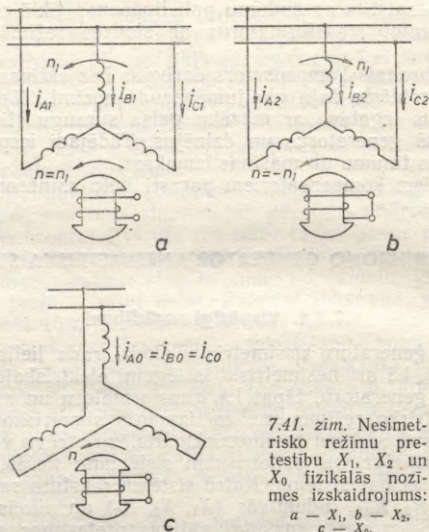
Tiešās secības strāvas I_{A1}, I_{B1}, I_{C1} rada rotējošu magnētisko lauku (tiešo lauku), kas griežas sinhroni ar rotoru (7.41. zīm. a) un tāpēc rotora tinumos (ierosmes tinumā un slāpētājtinumā) neinducē EDS. Sinhronajam generatoram darbojoties ar simetrisku slodzi, tā enkura tinumā pastāv tikai tiešās secības strāvas. Tas nozīmē ka tiešās secības induktīvā pretestība X_1 atkarībā no slodzes rakstura ir garenlauka sinhronā induktīvā pretestība X_d vai šķērslauka sinhronā induktīvā pretestība X_q . Tā, piemēram, ja generatora strādā ar induktīvu slodzi, tad $\varphi=90^\circ$ un, neievērojot niecīgo enkura tinuma aktīvo pretestību ($R_a=0$), arī $\psi=90^\circ$. Šajā gadījumā $I_d=I \sin \psi=I, I_q=0$ un tiešās secības induktīvā pretestība

$$X_1 = X_d = X_{ad} + X_{a,\sigma}. \quad (7.107)$$

Ja $\psi=0$, tad $I_d=0, I_q=I \cos \psi=I$ un tiešās secības induktīvā pretestība

$$X_1 = X_q = X_{aq} + X_{a,\sigma}. \quad (7.108)$$

Pretestībai X_1 atbilst 7.42. zīmējumā a attēlotās ekvivalentās shēmas.

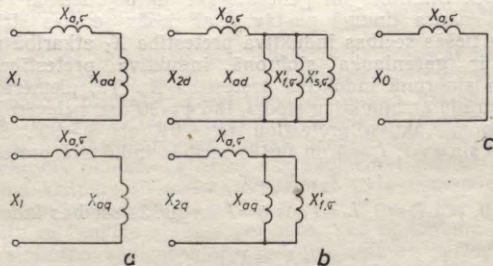


7.41. zīm. Nesimetrisko režīmu pretestību X_1 , X_2 un X_0 fizikālās nozīmes izskaidrojums:

a — X_1 , b — X_2 ,
c — X_0 .

Lietojot asinhrono mašīnu jēdzienus, var teikt, ka attiecībā pret enkura tiešo lauku sinhronās mašīnas rotora slide s ir vienāda ar nulli. Tāpēc pretestības X_d un X_q pēc savas fizikālās dabas ir līdzīgas asinhronās mašīnas induktīvajai pretestībai ideālās tukšgaitas režīmā, kad $s=0$.

Pretējās secības strāvas I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} rada rotējošu magnētisku lauku — pretējo lauku, kurš griežas ar tādu pašu rotācijas frekvenci kā tiešais lauks, tikai pretējā virzienā (sk. 7.41. zīm. b). Bet, tā kā



7.42. zīm. Ekvivalentās shēmas tiešās secības (a), pretējās secības (b) un nullsecības (c) strāvām.

rotors griežas tiešajā virzienā ar sinhrono rotācijas frekvenci, tad attiecībā pret rotoru pretējais lauks griežas ar divkārtu sinhrono rotācijas frekvenci. Tāpēc attiecībā pret enkura pretējo lauku rotora slīde $s_2=2$, un šāds režīms ir ekvivalents asinhronās mašīnas elektromagnētiskās bremzes režīmam, ja slīde $s=2$.

Pretējais lauks ierosmes tinumā un slāpētājtinumā inducē divkārtās frekvences strāvas. Izmantojot analogiju ar asinhrono mašīnu, kurai rotorā ir divi neatkarīgi tinumi (dubultrievu asinhronais dzinējs) un neievērojot nelielās tinumu aktīvās pretestības, var iegūt ekvivalentās shēmas pretējās secības strāvām (7.42. zīm. b). Pretestības $X''_{f,\sigma}$ un $X'_{s,\sigma}$ ir ierosmes tinuma un slāpētājtinuma izkļedes induktīvās pretestības, kas reducētas uz enkura tinumu.

Tā kā sinhronās mašīnas rotoram ir magnētiska un elektriska nesimetrija, tad pretējās secības induktīvā pretestība ir atkarīga no stāvokļa, kādu dotajā laika momentā ieņem rotors attiecībā pret enkura pretējo lauku. Šis stāvoklis, rotoram griežoties, nepārtraukti mainās. Laika momentā, kad enkura pretējā lauka un rotora polu asis sakrīt, savstarpējās indukcijas plūsma darbojas polu garenass virzienā un ar ierosmes un slāpētājtinumu ir maksimālais plūsmas saķēdējums. Pretējās secības strāvām šajā gadījumā atbilst induktīvā pretestība X_{2d} . Momentā, kad enkura pretējā lauka un rotora asis ir savstarpēji perpendikulāras, plūsmas saķēdējums ar ierosmes tinumu ir vienāds ar nulli, un enkura pretējās secības strāvām atbilst induktīvā pretestība X_{2q} .

Sinhronās mašīnas pretējās secības induktīvo pretestību X_2 nosaka šādi:

$$X_2 = \frac{X_{2d} + X_{2q}}{2}, \quad (7.109)$$

kur saskaņā ar 7.42. zīmējumu b

$$X_{2d} = X_{a,\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X'_{f,\sigma}} + \frac{1}{X'_{s,\sigma}}}, \quad (7.110)$$

$$X_{2q} = X_{a,\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X'_{s,\sigma}}}. \quad (7.111)$$

Sinhronajai mašīnai bez slāpētājtinuma $X'_{s,\sigma} = \infty$ un

$$X_{2d} = X_{a,\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X'_{f,\sigma}}}, \quad (7.112)$$

$$X_{2q} = X_{a,\sigma} + X_{aq} = X_q. \quad (7.113)$$

Nullsecības strāvas I_{A0} , I_{B0} , I_{C0} vienādas un sakrīt fāzē. Šādi apstākļi atbilst režīmam, kad enkura tinuma visas fāzes slēgtas virknē (vai paralēli) un pievienotas vienfāzes maiņspriegumam (sk. 7.41. zīm. c).

Nullsecības strāvas rada pulsējošu magnētisko lauku. Var pierādīt, ka šāds lauks satur tikai augstākās harmoniskās ar kārtas numuriem $v=3, 9, 15 \dots$. Šo augstāko harmonisko magnētiskās plūsmas ir nelielas, un, tā kā sinhronajās mašīnās ir relatīvi liela gaisa sprauga, to radītie plūsmas saķēdējumi ar ierosmes un slāpētājtinumu ir niecīgi. Tāpēc nullsecības strāvu radītā magnētiskā plūsma praktiski ir izkliedes plūsma un nullsecības induktīvā pretestība $X_0 \approx X_{a,\sigma}$ (sk. 7.42. zīm. c).

Tādējādi sinhronajās mašīnās $X_1 > X_2 > X_0$. So pretestību skaitliskās vērtības relatīvajās vienībās dotas 7.1. tabulā.

7.7.3. Nesimetrisko režīmu ietekme uz sinhronā ģenerātorā darbību

Sinhrono ģeneratoru enkura tinums parasti slēgts zvaigznē. Mazjaudas ģeneratoros nullpunkts ir izolēts, bet lieljaudas mašīnās tas iezemēts ar lielu pretestību, lai varētu izveidot drošu aizsardzību pret zemesslēgumiem. Tāpēc sinhronajos ģeneratoros nullsecības strāvas ir ļoti mazas vai vispār nav un nesimetriskas slodzes gadījumā praktiski pastāv tikai tiešās un pretējās secības strāvas. Pretējās secības strāvas rada virkni nevēlamu parādību, kas var traucēt mašīnas normālu darbību.

Ja sinhronais ģenerators darbojas ar nesimetrisku slodzi, tad ierosmes tinumā plūst pulsējoša strāva

$$i_f = I_{f0} + i_{f,\omega}, \quad (7.114)$$

kur I_{f0} — ierosmes strāvas nemainīgā komponente, ko tinumā uz tur līdzstrāvas barošanas avots;

$i_{f,\omega} = I_{f,\omega,m} \sin 2\omega t$ — ierosmes tinuma strāvas periodiskā komponente — divkāršas frekvences maiņstrāva, ko tinumā inducē pretējais lauks.

Ierosmes tinuma strāvas periodiskā komponente rada magnētisko lauku, kurš attiecībā pret rotoru pulsē ar frekvenci $2f$. Lai noskaidrotu šī pulsējošā lauka darbību, aizstāsim to ar diviem rotējošiem laukiem, kuri attiecībā pret rotoru griežas savstarpēji pretējos virzienos ar divkāršu sinhrono rotācijas frekvenci $2n_1$. Tā kā pats rotors griežas ar rotācijas frekvenci n_1 , tad rotora pretējā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret statoru ir $n_1 - 2n_1 = -n_1$, t. i., tāda pati kā enkura pretējā lauka rotācijas frekvence. Rotorā tiešais lauks attiecībā pret statoru griežas ar rotācijas frekvenci $n_1 + 2n_1 = 3n_1$, t. i., ar trīskāršu sinhrono rotācijas frekvenci enkura tiešā lauka virzienā un inducē katrā enkura tinuma fāzē EDS ar trīskāršu frekvenci. Šie EDS nobīdīti fāzē cits pret citu par 120° , un tāpēc trešās harmoniskās parādās gan fāzes, gan arī līnijas spriegumos. Var iedomāties, ka atšķirībā no EDS, ko inducē ierosmes lauka trešā harmoniskā (sk. 5.3.5.), trīskāršas frekvences EDS inducē lauks, kurš griežas ar trīskāršu rotācijas frekvenci, bet kura polu skaits ir vienāds ar mašīnas polu skaitu.

Tādējādi nesimetriska slodze un it sevišķi nesimetriski īsslēgumi sinhronajā ģeneratorā rada sprieguma un strāvas formas kropļojumus.

Ierosmes tinuma strāvas periodiskā komponente $i_{j,\omega}$ noslēdzas caur ierosmes tinuma barošanas avotu un var radīt traucējumus tā darbībā (komutācijas apstākļu pasliktināšanās mašīnerosinātājā, traucējumi taisngriežu iekārtas darbībā statiskās ierosmes sistēmās u. tml.).

Pretējā lauka inducētās strāvas ierosmes un slāpētājtinumā, kā arī virpuļstrāvas turboģeneratoru masīvajā rotorā var radīt ievērojamus papildzudumus, kas savukārt izraisa šo daļu pastiprinātu silšanu un samazina mašīnas lietderības koeficientu.

Ierosmes un enkura tiešo un pretējo lauku mijiedarbības rezultātā uz rotoru un statoru darbojas laikā mainīgi mehāniskie spēki, kas rada vibrācijas un vājina konstrukciju savienojumu mehānisko stiprību.

Pretējās secības strāvas izraisa enkura tinuma fāzēs sprieguma kritumus $I_2 Z_2$, kuru vektori attiecībā pret tiešās secības spriegumiem dažādās fāzēs ir dažāda virziena. Tā rezultātā ģeneratora fāzu spriegumi kļūst nesimetriski un vairāk noslogotajās fāzēs spriegums ir zemāks. Mašīnās ar slāpētājtinumu pretestība Z_2 ir mazāka (sk. izteiksmes (7.109), ..., (7.113)), un tāpēc tajās spriegumu nesimetrija ir neliela.

Pieļaujamo slodzes nesimetriju sinhronajiem ģeneratoriem ierobežo galvenokārt rotora silšana.

Lai nodrošinātu sinhronā ģeneratora normālu darbību nesimetriskas slodzes gadījumā, nepieciešams vājināt pretējo lauku. Šim nolūkam izveido slāpētājtinumu, kura darbība pamatojas uz to, ka šajā tinumā inducētās strāvas saskaņā ar Lenca likumu uz enkura pretējo lauku darbojas atmagnetizējoši. Tāpēc pretējā lauka rotējošā magnētiskā plūsma gaisa spraugā ir neliela, un slāpētājtinums tādējādi gandrīz pilnīgi ekranē ierosmes tinumu. Rezultātā ierosmes tinuma strāvas periodiskā komponente ievērojami samazinās.

Lai slāpētājtinuma darbība būtu pietiekami efektīva, to izveido ar mazu aktīvo un induktīvo pretestību. Turboģeneratoriem speciāls slāpētājtinums nav vajadzīgs, jo tā uzdevumu šeit veic masīvais rotors.

Var atzīmēt, ka, sinhronajam ģeneratoram darbojoties ar simetrisku slodzi, slāpētājtinums tā darbā nepiedalās, jo rotē sinhroni ar enkura lauku, un tāpēc šajā tinumā inducētais ĒDS ir vienāds ar nulli.

7.7.4. Sinhrono ģeneratoru nesimetriski īsslēgumi

Noskaidrosim, kā ar simetrisko komponentu metodi var aprēķināt nesimetrisko īsslēgumu strāvas sinhronajā ģeneratorā. Aplūkosim sinhrono ģeneratoru, kura enkura tinums slēgts zvaigznē, un pieņemsim, ka īsslēgums notiek, ģeneratoram strādājot tukšgaitā.

Vispirms sastādīsim vienādojumus, kuri saista dažādu secību strāvas (I_1, I_2, I_0), pretestības (X_1, X_2, X_0) un spriegumus (U_1, U_2, U_0).

Tā kā enkura tinums ir simetrisks, tad ierosmes lauks šajā tinumā inducē tikai tiešās secības EDS: $E_1=E, E_2=E_0=0$.

Tiešās, pretējās secības un nullsecības spriegumu vienādojumi ir šādi:

$$\dot{E} = \dot{U}_1 + jX_1 \dot{I}_1; \quad (7.115)$$

$$0 = \dot{U}_2 + jX_2 \dot{I}_2; \quad (7.116)$$

$$0 = \dot{U}_0 + jX_0 \dot{I}_0. \quad (7.117)$$

Fāzu spriegumus un strāvas var izteikt ar to simetriskajām komponentēm:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \quad (7.118)$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \quad (7.119)$$

$$\dot{U}_C = a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0; \quad (7.120)$$

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad (7.121)$$

$$\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0; \quad (7.122)$$

$$\dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0, \quad (7.123)$$

kur $a = e^{j2\pi/3}$;

$a^2 = e^{j4\pi/3}$,

pie tam $1 + a + a^2 = 0$.

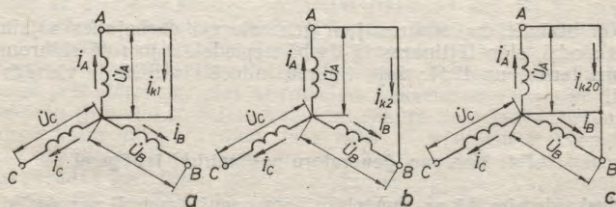
Tā kā deviņi vienādojumi (7.115), ..., (7.123) satur divpadsmit nezināmus lielumus, jā sastāda vēl trīs papildu vienādojumi, kuri iegūstami, ievērojot katra īsslēguma veida konkrētās īpatnības.

Saskaņā ar 7.43. zīmējumu vienfāzes īsslēgumā (7.43. zīm. a)

$$\dot{U}_A = 0; \quad (7.124)$$

$$\dot{I}_B = 0; \quad (7.125)$$

$$\dot{I}_C = 0, \quad (7.126)$$



7.43. zīm. Sihnronā ģeneratora nesimetrisko īsslēgumu shēmas:
a — vienfāzes īsslēgums, b — divfāzu īsslēgums, c — divfāzu īsslēgums uz neitrāli.

divfāzu īsslēgumā (7.43. zīm. b)

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B; \quad (7.127)$$

$$I_A + I_B = 0; \quad (7.128)$$

$$I_C = 0, \quad (7.129)$$

divfāzu īsslēgumā uz neitrāli (7.43. zīm. c)

$$\dot{U}_A = 0; \quad (7.130)$$

$$\dot{U}_B = 0; \quad (7.131)$$

$$I_C = 0. \quad (7.132)$$

Atrisinot katram īsslēguma veidam atbilstošo vienādojumu sistēmu, iegūstam, ka

$$I_{h1} = -j \frac{3\dot{E}}{X_1 + X_2 + X_0}; \quad (7.133)$$

$$I_{h2} = -j \frac{\sqrt{3}\dot{E}}{X_1 + X_2}; \quad (7.134)$$

$$I_{h20} = -j \frac{\sqrt{3} \left[\left(\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) X_2 + X_0 \right] \dot{E}}{X_1 X_2 + X_1 X_0 + X_2 X_0}. \quad (7.135)$$

Šo īsslēguma strāvu efektīvās vērtības:

$$I_{h1} = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0}; \quad (7.136)$$

$$I_{h2} = \frac{\sqrt{3}E}{X_1 + X_2}; \quad (7.137)$$

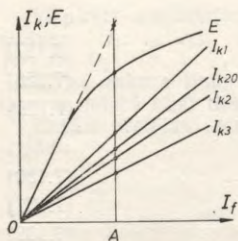
$$I_{h20} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{X_2^2 + X_2 X_0 + X_0^2} E}{X_1 X_2 + X_1 X_0 + X_2 X_0}. \quad (7.138)$$

Simetriskā trīsfāzu īsslēgumā (sk. 7.4.3., ..., 7.4.5.)

$$I_{h3} = \frac{E}{X_1}. \quad (7.139)$$

Tā kā sinhronajās mašinās $X_1 > X_2 > X_0$ (sk. 7.7.2.), tad no izteiksmēm (7.136), ..., (7.139) var atrast, ka $I_{h1} > I_{h20} > I_{h2} > I_{h3}$. Fizikāli tas izskaidrojams ar to, ka vienfāzes īsslēgumā atmagnetizējošu enkura reakciju rada tikai vienas fāzes strāva. Palielinoties īsslēgto fāzu skaitam, enkura reakcijas atmagnetizējošā darbība pastiprinās, rezultējošā plūsma gaisa spraugā samazinās, un tāpēc samazinās arī īsslēguma strāva.

7.44. zīmējumā attēlotas sinhronā ģenerators īsslēguma raksturlielnes dažādiem īsslēguma veidiem. Tā kā enkura reakcija atmagnetizē



7.44. zim. Sinhronā ģenerātorā tukšgaitas un īsslēguma raksturliķnes.

mašīnu, magnētiskā ķēde ir vāji piesātināta, un tāpēc īsslēguma raksturliķnes ir lineāras.

Izmantojot īsslēguma un tukšgaitas eksperimentālās raksturliķnes, var noteikt sinhronās mašīnas pretestības X_1 , X_2 , X_0 . Šim nolūkam kaut kādai ierosmes strāvai $I_f = \overline{OA}$ no nepiesātinātas mašīnas tukšgaitas raksturliķnes (svītrlīnija 7.44. zīmējumā) atrod atbilstošu EDS E vērtību, bet no īsslēguma raksturliķnēm — atbilstošas īsslēguma strāvu I_{k1} , I_{k2} un I_{k3} vērtības. Saskaņā ar izteiksmi (7.139)

$$X_1 = \frac{E}{I_{k3}}. \quad (7.140)$$

Ievietojot X_1 no izteiksmes (7.140) izteiksmē (7.137), var atrast pretestību X_2 :

$$X_2 = \frac{\sqrt{3}E}{I_{k2}} - \frac{E}{I_{k3}}. \quad (7.141)$$

No izteiksmes (7.136), ievietojot tajā atrastās X_2 un X_1 vērtības, iegūstam, ka

$$X_0 = \frac{3E}{I_{k1}} - \frac{\sqrt{3}E}{I_{k2}}. \quad (7.142)$$

7.8. PĀREJAS PROCESI SINHRONAJĀS MAŠĪNĀS

7.8.1. Vispārīgi norādījumi

Jebkura darba režīma strauja izmaiņa (pēkšņa slodzes maiņa, pēkšņš īsslēgums u. tml.) izraisa sinhronajā mašīnā pārejas procesus. Pārejas procesa laikā sinhronās mašīnas tinumu strāvas, kā arī mehāniskie spēki, kas darbojas uz mašīnas tinumiem un rotējošām daļām, var sasniegt daudzkārt lielākas vērtības nekā normālā darba režīmā. Tā kā mūsdienu elektriskajās sistēmās paralēli strādā liels skaits sinhrono mašīnu, tad pārejas procesi, kas noris vienā mašīnā, var jūtami ietekmēt citu mašīnu darbību, kā arī visas sistēmas darbību kopumā. Atsevišķos gadījumos pārejas procesi var būt par cēloni nopietnām avārijām elektriskajā sistēmā.

Pārejas procesu daba sinhronajās mašīnās salīdzinājumā ar transformatoriem ir daudz sarežģītāka, jo sinhronajās mašīnās

pārejas procesi ir saistīti ne tikai ar elektromagnētiskā lauka enerģijas, bet arī ar rotējošo daļu kinētiskās enerģijas izmaiņu.

Visus pārejas procesus sinhronajās mašīnās nosacīti var iedalīt divās grupās: *elektromagnētiskajos* un *elektromehāniskajos pārejas procesos*. Pie elektromagnētiskajiem pieskaita pārejas procesus, kuru laikā mašīnas rotora rotācijas frekvence neizmainās ($n = \text{const}$) un tāpat nemainās arī rotējošo daļu kinētiskā enerģija, pie elektromehāniskajiem — pārejas procesus, kuri saistīti ar rotora rotācijas frekvences un kinētiskās enerģijas izmaiņu.

Jebkura veida pārejas procesus sinhronajā mašīnā, tāpat kā transformatorā, var aprakstīt ar diferenciālvienādojumiem. Sinhronajās mašīnās, kā tika noskaidrots iepriekš, pastāv magnētiska un elektriska nesimetrija. Bez tam rotora tinumi attiecībā pret enkura tinumiem pārvietojas, un tā rezultātā mainās savstarpējā induktivitāte starp šiem tinumiem. Minēto iemeslu dēļ diferenciālvienādojumi pārejas procesiem sinhronajās mašīnās ir ļoti sarežģīti, un to korekta matemātiskā analīze neiekļaujas šīs grāmatas ietvaros. Tāpēc šeit aplūkosim vispirms raksturīgāko pārejas procesu fizikālo ainu, bet sakarības, kas raksturo pārejas procesu norisi, atradīsim, izejot galvenokārt no fizikālo parādību analīzes.

Visbiežāk pārejas procesus sinhronajās mašīnās izraisa pēkšņie īsslēgumi elektriskajos tīklos un elektropārvades līnijās, kuru cēloņi var būt izolācijas bojājumi, atmosfēras pārspriegumi, vadu pārrāvumi u. c. Šādi pārejas procesi daudzos gadījumos ir ļoti bīstami. Parādības, kas noris sinhronajās mašīnās pēkšņā īsslēguma gadījumā, daudzējādā ziņā ir raksturīgas arī citiem elektromagnētiskajiem pārejas procesiem. Tāpēc no elektromagnētiskajiem pārejas procesiem šajā nodaļā sīkāk iztirzāsim tieši sinhronā ģeneratora pēkšņo trīsfāzu īsslēgumu, kas noris, ģeneratoram darbojoties ar pilnu spriegumu. No elektromehāniskajiem pārejas procesiem aplūkosim pārejas procesu, ko izraisa pēkšņa slodzes maiņa un kas parasti ir saistīti ar sinhronās mašīnas rotora svārstībām.

7.8.2. Sinhronā ģeneratora pēkšņais īsslēgums

Aplūkosim sinhronā ģeneratora trīsfāzu pēkšņo īsslēgumu, kas notiek, ģeneratoram darbojoties tukšgaitā. Tā kā pēkšņā īsslēguma gadījumā galvenokārt interesē enkura strāvas lielums un tās izmaiņa laikā, tad galveno vērību pievērsīsim šīs strāvas noteikšanai.

Sinhronā ģeneratora pēkšņais īsslēgums daudzējādā ziņā ir līdzīgs īsslēguma procesam transformatorā. Tāpat kā transformatorā, sinhronā ģeneratora enkura tinumā rodas uzspiestās periodiskās strāvas un brīvās aperiodiskās strāvas, kuras pārejas procesa gaitā norimst. Tomēr pēkšņā īsslēguma process sinhronajā ģeneratorā sakarā ar rotora griešanos un notiekošajiem pārejas procesiem rotora tinumos ir daudz sarežģītāks nekā transformatorā.

Pēkšņā īsslēguma procesa fizikālā aina. Sinhronajās mašīnās tinumu aktīvās pretestības salīdzinājumā ar induktīvajām pretestībām

ir ļoti mazas. Šī iemesla dēļ aktīvās pretestības praktiski neietekmē pēkšņā īsslēguma strāvu sākuma vērtības, bet no šo pretestību lieluma ir atkarīgs strāvu rimšanas ātrums, t. i., pārejas procesa ilgums. Tāpēc, nosakot īsslēguma strāvu sākuma vērtības, var neievērot tinumu aktīvās pretestības ($R_a=R_f=R_s=0$, kur R_a, R_f, R_s — attiecīgi enkura, ierosmes tinuma un slāpētājtinuma aktīvās pretestības), t. i., pieņemt, ka visas elektriskās ķēdes ir supravadošas. Šādām ķēdēm ir piemērojama teorēma par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu.

Diferenciālvienādojums elektriskam kontūram, kas nesatur ārēju sprieguma avotu, ir šāds:

$$-\frac{d\Psi}{dt}=Ri, \quad (7.143)$$

kur Ψ — kontūra plūsmas saķēdējums, ko rada šī kontūra strāva, kā arī to kontūru strāvas, kuri induktīvi saistīti ar aplūkojamo kontūru.

Supravadošam kontūram ($R=0$) vienādojuma (7.143) vietā iegūstam sakarību

$$\frac{d\Psi}{dt}=0, \quad (7.144)$$

no kurienes izriet, ka $\Psi=\text{const}$, t. i., supravadošā kontūrā plūsmas saķēdējums ir nemainīgs. Ja, piemēram, šādam supravadošam kontūram tuvina magnēta polu, tad kontūrā inducējas tāda lieluma un virziena strāva, kuras radītais plūsmas saķēdējums pilnīgi kompensē ar pola tuvināšanu izraisīto plūsmas saķēdējuma izmaiņu.

Tagad noskaidrosim, kā, izmantojot teorēmu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu, var izskaidrot *periodisko* un *aperiodisko* strāvu rašanos enkura tinumā īsslēguma procesa sākumā. Pieņemsim patvaļīgu īsslēguma sākuma momentu ($t=0$), kad rotora polu ass atpauzē par leņķi ψ_0 no A fāzes ass (7.45. zīm.). Polu plūsmas Φ radītais plūsmas saķēdējums ar katru enkura tinuma fāzi Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C īsslēguma sākuma momentā ($t=0$) ir dažāds, jo attiecībā pret polu lauku enkura tinuma fāzes atrodas dažādos apstākļos. Ja ar Ψ_m apzīmējam plūsmas saķēdējumu ar tinuma fāzi momentā, kad šīs fāzes ass sakrīt ar polu asi, tad īsslēguma sākuma momentā

$$\Psi_A=\Psi_m \cos \psi_0, \quad \Psi_B=\Psi_m \cos (\psi_0-120^\circ), \quad \Psi_C=\Psi_m \cos (\psi_0-240^\circ). \quad (7.145)$$

Saskaņā ar teorēmu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu šādi plūsmas saķēdējumi saglabājas arī tad, ja $t>0$. Tas nozīmē, ka pēkšņā īsslēguma gadījumā enkura tinuma katrā fāzē jāparādās strāvai, kas var uzturēt nemainīgu plūsmas saķēdējumu ar šo tinuma fāzi. Bet nemainīgu plūsmas saķēdējumu var radīt tikai aperiodiskas strāvas $i_{A,a}, i_{B,a}, i_{C,a}$, kuras, pieņemot, ka $R_a=R_f=R_s=0$, nerimst. Šīs strāvas var uzskatīt par simetriskas trīsfāzu strāvu sis-

tēmas momentānajām vērtībām, kuras paliek nemainīgas, ja $t > 0$ («sastingusi maiņstrāva»).

Tādējādi nemainīgu plūsmas saķēdējumu $\Psi_{A,a} = \text{const}$, $\Psi_{B,a} = \text{const}$, $\Psi_{C,a} = \text{const}$ ar enkura tinuma fāzēm pēc išslēguma sākuma nodrošina laikā nemainīga un telpā nekustīga enkura magnētiskā plūsma Φ_{a1} , kuru uztur laikā nemainīgas enkura tinuma aperiodiskās strāvas $i_{A,a} = \text{const}$, $i_{B,a} = \text{const}$, $i_{C,a} = \text{const}$ (ievērojot pieņēmumu, ka $R_a = R_f = R_s = 0$).

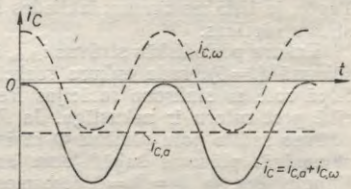
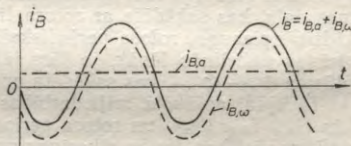
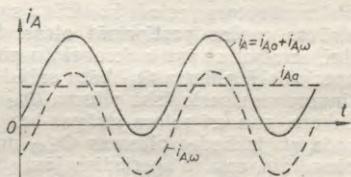
Rotoram griežoties, polu plūsma Φ ar enkura tinuma fāzēm rada periodiski mainīgu (ar frekvenci $f_1 = pn/60$) plūsmas saķēdējumu. Tāpēc, lai uzturētu nemainīgu plūsmas saķēdējumu ar šī tinuma fāzēm, līdztekus aperiodiskajām strāvām tinumā jāparādās periodiskām strāvām $i_{A,\omega}$, $i_{B,\omega}$, $i_{C,\omega}$, kuras rada ar sinhrono rotācijas frekvenci rotējošu enkura reakcijas magnētisko plūsmu $\Phi_{\omega 1}$. Šī plūsma ir vērsta polu garenass virzienā pretī ierosmes plūsmai Φ . No teiktā var secināt, ka enkura tinuma periodiskās strāvas pēc sava rakstura ir tādas pašas kā fāzu strāvas stacionāra išslēguma režīmā, kuras, ja neievēro tinuma aktīvo pretestību ($R_a = 0$), rada atmagnetizējošu enkura garenreakciju.

Jāatzīmē, ka išslēguma sākuma momentā ($t = 0$) periodiskās strāvas enkura tinuma fāzēs skaitliski ir vienādas ar aperiodiskajām strāvām, bet pretēji vērstas. Tādējādi laika momentā $t = 0$ periodisko un aperiodisko strāvu summa katrā fāzē ir vienāda ar nulli, kas atbilst sākumā pieņemtajam nosacījumam, ka išslēgums notiek tukšgaitā.

7.46. zīmējumā attēlota enkura periodisko, aperiodisko un rezultējošo strāvu



7.45. zim. Sinhronā ģeneratora magnētiskais lauks pirms pēkšņā išslēguma.



7.46. zim. Pēkšņā išslēguma strāvas enkura tinumā, ja $R_a = R_f = R_s = 0$ un $\psi_0 = 45^\circ$.

izmaiņa laikā enkura tinuma fāzēs A, B, C , neievērojot šo strāvu rimšanu ($R_a=R_f=R_s=0$). Zīmējumā attēlots gadījums, kad isslēguma sākuma momentā $\psi_0=45^\circ$.

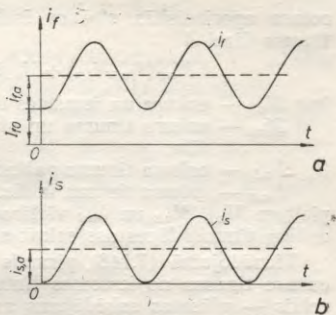
Tagad noskaidrosim, kā rodas periodiskās un aperiodiskās strāvas rotora tinumos.

Enkura tinuma aperiodiskā plūsma Φ_{a1} telpā ir nekustīga un, rotoram griežoties, šķēļ ierosmes tinumu un slāpētājtinumu. Tā rezultātā rotora tinumos inducējas periodiskas strāvas $i_{f,\omega}$ (ierosmes tinumā) un $i_{s,\omega}$ (slāpētājtinumā) ar frekvenci $f_1=pn/60$. Šīs strāvas, ja $R_f=R_s=0$, ir tīri induktīvas un saskaņā ar Lenca likumu attiecībā pret rotoru rada rotējošu magnētisko plūsmu $\Phi_{\omega 2}$, kas darbojas preti enkura aperiodiskajai plūsmai Φ_{a1} . Plūsma $\Phi_{\omega 2}$ attiecībā pret rotoru rotē ar sinhrono rotācijas frekvenci virzienā, kas pretējs rotora kustības virzienam, tāpēc tā ir nekustīga pret enkura aperiodisko plūsmu Φ_{a1} un cenšas to samazināt. Bet, tikko sāk samazināties enkura aperiodiskā plūsma Φ_{a1} , enkura tinuma fāzēs palielinās aperiodiskās strāvas, tādējādi cenšoties uzturēt iepriekšējo plūsmas saķēdējumu ar enkura tinuma fāzēm. Savukārt pieaugot enkura aperiodiskajām strāvām, palielinās plūsmas Φ_{a1} pretdarbība plūsmai $\Phi_{\omega 2}$, bet, lai plūsmas saķēdējums ar rotora tinumiem nemainītos, jāpieaug rotora tinumu periodiskajām strāvām. Rezultātā notiek enkura aperiodisko un rotora periodisko strāvu sarežģīta mijiedarbība, kurā vienas strāvas cenšas pastiprināt otras. Šis process turpinātos bezgalīgi ilgi, izraisot strāvu neierobežotu pieaugumu, ja enkura tinuma visa aperiodiskā plūsma Φ_{a1} būtu saķēdēta ar rotora tinumiem un rotora tinumu visa periodiskā plūsma $\Phi_{\omega 2}$ — ar enkura tinumu. Tomēr gan enkura, gan arī rotora strāvas bez savstarpējās indukcijas plūsmām rada arī izkliedes plūsmas $\Phi_{a,\sigma 1}$ un $\Phi_{\omega,\sigma 2}$. Tāpēc īstenībā, pieaugot, piemēram, enkura aperiodiskajām strāvām, rotora periodiskās strāvas palielinās lēnāk, jo tām jākompensē tikai tā enkura aperiodiskās plūsmas daļa, kas saķēdēta ar rotora tinumiem, t. i., plūsma $\Phi_{a1}-\Phi_{a,\sigma 1}$. Līdzīgi, pieaugot rotora periodiskajām strāvām, enkura aperiodiskās strāvas palielinās lēnāk, jo tām jākompensē tikai rotora periodiskā plūsma $\Phi_{\omega 2}-\Phi_{\omega,\sigma 2}$, kas saķēdēta ar enkura tinumu.

Tādējādi aplūkotā mijiedarbības procesa gaitā enkura aperiodiskās ($i_{A,a}, i_{B,a}, i_{C,a}$) un rotora periodiskās ($i_{f,\omega}, i_{s,\omega}$) strāvas sasniedz galīgas vērtības, kuras atkarīgas no tinumu izkliedes induktivitātēm. Tāpēc, jo lielākas tinumu izkliedes induktivitātes, jo mazākas minēto strāvu vērtības.

Enkura periodiskās strāvas $i_{A,\omega}, i_{B,\omega}, i_{C,\omega}$, kuras parādās isslēguma sākumā ($t=0$), rada enkura reakcijas magnētisko plūsmu $\Phi_{\omega 1}$, kas telpā rotē ar sinhrono rotācijas frekvenci $n_1=60f_1/p$ un tāpēc attiecībā pret rotoru ir nekustīga. Ja $R_a=0$, tad attiecībā pret ierosmes strāvas radīto polu plūsmu Φ tā ir atmagnetizējoša un tāpēc tiecas samazināt plūsmas saķēdējumu ar ierosmes tinumu un slāpētājtinumu. Bet, ja $R_f=R_s=0$, ierosmes tinumā un slāpētājtinumā parādās tāda virziena un lieluma strāvas $i_{f,a}$ un $i_{s,a}$, kuru radītā plūsma Φ_{a2} darbojas preti plūsmai $\Phi_{\omega 1}$, bet saskaņoti ar polu plūsmu Φ . Ierosmes tinuma papildstrāva $i_{f,a}$ pēc sava virziena ir tāda pati kā

sākuma ierosmes strāva I_{f0} , t. i., sinhronā ģenerators ierosmes strāva pirms išlęguma. Strāvas $i_{f,a}$ un $i_{s,a}$ ir rotora aperiodiskās strāvas, kuras attiecībā pret rotoru rada nekustīgu magnētisko plūsmu Φ_{a2} un tātad nekustīgu arī pret enkura periodisko strāvu radīto enkura reakcijas plūsmu $\Phi_{\omega 1}$. Rotora aperiodiskās ($i_{f,a}$, $i_{s,a}$) un enkura periodiskās ($i_{A,\omega}$, $i_{B,\omega}$, $i_{C,\omega}$) strāvas cenšas viena otru pastiprināt līdzīgi kā statora aperiodiskās un rotora periodiskās strāvas, kuras tika aplūkotas iepriekš. Strāvu neierobežotu pieaugumu ierobežo tas apstākļi, ka pastāv statora un rotora izkliedes plūsmas $\Phi_{\omega,\sigma 1}$ un $\Phi_{a,\sigma 2}$.



7.47. zim. Strāvas sinhronā ģenerators ierosmes tinumā (a) un slāpētājtinumā (b) pēkšņā išlęguma gadījumā, ja $R_a=R_l=R_s=0$.

Tādējādi pēkšņā išlęguma gadījumā visos sinhronā ģenerators tinumos rodas periodiskas un aperiodiskas strāvas. Tā kā rotors attiecībā pret enkuru griežas, tad induktīvi ir saistītas enkura aperiodiskās strāvas $i_{A,a}$, $i_{B,a}$, $i_{C,a}$ ar rotora periodiskajām strāvām $i_{f,\omega}$, $i_{s,\omega}$ un enkura periodiskās strāvas $i_{A,\omega}$, $i_{B,\omega}$, $i_{C,\omega}$ ar rotora aperiodiskajām strāvām $i_{f,a}$, $i_{s,a}$.

Rotora aperiodiskās strāvas $i_{f,a}$ un $i_{s,a}$, ja $R_l=R_s=0$, laikā nemainās. Atbilstoši šādiem nosacījumiem 7.47. zimējumā attēlota ierosmes tinuma strāvas

$$i_f = I_{f0} + i_{f,a} + i_{f,\omega} \quad (7.146)$$

un slāpētājtinuma strāvas

$$i_s = i_{s,a} + i_{s,\omega} \quad (7.147)$$

izmaiņa laikā.

Istenībā $R_a \neq 0$, $R_l \neq 0$, $R_s \neq 0$, un tāpēc išlęguma sākumā radušās brīvās aperiodiskās strāvas norimst, un kopā ar tām norimst periodiskās strāvas, kas induktīvi saistītas ar aperiodiskajām strāvām. Rezultātā (teorētiski, ja $t = \infty$) iestājas stacionāra išlęguma režīms, kad ierosmes tinumā plūst tikai strāva I_{f0} un enkura tinumā tai atbilstoša stacionārā išlęguma strāva.

Pārejas un virspārejas induktīvās pretestības. Izmantosim teorēmu par plūsmas saķēdējuma nemainīgumu išlęguma sākuma momentam ($t=0$) un pieņemsim, ka išlęgums notiek momentā, kad rotora polu ass sakrīt ar A fāzes asi ($\psi_0=0$). Tad ar A fāzi ir maksimālais plūsmas saķēdējums Ψ_m . Ievērojot, ka $\Psi = Li$, uzrakstīsim vienādojumus plūsmas saķēdējumiem, kurus rada enkura periodiskās un

rotora aperiodiskās strāvas īsslēguma sākuma momentā. Enkura tinuma fāzei A

$$M_{a,f}(I_{f0} + i_{f,a}) + M_{a,s}i_{s,a} - (L_{ad} + L_{a,\sigma})I_{\omega,m} = 0, \quad (7.148)$$

kur $M_{a,f}$ — enkura un ierosmes tinumu savstarpējā induktivitāte;

$M_{a,s}$ — enkura tinuma un slāpētājtinuma savstarpējā induktivitāte;

L_{ad} — enkura tinuma pašinduktivitāte;

$L_{a,\sigma}$ — enkura tinuma izkliedes induktivitāte,

pie tam $M_{a,f}$, $M_{a,s}$ un L_{ad} vērtības atbilst gadījumam, kad aplūkotās enkura tinuma fāzes ass sakrīt ar rotora polu asi (garenasi d).

Vienādojumā (7.148) pirmais loceklis ir plūsmas saķēdējums ar enkura tinumu no ierosmes tinuma aperiodiskās strāvas, otrais loceklis — plūsmas saķēdējums ar enkura tinumu no slāpētājtinuma aperiodiskās strāvas, bet trešais loceklis — plūsmas saķēdējums no paša enkura tinuma periodiskās strāvas. Kā noskaidrots iepriekš, plūsmas saķēdējums no minētajām strāvām ir vienāds ar nulli, jo nemainīgu sākuma plūsmas saķēdējumu ar enkura tinumu nodrošina enkura aperiodiskās un rotora periodiskās strāvas.

Līdzīgi var uzrakstīt plūsmas saķēdējuma vienādojumu ierosmes tinumam:

$$(L_f + L_{f,\sigma})(I_{f0} + i_{f,a}) + M_{f,s}i_{s,a} - M_{a,f}I_{\omega,m} = (L_f + L_{f,\sigma})I_{f0}, \quad (7.149)$$

kur $M_{f,s}$ — ierosmes tinuma un slāpētājtinuma savstarpējā induktivitāte;

L_f — ierosmes tinuma pašinduktivitāte;

$L_{f,\sigma}$ — ierosmes tinuma izkliedes induktivitāte.

Vienādojuma (7.149) kreisā puse izsaka plūsmas saķēdējumu ar ierosmes tinumu, ko rada enkura periodiskā un rotora aperiodiskā strāva laika momentā $t=0$, bet labā puse — plūsmas saķēdējumu ar ierosmes tinumu pirms īsslēguma sākuma. Vienādības zīme fiksē ierosmes tinuma plūsmas saķēdējuma nemainīgumu.

Plūsmas saķēdējuma vienādojums slāpētājtinumam ir šāds:

$$M_{f,s}(I_{f0} + i_{f,a}) + (L_s + L_{s,\sigma})i_{s,a} - M_{a,s}I_{\omega,m} = M_{f,s}I_{f0}, \quad (7.150)$$

kur L_s — slāpētājtinuma pašinduktivitāte;

$L_{s,\sigma}$ — slāpētājtinuma izkliedes induktivitāte.

Vienādojuma (7.150) kreisā puse izsaka plūsmas saķēdējumu ar slāpētājtinumu īsslēguma sākuma momentā $t=0$, bet labā puse — plūsmas saķēdējumu pirms īsslēguma.

Vienādojumus (7.148), ..., (7.150) lietderīgi pārveidot, aizstājot tajos reālā rotora lielumus ar lielumiem, kas reducēti uz statora tinumu. Reducēšanas princips šajā gadījumā ir tāds pats kā transformatoros un asinhronajās mašīnās (sk. 4.4.3. un 6.2.3.). Var pierādīt, ka, reducējot rotora lielumus uz statora tinumu, ir spēkā šāda sakarība

$$M'_{a,f} = M'_{a,s} = M'_{f,s} = L'_f = L'_s = L_{ad} = X_{ad}/\omega, \quad (7.151)$$

kur rotora reducētie parametri apzīmēti ar zīmi '.

Ievērojot sakarību (7.151), vienādojumu (7.148), ..., (7.150) vietā iegūstam vienādojumus

$$L_{ad}(I'_{f0} + i'_{f,a}) + L_{ad}i'_{s,a} - (L_{ad} + L_{a,\sigma})I_{\omega,m} = 0, \quad (7.152)$$

$$(L_{ad} + L'_{f,\sigma})(I'_{f0} + i'_{f,a}) + L_{ad}i'_{s,a} - L_{ad}I_{\omega,m} = (L_{ad} + L'_{f,\sigma})I'_{f0}, \quad (7.153)$$

$$L_{ad}(I'_{f0} + i'_{f,a}) + (L_{ad} + L'_{s,\sigma})i'_{s,a} - L_{ad}I_{\omega,m} = L_{ad}I'_{f0}, \quad (7.154)$$

kur I'_{f0} , $i'_{f,a}$, $i'_{s,a}$ — rotora tinumu strāvas, kas reducētas uz enkura tinumu.

Pareizināsim vienādojumu (7.152), ..., (7.154) abas puses ar $\omega = 2\pi f$ un ievērosim, ka

$$X_{ad} = \omega L_{ad} \quad (7.155)$$

ir enkura garenreakcijas induktīvā pretestība, bet

$$X_{a,\sigma} = \omega L_{a,\sigma}, \quad X'_{f,\sigma} = \omega L'_{f,\sigma}, \quad X'_{s,\sigma} = \omega L'_{s,\sigma} \quad (7.156)$$

ir enkura, ierosmes tinuma un slāpētāj-tinuma izkliedes induktīvās pretestības. Bez tam

$$\omega L_{ad}I'_{f0} = E_m, \quad (7.157)$$

kur E_m — enkura tinumā inducētā EDS amplitūdas vērtība. Tad, ievērojot sakarības (7.155), ..., (7.157), pēc locekļu pārgrupēšanas vienādojumu (7.152), ..., (7.154) vietā iegūstam vienādojumus

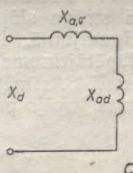
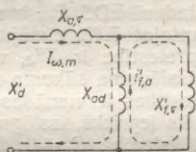
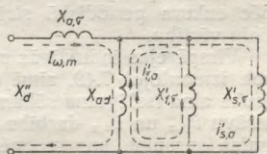
$$X_{ad}(-i'_{f,a} - i'_{s,a} + I_{\omega,m}) + X_{a,\sigma}I_{\omega,m} = E_m, \quad (7.158)$$

$$X_{ad}(i'_{f,a} + i'_{s,a} - I_{\omega,m}) + X'_{f,\sigma}i'_{f,a} = 0, \quad (7.159)$$

$$X_{ad}(i'_{f,a} + i'_{s,a} - I_{\omega,m}) + X'_{s,\sigma}i'_{s,a} = 0. \quad (7.160)$$

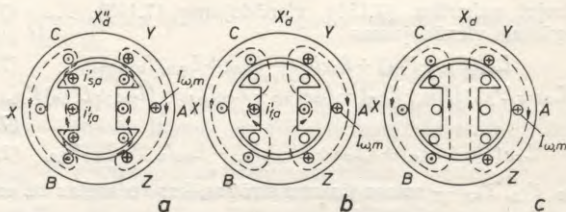
Vienādojumiem (7.158), ..., (7.160) atbilst ekvivalentā shēma, kas attēlota 7.48. zīmējumā *a*, pie tam strāvas $I_{\omega,m}$, $i'_{f,a}$ un $i'_{s,a}$ ir shēmā parādīto kontūru strāvas. Ekvivalentās shēmas kopējo pretestību

$$X''_d = X_{a,\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X'_{f,\sigma}} + \frac{1}{X'_{s,\sigma}}} \quad (7.161)$$



7.48. zīm. Pēkšņā īsslēguma induktīvo pretestību ekvivalentās shēmas:

a — virspārejas induktīvā pretestība, *b* — pārejas induktīvā pretestība, *c* — sinhronā induktīvā pretestība.



7.49. zīm. Enkura magnētiskā lauka aina pēkšņā išslēguma sākumā (a), pēc slāpētājtinuma aperiodiskās strāvas norimšanas (b) un stacionārā išslēguma režīmā (c).

sauc par sinhronās mašīnas *virspārejas induktīvo pretestību*. Saskaņā ar ekvivalento shēmu no šīs pretestības ir atkarīga enkura periodiskās strāvas maksimālā sākuma vērtība. Tā kā ģenerators tinumu izkļedes induktīvās pretestības $X_{a,\sigma}$, $X'_{f,\sigma}$ un $X'_{s,\sigma}$ ir mazas, tad arī virspārejas induktīvā pretestība X''_d ir samērā maza, un tāpēc enkura periodiskā strāva išslēguma sākumā sasniedz relatīvi lielu vērtību.

Virspārejas induktīvās pretestības X''_d fizikālo būtību var izskaidrot, izmantojot 7.49. zīmējumu a, kurā attēlota enkura magnētiskā lauka aina išslēguma sākuma momentā. Sakarā ar rotora aperiodisko strāvu $i'_{f,a}$ un $i'_{s,a}$ darbību enkura magnētiskais lauks tiek izspiests gaisa spraugā, kur magnētiskajai plūsmai ir relatīvi liela magnētiskā pretestība. Tāpēc, lai radītu magnētisko plūsmu, kas enkura tinumā inducē EDS E_m , ir nepieciešama lielāka strāva.

Izmantojot 7.48. zīmējumā a attēloto ekvivalento shēmu, kuras kopējā pretestība ir X''_d , var aprēķināt enkura periodiskās strāvas vērtību išslēguma sākuma momentā, pieņemot, ka visu tinumu aktīvās pretestības ir vienādas ar nulli. Šo pretestību neievērošana, kā jau minēts iepriekš, išslēguma strāvu sākuma vērtības praktiski neietekmē. Istenībā $R_a \neq 0$, $R_f \neq 0$, $R_s \neq 0$, tāpēc procesa turpmākajā gaitā ($t > 0$) jāievēro strāvu rimšana.

Aperiodiskā strāva slāpētājtinumā norimst ātrāk nekā ierosmes tinumā. Robežgadījumā, kad $i'_{s,a} = 0$, enkura magnētiskais lauks «iespiežas» slāpētājtinuma zonā (7.49. zīm. b), un šādiem apstākļiem atbilst 7.48. zīmējumā b attēlotā ekvivalentā shēma, kurā $X'_{s,\sigma} = \infty$. Shēmas kopējo pretestību

$$X'_d = X_{a,\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X'_{f,\sigma}}} \quad (7.162)$$

sauc par sinhronās mašīnas *pārejas induktīvo pretestību*. Arī sinhronajās mašīnās bez slāpētājtinuma $X'_{s,\sigma} = \infty$, un tāpēc šādās mašīnās enkura periodiskās strāvas maksimālā sākuma vērtība ir atkarīga no pārejas induktīvās pretestības X'_d .

Pārejas procesa beigās, kad norimusi arī aperiodiskā strāva ierosmes tinumā ($i'_{f,a}=0$), enkura lauks pilnīgi «iespiežas» rotorā (7.49. zīm. c). Šādiem apstākļiem atbilst 7.48. zīmējumā c attēlotā ekvivalentā shēma, kuras kopējā pretestība

$$| \quad X_d = X_{a,\sigma} + X_{ad} \quad (7.163)$$

un no kuras ir atkarīga stacionārā īsslēguma strāva (sk. 7.4.3. un 7.4.4.).

Atbilstoši enkura tinuma ekvivalentās pretestības izmaiņai no vērtības $X''_d(t=0)$ līdz vērtībai $X_d(t=\infty)$ enkura tinuma periodiskā strāva mainās no maksimālās sākuma vērtības līdz stacionāra īsslēguma strāvai. No ekvivalentajām shēmām (7.48. zīm.) redzams, ka $X''_d < X'_d < X_d$. So pretestību vērtības relatīvajās vienībās dotas 7.1. tabulā.

Pēkšņā īsslēguma strāvas generatorā bez slāpētājtinuma. Noteiksim pēkšņā īsslēguma strāvu vienai enkura tinuma fāzei, pieņemot, ka īsslēgums notiek tukšgaitā ($U=E$) un EDS momentānā vērtība šajā fāzē

$$e = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \psi_0), \quad (7.164)$$

kur ψ_0 — leņķis, kas raksturo EDS fāzi īsslēguma sākuma momentā ($t=0$).

Enkura tinuma īsslēguma strāva, kā minēts iepriekš, sastāv no periodiskās un aperiodiskās strāvas:

$$i_h = i_\omega + i_a. \quad (7.165)$$

Periodiskās strāvas maksimālo sākuma vērtību saskaņā ar ekvivalento shēmu (sk. 7.48. zīm. b) var atrast no izteiksmes

$$I_{\omega,m0} = \frac{\sqrt{2} E}{X'_d}. \quad (7.166)$$

Šī strāva, kā zināms, ierosmes tinumā izraisa aperiodisku papildstrāvu $i'_{f,a}$, kura ierosmes tinuma aktīvās pretestības ietekmē rimst. Līdz ar ierosmes tinuma aperiodiskās strāvas norimšanu samazinās arī ar to saistītās periodiskās strāvas amplitūda līdz stacionārā īsslēguma strāvas vērtībai. Tāpēc var uzskatīt, ka enkura periodiskā strāva sastāv no divām komponentēm: stacionārā īsslēguma strāvas ar amplitūdu $I_{\omega,m\infty}$ un rimstošas periodiskas strāvas, kuru sauc par *periodiskās strāvas pārejas komponenti*, ar maksimālo sākuma vērtību $I'_{\omega,m0}$. Tādējādi īsslēguma sākuma momentā ($t=0$)

$$I_{\omega,m0} = I_{\omega,m\infty} + I'_{\omega,m0}. \quad (7.167)$$

Saskaņā ar ekvivalento shēmu (sk. 7.48. zīm. c) stacionārā īsslēguma strāvas amplitūda

$$I_{\omega,m\infty} = \frac{\sqrt{2} E}{X_d}. \quad (7.168)$$

Ievietojot no izteiksmēm (7.166) un (7.168) strāvu I_{ω, m_0} un $I_{\omega, m\infty}$ vērtības izteiksmē (7.167), var atrast, ka

$$I'_{\omega, m_0} = \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (7.169)$$

Tā kā enkura periodiskās strāvas pārejas komponente saistīta ar aperiodisko strāvu ierosmes tinumā, tad abas strāvas norimst vienlaikus ar vienādu laika konstanti. Periodiskās strāvas pārejas komponentes amplitūdas vērtība jebkurā laika momentā

$$I'_{\omega, m} = I'_{\omega, m_0} e^{-t/T'_d} = \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d}, \quad (7.170)$$

kur T'_d — ierosmes tinuma laika konstante, kura atkarīga no šī tinuma aktivās pretestības un induktivitātes.

Nosakot enkura periodiskās strāvas momentāno vērtību, jāievēro, ka šī strāva no EDS atpaliek fāzē par ceturtdaļperiodu. Saskaņā ar izteiksmēm (7.164), (7.168) un (7.170) stacionārā īsslēguma strāvas un periodiskās strāvas pārejas komponentes momentānās vērtības

$$i_{\omega\infty} = \frac{\sqrt{2} E}{X_d} \sin \left(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2} \right) = - \frac{\sqrt{2} E}{X_d} \cos (\omega t + \psi_0), \quad (7.171)$$

$$\begin{aligned} i'_{\omega} &= \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} \sin \left(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= - \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} \cos (\omega t + \psi_0) \end{aligned} \quad (7.172)$$

un enkura kopējā periodiskā strāva

$$i_{\omega} = i_{\omega\infty} + i'_{\omega} = - \sqrt{2} E \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} \right] \cos (\omega t + \psi_0). \quad (7.173)$$

Enkura tinuma aperiodisko strāvu noteiksim, izmantojot nosacījumu, ka īsslēgums notiek tukšgaitā, t. i., $i_{h0} = 0$, kur i_{h0} — enkura tinuma īsslēguma strāva laika momentā $t = 0$. Tad, ievērojot izteiksmi (7.165),

$$i_{\omega 0} + i_{a0} = 0 \quad (7.174)$$

jeb

$$i_{a0} = - i_{\omega 0}, \quad (7.175)$$

kur $i_{\omega 0}$ un i_{a0} — enkura periodiskās un aperiodiskās strāvas sākuma vērtības.

Ievietojot izteiksmē (7.173) $t = 0$ un ievērojot sakarību (7.175), iegūstam, ka

$$i_{a0} = \frac{\sqrt{2} E}{X'_d} \cos \psi_0. \quad (7.176)$$

Enkura tinuma aperiodiskā strāva jebkurā laika momentā

$$i_a = i_{a0} e^{-t/T_a} = \frac{\sqrt{2} E}{X'_d} \cos \psi_0 e^{-t/T_a}, \quad (7.177)$$

kur T_a — enkura aperiodiskās strāvas rimšanas konstante, kura atkarīga no enkura tinuma aktīvās pretestības un induktivitātes.

Tādējādi sinhronajā ģeneratorā bez slāpētājtinuma kopējā īsslēguma strāva

$$\begin{aligned} i_k &= i_\omega + i_a = \\ &= -\sqrt{2} E \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} \right] \cos(\omega t + \psi_0) + \\ &\quad + \frac{\sqrt{2} E}{X'_d} \cos \psi_0 e^{-t/T_a}. \end{aligned} \quad (7.178)$$

Īsslēguma strāvas un tās atsevišķo komponentu izmaiņa laikā vienai fāzei attēlota 7.50. zīmējumā gadījumam, kad $\psi_0 = 0$, t. i., kad plūsmas saķēdējums ar aplūkoto fāzi ir maksimālais.

Strāvu izteiksmes pārējās fāzēs iegūst, ja izteiksmē (7.178) leņķa ψ_0 vietā atbilstoši ņem $\psi_0 - 2\pi/3$ un $\psi_0 - 4\pi/3$. Periodiskajām strāvām visās fāzēs ir vienādas aptverošās līknes (svitrlīnijas 7.50. zīm. *b, c*), kaut gan šīs strāvas katrā fāzē nobīdītas par 120° .

Aperiodisko strāvu vērtības katrā fāzē ir dažādas. To sākuma vērtības atkarīgas no īsslēguma momenta, t. i., no leņķa ψ_0 (sk. izteiksmi (7.176)). Aperiodiskās strāvas maksimālā vērtība netiek vienmēr sasniegta un, ja tā tiek sasniegta, tad tikai vienā fāzē. Visu fāžu aperiodisko strāvu algebriskā summa ir vienāda ar nulli gan sākuma momentā, gan arī vēlāk, jo tās rimst ar vienādu laika konstanti.

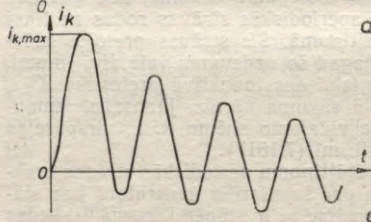
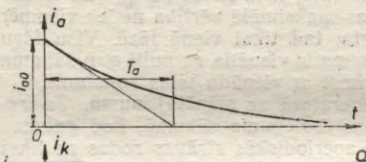
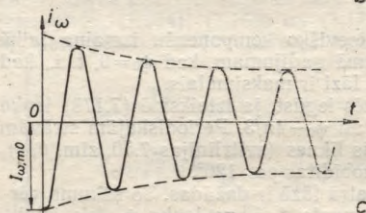
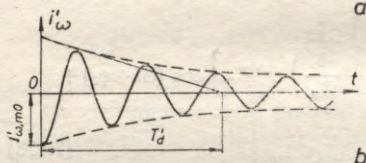
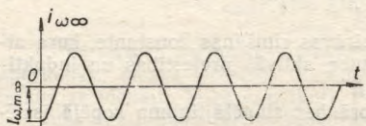
Pēkšņā īsslēguma strāvas ģeneratorā ar slāpētājtinumu. Ja rotorā ir slāpētājtinums, tad pēkšņā īsslēguma sākumā, kad galvenā plūsma sāk samazināties, rotorā aperiodiskās strāvas rodas ne tikai ierosmes tinumā, bet arī slāpētājtinumā. Šīs strāvas pretojas plūsmas saķēdējuma izmaiņai, tikai tagad šo uzdevumu veic divi tinumi. Te iegūst nozīmi slāpētājtinuma izkliedes induktīvā pretestība $X'_{s,\sigma}$, un periodiskās strāvas maksimālā sākuma vērtība jānosaka, izmantojot 7.48. zīmējumā *a* attēloto ekvivalento shēmu, t. i., virspārejas induktīvo pretestību X''_d (sk. izteiksmi (7.161)).

Sinhronajā ģeneratorā ar slāpētājtinumu periodiskās strāvas maksimālā sākuma vērtība ir lielāka par šo vērtību ģeneratorā bez slāpētājtinuma, jo $X''_d < X'_d$. Liela nozīme te ir slāpētājtinuma izkliedes induktīvajai pretestībai $X'_{s,\sigma}$, kura parasti ir mazāka par pārējām X''_d sastāvdaļām.

Palielinātas pēkšņā īsslēguma periodiskās strāvas cēlonis ir aperiodiskā strāva slāpētājtinumā, kas kopā ar ierosmes tinuma aperiodisko strāvu cenšas uzturēt nemainīgu iepriekšējo plūsmas saķēdējumu ar rotora tinumiem. Slāpētājtinuma aperiodiskā strāva

inducē periodisku papildstrāvu enkura diskās strāvas virspārejas komponenti.

tinumā, kuru sauc par *periodiskās strāvas virspārejas komponenti*. Tādējādi generatorā ar slāpētājtinumu enkura periodiskā strāva sastāv no trīs komponentēm:



$$i_{\omega} = i_{\omega\infty} + i'_{\omega} + i''_{\omega}, \quad (7.179)$$

kur $i_{\omega\infty}$ — stacionārā išslēguma strāva;

i'_{ω} — periodiskās strāvas pārejas komponente, kura saistīta ar aperiodisko strāvu ierosmes tinumā;

i''_{ω} — periodiskās strāvas virspārejas komponente, kura saistīta ar aperiodisko strāvu slāpētājtinumā.

Strāvu i_{ω} , $i_{\omega\infty}$ un i'_{ω} maksimālās sākuma vērtības (sk. arī izteiksmes (7.168) un (7.169))

$$I_{\omega,m0} = \frac{\sqrt{2} E}{X''_d}, \quad (7.180)$$

$$I_{\omega,m\infty} = \frac{\sqrt{2} E}{X_d}, \quad (7.181)$$

$$I'_{\omega,m0} = \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right). \quad (7.182)$$

No izteiksmes (7.179), izmantojot to išslēguma sākuma momentam, var atrast periodiskās strāvas virspārejas komponentes maksimālo sākuma vērtību:

$$I''_{\omega,m0} = I_{\omega,m0} - I_{\omega,m\infty} - I'_{\omega,m0} \quad (7.183)$$

7.50. zim. Pēkšņā išslēguma strāva un tās komponentes sinhronajā generatorā bez slāpētājtinuma:

a — stacionārā išslēguma strāva, *b* — periodiskās strāvas pārejas komponente, *c* — kopējā periodiskā strāva, *d* — aperiodiskā strāva, *e* — kopējā išslēguma strāva.

Jeb, ievērojot izteiksmes (7.180), ..., (7.182),

$$I''_{\omega, m0} = \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right). \quad (7.184)$$

Tā kā enkura periodiskās strāvas virspārejas komponente saistīta ar aperiodisko strāvu slāpētājinumā, tad abas strāvas vienlaikus norimst ar vienādu laika konstanti, un periodiskās strāvas virspārejas komponentes amplitūdas vērtība jebkurā laika momentā

$$I''_{\omega, m} = I''_{\omega, m0} e^{-t/T''_d} = \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d}, \quad (7.185)$$

kur T''_d — slāpētājinuma laika konstante, kura atkarīga no šī tinuma aktīvās pretestības un induktivitātes.

Virspārejas strāvas momentānā vērtība

$$\begin{aligned} i''_{\omega} &= \sqrt{2} E \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} \sin \left(\omega t + \psi_0 - \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= -\sqrt{2} E \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} \cos (\omega t + \psi_0). \end{aligned} \quad (7.186)$$

Ievietojot izteiksmē (7.179) i_{∞} , i'_{ω} un i''_{ω} vērtības no izteiksmēm (7.171), (7.172) un (7.186), iegūstam, ka

$$\begin{aligned} i_{\omega} &= -\sqrt{2} E \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \times \\ &\times \cos (\omega t + \psi_0). \end{aligned} \quad (7.187)$$

Aperiodiskās strāvas sākuma vērtību i_{a0} , līdzīgi kā ģeneratorā bez slāpētājinuma, nosaka, ievērojot nosacījumu, ka īsslēgums notiek tukšgaitā ($i_{h3} = 0$). Tad (sk. izteiksmi (7.175))

$$i_{a0} = -i_{\omega 0}. \quad (7.188)$$

Ievietojot izteiksmē (7.187) $t=0$ un ievērojot sakarību (7.188), iegūstam, ka

$$i_{a0} = \frac{\sqrt{2} E}{X''_d} \cos \psi_0. \quad (7.189)$$

Aperiodiskā strāva jebkurā laika momentā

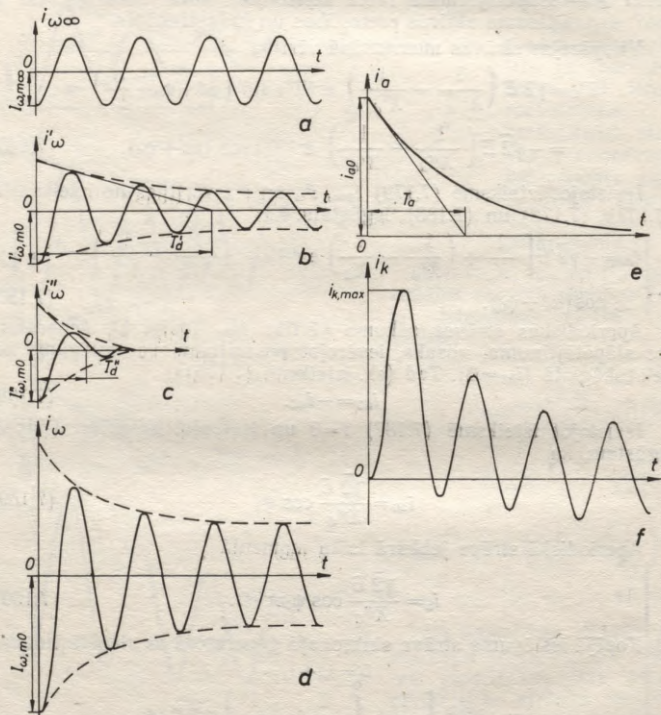
$$i_a = \frac{\sqrt{2} E}{X''_d} \cos \psi_0 e^{-t/T_a}. \quad (7.190)$$

Kopējā īsslēguma strāva sinhronajā ģeneratorā ar slāpētājinumu

$$\begin{aligned} i_h &= i_{\omega} + i_a = \\ &= -\sqrt{2} E \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T'_d} + \right. \\ &\left. + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-t/T''_d} \right] \cos (\omega t + \psi_0) + \frac{\sqrt{2} E}{X''_d} \cos \psi_0 e^{-t/T_a}. \end{aligned} \quad (7.191)$$

Issléguma strāvas un tās atsevišķo komponentu izmaiņa laikā mašīnai ar slāpētājinumu attēlota 7.51. zīmējumā gadījumam, kad $\psi_0=0$.

Issléguma triecienstrāva un tās darbība. Lielāko iespējamo vērtību $i_{h,max}$, ko sasniedz pēkšņā issléguma strāva, sauc par *issléguma triecienstrāvu*. Analītisku izteiksmi issléguma triecienstrāvas noteikšanai var iegūt, ja izteiksmē (7.191) ievieto $t=T/2=0,01$ s (ja $f=50$ Hz) un $\psi_0=0$. Pieņemot, ka pusperioda laikā enkura strāvas



7.51. zim. Pēkšņā issléguma strāva un tās komponentes sinhronajā ģeneratorā ar slāpētājinumu:

a — stacionārā issléguma strāva, *b* — periodiskās strāvas pārejas komponente, *c* — periodiskās strāvas virspārejas komponente, *d* — kopējā periodiskā strāva, *e* — aperiodiskā strāva, *f* — kopējā issléguma strāva.

periodiskās komponentes nerimst ($T'_d = T''_d = \infty$), no izteiksmes (7.191) iegūstam, ka

$$i_{h,max} = \frac{\sqrt{2}E}{X''_d} (1 + e^{-0,01/T_a}) = \frac{\sqrt{2}E}{X''_d} k_m, \quad (7.192)$$

kur lielumu

$$k_m = 1 + e^{-0,01/T_a} \quad (7.193)$$

sauc par *triecienkoeficientu*.

Tā kā $T_a = 0,03 \dots 0,4$ s (sk. 7.1. tab.), tad no izteiksmes (7.193) izriet, ka $k_m = 1,7 \dots 1,98$. Ja ievēro, ka saskaņā ar Valsts standartu GOCT 183—74 pieļaujama ģenerators darbība ar spriegumu $U = 1,05 U_N$, tad, ievietojot izteiksmē (7.192) $E = 1,05 U_N$ un maksimālo triecienkoeficienta vērtību $k_m = 1,98$, iegūstam, ka

$$i_{h,max} = \sqrt{2} \cdot 1,05 \cdot 1,98 \frac{U_N}{X''_d} \approx 3 \frac{U_N}{X''_d}$$

jeb relatīvajās vienībās

$$i_{h,max*} \approx \frac{3}{X''_{d*}}$$

Tā kā sinhronajās mašīnās $X''_{d*} = 0,12 \dots 0,35$ (sk. 7.1. tab.), tad $i_{h,max*} = 8 \dots 25$.

Isslēguma strāvu termiskā darbība sinhronajam ģeneratoram parasti nav bīstama, jo šīs strāvas ātri norimst. Bez tam mūsdienu elektriskajās sistēmās ir uzstādītas ātrdarbīgas aizsardzības iekārtas, kuras pietiekami ātri atslēdz tīkla posmu, kurā noticis īsslēgums. Daudz bīstamāki ir elektromagnētiskie spēki, kuri darbojas uz tinumu, it sevišķi frontālo savienojumu zonā. Šie spēki cenšas deformēt tinuma frontālos savienojumus un var radīt plaisas un lūzumus izolācijā. Bīstamākās vietas ir tās, kur tinuma vadi iziet no rievās.

Lai novērstu tinumu bojājumus īsslēguma gadījumā, frontālie savienojumi ir rūpīgi jānostiprina. Stiprinājumu mehāniskā izturība jāparedz, ievērojot īsslēguma triecienstrāvas vērtību un to, ka elektromagnētiskie spēki ir proporcionāli šīs strāvas kvadrātam.

7.8.3. Sinhronās mašīnas momenta pēkšņa izmaiņa un rotora svārstības

Sinhronajai mašīnai darbojoties paralēli ar tīklu, strauji var izmainīties tās vārpstai pievadītais mehāniskais moments, piemēram, pēkšņi palielinot ar ģeneratoru saistītā primārā dzinēja momentu vai ar dzinēju saistītā darba mehānisma pretestības momentu. Iespējama arī sinhronās mašīnas pēkšņa elektromagnētiskā momenta izmaiņa, piemēram, strauji samazinoties spriegumam tīklā sakarā ar avāriju, pēkšņi mainoties ierosmes strāvai.

Jebkura momenta izmaiņa ir saistīta ar rotora paātrināšanos vai palēnināšanos un tātad ar tā kinētiskās enerģijas izmaiņu. Sinhronajā mašīnā šajā gadījumā ģoris elektromehāniskie pārejas procesi, jo rotora rotācijas frekvences izmaiņa izraisa arī elektrisko lielumu (strāvas, jaudas) atbilstošu izmaiņu.

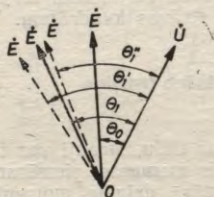
Ļoti bieži elektromehāniskie pārejas procesi ir saistīti ar sinhronās mašīnas rotora svārstībām, kad rotora leņķiskais ātrums Ω svārstās ap vidējo vērtību — sinhrono leņķisko ātrumu

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} \quad (7.194)$$

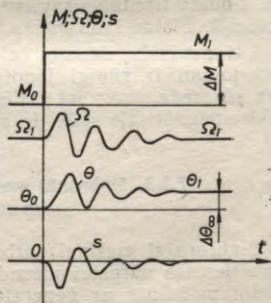
Svārstību procesa fizikālā aina. Sinhronajai mašīnai darbojoties stacionārā režīmā, tās elektromagnētiskais moments ir līdzsvarots ar vārpstai pievadīto mehānisko momentu, un tāpēc rotors griežas ar nemainīgu (sinhrono) rotācijas frekvenci. Jebkuram nemainīgam momentam, kas pievadīts mašīnas vārpstai, atbilst nemainīgs slodzes leņķis Θ , kas raksturo rotora polu ass nobīdi attiecībā pret rotojošā magnētiskā lauka asi jeb sprieguma \dot{U} un EDS \dot{E} vektoru fāzu nobīdi (sk. 7.5.3.).

7.52. zīmējumā ar nepārtrauktām līnijām attēloti divi vektoru \dot{U} un \dot{E} savstarpējie stāvokļi, kas atbilst sinhronā ģeneratora diviem dažādiem stacionāriem režīmiem: ar momentu M_0 (leņķis Θ_0) un ar momentu M_1 (leņķis Θ_1), pie tam $M_1 > M_0$ un $\Theta_1 > \Theta_0$.

Pieņemsim, ka ģeneratoram darbojoties stacionārā režīmā ar leņķi Θ_0 , kas atbilst momentam M_0 , strauji palielina primārā dzinēja momentu līdz vērtībai M_1 . Tad leņķis Θ pakāpeniski pieaug līdz Θ_1 , kas atbilst jaunajai momenta vērtībai M_1 . Bet rotora inerces dēļ leņķis Θ turpina palielināties līdz vērtībai $\Theta'_1 > \Theta_1$ (7.52. zīm.), un tikai pēc tam bremsējošā sinhronizējošā momenta ietekmē atkal



7.52. zīm. Sinhronā ģeneratora sprieguma un EDS vektori svārstību procesā.



7.53. zīm. Rotora leņķiskā ātruma Ω , slodzes leņķa Θ un slīdes s izmaiņas raksturs svārstību procesā.

sāk pakāpeniski samazināties līdz vērtībai Θ_1 . Tomēr inerces spēki neļauj rotoram palikt stāvoklī, kurš atbilst leņķim Θ_1 un kurā ģenerātorā elektromagnētiskais moments līdzsvarots ar primārā dzinēja mehānisko momentu. Tāpēc rotors ieņem stāvokli, kas atbilst leņķim $\Theta''_1 < \Theta_1$. Tālāk primārā dzinēja momenta pārsvara dēļ rotors atkal paātrinās, leņķis Θ palielinās utt. Tādējādi rotors, turpinot griešanos, svārstās ap vidējo leņķisko ātrumu Ω_1 , kas atbilst leņķim Θ_1 . Šādas svārstības, ko izraisa pēkšņa momenta (elektromagnētiskā vai mehāniskā) izmaiņa, sauc par *brīvajām svārstībām*.

Tā kā svārstību procesā mainās rotora leņķiskais ātrums ($\Omega \neq \Omega_1$), tad rotors attiecībā pret enkura magnētisko lauku griežas ar kaut kādu slīdi, un tāpēc svārstību procesā atbilstoši rotora leņķiskā ātruma svārstībām svārstās arī slide s.

7.53. zīmējumā parādītas lielumu Ω , Θ un s rimstošu svārstību liknes, kas atbilst primārā dzinēja momenta izmaiņai par lielumu $\Delta M = M_1 - M_0$.

Slodzes leņķa Θ svārstības, kā tas izriet no sinhronās mašīnas vektoru diagrammām, izraisa arī enkura strāvas I un jaudas P svārstības, ko var novērot, ja sinhronās mašīnas enkura ķēdē ieslēdz ampērmētru un vatmētru.

Atsevišķos gadījumos iespējamas ievērojamas sinhronās mašīnas rotora svārstības, kas nopietni var traucēt mašīnas, kā arī visas elektriskās sistēmas darbību.

Bez brīvajām svārstībām sinhronajā mašīnā var būt arī *uzspiestās svārstības*. Uzspiestās svārstības ģenerātorā izraisa primārā dzinēja (piemēram, dīzeļdzinēja, tvaika lokomobiles) nevienmērīga griešanās, bet dzinējā — darba mehānismi ar periodiski mainīgu pretestības momentu (piemēram, virzulsūkņi). Uzspiestās svārstības kļūst sevišķi bīstamas, ja to frekvence ir tuva brīvo svārstību frekvencei. Šajā gadījumā rodas svārstību rezonanse, kuras rezultātā rotora svārstību amplitūda var nepieļaujami pieaugt.

Rotora kustības vienādojums. Sastādīsim momentu vienādojumu sinhronajai mašīnai, kura darbojas ar mainīgu slodzes leņķi Θ . Analizēsīm vispirms gadījumu, kad leņķa Θ izmaiņas amplitūda ir neliela, jo tad rotora kustības vienādojums ir lineārs diferencialvienādojums ar samērā vienkāršu atrisinājumu, pēc kura var noskaidrot galvenās pārejas procesa īpatnības. Vienkāršības dēļ aplūkosim neizvirzīto polu sinhrono mašīnu un pieņemsim, ka tā darbojas ģenerātorā režīmā, kaut gan visas turpmāk aplūkotās sakarības ir spēkā arī dzinēja režīmam.

Ja ģenerātorā vārpstai pievadīto mehānisko momentu strauji palielina, tad, kā jau minēts, sāk pieaugt rotora ātrums Ω un leņķis Θ . Šāдай izmaiņai pretojas mašīnas *sinhronizējošais moments* M_{sh} , *inerces spēku moments* M_1 un *slāpējošais moments* M_s . Tāpēc vispirms noskaidrosim šo momentu atkarību no leņķa Θ .

Saskaņā ar izteiksmēm (7.78) un (7.83) sinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments

$$M = \frac{P}{\Omega_1} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} \sin \Theta. \quad (7.195)$$

Svārstību procesā leņķis Θ ir mainīgs lielums:

$$\Theta = \Theta_0 + \Delta\Theta, \quad (7.196)$$

kur Θ_0 — slodzes leņķis, kas atbilst līdzsvara stāvoklim, kad elektromagnētiskais moments $M = M_0$ līdzsvarots ar vārpstai pievadīto mehānisko momentu M_m ;

$\Delta\Theta = f(t)$ — laikā mainīgs lielums, kas raksturo rotora novirzi no momentam M_0 atbilstošā līdzsvara stāvokļa.

Ievietojot leņķa Θ vērtību no izteiksmes (7.196) izteiksmē (7.195), iegūstam, ka

$$M = \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} (\sin \Theta_0 \cos \Delta\Theta + \cos \Theta_0 \sin \Delta\Theta). \quad (7.197)$$

Ievērojot, ka nelielām $\Delta\Theta$ vērtībām $\cos \Delta\Theta \approx 1$ un $\sin \Delta\Theta \approx \Delta\Theta$, no izteiksmes (7.197) atrodam sakarību

$$M = \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} \sin \Theta_0 + \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} \cos \Theta_0 \Delta\Theta$$

jeb

$$M = M_0 + M_{sh,m} \Delta\Theta, \quad (7.198)$$

kur

$$M_0 = \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} \sin \Theta_0 \quad (7.199)$$

ir elektromagnētiskais moments, kas noteikts no izteiksmes (7.195), ja $\Theta = \Theta_0$, un

$$M_{sh,m} = \frac{m}{\Omega_1} \frac{EU}{X_d} \cos \Theta_0 \quad (7.200)$$

ir īpatnējais sinhronizējošais moments (sk. 7.5.8.).

Savukārt

$$| \quad M_{sh} = M_{sh,m} \Delta\Theta \quad (7.201)$$

ir sinhronizējošais moments, kas rodas leņķa Θ izmaiņas dēļ un pretojas šādi izmaiņai.

Inerces spēku momentu nosaka šāda izteiksme:

$$M_1 = J \frac{d^2\alpha}{dt^2}, \quad (7.202)$$

kur J — rotējošo daļu inerces moments;

α — rotora kustības leņķiskā koordināta, pie tam

$$\alpha = \Omega_1 t + \frac{\Theta}{p} = \Omega_1 t + \frac{\Theta_0}{p} + \frac{\Delta\Theta}{p}. \quad (7.203)$$

Tā kā α ir leņķis ģeometriskajos grādos, tad izteiksmē (7.203) leņķi Θ_0 un $\Delta\Theta$, kas izteikti elektriskajos grādos, ir dalīti ar polu pāru skaitu p .

Ievietojot no izteiksmes (7.203) α vērtību izteiksmē (7.202) un diferencējot pēc t , iegūstam

$$M_1 = \frac{J}{p} \frac{d^2\Delta\Theta}{dt^2}. \quad (7.204)$$

Slāpējošais moments rodas rotora nevienmērīgas kustības dēļ attiecībā pret enkura magnētisko lauku, un tas atkarīgs no slīdes s , pie tam svārstību procesā slīde nepārtraukti mainās (7.53. zīm.). Tā kā $s \neq 0$, tad ierosmes tinumā un slāpētājtinumā inducējas strāvas. Slāpējošais moments pēc savas fizikālās dabas ir tāds pats kā elektromagnētiskais moments asinhronajās mašīnās, un tas, darbojoties uz sinhronās mašīnas rotoru, pretojas leņķa Θ izmaiņām. Tiešām, ja $\Omega > \Omega_1$ ($s < 0$), slāpējošais moments ir bremzējošs, bet, ja $\Omega < \Omega_1$ ($s > 0$), — dzenošs.

Mazām slīdes s vērtībām slāpējošais moments ir proporcionāls slīdei:

$$M_s = m_s s, \quad (7.205)$$

kur m_s — proporcionalitātes koeficients ar momenta dimensiju, kas atkarīgs no rotora tinumu, galvenokārt slāpētājtinuma parametriem.

Kā zināms (sk. izteiksmi (6.3)),

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega}{\Omega_1}. \quad (7.206)$$

Rotora leņķiskais ātrums

$$\Omega = \frac{d\alpha}{dt} \quad (7.207)$$

jeb, ievērojot izteiksmi (7.203),

$$\Omega = \Omega_1 + \frac{1}{p} \frac{d\Delta\Theta}{dt}. \quad (7.208)$$

Ievietojot izteiksmē (7.206) Ω vērtību no izteiksmes (7.208), iegūstam

$$s = -\frac{1}{p\Omega_1} \frac{d\Delta\Theta}{dt}. \quad (7.209)$$

Tad slāpējošais moments saskaņā ar izteiksmi (7.205)

$$M_s = -\frac{m_s}{p\Omega_1} \frac{d\Delta\Theta}{dt} \quad (7.210)$$

jeb

$$M_s = D \cdot \frac{d\Delta\Theta}{dt}, \quad (7.211)$$

kur D — slāpēšanas koeficients.

Ievērojot teikto, var uzrakstīt šādu sinhronās mašīnas momentu vienādojumu:

$$M_0 + M_{sh} + M_1 + M_s + M_m = \Delta M. \quad (7.212)$$

Tā kā elektromagnētiskais moments M_0 ir līdzsvarots ar primārā dzinēja mehānisko momentu M_m , tad

$$M_{sh} + M_1 + M_s = \Delta M. \quad (7.213)$$

Ievietojot šajā vienādojumā M_{sh} , M_1 un M_s vērtības no izteiksmēm (7.201), (7.204) un (7.211), iegūstam diferenciālvienādojumu, kas ir rotora kustības vienādojums:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\Delta\Theta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\Theta}{dt} + M_{sh,m}\Delta\Theta = \Delta M. \quad (7.214)$$

Brīvās svārstības. Diferenciālvienādojumu (7.214) atrisina, šī vienādojuma partikulāro atrisinājumu summējot ar homogēna (bez labās puses) vienādojuma vispārīgo atrisinājumu.

Homogēnā diferenciālvienādojuma

$$\frac{J}{p} \frac{d^2\Delta\Theta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\Theta}{dt} + M_{sh,m}\Delta\Theta = 0 \quad (7.215)$$

vispārīgā atrisinājuma izteiksme ir šāda:

$$\Delta\Theta = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (7.216)$$

kur C_1 un C_2 — integrēšanas konstantes;

λ_1 un λ_2 — raksturīgā vienādojuma

$$\frac{J}{p} \lambda^2 + D\lambda + M_{sh,m} = 0 \quad (7.217)$$

saknes.

Atrisinot raksturīgo vienādojumu, iegūstam, ka

$$\lambda_{1,2} = -\frac{pD}{2J} \pm \sqrt{\left(\frac{pD}{2J}\right)^2 - \frac{pM_{sh,m}}{J}}. \quad (7.218)$$

Diferenciālvienādojuma (7.214) partikulāro atrisinājumu, kas atbilst stacionāram režīmam, iegūst no šī vienādojuma, ievietojot tajā $d^2\Delta\Theta/dt^2 = 0$ un $d\Delta\Theta/dt = 0$. Tad

$$M_{sh,m}\Delta\Theta_\infty = \Delta M, \quad (7.219)$$

no kurienes leņķa Θ pieauguma galīgā vērtība

$$\Delta\Theta_\infty = \frac{\Delta M}{M_{sh,m}}. \quad (7.220)$$

Ievērojot sakarības (7.216) un (7.220), diferenciālvienādojuma galīgais atrisinājums ir šāds:

$$\Delta\theta = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \Delta\theta_\infty. \quad (7.221)$$

Atkarībā no raksturīgā vienādojumu sakņu vērtībām iespējams divējāds leņķa $\Delta\theta$ izmaiņas raksturs. Ja $(\rho D/2J)^2 < \rho M_{sh,m}/J$, kā tas visbiežāk ir praksē, tad abas saknes ir kompleksas un leņķa $\Delta\theta$ izmaiņa notiek rimstošu svārstību veidā. Šajā gadījumā izteiksmes (7.218) vietā var rakstīt, ka

$$\lambda_{1,2} = \delta_s \pm j\omega_0, \quad (7.222)$$

kur lielums

$$\delta_s = -\frac{\rho D}{2J} \quad (7.223)$$

ir *rimšanas koeficients*, kas apgriezti proporcionāls rimšanas laika konstantei, bet

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\rho M_{sh,m}}{J} - \left(\frac{\rho D}{2J}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{\rho M_{sh,m}}{J}} \quad (7.224)$$

ir *rotora pašsvārstību frekvence*.

Ievietojot λ_1 un λ_2 vērtības no izteiksmes (7.222) izteiksmē (7.221), pēc pārveidojumiem iegūstam, ka

$$\Delta\theta = C e^{-\delta_s t} \cos(\omega_0 t + \varphi) + \Delta\theta_\infty. \quad (7.225)$$

Sajā izteiksmē C un φ ir citas (sk. izteiksmes (7.216) un (7.221)) integrēšanas konstantes, kuru noteikšanai izmanto šādus sākuma nosacījumus: ja $t=0$, tad $\theta=\theta_0$ un $\Delta\theta=0$; ja $t=0$, tad $s=0$ un $d\Delta\theta/dt=0$.

Ievietojot minētos nosacījumus izteiksmē (7.225), var atrast, ka $\varphi=0$ un $C=-\Delta\theta_\infty$. Tad vienādojuma galīgais atrisinājums ir šāds:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_\infty (1 - e^{-\delta_s t} \cos \omega_0 t). \quad (7.226)$$

Tā kā saskaņā ar izteiksmi (7.196) $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$, tad, ievērojot izteiksmi (7.226), slodzes leņķis sinhronās mašīnas svārstību procesā

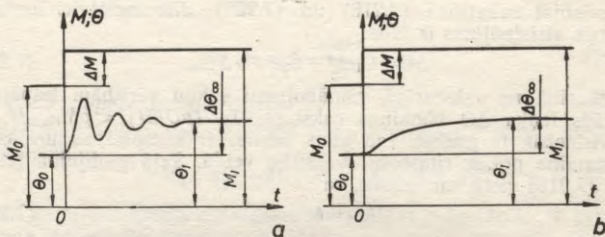
$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta_\infty (1 - e^{-\delta_s t} \cos \omega_0 t). \quad (7.227)$$

Slodzes leņķa θ izmaiņa laikā, kas atbilst izteiksmei (7.227), atēlota 7.54. zīmējumā *a*.

Sinhronās mašīnas svārstību režīmā slodzes leņķa maksimālā vērtība θ_{max} nedrīkst pārsniegt kritisko slodzes leņķi θ_{cr} . Ja šis noteikums nav izpildīts, mašīna var «izkrist» no sinhronisma.

Ja raksturīgā vienādojuma (7.217) saknes ir reālas, tad $\Delta\theta$ izmaiņas raksturs ir aperiódisks. Izmantojot iepriekš minētos sākuma nosacījumus un nosakot integrēšanas konstantes C_1 un C_2 , no izteiksmes (7.221) iegūstam, ka

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\theta_\infty}{\lambda_1 - \lambda_2} (\lambda_2 e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 e^{\lambda_2 t}) + \Delta\theta_\infty. \quad (7.228)$$



7.54. zim. Slodzes leņķa θ periodiska (a) un aperiodiska (b) izmaiņa sinhronajā mašīnā, pēkšņi palielinot vārpstai pievadīto momentu.

Leņķa $\theta = \theta_0 + \Delta\theta$ aperiodiska izmaiņa atbilstoši izteiksmei (7.228) atēlota 7.54. zīmējumā b.

Slodzes leņķa θ aperiodiskas izmaiņas gadījumā mašīnas «izkrišana» no sinhronisma, ja $\theta_1 < \theta_{cr}$, nav iespējama.

Uzspiestās svārstības. Ja uz sinhronās mašīnas rotoru darbojas periodiski mainīgs (pulsējošs) moments, tad mašīnā bez brīvajām svārstībām rodas arī uzspiestās svārstības.

Pieņemsim, ka pulsējošais mehāniskais moments, kas pievadīts sinhronā ģeneratora vārpstai, bez nemainīgās komponentes M_0 satur vēl arī sinusoidāli mainīgu komponenti M_ω :

$$M_m = M_0 + M_\omega = M_0 + M_1 \cos \omega t. \quad (7.229)$$

Tā kā nemainīgā komponente M_0 ir līdzsvarota ar mašīnas elektromagnētisko momentu, kuram atbilst leņķis θ_0 , tad $\Delta\theta$ izmaiņu, ko izraisa momenta mainīgā komponente M_ω , var atrast no šāda diferenciālvienādojuma atrisinājuma:

$$\frac{J}{p} \frac{d^2 \Delta\theta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\theta}{dt} + M_{sh,m} \Delta\theta = M_1 \cos \omega t. \quad (7.230)$$

Diferenciālvienādojumu (7.230) var atrisināt, izmantojot analogiju ar elektrisku ķēdi, kura satur virknē slēgtu rezistoru R , indukcijas spoli L un kondensatoru C un kurai pievienots sinusoidāls maiņspriegums. Procesus R , L , C ķēdē, kā zināms, apraksta šāds diferenciālvienādojums:

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \omega U_m \cos \omega t. \quad (7.231)$$

Salīdzinot vienādojumus (7.230) un (7.231), redzams, ka R , L , C ķēdi var uzskatīt kā sinhronās mašīnas svārstību fizikālu modeli, kurā L atbilst inerces parametram J/p ; R — slāpēšanas koeficientam D ; C — koeficientam $1/M_{sh,m}$; ωU_m — momenta mainīgās komponentes amplitūdai M_1 un i — leņķa θ novirzei $\Delta\theta$.

Kā zināms no teorētiskās elektrotehnikas kursa, vienādojuma (7.231) atrisinājums ir šāds:

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (7.232)$$

kur

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Izmantojot minēto analogiju, var atrast, ka

$$\Delta\theta = \frac{M_1}{\omega \sqrt{D^2 + \left(\frac{\omega J}{p} - \frac{M_{sh,m}}{\omega}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (7.233)$$

kur leņķa $\Delta\theta$ svārstību amplitūda

$$\Delta\theta_m = \frac{M_1}{\omega \sqrt{D^2 + \left(\frac{\omega J}{p} - \frac{M_{sh,m}}{\omega}\right)^2}}. \quad (7.234)$$

Sevišķi bīstami ir tad, ja uzspiesto svārstību frekvence ir vienāda ar pašsvārstību frekvenci. Šajā gadījumā iestājas rezonanse, un rotora svārstību amplitūda var ievērojami pieaugt, it sevišķi, ja slāpēšanas koeficients D ir mazs. Frekvenci, kuras gadījumā iestājas rezonanse (pašsvārstību frekvenci ω_0), var atrast no šāda noteikuma:

$$\frac{\omega_0 J}{p} - \frac{M_{sh,m}}{\omega_0} = 0,$$

no kurienes

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{p M_{sh,m}}{J}}. \quad (7.235)$$

Ievietojot ω_0 vērtību izteiksmē (7.234), iegūstam maksimālo leņķa θ novirzi rezonanses gadījumam:

$$\Delta\theta_{max} = \frac{M_1}{\omega_0 D} = \frac{M_1}{D} \sqrt{\frac{J}{p M_{sh,m}}}. \quad (7.236)$$

No iztīrātajām sakarībām var secināt, ka svārstību (gan brīvo, gan arī uzspiesto) slāpēšanā liela nozīme ir slāpētājtīnūmam, jo tieši no slāpētājtīnūma aktīvās un induktīvās pretestības ir atkarīga slāpēšanas koeficienta D vērtība. Tāpēc slāpētājtīnūmu sinhronajos ģeneratoros izveido ar mazu aktīvo un induktīvo pretestību

(sk. arī 7.7.3.). Lai novērstu rezonansi, sinhronajām mašīnām, kas darbojas ar periodiski mainīgu momentu, jāpalielina vai jāsamazina pašsvārstību frekvence ω_0 . Kā redzams no izteiksmes (7.235), to var panākt, ja samazina vai palielina mašīnas inerces momentu J .

Jēdziens par dinamisko stabilitāti. Ar sinhronās mašīnas dinamisko stabilitāti saprot tās spēju, darbojoties paralēli ar tiklu, saglabāt sinhronismu, ja ārējās iedarbes rezultātā notiek pēkšņa darba režīma izmaiņa (īsslēgums tīklā, strauja slodzes palielināšana u. tml.). Šādos apstākļos leņķa θ ievērojama pieauguma dēļ sinhronās mašīnas darbība var kļūt nestabila un mašīna var «izkrist» no sinhronisma.

Sinhronās mašīnas dinamiskā stabilitāte ir atkarīga no ārējās iedarbes lieluma un ilguma, mašīnas parametriem, kā arī no slodzes pirms pēkšņas režīma izmaiņas. Procesus, kas noris mašīnā, ja leņķa θ izmaiņas ir lielas, apraksta nelineāri diferenciālvienādojumi. Bez tam straujas režīma izmaiņas izraisa arī elektromagnētiskus pārejas procesus mašīnas tinumos (šos procesus, aplūkojot sinhronās mašīnas svārstības, neņemam vērā). Tāpēc jautājums par dinamisko stabilitāti ir ļoti sarežģīts, un to apskata speciālajā literatūrā.

7.9. SPECIĀLAS NOZĪMES SINHRONĀS MAŠĪNAS

7.9.1. Sinhronie mikrodzinēji

Sinhronie mikrodzinēji ir ļoti daudzveidīgi. Seit aplūkosim tikai raksturīgākos un praksē biežāk izmantojamos mikrodzinējus.

Sinhronos mikrodzinējus lieto dažādu mazas jaudas mehānismu piedziņai, kuriem nepieciešama nemainīga rotācijas frekvence (automātikas un telemehānikas iekārtu mehānismi, elektriskie pulksteņi, skaņu ieraksta un atskaņošanas iekārtas, kinoaparātūra u. c.).

Sinhronos mikrodzinējus izveido bez ierosmes tinuma rotorā, tāpēc to konstrukcija ir vienkārša, tie ir droši darbā un viegli apkalpojami.

Dažāda tipa sinhronie mikrodzinēji atšķiras galvenokārt tikai ar rotora konstrukciju. Statora konstruktīvais izveidojums šiem dzinējiem ir tāds pats kā parastajiem sinhronajiem un asinhronajiem dzinējiem. Visvairāk izplatīti vienfāzes mikrodzinēji, kuros rotējošo magnētisko lauku iegūst tāpat kā asinhronajos kondensatoru dzinējos (sk. 6.8.2.). Sinhrono mikrodzinēju palaišanai izmanto asinhrono palaišanas paņēmieni.

Sinhronie dzinēji ar pastāvīgajiem magnētiem. Sinhrono mikrodzinēju ar pastāvīgajiem magnētiem rotors sastāv no gredzenveida ķermeņa, kas salikts no elektrotehniskā tērauda skārda un kurā iepresēts pastāvīgo magnētu bloks. Gredzenveida ķermenī ievietots īsslēgts tinums — «vāveres rats», kurš nodrošina dzinēja asin-

hronās palaišanas iespēju. Sinhronos mikrodzinējus ar pastāvīgiem magnētiem izgatavo ar jaudu līdz 30...40 W.

Sinhronie reaktīvie mikrodzinēji. Izvirzīto polu sinhrono mašīnu, kurai nav ierosmes tinuma, sauc par reaktīvo sinhrono mašīnu. Šādas mašīnas darbības īpatnības jau tika noskaidrotas iepriekš (sk. 7.5.6.).

Sinhronā reaktīvā dzinēja elektromagnētiskais moments

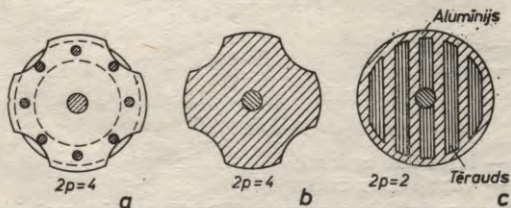
$$M = \frac{m}{\Omega_i} \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta. \quad (7.237)$$

No izteiksmes redzams, ka reaktīvā dzinēja moments ir jo lielāks, jo lielāka atšķirība starp induktīvo pretestību X_d un X_q vērtībām, kuras savukārt atkarīgas no magnētiskajām pretestībām rotora garenass (d) un šķērsass (q) virzienā. Tāpēc, lai palielinātu momentu, reaktīvajos mikrodzinējos izveido speciālas konstrukcijas rotorus, kuri parādīti 7.55. zīmējumā.

Visbiežāk lieto rotorus, kuri konstruktīvi atšķiras no asinhrono dzinēju parastā išslēgtā rotora tikai ar cilindriskajā virsmā aksiālā virzienā izveidotiem iedobumiem, starp kuriem veidojas rotora izciļņi (7.55. zīm. a), kā arī masīvus feromagnētiskā materiāla rotorus (7.55. zīm. b). Lieto arī cilindriskas formas slāņainus rotorus (7.55. zīm. c), kuri sastāv no alumīnija cilindra un elektrotehniskā tērauda skārda paketēm, kas ievietotas cilindrā izgatavošanas laikā. Tāda rotora magnētiskā pretestība garenass virzienā daudzkārt mazāka nekā šķērsass virzienā.

Sinhrono reaktīvo mikrodzinēju rotoros, kuri salikti no elektrotehniskā tērauda skārdiem, ievietots išslēgts palaišanas tinums — «vāveres rats» (7.55. zīm. a). Dzinējos ar masīvu rotoru palaišanas tinumu aizvieto pats masīvais feromagnētiskais rotors, kurā rotējošais magnētiskais lauks inducē virpuļstrāvas. Mikrodzinējos ar slāņainu rotoru (7.55. zīm. c) palaišanas tinuma uzdevumu veic rotora alumīnija cilindrs.

Sinhronajiem reaktīvajiem mikrodzinējiem ir zems $\cos\phi$ un tāpēc arī zems lietderības koeficients, to izmēri 2...3 reizes lielāki



7.55. zīm. Sinhrono reaktīvo mikrodzinēju rotorī:

a — no elektrotehniskā tērauda skārdiem ar išslēgtu palaišanas tinumu, b — masīvs feromagnētisks, c — slāņains.

nekā tādas pašas jaudas asinhronajiem dzinējiem. Sinhronos reaktīvos mikrodzinējus izgatavo ar jaudu līdz 50...100 W.

Sinhronie histerēzes dzinēji. Sinhronā histerēzes dzinēja rotors ir cilindrisks ķermenis ar gludu virsmu, kurš izgatavots no magnētiski cieta tērauda un var būt masīvs vai salikts no savstarpeji izolētiem skārdiem.

Sinhronā histerēzes dzinēja darbības princips paskaidrots 7.56. zīmējumā, kurā uzskatāmības dēļ statora divpolu rotējošais magnētiskais lauks aizstāts ar rotējošiem poliem N_1 un S_1 .

Statora tinumu pieslēdzot tiklam, tā radītais rotējošais magnētiskais lauks magnetizē rotoru. Pieņemsim, ka ieslēgšanas momentā, kad rotors ir nekustīgs, statora magnētiskā lauka ass ir vertikāla. Tad magnetizētā rotora poli N_2 un S_2 atrodas pret poliem N_1 un S_1 (7.56. zīm. a). Sajā stāvoklī starp rotora un statora poli darbojas tikai radiāli pievilksanas spēki F_r , kuri nevar radīt griezes momentu.

Statora magnētiskā lauka poli pagriežoties jaunā stāvoklī, (7.56. zīm. b), rotora polu ass tomēr paliek iepriekšējā stāvoklī, jo rotoram, kas izgatavots no magnētiski cieta materiāla, ir liels koercitīvais spēks. Starp rotora un statora poli izveidojas leņķis θ_h , ko sauc par histerēzes leņķi. Reizē ar to rodas pretēja nosaukuma polu pievilksanas spēku tangenciālā komponente F_t , kura darbojas uz rotoru lauka griešanās virzienā. Tādējādi rotora materiāla histerēzes dēļ uz rotoru darbojas griezes moments, ko sauc par *histerēzes momentu*.

Ja, dzinēju slogojot, bremsējošais moments uz vārpstas pārsniedz histerēzes momentu, rotors sāk griezties asinhroni. Sajā gadījumā histerēzes dzinējos ar masīvu rotoru rotējošā magnētiskā lauka un rotorā inducēto virpuļstrāvu mijiedarbības rezultātā rodas asinhronais jeb *virpuļstrāvu moments*.

Noskaidrosim histerēzes (M_h) un virpuļstrāvu (M_v) momentu atkarību no slides.

Elektromagnētiskā jauda, ko stators ar magnētiskā lauka starpniecību atdod rotoram (sk. 6.2.6.),

$$P_{em} = \frac{\Delta P_2}{s}, \quad (7.238)$$

kur ΔP_2 — zudumi rotorā;
 s — slide.

Histerēzes dzinēja rotorā

$$\Delta P_2 = \Delta P_h + \Delta P_v, \quad (7.239)$$

kur ΔP_h — histerēzes zudumi;
 ΔP_v — virpuļstrāvu zudumi.

Histerēzes zudumi ir proporcionāli rotora frekvencei f_2 , bet virpuļstrāvu zudumi proporcionāli f_2^2 . Tā kā rotora frekvence $f_2 = f_1 s$, tad

$$\Delta P_h = \Delta P'_h s; \quad \Delta P_v = \Delta P'_v s^2, \quad (7.240)$$

kur $\Delta P'_h$ un $\Delta P'_v$ — histerēzes un virpuļstrāvu zudumi rotorā, ja $s=1$ (rotors nekustīgs).

Ievērojot, ka $M = P_{em}/\Omega_1$, kur Ω_1 — rotējošā magnētiskā lauka leņķiskais ātrums, no izteiksmēm (7.238), ..., (7.240) iegūstam sakarību

$$M = \frac{\Delta P_h + \Delta P_v}{s\Omega_1} = \frac{\Delta P'_h}{\Omega_1} + \frac{\Delta P'_v}{\Omega_1} s = M_h + M_v. \quad (7.241)$$

Histerēzes dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes parādīta 7.57. zīmējumā.

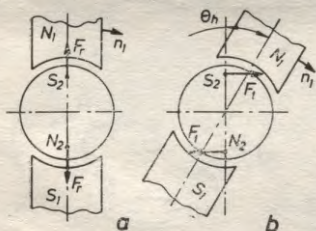
Histerēzes dzinējos, kuru rotors ir salikts no tērauda skārdiem, darbojas tikai histerēzes moments ($M = M_h$), bet virpuļstrāvu moments $M_v = 0$. Šie dzinēji strādā tikai sinhronajā režīmā, bet dzinēji ar masīvo rotoru atkarībā no bremzējošā momenta lieluma var strādāt gan sinhronajā, gan arī asinhronajā režīmā. Tomēr histerēzes dzinējus ar masīvo rotoru izmanto tikai sinhronajā režīmā, jo to darbība asinhronajā režīmā ir neekonomiska lielo magnētisko zudumu dēļ rotorā.

Histerēzes dzinējiem salīdzinājumā ar reaktīvajiem dzinējiem ir nedaudz labāki tehniski ekonomiskie rādītāji. Tos izgatavo ar jaudu līdz 300 ... 400 W.

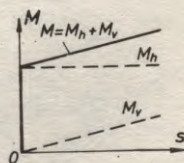
Sinhronie reduktordzinēji. Sinhronie reduktordzinēji ir speciālas konstrukcijas sinhronie reaktīvie dzinēji, kurus lieto mazas jaudas mehānismu piedziņai ar mazu rotācijas frekvenci. Izmantojot šādus dzinējus, var izveidot piedziņu bez mehāniska reduktora.

Reduktordzinēja rotors pēc konstrukcijas atgādina zobratu (7.58. zīm.) un var būt masīvs vai salikts no tērauda skārdiem. Zobu skaits statorā (Z_1) un rotorā (Z_2) ir dažāds. Parasti $Z_2 - Z_1 = 2p$.

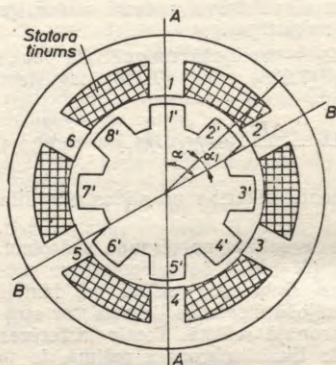
Sinhronā reduktordzinēja darbības princips paskaidrots 7.58. zīmējumā, kur $Z_1 = 6$, $Z_2 = 8$, $2p = 2$.



7.56. zīm. Histerēzes dzinēja darbības principa izskaidrojums:
a — $\theta_h = 0$, b — $\theta_h \neq 0$.



7.57. zīm. Histerēzes dzinēja griezes momenta atkarība no slīdes.



7.58. zim. Sinhronais reduktordzinējs.

Statora tinumu pieslēdzot tīklam, rodas rotējošs magnētiskais lauks. Rotors attiecībā pret šo lauku tiecas nostāties tā, lai magnētiskā pretestība plūsmai būtu vismazākā.

Pieņemsim, ka noteiktā laika momentā statora lauka ass sakrīt ar līniju A—A. Tad rotors ieņem stāvokli, kurā zobi 1' un 1 (tāpat arī zobi 5' un 4) atrodas viens otram pretī. Statora lauka asij pagriežoties par leņķi α (līnija B—B), rotors pagriežas par leņķi α_1 , tā, ka zobi 2' un 2 (arī zobi 6' un 5) atrodas viens pret otru. 7.58. zīmējumā attēlots gadījums, kad $\alpha = 360/6 = 60^\circ$, $\alpha_1 = 360/6 - 360/8 = 15^\circ$, no kurienes var secināt,

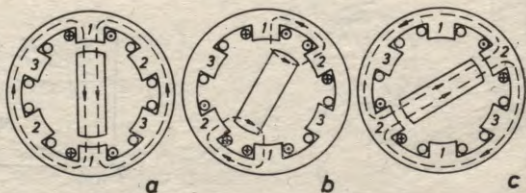
ka rotora rotācijas frekvence ir četras reizes mazāka par statora rotējošā lauka rotācijas frekvenci.

Vispārīgā gadījumā sinhronā reduktordzinēja rotora rotācijas frekvence

$$n = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2} \frac{60f_1}{p} \quad (7.242)$$

Soļu dzinēji. Soļu dzinēji paredzēti elektrisku impulsu pārveidošanai diskrētā mehāniskā kustībā — soļos, un tos lieto elektriskās piedziņas programmētai vadībai.

7.59. zīmējumā attēlots vienkāršots soļu dzinējs ar trīs polu pāriem statorā un izvirzīto polu konstrukcijas rotoru bez ierosmes tinuma. Var būt arī soļu dzinēji, kuru rotors izveidots ar pastāvīgiem magnētiem vai ar elektromagnētisku ierosmi.



7.59. zim. Soļu dzinēja darbības principa izskaidrojums:

a — rotora stāvoklis, ja strāva plūst spolē 1, b — rotora stāvoklis, ja strāva plūst spolēs 1 un 2, c — rotora stāvoklis, ja strāva plūst spolē 2.

Ja polu 1—1 tinumus pieslēdz līdzspriegumam, tad rotors nostājas šo polu ass virzienā (7.59. zīm. a). Pieslēdzot spriegumu arī polu 2—2 tinumiem, rotors pagriežas par 30° un ieņem stāvokli, kurš parādīts 7.59. zīmējumā b. Ja pēc tam atslēdz polu 1—1 tinumus, rotors vēl pagriežas par 30° un nostājas polu 2—2 ass virzienā utt.

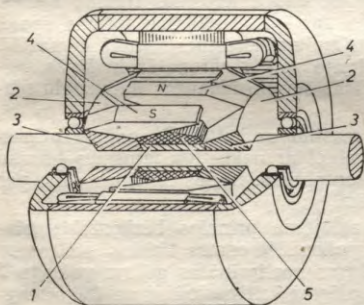
Statora tinuma barošanai izmanto elektronu vai pusvadītāju komutatoru, kurš pēc uzdotas programmas noteiktā secībā pieslēdz spriegumam statora tinuma spoles.

Svarīgs parametrs, kas raksturo soļu dzinēju darbību, ir reaģēšanas spēja. To raksturo ar maksimālo vadības impulsu frekvenci, kuras gadījumā rotors vēl spēj sekot vadības impulsu izmaiņām.

7.9.2. Sinhronās mašīnas ar ķētnveida poliem

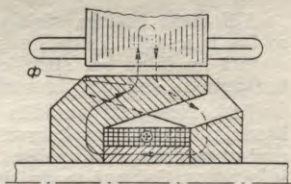
Sinhronās mašīnas ar ķētnveida poliem izveidojuma princips parādīts 7.60. zīmējumā. Tās rotora magnētiskā sistēma sastāv no cilindriska ieliktni 1, kurš nekustīgi nostiprināts uz vārpstas, un divām dažādas polaritātes polu sistēmām 2. Katra polu sistēma sastāv no gredzenveida jūga 3, kas liets kopā ar ķētnveida polu izciļņiem 4. Polu sistēmas nostiprinātas abpus ieliktnim 1 tā, lai vienas polu sistēmas izciļņi novietotos starp otras polu sistēmas izciļņiem. Ķētnveida rotora ierosmes tinums 5 novietots starp abām polu sistēmām, un tā vijumi aptver ieliktni 1. Ierosmes tinumam, tāpat kā parastās konstrukcijas sinhronajās mašīnās, līdzstrāvu pievada ar kontaktgredzenu starpniecību (7.60. zīmējumā kontaktgredzeni nav parādīti). Ierosmes tinuma vietā var būt arī pastāvīgie magnēti.

Ierosmes strāva rada magnētisko plūsmu Φ , kura virzīta aksiāli no ieliktni viena gala uz otru (7.61. zīm.). Tālāk caur polu sistēmas

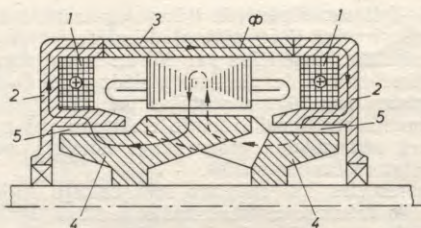


7.60. zīm. Sinhronās mašīnas ar ķētnveida poliem izveidojuma princips:

1 — ieliktnis, 2 — polu sistēmas, 3 — polu sistēmu jūgi, 4 — polu izciļņi, 5 — ierosmes tinums.



7.61. zīm. Magnētiskās plūsmas sadalījums sinhronajā mašīnā ar ķētnveida poliem.



7.62. zīm. Bezkontakta sinhronās mašīnas ar četnveida poliēm izveidojuma princips:

1 — ierosmes tinuma spoles, 2 — gultņu vairogi, 3 — korpuss, 4 — polu sistēmu jūgi, 5 — papildu gaisa sprauga.

jūgiem magnētiskā plūsma sadalās pa polu izciļņiem un, šķērsojot gaisa spraugu, nokļūst statorā. Magnētiskās plūsmas virziens katrā no polu sistēmām ir dažāds: vienā polu sistēmā plūsma virzīta no ieliktna caur jūgu un poliēm uz statoru, bet otrā polu sistēmā — no statora uz poliēm un tālāk caur jūgu uz ieliktni. Tādējādi gar statora aploci vienas polaritātes poli mijas ar pretējas polaritātes poliēm. Tas nozīmē, ka magnētiskā lauka sadalījums gaisa spraugā un statorā pēc sava rakstura ir tāds pats kā parastā tipa sinhronajās mašīnās.

Ķetnveida rotora priekšrocība salīdzinājumā ar parastās konstrukcijas izvirsīto polu rotoru ir tā vienkāršā konstrukcija un izgatavošana, jo katru polu sistēmu var izveidot kā viengabala lējumu. Izmantojot ķetnveida rotoru, nav vajadzīgs atsevišķi izgatavot un nostiprināt tajā $2p$ polus un tikpat daudz ierosmes tinuma spoles. Ierosmes tinumam ir tikai viena samērā vienkāršas formas spole, tāpēc vara patēriņš, kā arī jaudas zudumi ierosmes tinumā ir mazāki nekā parastās konstrukcijas izvirsīto polu sinhronajās mašīnās. Minētās ķetnveida rotora priekšrocības sevišķi izpaužas daudzpolu mašīnās.

Vēl viena būtiska sinhrono mašīnu ar ķetnveida poliēm priekšrocība ir iespēja šīs mašīnas izveidot ar nekustīgu ierosmes tinumu statorā un tātad bez slidošiem kontaktiem. Šādas mašīnas sauc par bezkontakta sinhronajām mašīnām.

7.62. zīmējumā parādīts izveidojuma princips bezkontakta sinhronajai mašīnai ar ķetnveida poliēm. Ierosmes tinums sastāv no divām gredzenveida spolēm 1, kuras nostiprinātas gultņu vairogu 2 iedobumos. Galvenā magnētiskā plūsma šeit noslēdzas pa ārējo magnētisko ķēdi, t. i. caur korpusu 3 un gultņu vairogiem 2, kuri no rotora jūgiem 4 atdalīti ar papildu gaisa spraugu 5. Bezkontakta sinhronajās mašīnās ķetnveida rotora priekšrocības (mazāks vara patēriņš un mazāki jaudas zudumi ierosmes tinumā) nav tik izteiktas, jo šajās mašīnās sakarā ar palielinātu magnētiskās ķēdes garumu

un divām papildu gaisa spraugām nepieciešams lielāks ierosmes tinuma MS. Bez tam bezkontakta mašīnās korpusi un gultņu vairogi vienmēr jāizgatavo no magnētiska materiāla.

Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliem lietderīgi izgatavot ar nelielu jaudu (līdz dažiem desmitiem kilovatu). Palielinoties jaudai, šo mašīnu tehniski ekonomiskie rādītāji strauji pasliktinās.

Sinhronos ģeneratorus ar ķetnveida poliem samērā plaši lieto automobiļu, traktoru un citu transporta līdzekļu elektroapgādes sistēmās. Bezkontakta sinhronie dzinēji ar ķetnveida poliem atsevišķos gadījumos sekmīgi var aizstāt isslēgtos asinhronos dzinējus, jo bezkontakta sinhronajiem dzinējiem ir samērā vienkārša konstrukcija, tie droši darbā un viegli apkalpojami, turklāt sinhronie dzinēji var uzlabot tīkla jaudas koeficientu. Bezkontakta sinhronajiem dzinējiem ar ķetnveida poliem izmanto asinhrono palaišanu, pie tam palaišanas tinuma uzdevumu šeit veic rotora masīvie ķetnveida poli.

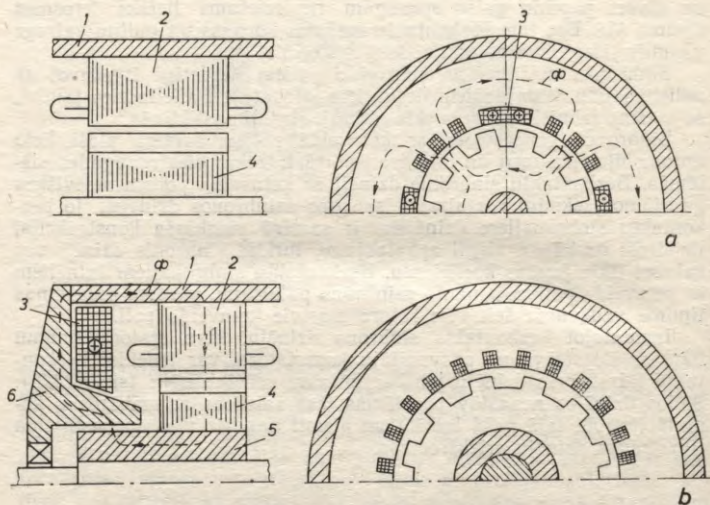
Izmantojot bezkontakta sinhrono dzinēju, kura statora tinumu baro ar līdzstrāvu no pusvadītāju komutatora, var izveidot bezkontakta līdzstrāvas dzinēju jeb bezkontakta ventiļdzinēju (sk. 3.13.3.). Šādos dzinējos nepastāv problēmas, kas saistītas ar mehānisku komutāciju, bet tajā pašā laikā tiem piemīt gandrīz visas parastā tipa līdzstrāvas dzinēju priekšrocības.

7.9.3. Induktorģeneratori

Dažādu rūpniecisko iekārtu (indukcijas krāšņu, metināšanas iekārtu u. c.), kā arī autonomu elektrisko sistēmu (lidmašīnu, kuģu u. c.) barošanai nepieciešama paaugstinātas frekvences (400... 30 000 Hz) maiņstrāva. Šajos gadījumos nevar izmantot parastās konstrukcijas sinhronos ģeneratorus, kuru frekvence $f_1 = pn/60$, jo rotācijas frekvences n palielināšanu ierobežo rotējošo daļu mehāniskā izturība, bet polu skaita $2p$ palielināšanu — minimālie izmēri, kas nepieciešami ierosmes tinuma novietošanai rotorā. Tāpēc izveido speciālas konstrukcijas sinhronos ģeneratorus, kurus sauc par induktorģeneratoriem.

Visu tipu induktorģeneratoru rotorus izveido zobratu veidā bez tinumiem, bet ierosmes tinumu atšķirībā no parastās konstrukcijas sinhronajiem ģeneratoriem novieto statorā. Dažos gadījumos ierosmes tinumu aizstāj pastāvīgie magnēti.

Atkarībā no ierosmes tinuma spoļu novietojuma statorā izšķir radiālas un aksiālas ierosmes induktorģeneratorus. Radiālas ierosmes ģeneratoros (7.63. zīm. a) ierosmes tinums novietots statora lielākajās rievās, bet enkura tinums — mazākajās rievās. Magnētiskajam spēka līnijām uz ierosmes tinuma poles ass ir radiāls virziens, un magnētiskā plūsma noslēdzas caur gaisa spraugu, rotora un statora zobu slāni un jūgiem. Aksiālas ierosmes ģeneratoros (7.63. zīm. b) ierosmes tinums novietots gultņu vairogu iedobumos un rada magnētisko lauku, kura spēka līnijām uz ierosmes tinuma ass ir aksiāls virziens. Aksiālas ierosmes induktorģeneratoru īpatnība ir tā, ka



7.63. zīm. Radiālas (a) un aksiālas (b) ierosmes induktorgeneratoru uzbūve: 1 — korpuss, 2 — stators, 3 — ierosmes tinums, 4 — rotors, 5 — magnētiska materiāla ieliktņš, 6 — gultņa vairogs.

jebkurā punktā gar enkura iekšējo aploci magnētiskā lauka spēka līnijas vērstas vienā virzienā — no statora uz rotoru vai otrādi.

Magnētiskās indukcijas sadalījums induktorgeneratora gaisa spraugā gar enkura aploci attēlots 7.64. zīmējumā. Pret rotora zobiem magnētiskajai indukcijai ir maksimālā, bet pret rievām — minimālā vērtība. Var uzskatīt, ka magnētiskā indukcija sastāv no divām komponentēm — nemainīgās

$$B_0 = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{2} \quad (7.243)$$

un periodiskās B_ω ar amplitūdu

$$B_{\omega, m} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{2}. \quad (7.244)$$

Enkura tinumā inducētais EDS ir atkarīgs tikai no magnētiskās indukcijas periodiskās komponentes B_ω , kura pārvietojas telpā kopā ar rotoru, jo indukcijas nemainīgā komponente B_0 rada ar statora tinumu laikā un telpā nemainīgu plūsmas saķēdējumu. Magnētiskās indukcijas nemainīgā komponente papildus noslogo magnētisko sistēmu, tāpēc magnētiskās ķēdes atsevišķo posmu šķērsriezumi jāiz-

vēlas pēc maksimālās indukcijas $B_{max} = B_{\omega} + B_0$ vērtības. Tas savukārt palielina mašīnas izmērus un masu.

Enkura tinumā inducētā EDS frekvence (Hz)

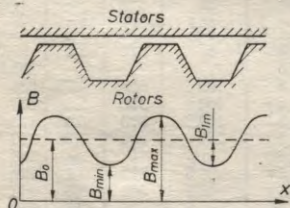
$$f_1 = \frac{Z_2 n}{60}, \quad (7.245)$$

kur Z_2 — rotora zobu skaits;

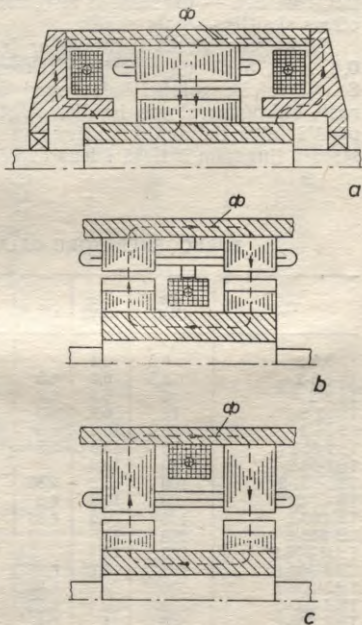
n — rotora rotācijas frekvence (min^{-1}).

Paaugstinātas frekvences dēļ induktorgenerators enkura tinumam ir relatīvi liela induktīvā pretestība, kas izraisa ievērojamu sprieguma izmaiņu, generatoru slogojot. Tāpēc, lai uzlabotu ģenerātoru raksturlīknes, dažreiz virknē ar enkura tinumu slēdz kondensatorus.

Induktorgenerators konstruktīvais izveidojums var būt ļoti daudzveidīgs. No aksiālās ierosmes mašīnām visizplatītākās ir 7.65. zīmējumā attēloto konstrukciju mašīnas. Dubultotus vienpaketes ģenerātorus (7.65. zīm. *a*) lieto pasažieru vagonu elektroapgādes sistēmās, divpakēšu ģenerātorus (7.65. zīm. *b* un *c*) — jauna tipa bezkontakta līdzstrāvas metināšanas agregātos, kurus sāk ieviest sērijveida ražošanā. Šādiem agregātiem, kas sastāv no induktorgenerators un taisngriežu bloka, ir vairākas būtiskas priekšrocības salīdzinājumā ar iepriekš (sk. 2.13.1.) aplūkoto ģenerātoriem (augstāks lietderības koeficients, lielāks darbības drošums un vienkāršāka apkalpošana).



7.64. zīm. Magnētiskās indukcijas sadalījums induktorgenerators gaisa spraugā.



7.65. zīm. Aksiālās ierosmes induktorgenerators paveidi:

a — dubultots vienpaketes ģenerators, *b* un *c* — divpakēšu ģeneratori.

7.10. PADOMJU SAVIENĪBĀ RAŽOTO SINHRONO MAŠĪNU PAMATTIPI

Padomju Savienībā ražotās sinhronās mašīnas var iedalīt šādās grupās: 1) turbogeneratori; 2) hidroģeneratori; 3) vispārīga lietojuma sinhronie ģeneratori un dzinēji; 4) sinhronie kompensatori; 5) speciālas nozīmes sinhronās mašīnas.

Turbogeneratorus izgatavo ar jaudu 0,5...1200 MW, spriegumu 0,4...24 kV un rotācijas frekvenci 3000 min⁻¹. Ģeneratorus ar jaudu līdz 30 MW izveido ar slēgtu netiešo gaisa dzesēšanu, bet ar jaudu 30...150 MW — ar slēgtu netiešo ūdenraža dzesēšanu. Ģeneratoriem, kuru jauda pārsniedz 150 MW, lieto viena vai abu tinumu tiešo dzesēšanu ar ūdenradi, ūdeni vai eļļu.

Padomju Savienībā ražoto raksturīgāko turbogeneratoru galvenie tehniskie dati doti 7.2. tabulā. Turbogeneratora tipa apzīmējumā burtiem un skaitļiem ir šāda nozīme: T — turbogenerators; 2, B2, B, BB, BΦ, BM — dzesēšanas sistēma; pirmais skaitlis — jauda (MW), otrais skaitlis — polu skaits.

Hidroģeneratorus izgatavo ar jaudu 0,25...640 MW, spriegumu 0,4...15,75 kV un rotācijas frekvenci 50...750 min⁻¹ ($2p=120...8$). Visvairāk izplatīti hidroģeneratori ar vertikālu rotācijas asi. Parasti hidroģeneratoros izveido slēgtu gaisa dzesēšanas sistēmu, bet pēdējā laikā lieljaudas mašīnās — jauktu dzesēšanas sistēmu, kurā statora tinumam ir tiešā ūdens dzesēšana, bet rotora tinumam netieša

7.2. tabula

TURBOĢENERATORU GALVENIE TEHNISKIE DATI

Tips	P_N (MW)	U_N (kV)	$\cos \varphi$	η (%)	D (cm)	l (cm)	δ (cm)	Masa (t)
T2-0,5-2	0,5	0,4		92,0				7,0
T2-1,5-2	1,5	6,3	0,8	95,1	50	100	1,4	10,4
T2-6-2	6	6,3	0,8	96,4	70	135	1,8	29,0
T2-12-2	12	6,3	0,8	97,2	77	190	2,1	39,0
T2-25-2	25	10,5	0,8	97,6	87	270	2,8	69,6
TB2-30-2	30	10,5	0,8	98,3	87	270	2,8	91,0
TB2-60-2	60	10,5		98,5				153,5
TB2-100-2	100	13,8	0,85	98,8	109,5	525	4,75	256
TB-60-2	60	10,5	0,8	98,5	103	280	5,0	130
TB-100-2	100	10,5	0,85	98,3	112,8	310	6,4	175
TB-200-2	200	11	0,85	98,5	122	545	7,25	340
TBM-300-2	300	20		98,8				393
TBB-200-2	200	15,75	0,85	98,5	123,5	430	8,0	220
TBB-300-2	300	20	0,85	98,6	126,5	600	9,5	350
TBB-500-2	500	20	0,85	98,75	131,5	635	9,5	389
TBB-800-2	800	24	0,9	98,75	140,0	720	10,0	577
TBB-1200-2	1200	24	0,9	98,86	155,0	800	15,0	610

Piezīme. Tabulā izmantoti šādi apzīmējumi: U_N — nominālais līnijas spriegums; D — enkura iekšējais diametrs; l — enkura aktīvais garums; δ — gaisa sprauga.

DAZU HIDROĢENERATORU GALVENIE TEHNISKIE DATI

Tips	S_N (MV · A)	U_N (kV)	$\cos \varphi$	η (%)	n (min ⁻¹)	D (cm)	l (cm)	Masa (t)
BFC 375/89-28	9,4	6,3		96,4	214			120
CB 375/195-12	65,5	10,5		97,4	500			283
CB 640/170-24	78,8	13,8		97,6	250			498
CB 800/76-60	18,0	10,5		95,7	100			350
CB 1160/180-72	103,5	13,8	0,8	97,5	83,3	1100	180	985
CB 1190/250-48	264,7	15,75	0,85	98,2	125	1100	250	1300
CB 1690/175-64	590	15,75	0,85	98,2	93,75	1610	175	1650
CB 1250/275-42	711	15,75	0,9	98,3	142,7	1185	275	1790

DAZU ECC, CGD, CGH SERIJAS SINHRONO ĢENERATORU
GALVENIE TEHNISKIE DATI

P_N (kW)	n (min ⁻¹)	U_N (kV)	η (%)	Masa (t)
5	1500	0,4	79	0,125
12	1500	0,4	86	0,215
30	1500	0,4	88	0,42
75	1500	0,4	91	0,725
125	500	0,4	90	2,35
400	500	6,3	92,4	4,95
1250	1000	6,3	95,5	7,45
3200	600	6,3	96,4	19,5

DAZU CD UN CDH SERIJAS SINHRONO DZINEJU
GALVENIE TEHNISKIE DATI

P_N (kW)	U_N (kV)	n (min ⁻¹)	η (%)	Masa (t)
75	0,38	750	96	1,07
125	0,38	500	90	2,35
400	6	500	92,6	4,95
1 250	6	1000	95,8	7,45
6 300	6	1000	97,1	23,1
10 000	6	600	97,2	47,0

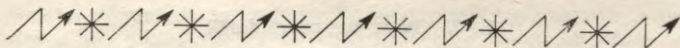
Piezīme. Dzinēji paredzēti darbībai ar pārierosmi ($\cos \varphi_N = 0,9$).

gaisa dzesēšana. Nelielas jaudas (līdz 3 MW) hidroģeneratorus Padomju Savienībā ražo sērijveidā, bet lielākas jaudas — pēc individuāliem pasūtījumiem atkarībā no hidroelektrostacijas tipa un īpatnībām. 7.3. tabulā doti dažu Padomju Savienībā ražoto hidroģeneratoru galvenie tehniskie dati. Tipa apzīmējumā burtiem un skaitļiem ir šāda nozīme: ВГС, СВ, СФ — konstruktīvās īpatnības (novietojums, stiprinājuma veids) un dzesēšanas sistēma; skaitlis pirms slīpās svītras — statora serdes ārējais diametrs (cm); skaitlis aiz slīpās svītras — statora serdes garums (cm); skaitlis aiz defises — polu skaits.

Vispārīga lietojuma sinhronos ģeneratorus, kas paredzēti sajūgšanai ar iekšdedzes un citiem dzinējiem, ražo sērijveidā ar jaudu 5...3200 kW, spriegumu 0,4...6,3 kV, rotācijas frekvenci 600...1500 min⁻¹ un $\cos \varphi = 0,8$. Izplatītākie ir ECC, СГД un СГН sērijas ģeneratori, kuru daži tehniskie dati doti 7.4. tabulā.

Vispārīga lietojuma sinhrono dzinēju nomenklatūra ir ļoti plaša. Tos izgatavo ar jaudu 40...50 000 kW, spriegumu 0,38...10 kV un rotācijas frekvenci 100...1000 min⁻¹. Visizplatītākie ir СД un СДН sērijas dzinēji, kuru galvenie tehniskie dati doti 7.5. tabulā.

Sinhronos kompensatorus ražo (sērijas КС un КСВ) ar jaudu 10...160 MV·A, spriegumu 6,6...15,75 kV, rotācijas frekvenci 750 un 1000 min⁻¹.



8. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI UN MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

8.1. ELEKTROMAŠĪNU PĀRVEIDOTĀJI

8.1.1. Dzinējs-ģenerators

Dažādu elektriskās enerģijas parametru (frekvences, sprieguma, strāvas veida u. c.) pārveidošanai līdztekus jonu, elektronu, pusvadītāju pārveidotājiem un transformatoriem lieto arī rotējošas elektriskās mašīnas.

Vienkāršākais elektromašīnu pārveidotājs ir dzinējs-ģenerators, t. i., agregāts, kurā mehāniski savienoti dzinējs un ģenerators, bet elektriski tie nav saistīti. Atsevišķos gadījumos abas mašīnas var būt ievietotas vienā korpusā un to rotorī nostiprināti uz vienas vārpstas.

Dzinēju-ģeneratoru visbiežāk lieto maiņstrāvas pārveidošanai līdzstrāvā. Šādā pārveidotājā par dzinēju parasti izmanto asinhrono dzinēju, retāk sinhrono dzinēju. Ja nepieciešams nemainīgs līdzspriegums, lieto līdzstrāvas ģeneratoru ar paralēlu vai jauktu ierosmi, bet, ja līdzspriegums jāregulē plašās robežās, — ģeneratoru ar neatkarīgu ierosmi.

Elektromašīnu pārveidotāju, kurā par dzinēju izmantots asinhronais vai sinhronais dzinējs, bet par ģeneratoru sinhronais ģenerators, lieto frekvences pārveidošanai. To var izmantot arī sprieguma paaugstināšanai vai pazemināšanai, tomēr šādam nolūkam vienkāršāks un ekonomiskāks ir parastais transformators.

Pārveidotāju, kas izveidots no līdzstrāvas dzinēja un sinhronā ģenerators, var izmantot līdzstrāvas pārveidošanai maiņstrāvā, kā arī par maiņstrāvas barošanas avotu ar nepārtraukti regulējamu frekvenci. Šāda pārveidotāja frekvenci maina, regulējot līdzstrāvas dzinēja rotācijas frekvenci.

Līdzsprieguma paaugstināšanai vai pazemināšanai var izmantot agregātu, kas sastāv no divām līdzstrāvas mašīnām (dzinēja un ģenerators) ar dažādiem enkura spriegumiem.

Dzinēja-ģenerators priekšrocība salīdzinājumā ar citiem elektromašīnu pārveidotājiem ir iespēja izmantot sērijveidā ražotās mašīnas. Kā trūkums jāmin šādu pārveidotāju samērā lielie izmēri, kā arī samērā zemais lietderības koeficients, kas vienāds ar dzinēja un ģenerators lietderības koeficientu reizinājumu.

8.1.2. Vienenkura pārveidotāji

Līdzstrāvas vienenkura pārveidotāji. Līdzstrāvas vienenkura pārveidotājs no parastās līdzstrāvas mašīnas atšķiras ar to, ka enkurā ir divi elektriski nesaistīti tinumi (primārais 1 un sekundārais 2), kas pievienoti diviem kolektoriem (8.1. zīm.). Primāro tinumu ar suku un kolektora $K1$ starpniecību pievieno līdzstrāvas avotam, kura spriegums ir U_1 , un no šī tinuma puses pārveidotājs darbojas kā līdzstrāvas dzinējs. Enkuram rotējot, sekundārajā tinumā, kuram ar kolektora $K2$ un suku starpniecību pievienots slodzes rezistors R , inducējas EDS E_2 .

Līdzstrāvas vienenkura pārveidotāju lieto viena sprieguma līdzstrāvas pārveidošanai cita sprieguma līdzstrāvā, un tāpēc to var uzskatīt par «līdzstrāvas transformatoru».

Primārajā un sekundārajā tinumā inducētie EDS (sk. 3.6.)

$$E_1 = c_{E1} n \Phi, \quad (8.1)$$

$$E_2 = c_{E2} n \Phi \quad (8.2)$$

un transformācijas koeficients

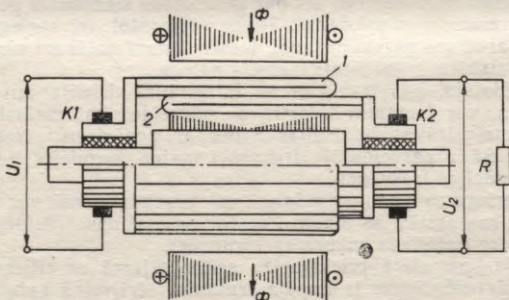
$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{c_{E1}}{c_{E2}} \quad (8.3)$$

jeb, ievērojot izteiksmi (3.59),

$$k = \frac{N_1 a_2}{N_2 a_1}, \quad (8.4)$$

kur N_1 un N_2 — primārā un sekundārā tinuma aktīvo vadu skaits;
 a_1 un a_2 — primārā un sekundārā tinuma paralēlo zaru pāru skaits.

Līdzstrāvas vienenkura pārveidotāju trūkums ir tas, ka sekundāro spriegumu U_2 nevar regulēt, mainot ierosmes strāvu, kā tas ir pa-



8.1. zīm. Līdzstrāvas vienenkura pārveidotāja uzbūves princips:

1 — primārais enkura tinums, 2 — sekundārais enkura tinums.

rastajos līdzstrāvas ģeneratoros. Tā, piemēram, ja samazina ierosmes strāvu, tad pieaug enkura rotācijas frekvence, bet, tā kā vienlaikus samazinās magnētiskā plūsma, tad sekundārā tinuma EDS paliek nemainīgs. Tādējādi līdzstrāvas vienkura pārveidotāja sekundārā sprieguma U_2 regulēšana iespējama, tikai mainot primāro spriegumu U_1 .

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotājs. Šī tipa vienkura pārveidotāju parasti lieto maiņsprieguma pārveidošanai līdzspriegumā, retāk — līdzsprieguma pārveidošanai maiņspriegumā.

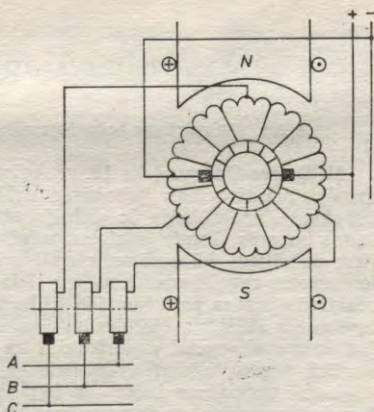
Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotājs pēc savas konstrukcijas atbilst līdzstrāvas mašīnai, tikai ar to atšķirību, ka tā enkura tinums pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem (8.2. zīm.), kas novietoti uz enkura vārpstas no kolektoram pretējās pusēs. Visbiežāk lieto trīsfāzu un sešfāzu vienkura pārveidotājus.

Ja pārveidotāju lieto maiņsprieguma pārveidošanai līdzspriegumā, tad no kontaktgredzenu puses tas darbojas tāpat kā sinhronais dzinējs, bet no kolektora puses kā līdzstrāvas ģenerators. Pārveidojot līdzspriegumu maiņspriegumā, pārveidotājs no kolektora puses darbojas kā līdzstrāvas dzinējs, bet no kontaktgredzenu puses kā sinhronais ģenerators.

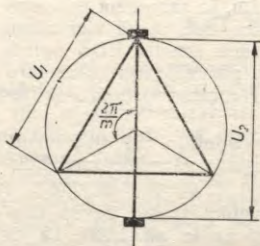
Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var uzskatīt par savdabīgu autotransformatoru, jo tā primārais un sekundārais tinums veido kopīgu elektrisku ķēdi.

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāja transformācijas koeficientu var atrast, ja enkura tinuma atsevišķās sekcijas inducēto EDS attēlo ar vektoriem. Saskaitot vektorus, iegūst spriegumu daudzstūri, kurš robežgadījumā (ja sekciju skaits pietiekami liels) pārveidojas par aploci (8.3. zīm.). Tad aploces diametrs ir vienāds ar EDS uz kolektora sukām E_2 , bet aplocē ievilkta regulārā trīsstūra (trīsfāzu pārveidotājiem) vai sešstūra (sešfāzu pārveidotājiem) malas vienādas ar fāzē inducētā EDS amplitūdas vērtību $E_m = \sqrt{2} E_1$. Tādējādi pārveidotāja transformācijas koeficients

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} \quad (8.5)$$



8.2. zīm. Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāja principiālā shēma.



8.3. *zim.* Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāja diagramma transformācijas koeficienta noteikšanai.

nav atkarīgs no tinuma parametriem, bet tikai no fāzu skaita m . No izteiksmes (8.5) var atrast, ka trīsfāzu pārveidotājam $k=0,612$, sešfāzu — $k=0,354$.

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var palaist no līdzsprieguma puses, pievadot tam enerģiju no kāda līdzstrāvas avota un pēc tam sinhronizējot ar maiņsprieguma tīklu. Biežāk lieto pārveidotāja asinhrono palaišanu no maiņsprieguma puses, tāpat kā sinhronajam dzinējam. Asinhronajai palaišanai paredzēts polu korpūs ievietotais palaišanas tinums.

Maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotāju var izveidot arī ar diviem neatkarīgiem enkura tinumiem, lai varētu izmantot standarta spriegumus abās pusēs bez papildu transformatora. Pārveidotājus var izmantot arī par divu strāvas veidu — maiņstrāvas un līdzstrāvas — generatoru, ja tā enkuru griež ar kādu primāro dzinēju. Ja līdzstrāvas tinumu izmanto tikai ierosmes tinuma barošanai, tad iegūst savdabīgu sinhrono mašīnu ar pašierosmi.

Agrāk maiņstrāvas-līdzstrāvas vienkura pārveidotājus plaši lietoja tramvaju un rūpnīcu apakšstacijās un citur, kur bija nepieciešama līdzstrāva. Tagad gandrīz visur tos aizstāj vienkāršāki un ekonomiskāki pusvadītāju, elektronu un jonu pārveidotāji.

8.2. MAIŅSTRĀVAS KOLEKTORMAŠĪNAS

8.2.1. Maiņstrāvas kolektormašīnu vispārīgs raksturojums

M. Doļivo-Dobrovoļska 19. gs. beigās izgudrotā trīsfāzu asinhronā dzinēja priekšrocības (vienkārša uzbūve, darbības drošums, mazās izmaksas) nodrošināja šo dzinēju strauju ieviešanu dažādās ražošanas nozarēs. Tomēr līdztekus minētajām priekšrocībām asinhronajiem dzinējiem, kā zināms, piemīt arī trūkumi: rotācijas frekvences ierobežotas regulēšanas iespējas; tīkla $\cos \varphi$ samazināšana sakarā ar reaktīvās jaudas patēriņu. Šie trūkumi stimulēja maiņstrāvas kolektordzinēju attīstību. Maiņstrāvas kolektordzinējiem iespējams rotācijas frekvenci regulēt nepārtraukti un plašākā diapazonā, saglabājot samērā augstu lietderības koeficientu, kā arī paaugstināt $\cos \varphi$.

Laika periodā no 1880. līdz 1925. gadam tika izgudrotas un radītas daudz dažāda veida vienfāzes un trīsfāzu maiņstrāvas kolektormašīnas. Tomēr maiņstrāvas kolektormašīnu turpmāka attīstība un ieviešana pakāpeniski samazinājās, kam par cēloni bija to sliktāki

komutācijas apstākļi salīdzinājumā ar līdzstrāvas mašīnām, sarežģīta konstrukcija un samērā lielas izmaksas. Trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinēji ir 1,5...2 reizes dārgāki par līdzstrāvas dzinējiem un 4...6 reizes dārgāki par asinhronajiem dzinējiem ar īsslēgtu rotoru. Vienlaikus kļuva iespējams vienkāršāks to problēmu atrisinājums, kuras izraisīja maiņstrāvas kolektormašīnu attīstību. Jaudas koeficienta uzlabošanu daudz efektīvāk varēja realizēt ar kondensatoriem, sinhronajiem dzinējiem un kompensatoriem. Daudzos gadījumos apmierinoši tika atrisināta asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanas problēma. Plašāk sāka izmantot līdzstrāvas dzinējus, kuriem rotācijas frekvenci iespējams regulēt vienkāršāk un plašākā diapazonā nekā maiņstrāvas kolektordzinējiem. Jonu un pusvadītāju vadāmo taisngriežu attīstība vēl vairāk paplašināja līdzstrāvas dzinēju regulēšanas iespējas. Mūsdienās sakarā ar pusvadītāju frekvences pārveidotāju attīstību paplašinās arī asinhrono un sinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanas iespējas. Minētie apstākļi arvien vairāk samazināja un samazina maiņstrāvas kolektormašīnu izmantošanas efektivitāti, un šāda tendence saglabāsies arī turpmāk.

Maiņstrāvas kolektormašīnas visvairāk izplatītas dažās Eiropas valstīs (VDR, VFR, CSR, Sveicē u. c.). Padomju Savienībā šīs mašīnas izgatavo ļoti maz, un tās galvenokārt ir vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji, kurus lieto dažādu mazjaudas mehānismu piedziņai.

Ievērojot teikto, šeit aplūkosim tikai raksturīgāko maiņstrāvas kolektormašīnu uzbūves un darbības principus.

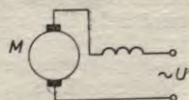
8.2.2. Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji

No vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem visvairāk lieto virknes ierosmes kolektordzinējus. Šie dzinēji pēc slēguma shēmas (8.4. zīm.) un uzbūves ir līdzīgi līdzstrāvas dzinējiem. Lai samazinātu virpuļstrāvu zudumus, ko rada mainīga magnētiskā plūsma, statora serdi izgatavo no savstarpēji izolētiem elektrotehniskā tērauda skārdiem. Lielākas jaudas kolektordzinējiem izveido papildpolus komutācijas uzlabošanai un kompensācijas tinumu enkura reakcijas kompensēšanai un $\cos \varphi$ uzlabošanai.

Tā kā vienfāzes kolektordzinējā ierosmes tinums slēgts virknē ar enkuru, tad enkura strāva i_a ir vienāda ar ierosmes strāvu, kura rada mašīnas galveno magnētisko plūsmu Φ . Sakarā ar zudumiem serdē plūsma Φ atpaliek fāzē no strāvas i_a par magnētisko zudumu leņķi α . Pieņemot, ka enkura strāva un magnētiskā plūsma mainās sinusoidāli, šo lielumu momentānās vērtības ir šādas:

$$i_a = I_{a,m} \sin \omega t = \sqrt{2} I_a \sin \omega t, \quad (8.6)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \alpha). \quad (8.7)$$



8.4. zīm. Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja ar virknes ierosmi shēma.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja darbības princips ir līdzīgs līdzstrāvas dzinēja darbības principam. Tāpēc elektromagnētisko griezes momentu var noteikt no izteiksmes (3.64), ievietojot tajā enkura strāvas un magnētiskās plūsmas momentānās vērtības no izteiksmēm (8.6) un (8.7):

$$m = c_M i_a \Phi = c_M I_{a,m} \Phi_m \sin \omega t \sin (\omega t - \alpha) \quad (8.8)$$

jeb, pārveidojot šo izteiksmi,

$$m = \frac{\sqrt{2}}{2} c_M I_a \Phi_m [\cos \alpha - \cos (2\omega t - \alpha)]. \quad (8.9)$$

Tā kā enkura strāvas un magnētiskās plūsmas virziens mainās gandrīz vienlaikus (leņķis α ir mazs), moments darbojas pārsvarā vienā virzienā, bet pulsē ar divkārtu frekvenci (8.5. zīm.). Tomēr mehāniskās inerces dēļ rotora rotācijas frekvence ir nemainīga un tā kustība ir atkarīga no vidējā momenta M , ko pieņem par maiņstrāvas kolektordzinēja elektromagnētisko griezes momentu. Vidējā momenta vērtība

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt. \quad (8.10)$$

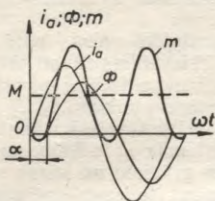
Ievietojot šajā izteiksmē m no izteiksmes (8.9), pēc integrēšanas iegūstam, ka

$$M = \frac{\sqrt{2}}{2} c_M I_a \Phi_m \cos \alpha. \quad (8.11)$$

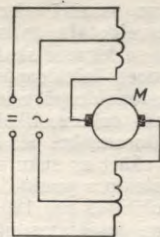
Maiņstrāvas kolektordzinējā ar virknes ierosmi leņķis α ir neliels ($\alpha = 10 \dots 20^\circ$), un tāpēc tas momenta vērtību praktiski neietekmē. Turpretī, ja ierosmes tinumu slēdz paralēli enkuram, enkura strāvas un magnētiskās plūsmas fāzu nobīde ir daudz lielāka, un moments jūtami samazinās. Šī iemesla dēļ maiņstrāvas kolektordzinējus ar paralēlu ierosmi nelieto.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem komutācijas apstākļi ir sliktāki nekā līdzstrāvas dzinējiem, jo komutācijas procesa laikā izzlēgtajās sekcijās bez reaktīvā EDS (sk. 3.8.3.) inducējas vēl arī transformācijas EDS. Tā kā izzlēgtās sekcijas ir saķēdētas ar visu mainīgo galveno plūsmu, transformācijas EDS vērtība var būt samērā liela. Bez tam transformācijas EDS attiecībā pret reaktīvo EDS ir nobīdīts fāzē par 90° un atšķirībā no reaktīvā EDS nav atkarīgs no enkura rotācijas frekvences. Šo iemeslu dēļ ir apgrūtināta transformācijas EDS pilnīga kompensācija ar papildpoliem.

Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēja un līdzstrāvas virknes ierosmes dzinēja mehāniskās raksturlieknes $n=f(M)$ ir līdzīgas, t. i., palielinot slodzi, rotācijas frekvence strauji samazinās. Arī rotācijas frekvenci maiņstrāvas kolektordzinējam var regulēt tāpat kā līdzstrāvas virknes ierosmes dzinējam (sk. 3.12.3., 3.12.6.).



8.5. zīm. Vienfāzes maiņstrāvas virknes ierosmes kolektordzinēja griezes moments.



8.6. zīm. Universālā kolektordzinēja shēma.

Mazjaudas ($P_N \leq 0,5$ kW) vienfāzes virknes ierosmes kolektordzinējus samērā plaši lieto elektroinstrumentu (urbjmašīnu, slīpmašīnu u. tml.), kā arī mājsaimniecības ierīču (putekļu sūcēju, šujmašīnu u. tml.) piedziņai. Viena no maiņstrāvas kolektordzinēju priekšrocībām salīdzinājumā ar vienfāzes asinhronajiem dzinējiem ir iespēja, barojot tos no 50 Hz frekvences tīkla, iegūt rotācijas frekvenci, kas lielāka par 3000 min^{-1} . Tāpēc iespējams samazināt dzinēja un tātad arī to ierīču izmērus un masu, kurās izmantoti maiņstrāvas kolektordzinēji. Bez tam vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinējiem ir arī lielāks palaišanas moments un mazāka palaišanas strāva, tie mazāk jutīgi pret pārslodzēm.

Nelielas jaudas vienfāzes kolektordzinējus bieži izgatavo darbam ar līdzstrāvu un maiņstrāvu. Sādus dzinējus sauc par *universāliem kolektordzinējiem*. Tā kā dzinēja tinumu pretestība maiņstrāvai ir lielāka nekā līdzstrāvai, tad ierosmes tinumam paredz papildu izvādus. Darbinot dzinēju ar līdzstrāvu, ieslēdz visu ierosmes tinumu, bet, darbinot ar maiņstrāvu, — tikai ierosmes tinuma daļu (8.6. zīm.), tādējādi panākot to, ka dzinēja griezes moments praktiski nav atkarīgs no barošanas tīkla strāvas veida.

8.2.3. Trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinēji

Frekvences kolektorpārveidotājs. Viens no asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanas paņēmieniem ir regulēšana ar papildu EDS rotora ķēdē (sk. 6.6.3.). Šī paņēmiena priekšrocība ir iespēja rotācijas frekvenci regulēt plašā diapazonā un ar maziem enerģijas zudumiem. Tomēr grūtības šajā gadījumā rada tas, ka rotora papildu EDS ΔE frekvencei ir jābūt vienādai ar rotorā inducētā EDS $E_{2s} = sE_2$ frekvenci. Bet, tā kā rotora frekvence f_2 ir atkarīga no slīdes, respektīvi, slodzes, tad rotora barošanai nepieciešamas speciālas ierīces — frekvences pārveidotāji, kas nodrošina jebkurai slodzei atbilstošu EDS ΔE frekvenci.

Viens no samērā vienkāršākajiem frekvences pārveidotājiem ir kolektorpārveidotājs, ar kuru iespējams mainīt frekvenci, saglabājot nemainīgu sprieguma skaitlisko vērtību.

Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma parādīta 8.7. zīmējumā. Kolektorpārveidotāja rotors ir izveidots tāpat kā līdzstrāvas mašīnas enkurs, tikai ar to atšķirību, ka tinums pievienots ne tikai kolektoram, bet arī kontaktgredzeniem punktos A_2, B_2, C_2 . Šie punkti savukārt ar suku starpniecību pievienoti trīsfāzu maiņstrāvas tīklam. Kolektors punktos a_2, b_2, c_2 savienots ar sukām, kuras savstarpēji nobīdītas par 120 elektriskajiem grādiem un kuras pa kolektora virsmu iespējams pārvietot, nemainot to savstarpējo stāvokli. Kolektorpārveidotāja statorā (zīmējumā stators nav parādīts) nav tinumu, un tas veic tikai magnētveda funkcijas.

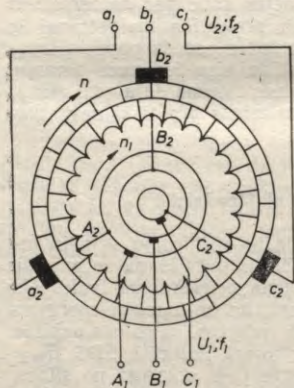
Aplūkosim vispirms gadījumu, kad rotors ir nekustīgs ($n=0$) un suku a_2, b_2, c_2 novietotas pret tinuma punktiem A_2, B_2, C_2 , kā tas parādīts 8.7. zīmējumā.

Ja spaiļēm A_1, B_1, C_1 , respektīvi, kontaktgredzeniem, pievada sinusoidālu maiņspriegumu U_1 ar frekvenci f_1 , mašīnā rodas rotējošs magnētiskais lauks, kas attiecībā pret rotoru griežas ar rotācijas frekvenci $n_1 = 60f_1/p$. Tā kā rotors ir nekustīgs, tad tāda pati ir lauka rotācijas frekvence attiecībā pret nekustīgajām sukām a_2, b_2, c_2 . Rotējošais magnētiskais lauks katrā enkura tinuma sekcijā inducē sinusoidālu EDS, pie tam maksimālā EDS vērtība sekcijā ir tad, kad rotējošā lauka ass sakrīt ar dotās sekcijas asi. Tā kā katra sekcija pievienota divām kolektora plāksnītēm, tad katrā laika momentā uz kolektora ir tāds pats sprieguma sadalījums kā tinumā. Tādējādi, magnētiskajam laukam rotējot, pa kolektoru pārvietojas sinusoidāla sprieguma vilnis (8.8. zīm.), kura rotācijas frekvence un virziens

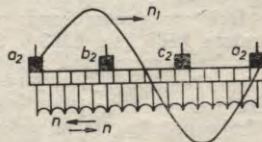
sakrīt ar magnētiskā lauka rotācijas frekvenci un virzienu. Tas nozīmē, ka uz sukām, kas pievienotas kolektoram, ir simetrisks trīsfāzu spriegums U_2 ar frekvenci $f_2 = f_1 = pn_1/60$. Ja neievēro sprieguma kritumu tinumā, tad

$$U_2 = E_2 = U_1. \quad (8.12)$$

Ja suku a_2, b_2, c_2 nobīda attiecībā pret 8.8. zīmējumā attēloto



8.7. zīm. Frekvences kolektorpārveidotāja principiālā shēma.



8.8. zīm. Kolektora sprieguma vilnis.

stāvokli par kaut kādu leņķi α , tad izmainās sprieguma U_2 fāze attiecībā pret U_1 , bet tā skaitliskā vērtība paliek nemainīga. To var izskaidrot, uzskatot, ka sekcijas, kas atrodas starp jebkurām divām sukām, veido trīs atsevišķus tinumus, pret kuru asīm šīs sukas vienmēr novietotas simetriski. Pārvietojot, piemēram, sukas preti magnētiskā lauka griešanās virzienam, vienlaikus tādā pašā virzienā un par tādu pašu leņķi α pārvietojas tinumu asis. Tāpēc rotējošā lauka ass katras fāzes asi šķērso agrāk un

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 e^{j\alpha}. \quad (8.13)$$

Ja sukas pārvieto par leņķi α lauka griešanās virzienā, tad

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 e^{-j\alpha} \quad (8.14)$$

jeb vispārīgā gadījumā

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 e^{\pm j\alpha}. \quad (8.15)$$

Tagad pieņemsim, ka rotoru griež ar rotācijas frekvenci n , piemēram, lauka griešanās virzienā. Tad kolektora sprieguma vilnis saglabā nemainīgu amplitūdu un turpina griezties attiecībā pret rotoru ar iepriekšējo rotācijas frekvenci, t. i., $n_1 = 60f_1/p$. Bet telpā un tātad attiecībā pret nekustīgajām sukām a_2, b_2, c_2 sprieguma vilnis rotē ar rotācijas frekvenci $n_2 = n_1 + n$. Ja rotoru griež pretī lauka rotācijas virzienam, tad kolektora sprieguma vilnis attiecībā pret nekustīgajām sukām griežas ar rotācijas frekvenci $n_2 = n_1 - n$. Tas nozīmē, ka spriegums uz sukām U_2 mainās ar frekvenci

$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_1 \pm n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 \pm n}{n_1} = f_1 s. \quad (8.16)$$

Tādējādi sprieguma U_2 skaitliskā vērtība nav atkarīga no rotora rotācijas frekvences un no suku stāvokļa. Bet, mainot suku stāvokli, var izmainīt sprieguma U_2 fāzi attiecībā pret U_1 un, mainot rotora rotācijas frekvenci, var izmainīt U_2 frekvenci.

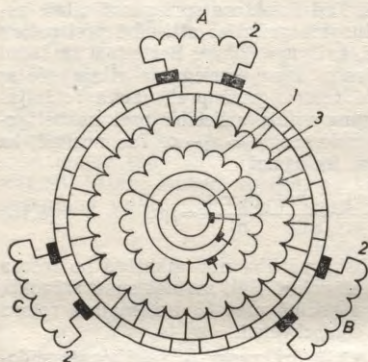
Kā redzams no izteiksmes (8.16), frekvenci f_2 kolektorpārveidotāja izejā var noteikt pēc tādas pašas sakarības kā frekvenci asinhronā dzinēja rotorā (sk. izteiksmi (6.5)). Tas rada iespēju izmantot frekvences kolektorpārveidotāju kā rotora papildu EDS avotu asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšanai. Šādu regulēšanu izmanto trīsfāzu maiņstrāvas kolektormašīnās.

Trīsfāzu paralēla slēguma maiņstrāvas kolektordzinējs ar rotora barošanu. Izmantojot iepriekš izklāstīto frekvences kolektorpārveidotāja darbības principu, ir radītas daudz dažāda veida maiņstrāvas kolektormašīnas. Visizplatītākā no tām ir trīsfāzu paralēla slēguma kolektordzinējs ar rotora barošanu (Srage-Rihtera dzinējs), kura principiālā shēma parādīta 8.9. zīmējumā.

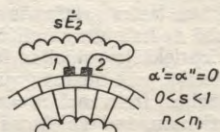
Dzinēja rotorā ir divi tinumi. Viens no tiem (1) ir primārais tinums, kas ar kontaktgredzenu un suku starpniecību pievienots trīsfāzu maiņstrāvas tīklam. Otrs rotora tinums (3), ko sauc par

kolektora tinumu, ir līdzstrāvas mašīnas tipa tinums, kas pievienots kolektoram un veic frekvences kolektorpārveidotāja funkcijas. Abi rotoru tinumi ievietoti vienās un tajās pašās rievās. Sekundārais tinums 2, kas sastāv no trīs atsevišķām fāzēm, novietots statorā, un katra no fāzēm pievienota divām sukām, kuras pa kolektoru var pārvietot dažādos virzienos.

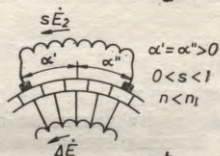
Tiklām pievienotais primārais tinums rada rotējošu magnētisko lauku, kurš attiecībā pret rotoru griežas ar sinhrono rotācijas frekvenci n_1 . Šī rotējošā lauka rotācijas frekvence attiecībā pret statoru ir atkarīga no rotoru rotācijas frekvences, un tāpēc rotējošā lauka inducētais EDS statora tinumā ir ar slīdes frekvenci $f_2 = sf_1$. Tā kā rotējošam laukam attiecībā pret rotoru ir nemainīga rotācijas frekvence, tad kolektora tinumā inducētais EDS ir ar tādu pašu frekvenci f_1 un nav atkarīgs no rotoru rotācijas frekvences. Turpretī spriegumam uz kolektora sukām ir slīdes frekvence f_2 , t. i., tāda pati frekvence kā inducētajam EDS sekundārajā (statora) tinumā. Tāpēc šo EDS



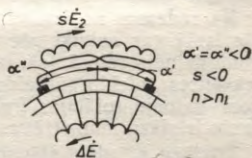
8.9. zīm. Principiālā shēma trīsfāzu paralēla slēguma maiņstrāvas kolektordzinējam ar rotoru barošanu.



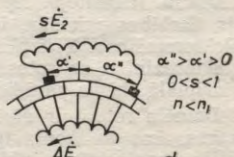
a



b



c



d

8.10. zīm. Papildu EDS atkarība no suku pārbīdes leņķa α maiņstrāvas kolektormāšīnā:

$$a - \alpha' = \alpha'' = 0, \quad b - \alpha' = \alpha'' > 0, \quad c - \alpha' = \alpha'' < 0, \\ d - \alpha'' > \alpha' > 0.$$

ar suku starpniecību var pievadīt statora tinumam kā papildu EDS ΔE .

Statora tinumam pievadītā EDS ΔE lielumu var mainīt, regulējot attālumu starp šī tinuma vienas fāzes sukām. Jo lielāks ir šis attālums, jo lielāks papildu EDS tiek pievadīts statora tinumam. Papildu EDS vislielākā vērtība ir tad, ja attālums starp vienas fāzes sukām ir 180 elektrisko grādu. Ja sukas atrodas uz vienas kolektora plāksnītes (8.10. zīm. *a*), tad papildu EDS $\Delta E = 0$. Visas trīs statora tinuma fāzes šajā gadījumā ir išslēgtas un mašīnas darbība ir līdzīga parastā asinhronā dzinēja ar fāzu rotoru darbībai, kuram barošana pievadīta no rotora puses, bet statora tinums išslēgts.

Ja katras fāzes sukas pārbīda no tinuma simetrijas ass uz abām pusēm par vienādu attālumu (8.10. zīm. *b*), tad papildu EDS ΔE sekundārā tinuma ķēdē darbojas preti šajā tinumā inducētajam EDS sE_2 . Ja sukas attiecībā pret statora tinuma fāzu asi pārbīda pretējos virzienos (8.10. zīm. *c*), tad mainās papildu EDS ΔE virziens, kas tagad sakrīt ar sekundārajā tinumā inducētā EDS sE_2 virzienu.

Nesimetriski pārbīdot sukas (8.10. zīm. *d*), var panākt, ka papildu EDS ΔE apsteidz sekundārajā tinumā inducēto EDS sE_2 vai arī atpaliek no šī EDS (atkarībā no leņķu α' un α'' starpības).

Trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinēja rotācijas frekvences un $\cos \varphi$ regulēšana. Tā kā trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinējs būtībā ir asinhronais dzinējs, tad rotācijas frekvences regulēšanas princips ar papildu EDS sekundārajā ķēdē ir tāds pats kā parastajam asinhronajam dzinējam ar fāzu rotoru (sk. 6.6.3.). Tāpēc atgādināsim šeit tikai galvenās minētā regulēšanas paņēmiena īpatnības.

Ja sekundārajam (statora) tinumam pievadā papildu EDS, kas ir pretējā fāzē šajā tinumā inducētajam EDS sE_2 , t. i., $\Delta E < 0$, tad sekundārā strāva I_2 sākumā samazinās. Tāpēc samazinās arī dzinēja elektromagnētiskais moments un statiskā pretestības momenta pārsvara dēļ ($M_{stat} > M$) rotora rotācijas frekvence samazinās, bet slīde s palielinās. Slīdei palielinoties, pieaug sekundārajā tinumā inducētais EDS sE_2 , un tāpēc pieaug sekundārā strāva un tātad arī elektromagnētiskais moments M . Šāda slīdes, EDS un strāvas palielināšanās turpinās tik ilgi, kamēr iestājas elektromagnētiskā un statiskā momenta līdzsvars. Tādējādi dzinējs darbojas ar palielinātu slīdi un tā rotācijas frekvence ir mazāka nekā gadījumā, kad $\Delta E = 0$.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS ΔE , kas sakrīt fāzē ar šī tinuma EDS sE_2 , t. i., $\Delta E > 0$, tad sākumā sekundārā strāva I_2 un elektromagnētiskais moments M palielinās. Tā kā $M > M_{stat}$, tad rotora rotācijas frekvence pieaug, bet slīde samazinās. Slīdei samazinoties, samazinās arī EDS sE_2 , sekundārā strāva I_2 un elektromagnētiskais moments M , pie tam šāda samazināšanās notiek tik ilgi, kamēr iestājas elektromagnētiskā un statiskā momenta līdzsvars. Dzinējs šajā gadījumā darbojas ar samazinātu slīdi un palielinātu rotācijas frekvenci. Ja $\Delta E > 0$ un pārsniedz noteiktu vērtību, iespējams režīms, kad slīde ir negatīva un rotors griežas ar rotācijas frekvenci, kas lielāka par sinhrono rotācijas frekvenci.

Vispārīgā gadījumā, tāpat kā asinhronajam dzinējam,

$$s_1 = s \mp \frac{\Delta E}{E_2}, \quad (8.17)$$

kur s_1 un s — attiecīgi rotora slīde pēc un pirms papildu EDS pievadišanas sekundārajam tinumam, pie tam mīnusa zīme atbilst gadījumam, kad ΔE sakrīt fāzē ar sE_2 , bet plusa zīme —, kad ΔE un sE_2 ir pretējās fāzēs.

Tagad noskaidrosim, kā, pievadot sekundārajam tinumam papildu EDS, var regulēt trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinēja $\cos \varphi$.

Tāpat kā parastajā asinhronajā dzinējā, sekundārā strāva kolektordzinējā

$$I_2 = \frac{s\dot{E}_2}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{R_2 + jsX_2}. \quad (8.18)$$

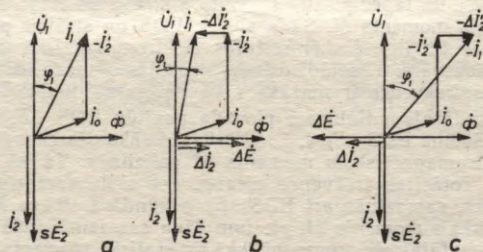
Tā kā dzinēja normālā darba režīmā slīde ir neliela, tad $R_2^2 \gg \gg (sX_2)^2$ un $Z_{2s} = \sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2} \approx R_2$ un izteiksmes (8.18) vietā var rakstīt, ka

$$I_2 = \frac{s\dot{E}_2}{R_2}. \quad (8.19)$$

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS ΔE , kas apsteidz tinumā inducēto EDS sE_2 par 90° , tad šajā tinumā rodas papildstrāva

$$\Delta I_2 = \frac{\Delta E}{R_2}, \quad (8.20)$$

kas tāpat apsteidz EDS sE_2 par 90° un tāpēc nerada nekādu papildu griezes momentu. Tas nozīmē, ka rotora slīde un rotācijas frekvence



8.11. zim. Vienkāršotas vektoru diagrammas trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinējam ar dažādiem papildu EDS ΔE sekundārajā ķēdē:

a — $\Delta E=0$, b un c — $\Delta E \neq 0$.

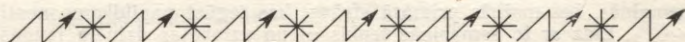
nemainās, bet mainās primārā strāva, kas iegūst papildkomponenti $-\Delta I'_2$. Līdz ar to samazinās leņķis φ_1 un uzlabojas dzinēja jaudas koeficients. Aplūkotsais gadījums ilustrēts 8.11. zīmējumā *b* attēlotajā vektoru diagrammā.

Var atzīmēt, ka tad, ja ΔE pārsniedz noteiktu vērtību, primārā strāva I_1 var apsteigt spriegumu U_1 , t. i., $\varphi_1 < 0$. Šādos apstākļos maiņstrāvas kolektordzinējs atdod tīklā reaktīvo jaudu un darbojas kā kompensators, t. i., līdzīgi pārierosinātai sinhronajai mašīnai.

Ja sekundārajam tinumam pievada papildu EDS ΔE , kas atpaliek fāzē no tinumā inducētā EDS sE_2 par 90° , tad papildstrāva ΔI_2 ir pretēja virziena (8.11. zīm. *c*), leņķis φ_1 palielinās un jaudas koeficients samazinās.

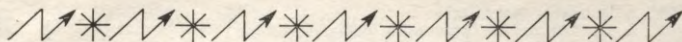
Vispārīgā gadījumā, kad vienlaikus maina ΔE skaitlisko vērtību un fāzi, mainās dzinēja rotācijas frekvence un $\cos \varphi$.

Padomju Savienībā trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinējus neražo. Tomēr tie sastopami dažādās iekārtās, kas izgatavotas Eiropas valstīs un kuras Padomju Savienībā izmanto papīrrūpniecībā, tekstilrūpniecībā, dažādos konveijeros u. tml. Trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinējus izgatavo ar jaudu līdz 100...150 kW un rotācijas frekvences regulēšanas diapazonu 3:1.



LITERATURA

1. *Костенко М. П., Пиотровский Л. М.* Электрические машины. — 3-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергия, 1972—1973.
 - Ч. 1. Машины постоянного тока. Трансформаторы. 1972. 544 с.
 - Ч. 2. Машины переменного тока. 1973. 684 с.
2. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. 1. Введение. Трансформаторы. — 3-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.
3. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. — 2-е изд., перераб. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 416 с.
4. *Петров Г. Н.* Электрические машины. Ч. 3. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергия, 1968. — 224 с.
5. *Вольдек А. И.* Электрические машины. — 3-е изд., перераб. — Л.: Энергия, 1978. — 832 с.
6. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. — М.: Энергия, 1980. — 928 с.
7. *Копылов И. П.* Электромеханические преобразователи энергии. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.
8. *Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С.* Электрические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1971. — 432 с.
9. *Арменский Е. В., Фалк Г. Б.* Электрические микромашины. — М.: Высшая школа, 1975. — 240 с.
10. Проектирование электрических машин / Под ред. *И. П. Копылова*. — М.: Энергия, 1980. — 496 с.
11. Электротехнический справочник / Под ред. *П. Г. Грудинского* и др. — 5-е изд. — М.: Энергия, 1974. — Т. I. 776 с.
12. ГОСТ 183—74. Машины электрические. Общие технические требования. — Переизд. Сент. 1975.



SATURS

1. Ievads

1.1. Elektrisko mašīnu vispārīgs raksturojums un nozīme	3
1.2. Elektrisko mašīnu vēsture	4
1.3. Isas ziņas par elektromašīnbūves attīstību Lāvijā	5

2. Elektrisko mašīnu kopīgi jautājumi

2.1. Vispārīgi norādījumi	9
2.2. Elektrisko mašīnu darbības princips	10
2.3. Sakarības starp elektrisko mašīnu jaudu, izmēriem un tehniski ekonomiskajiem rādītājiem	12
2.4. Elektromašīnbūvē izmantojamie materiāli	14
2.4.1. Strāvu vadošie materiāli	14
2.4.2. Magnētiskie materiāli	14
2.4.3. Izolācijas materiāli	15
2.4.4. Konstrukciju materiāli	16
2.5. Elektrisko mašīnu silšana un dzesēšana	16
2.5.1. Silšanas pamatvienādojums	16
2.5.2. Silšanas un atdzišanas raksturlieknes	17
2.5.3. Elektrisko mašīnu silšana atkarībā no darba režīma	18
2.5.4. Elektrisko mašīnu dzesēšana	21
2.6. Relatīvo vienību sistēma	23

3. Līdzstrāvas mašīnas

3.1. Vispārīgi norādījumi	24
3.2. Līdzstrāvas mašīnas darbības princips	24
3.3. Līdzstrāvas mašīnas uzbūve	25
3.4. Līdzstrāvas mašīnu enkuru tinumi	28
3.4.1. Pamatjēdzieni un tinumu izveidošanas princips	28
3.4.2. Cilpas tinums	30
3.4.3. Viļņa tinums	34
3.4.4. Tinuma tipa izvēle	36
3.5. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskais lauks	36
3.5.1. Magnētiskais lauks tukšgaitā	36
3.5.2. Līdzstrāvas mašīnas magnētiskās ķēdes aprēķins	37
3.5.3. Magnētiskais lauks slogotā līdzstrāvas mašīnā	43
3.6. Enkura tinuma EDS	47
3.7. Elektromagnētiskais moments	49
3.8. Līdzstrāvas mašīnu komutācija	50
3.8.1. Komutācijas procesa vispārīgs raksturojums	50
3.8.2. Komutācijas procesa fizikalā aina un pamatvienādojumi	51
3.8.3. Komutācijas veidi	53
3.8.4. Komutācijas uzlabošanas paņēmieni	55
3.9. Līdzstrāvas mašīnu klasifikācija pēc ierosmes veida	57
3.10. Līdzstrāvas mašīnu jaudas zudumi un lietderības koeficients	58
3.10.1. Jaudas zudumi	58
3.10.2. Lietderības koeficients	60
3.10.3. Enerģētiskā diagramma	60

3.11.	Līdzstrāvas ģeneratori	61
3.11.1.	Līdzstrāvas ģeneratoru pamatvienādojumi	61
3.11.2.	Neatkarīgas ierosmes ģenerators	62
3.11.3.	Paralēlas ierosmes ģenerators	66
3.11.4.	Virknes ierosmes ģenerators	68
3.11.5.	Jauktas ierosmes ģeneratori	69
3.11.6.	Līdzstrāvas ģeneratoru paralēla darbība	70
3.12.	Līdzstrāvas dzinēji	72
3.12.1.	Līdzstrāvas dzinēju pamatvienādojumi	72
3.12.2.	Līdzstrāvas dzinēju palaišana	74
3.12.3.	Līdzstrāvas dzinēju rotācijas frekvences regulēšana	76
3.12.4.	Līdzstrāvas dzinēja darbības stabilitāte	77
3.12.5.	Paralēlas ierosmes dzinējs	79
3.12.6.	Virknes ierosmes dzinējs	82
3.12.7.	Jauktas ierosmes dzinējs	85
3.12.8.	Līdzstrāvas dzinēju darba raksturlieknes	86
3.12.9.	Līdzstrāvas dzinēju elektriskā bremzēšana	86
3.13.	Speciālas nozīmes līdzstrāvas mašīnas	89
3.13.1.	Līdzstrāvas metināšanas ģeneratori	89
3.13.2.	Elektromašīnu pastiprinātāji	90
3.13.3.	Ventīldzinēji	92
3.13.4.	Līdzstrāvas tahogeneratori	94
3.13.5.	Līdzstrāvas servodzinēji	95
3.14.	Padomju Savienībā ražoto līdzstrāvas mašīnu pamattipi	95

4. Transformatori

4.1.	Pamatjēdzieni un transformatora darbības princips	98
4.2.	Transformatora uzbūve	99
4.2.1.	Magnētivadi	100
4.2.2.	Tinumi	103
4.2.3.	Tvertne	105
4.3.	Transformatoru tinumu slēgumi un savienojumu grupas	105
4.4.	Elektromagnētiskie pamatprocesi transformatoros un to analīze	108
4.4.1.	Transformatora darbības fizikālie pamati	108
4.4.2.	Transformatora pamatvienādojumi	109
4.4.3.	Reducētais transformators	112
4.4.4.	Transformatora vektoru diagramma	113
4.4.5.	Transformatora ekvivalentās shēmas	115
4.4.6.	Procesi, kas saistīti ar transformatora serdes magnetizēšanu. EDS un strāvu augstākās harmoniskās	117
4.5.	Transformatora tukšgaita un īsslēgums	121
4.5.1.	Transformatora tukšgaitas režīms	121
4.5.2.	Transformatora īsslēguma režīms	124
4.6.	Transformatora darbība slodzes režīmā	127
4.6.1.	Slogota transformatora sprieguma izmaiņa	127
4.6.2.	Sprieguma regulēšana	128
4.6.3.	Transformatora lietderības koeficients	130
4.6.4.	Transformatoru paralēla darbība	132
4.7.	Trīsfāzu transformatoru nesimetriska slodze	135
4.7.1.	Simetrisko komponentu metode nesimetrisko režīmu analīzē	135
4.7.2.	Nesimetriska slodze transformatoru slēguma shēmās bez nullvada	136
4.7.3.	Nesimetriska slodze transformatoru slēguma shēmās ar nullvadu	137
4.8.	Pārejas procesi transformatoros	140
4.8.1.	Vispārīgi norādījumi	140
4.8.2.	Transformatora pieslēgšana tīklam	141
4.8.3.	Transformatora pēkšņais īsslēgums	143
4.8.4.	Pārspriegumi	146
4.9.	Speciālas nozīmes transformatori	148
4.9.1.	Trīstinumu transformatori	148
4.9.2.	Autotransformatori	151

4.9.3. Metināšanas transformatori	154
4.9.4. Taisngriežu iekārtu transformatori	154
4.10. Transformatoru silšana un dzesēšana	156
4.11. Padomju Savienībā ražoto transformatoru pamattipi	157

5. Maiņstrāvas mašīnu teorijas kopīgi jautājumi

5.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi un uzbūve	160
5.1.1. Maiņstrāvas mašīnu pamattipi	160
5.1.2. Asinhrono mašīnu uzbūve	161
5.1.3. Sinhrono mašīnu uzbūve	163
5.2. Rotējošs magnētiskais lauks	165
5.3. Maiņstrāvas mašīnu tinumu EDS	167
5.3.1. Vispārīgi norādījumi	167
5.3.2. Vienā vadā inducētais EDS	169
5.3.3. Vijumā un spolē inducētie EDS	170
5.3.4. Spoļu grupā un fāzē inducētie EDS	171
5.3.5. EDS augstākās harmoniskās un to samazināšanas paņēmieni	173
5.4. Maiņstrāvas mašīnu tinumi	175
5.4.1. Maiņstrāvas mašīnu tinumu pamattipi	175
5.4.2. Rievu EDS vektoru zvaigzne	176
5.4.3. Trīsfāzu divslāņu cilpas tinums	177
5.4.4. Trīsfāzu divslāņu vijņa tinums	180
5.4.5. Trīsfāzu vienslāņa tinumi	181
5.4.6. Tinumi ar fāzu skaitu $m \neq 3$	183
5.5. Maiņstrāvas mašīnu tinumu magnetizējošais spēks	184
5.5.1. Vispārīgi norādījumi	184
5.5.2. Vienas spoles MS	184
5.5.3. Fāzes MS. Pulsējoša MS sadalīšana rotējošās komponentēs	187
5.5.4. Trīsfāzu tinuma MS	190
5.5.5. Rotējoša MS sadalīšana divos pulsējošos MS un divfāzu tinuma MS	193
5.6. Maiņstrāvas mašīnu induktīvās pretestības	194

6. Asinhronās mašīnas

6.1. Asinhronās mašīnas darbības princips un darba režīmi	196
6.2. Elektromagnētiskie pamatprocesi asinhronajās mašīnās un to analīze	198
6.2.1. Asinhronās mašīnas darba režīma reducēšana uz transformatora darba režīmu	198
6.2.2. Spriegumu un strāvu vienādojumi	200
6.2.3. Rotorā elektrisko lielumu reducēšana uz statora tinumu	202
6.2.4. Ekvivalentās shēmas	203
6.2.5. Vektoru diagramma	206
6.2.6. Asinhronās mašīnas enerģētiskās sakarības, zudumi un lietderības koeficients	207
6.3. Asinhronās mašīnas elektromagnētiskais moments un mehāniskā raksturliktne	210
6.3.1. Elektromagnētiskā momenta atkarība no slīdes	210
6.3.2. Maksimālais elektromagnētiskais moments, kritiskā slide un palaišanas moments	212
6.3.3. Asinhronā dzinēja mehāniskā raksturliktne un tās aprēķins no dzinēja pases datiem	214
6.3.4. Asinhronā dzinēja darbības stabilitāte	215
6.4. Asinhronās mašīnas riņķa diagramma	217
6.4.1. Vispārīgi norādījumi	217
6.4.2. Riņķa diagrammas teorētiskais pamatojums	217
6.4.3. Asinhronā dzinēja darba raksturliktņu noteikšana no riņķa diagrammas	220
6.4.4. Riņķa diagrammas konstruēšana pēc tukšgaitas un īsslēguma mēģinājumu rezultātiem	223
6.5. Trīsfāzu asinhrono dzinēju palaišana	225
6.5.1. Palaišanas procesa vispārīgs raksturojums	225

6.5.2.	Isslēgtu asinhrono dzinēju palaišana	226
6.5.3.	Asinhrono dzinēju ar fāzu rotoru palaišana	228
6.5.4.	Isslēgtie asinhronie dzinēji ar uzlabotām palaišanas raksturliķnēm	230
6.6.	Asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana	232
6.6.1.	Vispārīgi norādījumi	232
6.6.2.	Isslēgtu asinhrono dzinēju rotācijas frekvences regulēšana	233
6.6.3.	Asinhrono dzinēju ar fāzu rotoru rotācijas frekvences regulēšana	237
6.7.	Asinhrono mašīnu speciāli darba režīmi	239
6.7.1.	Asinhrono dzinēju darbība apstākļos, kas atšķiras no nominālajiem	239
6.7.2.	Asinhronā mašīna ar nobremzētu rotoru	241
6.7.3.	Asinhronais frekvences pārveidotājs	243
6.7.4.	Asinhronais ģenerators ar pašerosmi	244
6.7.5.	Asinhrono dzinēju nesimetriskie režīmi	245
6.8.	Vienfāzes asinhronie dzinēji	249
6.8.1.	Vienfāzes dzinēju darbības īpatnības	249
6.8.2.	Vienfāzes asinhrono dzinēju pamattipi	251
6.9.	Speciālas nozīmes asinhronās mašīnas	253
6.9.1.	Lineārais asinhronais dzinējs	253
6.9.2.	Asinhronie servodzinēji	255
6.9.3.	Selsīni	256
6.10.	Padomju Savienībā ražoto asinhrono dzinēju pamattipi	259

7. Sinhronās mašīnas

7.1.	Sinhrono mašīnu darbības princips	262
7.2.	Sinhrono mašīnu ierosināšana	263
7.3.	Elektromagnētiskie pamatprocesi sinhronajās mašīnās un to analīze	264
7.3.1.	Sinhronās mašīnas tukšgaitas režīms	264
7.3.2.	Sinhronās mašīnas simetriskas slodzes režīms	265
7.3.3.	Sinhronās mašīnas induktīvās pretestības	270
7.3.4.	Sinhronās mašīnas vektoru diagrammas	272
7.4.	Sinhronā ģenerators raksturliķnes	278
7.4.1.	Vispārīgi norādījumi	278
7.4.2.	Tukšgaitas raksturliķne	278
7.4.3.	Isslēguma raksturliķne	279
7.4.4.	Garenlauka sinhronās induktīvās pretestības eksperimentāla noteikšana	279
7.4.5.	Isslēguma attiecība	280
7.4.6.	Ārējās raksturliķnes	281
7.4.7.	Regulēšanas raksturliķnes	282
7.4.8.	Slodzes raksturliķne	283
7.4.9.	Reaktīvais trīsstrūris un izkliedes induktīvās pretestības eksperimentāla noteikšana	283
7.5.	Sinhrono mašīnu paralēla darbība	284
7.5.1.	Vispārīgi norādījumi	284
7.5.2.	Sinhrono ģeneratoru pieslēgšana paralēlai darbībai	284
7.5.3.	Sinhronās mašīnas paralēla darbība ar lielas jaudas tiklu	288
7.5.4.	Samerojamas jaudas sinhrono mašīnu paralēla darbība	290
7.5.5.	Sinhronās mašīnas elektromagnētiskā jauda un elektromagnētiskais moments	292
7.5.6.	Sinhronās mašīnas leņķa raksturliķnes	293
7.5.7.	Sinhronās mašīnas statiskā stabilitāte un pārslodzes spēja	295
7.5.8.	Sinhronizējošā jauda un sinhronizējošais moments	298
7.5.9.	Sinhronās mašīnas U veida raksturliķnes	299
7.6.	Sinhronie dzinēji un kompensatori	301
7.6.1.	Sinhronie dzinēji	301
7.6.2.	Sinhronie kompensatori	304
7.7.	Sinhrono ģeneratoru nesimetriska slodze	305
7.7.1.	Vispārīgi norādījumi	305
7.7.2.	Nesimetrisko režīmu parametri	305

7.7.3.	Nesimetrisko režīmu ietekme uz sinhronā ģeneratora darbību	308
7.7.4.	Sinhrono ģenerátoru nesimetriski isslēgumi	309
7.8.	Pārejas procesi sinhronajās mašīnās	312
7.8.1.	Vispārīgi norādījumi	312
7.8.2.	Sinhronā ģenerátorā pēkšņais isslēgums	313
7.8.3.	Sinhronās mašīnas momenta pēkšņa izmaiņa un rotora svārstības	327
7.9.	Speciālas nozīmes sinhronās mašīnas	336
7.9.1.	Sinhronie mikrodzinēji	336
7.9.2.	Sinhronās mašīnas ar ķetnveida poliem	341
7.9.3.	Induktorģeneratori	343
7.10.	Padomju Savienībā ražoto sinhrono mašīnu pamattipi	346

8. Elektromašīnu pārveidotāji un maiņstrāvas kolektormašīnas

8.1.	Elektromašīnu pārveidotāji	349
8.1.1.	Dzinējs-ģenerators	349
8.1.2.	Vienenkura pārveidotāji	350
8.2.	Maiņstrāvas kolektormašīnas	352
8.2.1.	Maiņstrāvas kolektormašīnu vispārīgs raksturojums	352
8.2.2.	Vienfāzes maiņstrāvas kolektordzinēji	353
8.2.3.	Trīsfāzu maiņstrāvas kolektordzinēji	355
Literatūra	362

Андрей Звиедрис
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования Латвийской ССР в качестве учебного пособия для студентов электроэнергетических и электротехнических специальностей РПИ

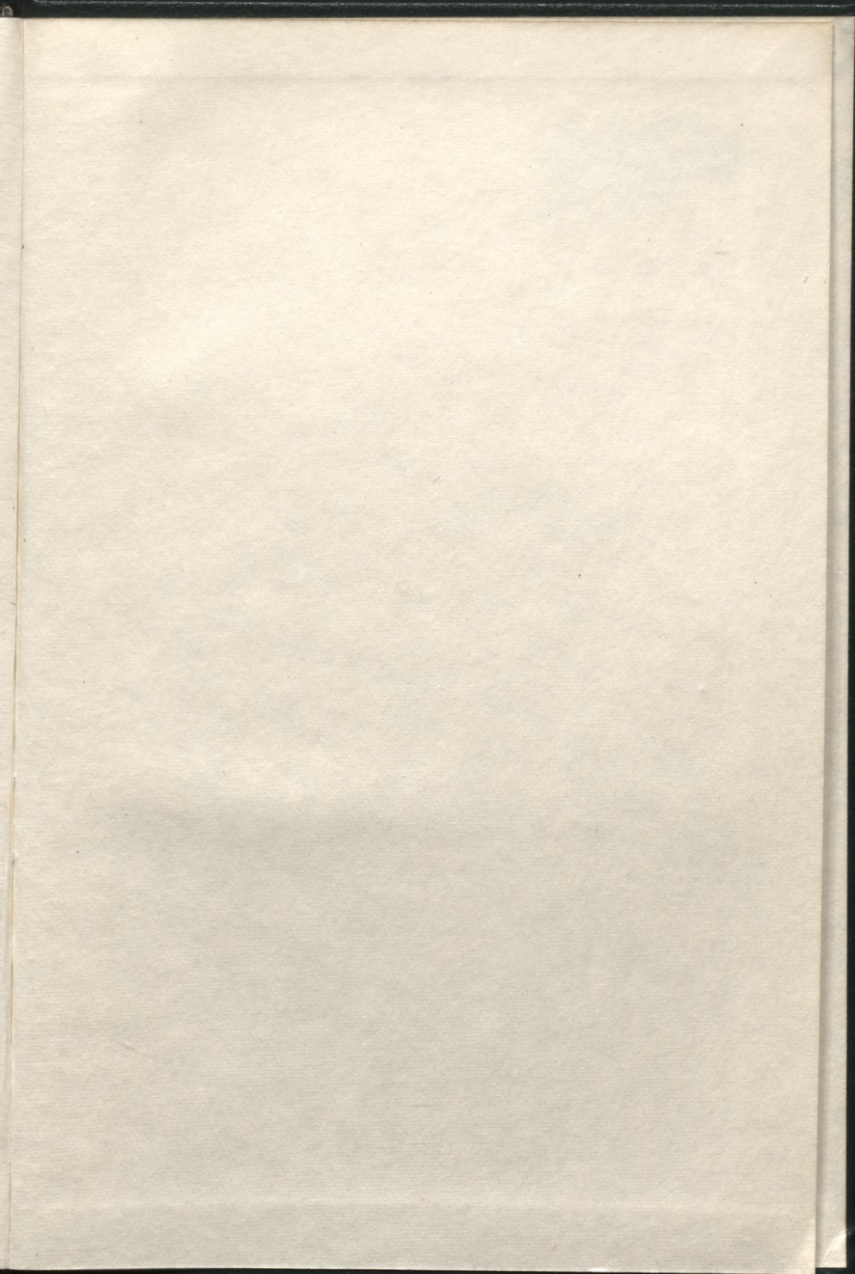
Рига «Звайгзне» 1984
На латышском языке

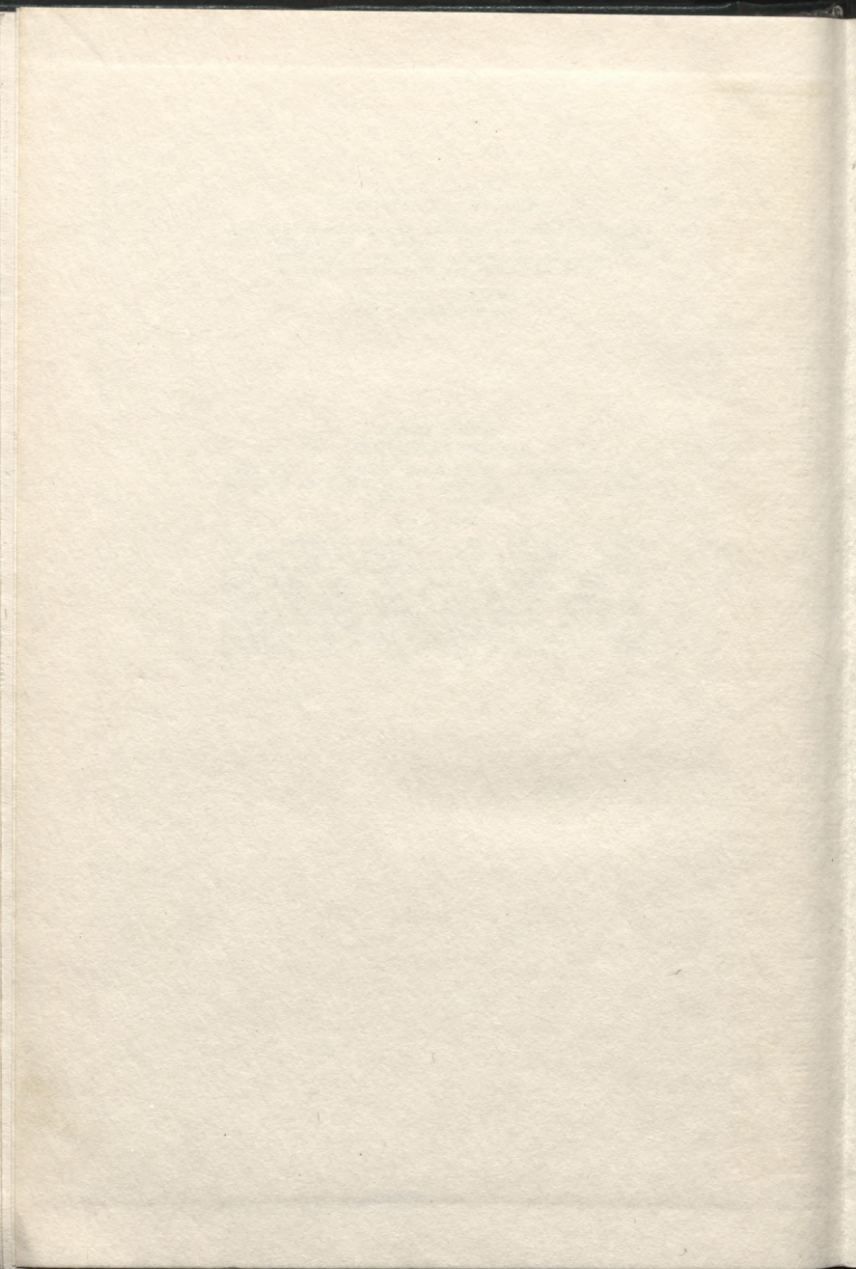
Andrejs Zviedris
ELEKTRISKĀS MASĪNAS

Vāku zīm. *V. Rudzītis*. Redaktors *R. Lejasmēters*. Māksl. redaktors *U. Gulbis*. Tehn. redaktore *I. Bledava*. Korektore *S. Ermane*.

ИБ № 2287

Nodota salikšanai 27.05.83. Parakstīta iespēšanai 26.04.84. JT 10077. Formāts 60×90/16. Tipogr. papīrs Nr. 1. Literatūras garnitūra. Augstspiedums. 23 uzsk. iespied., 23,19 uzsk. krāsu nov., 23,46 izdevn. l. Metiens 2000 eks. Pasūt. Nr. 1311. Cena 1 rbl. 10 kap. Izdevniecība «Zvaigzne», 226013, Rīgā, Gorkija ielā 105. Izdevn. Nr. 6201/T-99. Iespiesta Latvijas PSR Valsts izdevniecību, poligrāfijas un grāmatu tirdzniecības lietu komitejas tipogrāfijā «Cīņa», 226011, Rīgā, Blaumaņa ielā 38/40.





Kontroleksemplārs —

LATVIJAS NACIONĀLA BIBLIOTEKA



0308012398

110