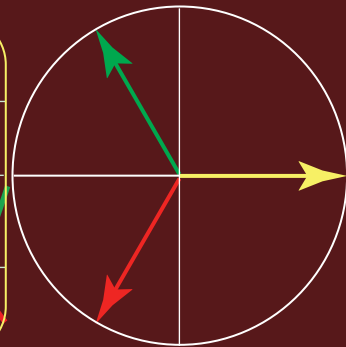
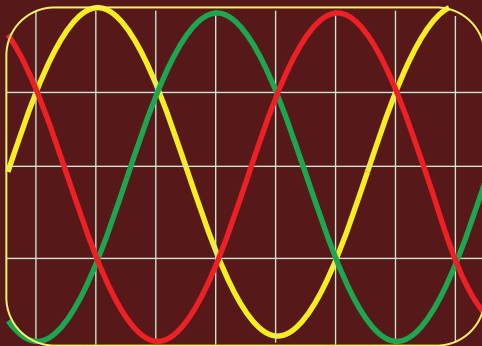
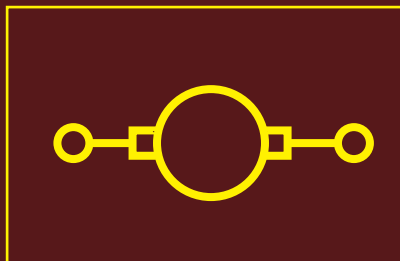


S.Masiokas

Elektro technika



10



Nuolatinės
srovės
mašinos

VADOVĖLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

10.1. Bendros žinios apie elektros mašinas 286

- 10.1.1. Elektros mašinų paskirtis ir ypatumai / 286
- 10.1.2. Nuolatinės srovės mašinų naudojimo sritys / 287
- 10.1.3. Laidininkas magnetiniame lauke / 288

10.2. Nuolatinės srovės mašinos veikimo principas ir atstojamoji schema 289

- 10.2.1. Variklio režimas / 289
- 10.2.2. Generatoriaus režimas / 290
- 10.2.3. EVJ ir mechaninis momentas / 291
- 10.2.4. Inkarų grandinės atstojamoji schema / 293

10.3. Nuolatinės srovės mašinos sandara, energijos nuostoliai ir naudingumo koeficientas 293

- 10.3.1. Sandara / 293
- 10.3.2. Žadinimo būdai ir žadinimo apvijos / 295
- 10.3.3. Energijos nuostoliai ir galios balansas / 296
- 10.3.4. Naudingumo koeficientas / 296

10.4. Inkarų reakcijos ir komutacijos reiškiniai 297

- 10.4.1. Inkarų reakcija / 297
- 10.4.2. Komutacija / 298
- 10.4.3. Pagalbiniai poliai / 298
- 10.4.4. Kibirkščiavimas / 299

10.5. Variklių bendrosios savybės 299

- 10.5.1. Paleidimas ir reversavimas / 299
- 10.5.2. Susiregulavimas / 300
- 10.5.3. Samprata apie greičio reguliavimą / 301
- 10.5.4. Mechaninė charakteristika / 302

10.6. Skirtingų variklių tipų ypatumai 303

- 10.6.1. Nepriklausomo ir lygiagreto žadinimo variklis / 303
- 10.6.2. Nuoseklaus žadinimo variklis / 304
- 10.6.3. Mišraus žadinimo variklis / 305
- 10.6.4. Universalūs kolektoriniai varikliai / 305

10.7. Generatorių ypatybės ir charakteristikos 306

- 10.7.1. Svarbiausios charakteristikos / 306
- 10.7.2. Nepriklausomo žadinimo generatorius / 307
- 10.7.3. Lygiagreto žadinimo generatorius / 308
- 10.7.4. Nuoseklaus žadinimo generatorius / 309
- 10.7.5. Mišraus žadinimo generatorius / 309

Kontroliniai klausimai ir užduotys 310

Bendros žinios apie elektros mašinas

10.1.1. Elektros mašinų paskirtis ir ypatumai. Elektros mašina* vadinsime elektromechaninį įrenginį, kuriame mechaninė energija yra paverčiama elektrine arba elektrinė energija – mechanine. Pirmuoju atveju mašina veikia generatoriaus režimu, o antruoju – variklio. Generatorių paprastai suka garo, vandens, dujų turbinos, vidaus degimo ar kito kokie varikliai. Didelė dalis (daugiau nei 50%) visos elektrinės pagamintos elektros energijos yra vėl paverčiama mechanine varikliuose, kurie varo įvairiausias darbo mašinas.

Visoms elektros mašinoms būdinga tai, kad kiekviena iš jų gali dirbti ir generatoriaus, ir variklio režimu, nes jokių esminių sandaros skirtumų tarp elektros generatoriaus ir variklio nėra. Antra vertus, kiekvienos mašinos pase nurodoma, koks – generatoriaus ar variklio – režimas jai yra tinkamesnis. Įvertinant vieno ar kito režimo specifiką, mašina konstruojama taip, kad jai būtų suvartotas optimalus medžiagų kiekis ir kad mašinos santykinė galia vienam jos masės vienetui būtų didžiausia.

Pagal gaminamą ar vartojamą elektros energiją galima išskirti nuolatinės srovės ir kintamosios srovės mašinas. Savo ruožtu kintamosios srovės mašinos gali būti trifazės arba vienfazės.

Mechaniniu požiūriu galime išskirti dvi kiekvienos elektros mašinos dalis: 1) nejudamąją dalį – statorių; 2) judamąją dalį – rotorių. Tam, kad rotorius galėtų judėti statoriaus atžvilgiu, statorius turi būti pritvirtintas prie pagrindo, o tarp statoriaus ir rotoriaus turi būti oro tarpas.

Visoms šiuolaikinėms elektros mašinoms bendra yra tai, kad jose vyksta elektromagnetinės indukcijos ir elektromechaniniai magnetinio lauko reiškiniai. Elektrotechniniu požiūriu kiekvienos mašinos svarbiausios dalys yra: 1) induktorius, kuris sudaro pagrindinį mašinos magnetinį srautą (vadinamą žadinimo srautu); 2) dalis, kurios laidininkuose indukuojama EVJ ir teka darbinė srovė, yra vadinama inkaru.

Praktiškai labai svarbu turėti kuo didesnę žadinimo magnetinį srautą. Tuo tikslu kiekvienoje mašinoje yra sudaroma magnetinė grandinė, kurios magnetolaidis paprastai yra fe-

* Bendruoju atveju elektrotechnikoje elektros mašinos sąvoka yra kiek platesnė, nes yra specialiųjų elektros mašinų, keičiančių elektros energijos parametrus. Dažnai elektros mašinoms priskiriami ir transformatoriai, nes juose vyksta panašūs elektromagnetiniai reiškiniai.

romagnetinis. Oro tarpas, esantis tarp statoriaus ir rotoriaus, labai padidina magnetinės grandinės varžą. Kuo tiksliau pagaminta elektros mašina, tuo mažesnis jos magnetinės grandinės oro tarpas ir tuo didesnė jos santykinė galia masės vienetai. Paprastai oro tarpas esti nuo milimetro dalių mažos galios mašinose iki keleto milimetrų galingose mašinose.

Kiekvienoje veikiančioje elektros mašinoje gaunami energijos nuostoliai (magnetiniai, elektriniai, mechaniniai), kurie virsta šiluma ir dėl to įvairios mašinos dalys šyla. Kuo labiau mašina apkrauta, tuo šie nuostoliai didesni. Jautriausia įšilimui yra mašinos laidų izoliacija, kurios izoliacinės savybės smarkiai pablogėja, jei jos temperatūra pasidaro aukštesnė už leistinąją. Kuo geresnės kokybės laidų izoliacija, tuo aukštesnė jos leistinoji temperatūra ir tuo gali būti didesnė mašinos santykinė galia masės vienetai.

Kaip matome, elektros mašinos techniniai ir ekonominiai rodikliai priklauso ne tik nuo jos konstrukcijos, bet ir nuo naudotų elektrotechninių bei magnetinių medžiagų kokybės ir gamybos tikslumo.

10.1.2. Nuolatinės srovės mašinų naudojimo sritys. Nors daugumoje pramonės įmonių plačiau taikomos kintamosios srovės mašinos, nuolatinės srovės mašinų pranašumai atveria kelią jų naudojimui įvairiose technikos srityse. Nuolatinės srovės varikliams galima plačiame diapazone ir tiksliai reguliuoti rotoriaus greitį, keisti jų mechaninę charakteristiką; jų paleidimo momentai yra dideli. Dėl šių savybių jie naudojami tuose technologiniuose įrenginiuose, kur yra svarbu sklandžiai keisti darbo mechanizmo greitį (galinguose valcavimo staklynuose, lengvosios, popieriaus pramonės įrenginiuose ir kt.). Nuolatinės srovės varikliai yra plačiai naudojami elektriniame transporte: tai – elektrinių traukinių, troleibusų, tramvajų varikliai. Nuolatinės srovės mikrovarikliai yra naudojami įvairiose autonomiškose transporto priemonėse (automobiliuose, laivuose, lėktuvuose, kosminiuose laivuose), automatikos įrenginiuose, medicinos aparatūroje ir kitur.

Nuolatinės srovės generatorius daugelyje sričių jau pakeičia galingi valdomieji tiristoriniai lygintuvai. Šiuo metu nuolatinės srovės generatoriai naudojami kaip žemos įtampos ir stiprios srovės šaltiniai: elektrolizei (6–12 V, srovės iki 10000 A), akumuliatorių baterijoms įkrauti, geros kokybės suvirinimo darbams. Mažos galios generatoriai naudojami automatikos įrenginiuose bei tachometruose (sūkių dažniui matuoti).

Antra vertus, nuolatinės srovės mašinos turi nemažai ir trūkumų. Jos yra brangesnės, jų sandara sudėtingesnė negu kintamosios srovės mašinų, joms maitinti reikalingas nuo-

latinės srovės šaltinis. Nuolatinės srovės mašinos yra mažiau patikimos: jos dažniau genda, todėl daugiau lėšų reikia joms prižiūrėti ir taisyti.

10.1.3. Laidininkas magnetiniame lauke. Visose elektros mašinose vyksta elektromechaniniai ir elektromagnetiniai reiškiniai: 1) laidininką, kuris yra magnetiniame lauke ir kuriuo teka srovė, veikia elektromagnetinė jėga; 2) laidininke, kuris juda magnetiniame lauke, yra indukuojama EVJ. Šie abu reiškiniai yra būdingi ir varikliams, ir generatoriams, taigi aiškinant mašinos veikimo principą, tuos reiškinius reikia nagrinėti neatsiejamai.

1. Kaip žinome, laidininką, kuris yra magnetiniame lauke ir kuriuo teka srovė, veikia elektromagnetinė jėga (Ampero dėsnis). Elektros mašinose paprastai laidininkas esti statmenas magnetinio lauko indukcijos vektoriui \vec{B} (10.1 pav.). Tuo atveju tiesių laidininką veikianti elektromagnetinė jėga apskaičiuojama šitaip:

$$F_{em} = IBl; \quad (10.1)$$

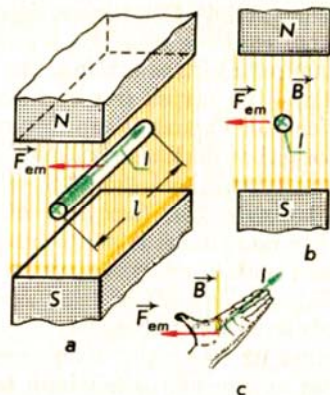
čia l – tiesaus laidininko aktyvusis ilgis (tos dalies, kuri yra magnetiniame lauke), B – magnetinio lauko indukcija, I – laidininku tekanti srovė.

Elektromagnetinės jėgos kryptis nusakoma kairiosios rankos taisykle. Kairiąją ranką reikia laikyti taip, kad magnetinės linijos būtų nukreiptos į delną (delnas turi būti atkreiptas į N polių), o keturi ištiesti pirštai rodytų laidininko srovės kryptį; tuomet atlenktas nykštys rodo laidininką veikiančios jėgos kryptį.

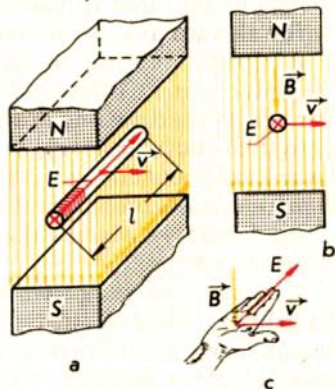
2. Kai tiesus laidininkas, kurio aktyvusis ilgis yra l , greičiu v juda magnetiniame lauke magnetinės indukcijos vektoriui \vec{B} statmena kryptimi (10.2 pav.), laidininke indukuojama EVJ:

$$E = lBv. \quad (10.2)$$

Indukuotos EVJ kryptis nusakoma dešinėsios rankos taisykle. Laikant dešiniąją ranką taip, kad magnetinės linijos būtų nukreiptos į delną (delnas atkreiptas į N polių), o atlenktas nykštys rodytų laidininko judėjimo kryptį, ištiesti keturi pirštai rodo indukuotos laidininke EVJ kryptį.



10.1 pav. Laidininkas, kuriuo teka srovė, magnetiniame lauke: a – erdvinis vaizdas; b – pjūvis ir c – elektromagnetinės jėgos krypties nustatymas kairiąja ranka



10.2 pav. Judantis laidininkas magnetiniame lauke: a – erdvinis vaizdas; b – pjūvis ir c – EVJ krypties nustatymas dešiniąja ranka

10.2

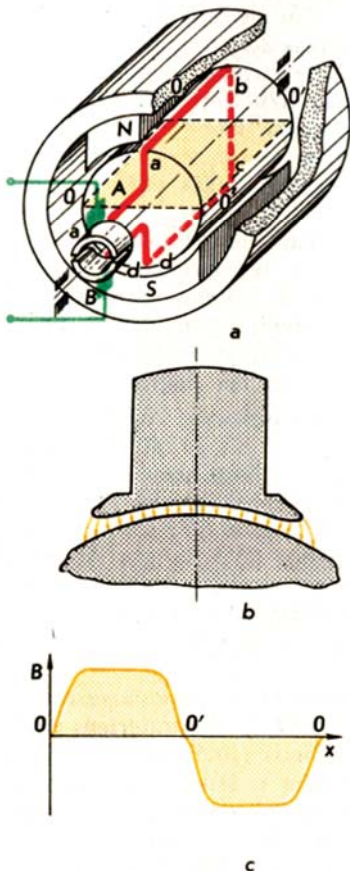
Nuolatinės srovės mašinos veikimo principas ir atstojamoji schema

Veikimo principui paaiškinti nubraižysime supaprastintą nuolatinės srovės mašinos sandaros schemą (10.3 pav., a). Induktorių, kuriantį žadinimo srautą, vaizduojame kaip nuolatinio magneto polių N ir S . Paprastai jie yra mašinos statoriuje. Tarp magnetinių polių patalpiname inkarą – feromagnetinės medžiagos cilindą, kurio išilginiuose grioveluose yra izoliuoti laidininkai, sudarantieji inkaro apviją. Paprastumo dėlei laikome, kad inkaro apviją sudaro tik vienas dviejų laidininkų rėmelis $abcd$. Inkaro apviją prijungiama prie kolektoriaus. Paprasčiausiu kolektoriumi galima laikyti du pusžiedžius a ir d , kurie yra elektriškai izoliuoti vienas nuo kito. Kartu su inkaru kolektorius sudaro nuolatinės srovės mašinos rotorių. Prie kolektoriaus prispaudžiami kontaktiniai šepetėliai A ir B . Tokiu būdu mašinos inkaro apviją prie kolektorių ir šepetėlius yra elektriškai sujungiamo su išorine grandine.

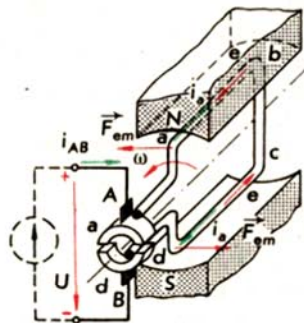
Magnetiniai poliai gaminami tokie, kad magnetinė indukcija oro tarpe ties poliiais būtų beveik pastovi, o vienodu atstumu nuo priešingųjų polių ji būtų lygi nuliui (žr. 10.3 pav., b ir c). Išveskime plokštumą, vienodai nutolusią nuo N ir S polių (10.3 pav., a pavaizduotoje mašinoje ji horizontali). Šios plokštumos ir inkaro paviršiaus susikirtimo linija $0-0'-0''-0$ yra vadinama geometrine neutralė. Geometrinėje neutralėje žadinimo magnetinio lauko indukcija $B=0$.

10.2.1. Variklio režimas. Tam, kad mašina dirbtų kaip variklis, reikia jos šepetėlių A ir B išvadus prijungti prie nuolatinės įtampos (10.4 pav.). Inkaro rėmeliu kryptimi $abcd$ teka srovė $i_a = I_a$. Inkaro laidininkus veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F}_{em} , kurių kryptis pažymėta, pritaikius kairiosios rankos taisyklę. Šios jėgos sudaro elektromagnetinį sukimo momentą M_{em} . Jei jis pakankamas, tai suka inkarą kampiniu greičiu ω .

Polių magnetinė indukcija yra didžiausia ties polių viduriu, todėl inkarą veikia didžiausios jėgos, kai laidininkai yra ties poliiais. Inkarui sukantis, laidininkai patenka į mažėjančios magnetinės indukcijos sritį, todėl juos veikiančios jėgos ir inkaro sukimo momentas mažėja. Kai inkaras pasisuka 90° kampu, laidininkai atsiranda geometrinėje neutralėje. Tuo momentu $B=0$, todėl išnyksta juos veikiančios jėgos. Inkaras toliau sukasi iš inercijos. Kartu su inkaru sukasi ir kolektorius.



10.3 pav. Nuolatinės srovės mašinos sandaros schema (a), induktooriaus magnetinis poliūs (b) ir magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe (c)



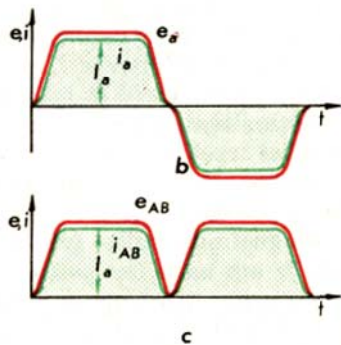
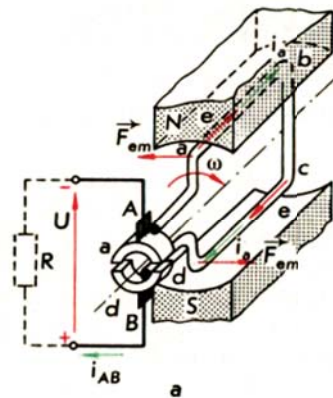
10.4 pav. Variklio modelis veikimo principui aiškinti

Kai tik laidininkas ab patenka į S poliaus sritį, o laidininkas cd į N , a pusziedis yra perjungiamas prie šepetio B , o d pusziedis – prie šepetio A . Inkaru laidininkais srovė teka kryptimi $dcab$, t. y. jos kryptis pasikeičia priešinga buvusiai: $i_a = -I_a$. Pritaikę kairiosios rankos taisyklę, matome, kad pusziedžių ir kontaktinių šepetių dėka inkaro laidininkus veikia elektromagnetinės jėgos, kurios sudaro tos pačios krypties sukimo momentą.

Tuo būdu nuolatinės srovės variklyje kolektorius ir šepetiai yra mechaninis nuolatinės srovės krypties keitiklis.

Kad sukimo momento pulsacija būtų mažesnė, inkaro apviją sudaroma iš daugelio tokių rėmelių – sekcijų, kurios yra prijungiamos prie didesnio segmentų skaičiaus nei nagrinėto dviejų pusziedžių kolektoriaus.

Besisukančio inkaro laidininkuose indukuojama EVJ. Nustatę jos kryptį dešiniąja ranka, pastebime, kad EVJ yra priešinga srovės laidininkuose kryptčiai. Tai viena iš labai svarbių variklio ypatybių. Kuo sparčiau inkaras sukasi, tuo didesnė EVJ susikuria jo apvijoje. Tačiau, jeigu inkaro apvijos EVJ išaugtų iki prijungtos įtampos dydžio, tai ja srovė netekėtų ir išnyktų inkaro sukimo momentas. Taigi variklio inkaras gali sukintis tik tuo atveju, jeigu jo apvijoje indukuojama EVJ yra mažesnė už prijungtą įtampą.



10.2.2. Generatoriaus režimas. Tarkime, kad tos pačios mašinos (10.5 pav., a) inkarą sukame pastoviu kampiniu greičiu ω laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi. Kiekviename inkaro laidininke indukuojama EVJ e , kurios kryptis pažymėta, taikant dešinėsios rankos taisyklę. Inkaro apvijoje indukuota EVJ $e_a = 2e = 2lBv$.

Kai inkaro laidininkai atsiranda geometrinėje neutralėje, magnetinė indukcija $B=0$, todėl $e_a=0$. Kai laidininkai pereina į priešingųjų magnetinių polių sritis (ab į S , o cd į N poliaus), EVJ e_a kryptis pasikeičia priešinga. Matome, kad inkaro apvijoje indukuojama kintamoji EVJ, kurios momentinė vertė yra proporcinga magnetinio lauko indukcijai (žr. (10.2) lygybę). Dėl to gauta EVJ e_a kinta tokiu pat dėsniu, koku pasiskirsto magnetinė indukcija oro tarpe tarp polių (žr. 10.3 pav., c ir 10.5 pav., b).

Kartu su inkaru sukasi ir kolektorius. Tuo momentu, kai inkaro laidininkai atsiranda geometrinėje neutralėje, pusziedis a nuo šepetio A yra perjungiamas prie B , o pusziedis d – nuo šepetio B prie A . Tarp šepetių A ir B gaunamos EVJ $e_{AB} = |e_a|$ kryptis dėl perjungimo išlieka tokia pat kaip buvusi iki tol (žr. 10.5 pav., c), nors inkaro apvijos EVJ e_a kryptis pasikeičia. Tarp šepetių A ir B gaunama pulsuojanti EVJ, todėl, prijungus imtuvą R , išorinė grandinė teka taip pat pulsuojanti vienos krypties srovė $i_{AB} = |i_a|$.

10.5 pav. Generatoriaus modelis veikimo principui aiškinti (a), inkaro rėmelio EVJ $e_a(t)$ ir srovės $i_a(t)$ kreivės (b), EVJ tarp šepetių $e_{AB}(t)$ ir apkrovos srovės $i_{AB}(t)$ kreivės (c)

Generatoriuje kolektorius ir šepečiai yra mechaninis kintamosios srovės lygintuvas.

Realaus generatoriaus EVJ pulsacija yra daug mažesnė, nes inkaro apvija yra sudaroma iš daugelio laidininkų, kurie prijungiami prie kolektoriaus, surinkto iš daugelio segmentų.

Tarkime, kad generatoriaus inkaro apviją sudaro du rėmeliai, kurie prijungti prie keturių kolektoriaus segmentų (10.6 pav.). Rėmeliuose indukuojamos dvi kintamosios EVJ, kurių kreivės formos yra vienodos, bet jos skiriasi faze. Jei šepečiai būtų prijungti prie pirmojo rėmelio, tarp jų būtų EVJ $e_1(t)$, jei prie antrojo, $-e_2(t)$. Iš tiesų, kolektoriui sukantis, šepečiai pakaitomis prijungiami tai prie pirmojo, tai prie antrojo rėmelio, todėl generatoriaus šepečių EVJ e_{AB} palyginti nedaug pulsuoja.

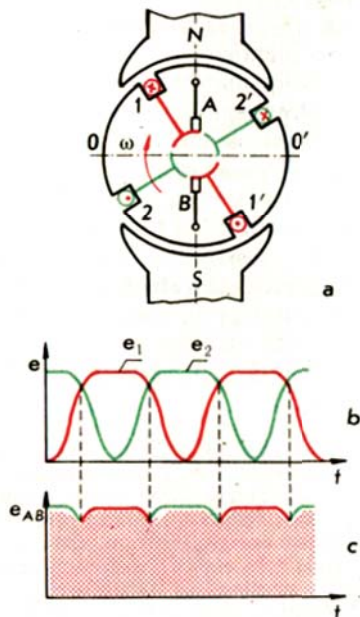
Praktiškai nuolatinės srovės mašinų kolektoriaus segmentų esti gana daug (nuo keliolikos iki keliasdešimt), o inkaro apvija sudaroma iš daug laidininkų, sujungtų tam tikra tvarka. Dėl to galime laikyti, kad EVJ pulsacijos nėra.

Kai prie generatoriaus yra prijungtas imtuvas, išorine grandine ir inkaro laidininkais teka srovė (žr. 10.5 pav.). Kadangi laidininkai yra magnetiniame lauke, juos veikia elektromagnetinės jėgos \vec{F}_{em} , kurių kryptis nusakoma kairiosios rankos taisykle. Ją pritaikę pastebime, kad \vec{F}_{em} kryptis yra priešinga rėmelio sukimo krypčiai. Šios jėgos kuria momentą, priešingą inkarą sukančiam momentui M .

Kuo didesnė srovė teka imtuvu, t. y. kuo didesnė jo galia $P = UI_a$, tuo didesnės inkarą stabdančios elektromagnetinės jėgos $F_{em} = IBI_a$. Tai reiškia, kad kuo didesnės galios imtuvas yra prijungtas prie generatoriaus, tuo didesnė galia jį turi sukti variklis ($P = \omega M$), kad būtų $\omega = \text{const}$.

10.2.3. EVJ ir mechaninis momentas. Nuolatinės srovės mašinos (ir variklio, ir generatoriaus) inkaro viename laidininke indukuota vidutinė EVJ apskaičiuojama iš (10.2) lygybės: $\bar{E} = I\bar{B}v$, čia \bar{B} – vidutinė magnetinė indukcija ties vienu mašinos poliumi. Kiekvienos mašinos \bar{B} yra proporcinga poliaus magnetiniam srautui Φ , o linijinis inkaro laidininkų judėjimo greitis v yra proporcingas inkaro sūkių dažniui n ($v = \pi Dn$, čia D – inkaro skersmuo). Pakeitę \bar{B} ir v jiems proporcingais dydžiais, o visus pastovius koeficientus, priklausančius nuo mašinos konstrukcinių ypatybių, pažymėję C_E , galime parašyti nuolatinės srovės mašinos EVJ:

$$E = C_E \Phi n; \quad (10.3)$$



10.6 pav. Generatoriaus inkaras su keturiais kolektoriaus segmentais (a), abiejų rėmelių išlygintos EVJ $e_1(t)$ bei $e_2(t)$ (b) ir EVJ tarp šepečių $e_{AB}(t)$ kreivė (c)

čia C_E – kiekvienai nuolatinės srovės mašinai pastovus koeficientas.

Kaip matėme, **kiekvienos elektros mašinos inkarą veikia elektromagnetinis momentas**, kurį sudaro jo laidininkus veikiančios elektromagnetinės jėgos (10.7 pav.). **Variklio sukimo momentas M_{em} suka jo inkarą** ir darbo mašiną *Mec*, kuri sudaro varikliui pasipriešinimo momentą M_s . Kai elektros mašina dirba kaip variklis, $M_{em} \geq M_s$ ir variklio bei darbo mašinos sukimosi kryptis yra tokia pat kaip M_{em} .

Generatoriaus elektromagnetinis momentas M_{em} sudaro pasipriešinimą jo inkarą sukiančio variklio sukimo momentui M . Kai elektros mašina dirba kaip generatorius, $M_{em} \leq M$ ir M_{em} kryptis yra priešinga jos inkaro sukimo krypčiai.

Jei variklio M_{em} sumažėtų tiek, kad būtų $M_{em} < M_s$, pasikeistų variklio ir darbo mašinos sukimosi kryptis. Variklis taptų generatoriumi, stabdančiu darbo mašinos judėjimą. Kai kuriais atvejais variklis yra specialiai pervedamas į generatoriaus režimą ne tam, kad gamintų elektros energiją, bet tam, kad sukurtų stabdymo momentą. Bendruoju atveju toks elektros mašinos darbo režimas, kai ji sukuria momentą M_{em} , priešingą jos inkaro sukimosi krypčiai, yra vadinamas stabdymo režimu.

Variklio sukimo momentas bei generatoriaus stabdymo elektromagnetinis momentas yra proporcingas inkaro laidininkus veikiančiai vidutinei elektromagnetinei jėgai (žr. (10.1) lygybę): $F_{em} = I\bar{B}l_a$. \bar{B} yra proporcinga poliaus srautui Φ , o visus pastovius koeficientus galime pažymėti C_M . Tokiu atveju nuolatinės srovės mašinos **elektromagnetinis momentas M_{em}** (toliau indekso neberašysime):

$$M = C_M \Phi I_a; \quad (10.4)$$

čia C_M kiekvienai mašinai pastovus koeficientas, kurio vertė priklauso nuo mašinos konstrukcijos.

Mašinos elektromagnetinė galia:

$$P_{em} = EI_a. \quad (10.5)$$

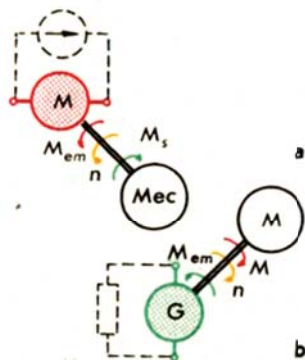
Naudingoji generatoriaus elektrinė galia:

$$P_e = UI_a. \quad (10.6)$$

Naudingoji variklio mechaninė galia*:

$$P_{mec} = \omega M = 2\pi nM. \quad (10.7)$$

* Čia ir tolesnėse formulėse sūkių dažnio n matavimo vienetu laikomas sūkis per sekundę (r/s).



10.7 pav. Mechaninių momentų ir inkaro sukimosi kryptys, kai elektros mašina veikia variklio (a) ir generatoriaus (b) režimu

Naudingoji elektros mašinos galia, kuri nurodoma jos pase ir kataloguose, vadinama vardine galia ir žymima P_N .

10.1 pavyzdys. Nuolatinės srovės variklio pase nurodyta, kad jo vardinė galia yra 0,6 kW, o vardinis sūkių dažnis – 1280 sūkių per minutę. Apskaičiuokime variklio vardinį sukimo momentą.

Sprendimas. Sūkių dažnį perskaičiuokime, kad jis būtų išreiškiamas sūkiams per sekundę: $n_N = 1280/60 = 21,33$ r/s. Iš (10.7) lygybės: $M_N = P_N / (2\pi n_N) = 0,6 \cdot 10^3 / (2\pi \cdot 21,33) = 4,48$ N · m.

10.2.4. Inkarų grandinės atstojamoji schema. Nuolatinės srovės mašinos inkaro apviją vaizduojama kaip elementą, kuriame yra elektrovaros jėga E ir kurio vidinė varža yra R_a (10.8 pav.).

Nuolatinės srovės **variklio inkaro apviją galime laikyti imtuvu**, kuriame yra priešinė EVJ E . Inkarų grandinė teka srovė I_a , kurios kryptis priklauso nuo tinklo įtampos U poliarumo, o **EVJ yra priešingos krypties negu srovė**.

Generatorius dirba šaltinio režimu, jo inkaro grandinėje yra įjungtas imtuvas, kurio varža R . Generatoriaus inkaro ir išorinė grandinė teka srovė I_a , kurios kryptis yra tokia pat kaip EVJ.

Pritaikę II Kirchhofo dėsnį inkaro grandinei (žr. 10.8 pav.), galime parašyti

varikliui:

$$U = E + R_a I_a, \quad (10.8)$$

generatoriui:

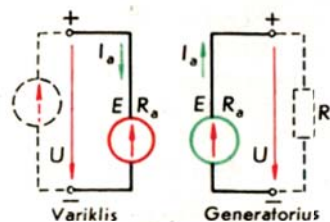
$$U = E - R_a I_a. \quad (10.9)$$

Variklio $U > E$, generatoriaus $U < E$, nes yra įtampos kritimas dėl inkaro apvijos varžos. Praktiškai nuolatinės srovės mašinos vardinė EVJ skiriasi nuo vardinės įtampos apie 5%.

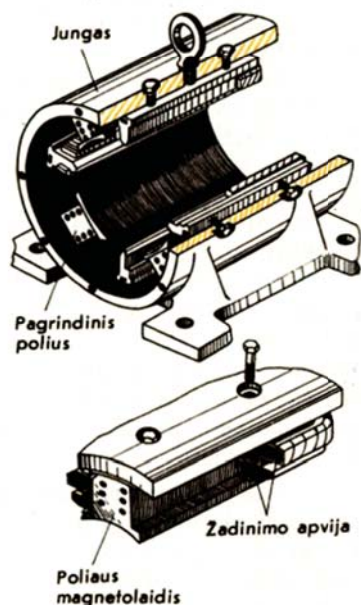
10.3

Nuolatinės srovės mašinos sandara, energijos nuostoliai ir naudingumo koeficientas

10.3.1. Sandara. Mechaniniu požiūriu nuolatinės srovės mašinoje galima išskirti dvi dalis: 1) nejudamąją – statorių ir 2) judamąją – rotorių.



10.8 pav. Variklio ir generatoriaus inkaro atstojamoji schema



10.9 pav. Nuolatinės srovės mašinos statorius ir elektromagnetinis polius

Svarbiausia nuolatinės srovės mašinos statoriaus (10.9 pav.) dalis yra **induktorius**, kuris sukuria mašinos nuolatinį žadinimo magnetinį srautą. Induktorius turi dvi dalis: polių ir jungą, prie kurio pritvirtinami poliai.

Kai mašinos žadinimo srautą sukuria nuolatinio magneto poliai, mašina vadinama **magnetoelektrinio žadinimo**. Kai žadinimo srautą sukuria elektromagnetai, mašina yra **elektromagnetinio žadinimo**. Tokios mašinos poliai surenkami iš elektrotechninio plieno lakštų. Ant jų uždedama varinio ar aliumininio izoliuoto laido **žadinimo apvija**, kuria teka nuolatinė žadinimo srovė.

Paprastai mašinoje esti daugiau negu viena magneto ar elektromagneto **polių pora**. Tokiu atveju **poliai išdėstomi** vidiniu jungo paviršiumi taip, kad ***N* ir *S* poliai eitų pakaitomis**. Elektromagnetinio žadinimo mašinose tai pasiekama, tam tikra tvarka sujungiant žadinimo apvijos dalis. (Kaip žinome, rite tekančios srovės ir jos sukurto magnetinio srauto kryptis nusakoma dešiniojo sraigto taisykle.)

Jungas yra plieninis cilindras. Jis sudaro **elektros mašinos magnetinės grandinės magnetolaidžio dalį**. Nedidelės galios mašinų masyvus jungas kartu yra ir korpusas, prie kurio tvirtinamos kitos nejudamos mašinos dalys.

Nuolatinės srovės mašinos rotorius sudaro **inkaras** ir **kolektorius** (10.10 pav.). **Inkaro magnetolaidis yra cilindras su išilginiais grioveliais**. Jis surenkamas iš dantytų elektrotechninio plieno lakštų, kurių paviršius apdorojamas taip, kad jie būtų **elektriškai izoliuoti vienas nuo kito** (žr. 5.4.4). Tokiu būdu sumažinamos inkaro magnetolaidžio sukurinės srovės. Jos atsiranda dėl to, kad inkaras juda magnetiniame lauke ir jo apvija teka kintamoji srovė. Magnetolaidyje sudaromos aušinimo angos.

Į **inkaro magnetolaidžio išilginius griovelius sudedama varinė izoliuoto laido apvija**. Apvijos dalys (sekcijos) specialia tvarka yra sujungiamos su kolektoriumi. Inkaro apvija sudaro uždarą grandinę. Mašinos inkaro išvadų atžvilgiu visada turime dvi ar daugiau lygiagrečių šakų, kurių skaičius visada esti lyginis.

Kolektorius gaminamas iš varinių segmentų, atskirtų vienas nuo kito izoliacijos sluoksniu. Kadangi praktiškai segmentų yra daug, jų forma plokščia, ir jie paprastai vadinami **plokštelėmis**. Prie kolektoriaus yra **prispaudžiami presuotos anglies, grafito arba jų mišinio** (kartais su vario ar bronzos priemaišomis) **strypeliai, vadinami šepečiais**. Jais sudaromas **kontaktas tarp besisukančio kolektoriaus ir išorinės grandinės**. Šepečiai yra įtvirtinami spyruokliniuose laikikliuose, kurių padėtį paprastai galima reguliuoti. Dėl to šepečius galima kiek pasukti pagal arba prieš kolektoriaus sukimosi kryptį.

Be minėtųjų, elektros mašinose yra dar įvairių bendros



10.10 pav. Nuolatinės srovės mašinos inkaras su kolektoriumi (a), šepečiai ir jų laikikliai (b), inkaro magnetolaidis ir kolektoriaus pjūvis (c), inkaro kilpinės (d) ir banginės (e) apvijų sekcijos su jų schemomis.

paskirties dalių; tai – velenas, guoliai, aušinimo ventiliatorius ir kitos.

10.3.2. Žadinimo būdai ir žadinimo apvijos. Magneto-elektrinio žadinimo mašinos gali būti naudojamos tais atvejais, kai žadinimo magnetinis srautas turi būti pastovus arba jį reguliuoti nereikia. Jos yra ekonomiškesnės (nėra energijos nuostolių žadinimo apvijoje), jų santykinė galia (kW/kg) esti didesnė. Tokios yra gaminamos mažos galios (iki kelių kW) ir dauguma mikromašinų. Pastarosios paprastai naudojamos įvairiuose automatikos įrenginiuose, medicinos aparaturoje, tachometruose.

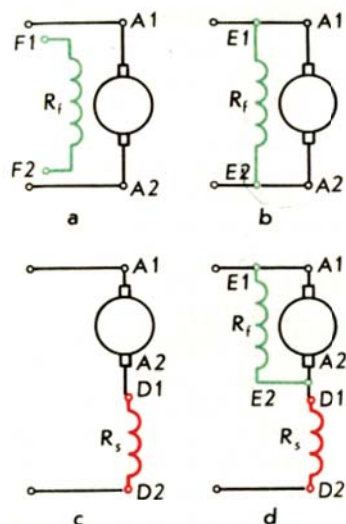
Plačiausiai naudojamos didesnės galios nuolatinės srovės mašinos yra **elektromagnetinio žadinimo**. Jų savybės ir charakteristikos labai priklauso nuo to, kokio tipo žadinimo apvijos yra statoriuje ir kaip jos prijungiamos. Pagal prijungimo būdą **nuolatinės srovės mašinų žadinimo apvijos yra skirstomos į: a) nepriklausomo arba lygiagretaus žadinimo ir b) nuoseklaus žadinimo.**

Apvija, kurios vardinė įtampa yra tokia pat kaip inkaro apvijos vardinė įtampa, yra **jungiamo prie atskiro nuolatinės įtampos šaltinio arba lygiagrečiai inkaro apvijai** (10.11 pav.). **Nepriklausomo** (lygiagretaus) žadinimo apvija teka silpna žadinimo srovė (nuo 0,5 iki 3% inkaro srovės). Dėl to jos laidų skerspjūvis, lyginant su inkaro apvija, yra nedidelis. Kad būtų gauta reikiama MVJ, šios apvijos vijų skaičius esti didelis. Dėl palyginti mažo skerspjūvio ir didelio vijų skaičiaus šios apvijos varža yra daug didesnė už inkaro apvijos varžą.

Nuoseklus žadinimo apvija yra jungiama nuosekliai inkaro apvijai, ja teka inkaro grandinės srovė. Reikiamai MVJ sudaryti pakanka nedidelio žadinimo apvijos vijų skaičiaus. Nuoseklus žadinimo apvijos skerspjūvis yra toks pat, kaip inkaro apvijos, o varža artima inkaro apvijos varžai.

Dažniausiai ant mašinos to paties poliaus uždedama ir nepriklausomo (lygiagretaus), ir nuoseklus žadinimo apvija. Sujungę šias apvijas pagal 10.11 pav., *d*, schemą, turime **mišraus žadinimo mašiną, kurios suminę MVJ sudaro abi apvijos kartu.** Paprastai viena iš šių apvijų sudaro didžiąją dalį visos mašinos MVJ.

Nuolatinės srovės mašinos visų apvijų galai prijungti prie išvadų skydelio gnybtų. Išvadai lotyniškais (senesnių mašinų, pagamintų Tarybų Sąjungoje, – rusiškais) raidėmis sužymėti šitaip: inkaro apvija – $A1-A2$ ($\mathcal{A}1-\mathcal{A}2$); nepriklausomo žadinimo apvija – $F1-F2$ ($H1-H2$); lygiagretaus – $E1-E2$ ($\mathcal{M}1-\mathcal{M}2$) ir nuoseklus – $D1-D2$ ($C1-C2$) žadinimo apvija.



10.11 pav. Nuolatinės srovės mašinos žadinimo būdai: *a* – nepriklausomas; *b* – lygiagretusis; *c* – nuoseklusis; *d* – mišrusis

10.3.3. Energijos nuostoliai ir galios balansas. Kiekvienai elektros mašinai galima sudaryti galios balansą, kuris paprastai grafiškai yra vaizduojamas energetine diagrama (10.12 pav.). **Variklio** elektrinė galia P_e yra imama iš tinklo galia P_1 , iš kurios atėmę elektrinių variklio nuostolių galią P_{de} , gausime variklio elektromagnetinę galią $P_{em} = EI_a$. Iš jos atėmę magnetinių ir mechaninių nuostolių galią P_{dm} ir P_{dmec} , gausime variklio mechaninę galią $P_{mec} = P_2$, kurią variklis suteikia darbo mašinai.

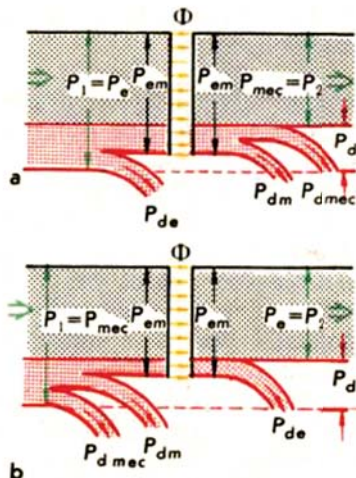
Generatorių sukančio variklio galia $P_1 = P_{mec}$, iš kurios atėmę generatoriaus mechaninių ir magnetinių nuostolių galią P_{dmec} ir P_{dm} , gauname generatoriaus elektromagnetinę galią $P_{em} = EI_a$. Generatorius atiduoda imtuvui elektrinę galią $P_e = P_2$, kuri yra mažesnė už P_{em} , nes generatoriuje yra elektriniai nuostoliai, kurių galia P_{de} .

Kaip matome, **elektros mašinose yra trys nuostolių grupės: mechaniniai, magnetiniai, elektriniai.** **Mechaniniai nuostoliai** gaunami dėl: guolių trinties, šepėčių trinties į kolektorių, aušinimo (oro pasipriešinimo judančioms mašinos dalims ir ventiliatoriui ir pan.). **Mechaniniai nuostoliai** priklauso nuo mašinos inkaro greičio, bet beveik nepriklauso nuo jos apkrovos.

Magnetiniai nuostoliai gaunami dėl histerezės reiškinių (permagnetinimo) ir sūkurinių srovių (žr. 5.4.4). Šie nuostoliai yra proporcingi magnetinei indukcijai kvadratu. Praktiškai galima laikyti, kad jie nuo mašinos apkrovos nepriklauso, kai inkaro greitis kinta mažai.

Elektriniai nuostoliai gaunami, tekant srovei mašinos žadinimo ir inkaro apvijomis, ir yra proporcingi jomis tekančioms srovėms kvadratu. Nepriklausomo ir lygiagreto žadinimo apvijų srovę ir nuostolius galime laikyti pastoviais. **Inkaro ir nuoseklaus žadinimo** apvijomis tekančios srovės stiprėja, didinant mašinos apkrovą, todėl šių **apvijų nuostoliai** labai priklauso nuo mašinos apkrovos.

Kaip matome, visus nuolatinės srovės mašinos nuostolius galima suskirstyti į dvi dalis. Vieni iš jų nepriklauso nuo mašinos apkrovos (jie vadinami pastoviais), o kiti didėja, didinant mašinos apkrovą (jie vadinami kintamaisiais).



10.12 pav. Variklio (a) ir generatoriaus (b) energetinės diagramos

10.3.4. Naudingumo koeficientas. Jis apskaičiuojamas šitaip:

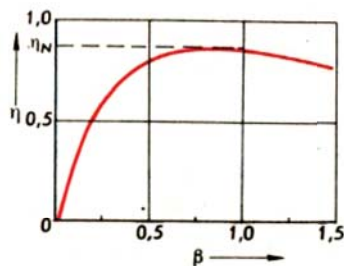
$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_d); \quad (10.10)$$

čia P_2 ir P_1 – mašinos naudinga ir visa galia, P_d – nuostolių galia.

Kai mašinos įtampa ir inkaro greitis yra pastovūs, **naudingumo koeficientas didėja, didinant mašinos ap-**

krovą P_2 (10.13 pav.), kol pasiekia didžiausią vertę. Ji gaunama, esant tokiam apkrovos koeficientui ($\beta \approx 0,75$), kai mašinos kintamieji nuostoliai susilygina su pastoviais. Toliau didinant apkrovą, η šiek tiek mažėja, nes labai padidėja kintamieji nuostoliai. Kaip matome, naudingumo koeficientas pakankamai didelis, kintant apkrovai gana plačiose ribose.

Nuolatinės srovės mašinų vardinis naudingumo koeficientas priklauso nuo jų sandaros ypatumų, tačiau jis tuo didesnis, kuo didesnė mašinos galia. Pavyzdžiui, mikromašinų (iki 0,5 kW) $\eta_N \leq 0,7$, mažos galios mašinų (1,0–10 kW) $\eta_N \approx 0,8$, vidutinės galios (10–100 kW) – $\eta_N \approx 0,85–0,9$, didelės galios (100–1000 kW ir daugiau) – $\eta_N \approx 0,9–0,95$. Lygindami tos pačios galios, bet įvairių greičių mašinas, pamatysime, kad greitaeigių mašinų naudingumo koeficientai yra didesni, jos ekonomiškės.



10.13 pav. Naudingumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos koeficiento $\beta = P_2/P_N$

10.4

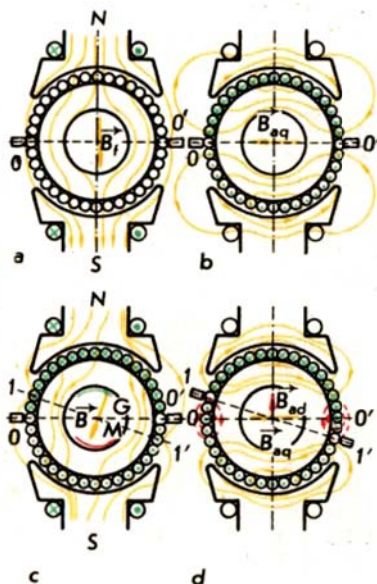
Inkaro reakcijos ir komutacijos reiškiniai

10.4.1. Inkaro reakcija. Tai reiškinys, kuris mašinoje atsiranda dėl inkaro magnetinio srauto įtakos. Jam paaiškinti tarkime, kad mašina yra nepriklausomo žadinimo. Kai inkaro apvija srovė neteka ($I_a = 0$), mašinos magnetinį lauką sukuria tik žadinimo apvija (10.14 pav., a). Toks magnetinis laukas ties poliais yra tolygus, jis yra simetriškas polių ašiai. Tokio mašinos magnetinio lauko indukcija geometrinėje neutralėje yra lygi nuliui.

Tarkime, kad mašinos inkaro apviją sudaro dvi lygiagrečios šakos, kuriose yra po lygiai nuosekliai sujungtų apvijų laidininkų. Kai inkaro apvija teka srovė, ji sukuria inkaro magnetinį lauką. Jei šepėčiai yra geometrinėje neutralėje (žr. 10.14 pav., b), gaunamas toks inkaro magnetinis laukas (jo indukcija – \vec{B}_{aq}), kuris yra vadinamas skersiniu, nes jo ašis yra statmena mašinos polių ašiai. Ties vienu poliaus kraštu žadinimo ir inkaro laukų magnetinės linijos yra tos pačios krypties, o ties kitu – priešingos. Dėl to inkaro magnetinis laukas vieną poliaus kraštą įmagnetina, o kitą – išmagnetina. Kadangi polių plienas paprastai esti arti soties, tose jų vietose, kur magnetinis laukas sustiprėja, indukcija nepadidėja proporcingai veikiančioms MVJ, o šiek tiek mažiau. Tuo tarpu tose polių vietose, kur magnetiniai laukai yra priešingų kryptei, magnetinė indukcija sumažėja pastebimai. Dėl to suminis mašinos magnetinis srautas sumažėja, ir sumažėja inkaro apvijoje indukuota EVJ.

Dėl inkaro reakcijos mašinos magnetinis laukas yra iškreipiamas (žr. 10.14 pav., c). Išveskime plokštumą per taškus, kuriuose mašinos suminio magnetinio lauko indukcija $B = 0$. Šios plokštumos susikirtimo su inkaro paviršiumi linija yra vadinama fizine neutralė. 10.14 pav., c, fizinė neutralė pažymėta tiese 1–1'. Matome, kad fizinė neutralė pasisuka geometrinės atžvilgiu. Kuo stipresnė srovė teka inkaro apvija, tuo didesnis yra inkaro srautas ir tuo didesniu kampu pasisuka fizinė mašinos neutralė.

Nesunku įsitikinti (pritaikius kairės ir dešinės rankos taisykles), kad tuo atveju, kai mašina dirba kaip generatorius, jos fizinė neutralė pasisuka pagal inkaro sukimo kryptį, o kai variklis, – prieš jo sukimosi kryptį.



10.14 pav. Mašinos magnetiniai laukai: a – polių; b – inkaro skersinis; c – suminis, kai veikia skersinė inkaro reakcija ir d – inkaro skersinis bei išilginis

Skersinės inkaro reakcijos įtaką būtų galima šiek tiek susilpninti, stumiant mašinos šepečius fizinės neutralės link, bet tuomet pasireiškia išilginė inkaro reakcija: atsiranda inkaro magnetinis laukas (jo indukcija – \vec{B}_{ad}), kurio linijos yra nukreiptos prieš polių magnetinį lauką ir jį silpnina (žr. 10.14 pav., d).

10.4.2. Komutacija. Inkariui sukantis, jo apvijų kiekviena sekcija yra sujungiami su šepečiu ir perjungiami iš vienos lygiagrečios šakos į kitą (žr. 10.14 pav., b). Perjungimo metu sekcijoje srovės kryptis pasikeičia priešinga.

Tarkime, kad sekcija perjungiamą, kai mašinos šepečiai yra geometrinėje neutralėje (10.15 pav.). Perjungiamoje sekcijoje per laiką, kol šepečys nušluožia nuo pirmosios iki antrosios kolektoriaus plokštelės, srovė turi išnykti, o po to jos kryptis turi pasikeisti priešinga. Taigi per labai trumpą laiką, trunkantį tūkstantąsias sekundes dalis, – komutacijos periodą T – srovė sekcijoje turi pasikeisti nuo vertės „plus“ iki „minus“.

Idealiu atveju, jei inkaro sekcijoje nebūtų indukuojama jokių EVJ, srovė keistųsi tiesiškai (10.16 pav.). Tokia komutacija vadinama tiesine. Esant tiesinei komutacijai, srovės tankis po visu šepečio plotu visą komutacijos periodą yra pastovus. Realiu atveju ji tokia būti negali.

Perjungiant sekciją, joje yra indukuojama saviindukcijos EVJ $e_L = -L di/dt$. Ši EVJ yra gana didelė, nes a) inkaro apvija yra feromagnetinėje aplinkoje, todėl sekcijos induktyvumas yra nemažas (žr. 5.4.1); b) srovė turi pasikeisti labai staiga.

Be to, sekcija judėdama komutacijos metu kerta inkaro skersinio magnetinio lauko jėgų linijas, todėl joje dar yra indukuojama EVJ e_{aq} , kuri proporcinga inkaro skersiniam magnetiniam srautui Φ_{aq} ir sekcijos judėjimo greičiui: $e_{aq} = d\Phi_{aq}/dt$.

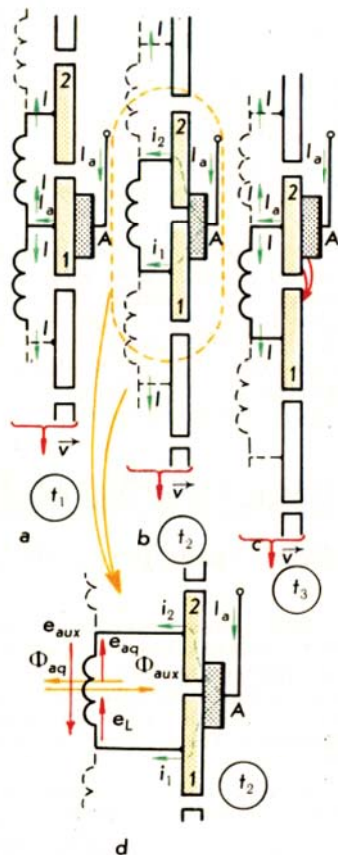
Abi EVJ (e_L ir e_{aq}) trukdo keistis sekcijos srovei, bet per komutacijos periodą T srovė neišvengiamai pasikeičia priešinga. Dėl to srovė pradžioje kinta lėčiau, ir tik vėliau jos kitimas paspartėja (žr. 10.16 pav., 2 kreivę). Tokia komutacija yra vadinama vėlyvąja. Tuomet srovės tankis kolektoriaus plokštelės krašte, nubėgančiame nuo šepečio, labai padidėja. Kolektoriaus ir šepečio kraštai įkaista, gali imti kibirkščiuoti.

Komutacijai pagerinti reikia, kad perjunginėjamoje sekcijoje atsirastų EVJ e_{aux} , kuri būtų priešingos krypties ir panaikintų e_L ir e_{aq} . Tam reikalingas pagalbinis magnetinis laukas, kurį judėdama kirstų perjunginėjamoji inkaro sekcija. Kai $e_{aux} - e_L - e_{aq} > 0$, gaunama ankstyvoji komutacija (žr. 10.16 pav., 3 kreivę). Paprastai nuolatinės srovės mašinos gaminamos tokios, kad komutacija būtų tiesinė arba šiek tiek paankstinta.

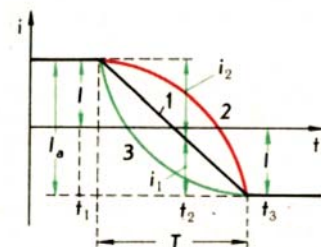
10.4.3. Pagalbiniai poliai. Jie įrengiami mašinos komutacijai pagerinti ir sumažinti inkaro reakcijai. Pagalbiniai poliai įtaisomi mašinos statoriuje taip, kad jų magnetinio lauko ašis būtų mašinos geometrinėje neutralėje (10.17 pav.). Jų apvija sujungiamą nuosekliai su inkaro apvija ir taip, kad pagalbinių polių apvijų magnetinis srautas Φ_{aux} būtų priešingas inkaro skersiniam magnetiniam srautui Φ_{aq} .

Didėjant mašinos apkrovai, didėja inkaro srautas Φ_{aq} . Kadangi pagalbinių polių apvija teka inkaro apvijų srovė, tai didėja ir magnetinis srautas Φ_{aux} , kuris silpnina inkaro srautą Φ_{aq} . Kaip matome, pagalbinių polių srautas kinta, keičiantis apkrovai, todėl automatiškai yra susilpninama nuo apkrovos priklausanti inkaro reakcija komutuojamos sekcijos zonoje.

Pagalbiniai poliai įrengiami nuo 0,3 kW galios mašinose. Jų apvijų išvadai yra žymimi raidėmis B1–B2 (arba $\overline{B1}$ – $\overline{B2}$).



10.15 pav. Inkaro sekcija iki komutacijos (a), sujungta šepečiu (b), po komutacijos (c), sekcijos kontūro EVJ komutacijos metu (d)

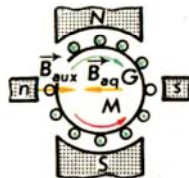


10.16 pav. Srovės inkaro sekcijoje kitimas tiesinės (1), vėlyvosios (2) ir ankstyvosios (3) komutacijos metu

Mažos galios mašinose, kuriuose nėra pagalbinių polių, komutacijai pagerinti sudaromos sąlygos, kad komutacijos metu sekcija patektų į zoną, kurioje magnetinė indukcija lygi nuliui. Tuo tikslu šepečiai turi būti fiziniėje neutralėje. Tai tikslinga daryti tik tokioms mašinoms, kurių apgrova yra pastovi ir sukimosi kryptis nekeičiama. Priešingu atveju, mašinai dirbant, fizinės neutralės padėtis kinta.

10.4.4. Kibirkščiaavimas. Tai toks reiškinys, kai tarp kolektoriaus ir šepečių atsiranda kibirkštis ir lankinis išlydis. Kibirkščiaavimo priežastys gali būti mechaninės ir elektromagnetinės. Mechaninės priežastys – tai tokios, kai kibirkščiaavimas atsiranda dėl nepakankamai gero kontakto tarp šepečių ir kolektoriaus: nelygus kolektoriaus paviršius, blogai prišlifuoti, neteisingai pritvirtinti ar vibruojantys šepečiai ir pan. Svarbiausia elektromagnetinė kibirkščiaavimo priežastis yra vėlyvoji komutacija.

Dėl kibirkščiaavimo kolektorius ir šepečiai apdega, jų paviršius darosi nelygus, dėl to slankaus kontakto varža dar padidėja. Visiškai išvengti kibirkščiaavimo praktiškai neįmanoma. Norint jį susilpninti, stengiamasi pašalinti mechanines jo priežastis ir pagerinti komutaciją.



10.17 pav. Nuolatinės srovės mašina su pagalbiniais statoriaus poliiais

10.5

Variklių bendrosios savybės

10.5.1. Paleidimas ir reversavimas. Paleidimas yra pereinamasis režimas, kurio metu nesisukančio variklio inkaro ir žadinimo apvijai paduodama įtampa. Inkaras pradeda sukintis ir įsisuka iki tam tikro sūkių dažnio.

Inkaro apvija tekanti srovė (žr. (10.8) ir (10.3) lygtis):

$$I_a = (U - E) / R_a = (U - C_E \Phi n) / R_a. \quad (10.11)$$

Pirmuoju paleidimo momentu $n=0$, todėl $E=0$ ir inkaro apvijos srovė didžiausia. Tai variklio paleidimo srovė

$$I_k = U / R_a. \quad (10.12)$$

Nedidelės galios (iki kelių šimtų vatų) mašinų inkaro apvijos varža yra nemaža, todėl jų paleidimo srovė nedaug didesnė už vardinę: $I_k \leq (4-6)I_N$. Kadangi jų paleidimas paprastai trunka ne ilgiau kaip 1–2 sekundes, tokius variklius galima jungti į tinklą tiesiogiai.

Didesnės galios mašinų inkaro apvijos varža paprastai esti palyginti maža, todėl paleidimo srovė $I_k = (10-50)I_N$. Tokia srovė gali pakenkti variklio inkaro apvijoms, gali apdegti kolektorius ir šepečiai; ji pavojinga ir tinklui. Dėl to paleidimo srovę reikia silpninti.

Dažniausiai paleidimo srovę silpninama, įjungiant nuosekliai su inkaro apvija paleidimo reostatą. Tuomet inkaro grandinės srovė:

$$I'_a = (U - E)/(R_a + R) = (U - C_E \Phi n)/(R_a + R); \quad (10.13)$$

čia R – paleidimo reostato varža.

Paleidimo srovė (kai $n=0$):

$$I'_k = U/(R_a + R). \quad (10.14)$$

Paleidimo reostato varža R paprastai parenkama tokia, kad būtų $I'_k = (1,5 - 2,5) I_N$.

Varikliui įsisukant, didėja indukuojama EVJ ($E = C_E \Phi n$), todėl paleidimo reostato varža sklandžiai ar šuoliais mažinama, kol reostatas visai sujungiamas trumpai ($R=0$).

Paleidimo reostatu teka stipri srovė, jame išsiskiria nemažai šilumos. Paprastai paleidimo reostatas skaičiuojamas tokiam trumpalaikiam darbui ir jam tai nėra pavojinga. Variklio normalaus darbo metu paleidimo reostato negalima palikti įjungto viso ar kurioje nors tarpinėje padėtyje. Viena, tai gali pakenkti reostatui, nes per ilgesnį laiką jame gali išsiskirti neleistinai daug šilumos; antra, dėl padidintos inkaro grandinės varžos pasikeičia variklio charakteristikos.

Paleidžiant apkrautą variklį, dažniausiai reikia, kad jo mechaninis momentas būtų pakankamai didelis. Varikliui tenka įveikti ne tik statinį darbo mašinos pasipriešinimo momentą, bet ir dinامينius momentus, atsirandančius dėl išjudinamųjų masių inercijos. Paleidimo momentas (žr. (10.4) lygybę) $M'_k = C_M \cdot \Phi I'_k$. Dėl to stengiamasi pasiekti, kad paleidimo metu variklio žadinimo magnetinis srautas būtų didžiausias. Tam reikia, kad paleidimo metu žadinimo grandinės varža būtų mažiausia.

Reversavimas yra variklio sukimosi krypties pakeitimas. Variklio sukimo momento kryptis priklauso nuo magnetinio lauko ir inkaro laidininkais tekančios srovės krypties (žr. 10.1.1). Kad variklis sukėtųsi priešinga kryptimi, reikia atlikti vieną iš šių veiksmy: 1) pakeisti magnetinio srauto kryptį arba 2) pakeisti inkaro srovės kryptį. Praktiškai tai atliekama šitaip: variklis atjungiamas nuo tinklo; žadinimo arba inkaro apvijos išvadai sukeičiami taip, kad žadinimo arba inkaro apvija tekėtų priešingos krypties srovė; variklis vėl paleidžiamas ir sukasi priešinga kryptimi.

Pakeitus ir žadinimo srauto, ir inkaro apvijos srovės kryptį, variklis ir toliau sukasi ta pačia kryptimi.

10.5.2. Susiregulavimas. Visoms elektros mašinoms būdinga savybė keisti darbo režimą, prisitaikant prie besikeičiančios apkrovos, t.y. susireguliuoti. Tarkime, kad variklis suka darbo mašiną, kurios statinis pasipriešinimo momentas M_s dėl kokių nors priežasčių padidėja. Jis pasidaro didesnis už variklio sukimo momentą $M_s > M$, todėl varik-

lio (ir darbo mašinos) sūkių dažnis sumažėja. Tuo pačiu mažėja variklio inkaro apvijoje indukuojama $E = C_E \Phi n$ (laikome, kad $\Phi = \text{const}$). Variklio inkaro apvijos srovė $I_a = (U - E) / R_a$, todėl ji sustiprėja, dėl to padidėja variklio sukimo momentas $M = C_M \Phi I_a$. Šis procesas vyksta tol, kol sūkių dažnis nustoja mažėti, t.y. kol naujasis variklio sukimo momentas susilygina su padidėjusiu pasipriešinimo momentu.

Čia aprašytą susiregulavimo procesą galime užrašyti tokia dydžių logine seka:

$$M_s \uparrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow E \downarrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow M \uparrow (M = M_s).$$

Kaip matome, padidinus variklio apkrovą, variklis darbo mašinai atiduoda daugiau mechaninės energijos. Dėl to jis ima iš tinklo daugiau elektros energijos, nei padidėja jo galia $P = UI_a$. Sumažinus variklio apkrovą, vyksta panašus susiregulavimo procesas, kurio metu variklio momentas sumažėja.

10.5.3. Samprata apie greičio reguliavimą. Įrašę į (10.9) lygtį EVJ (10.3) išraišką, galime parašyti, kad variklio sūkių dažnis

$$n = \frac{U - R_a I_a}{C_E \Phi}. \quad (10.15)$$

Sujungę nuosekliai su inkaro apvija specialų reguliavimo reostatą, kurio varža lygi $R_{r,a}$, gausime:

$$n = \frac{U - (R_a + R_{r,a}) I_a}{C_E \Phi}. \quad (10.16)$$

Kaip matome, yra trys variklio greičio (sūkių dažnio) reguliavimo būdai, keičiant: 1) magnetinį srautą Φ ; 2) inkaro grandinės reguliavimo reostato varžą $R_{r,a}$; 3) inkaro apvijos įtampą.

Kalbėdami apie greičio reguliavimą, laikysime, kad keičiamas tik vienas iš minėtų trijų dydžių, o kiti du lieka pastovūs. Reguluoti greitį, keičiant srovę I_a , negalima, nes ji susireguluoja priklausomai nuo to; koks turi būti variklio sukimo momentas. Panagrinėkime kiekvieną iš minėtų būdų.

1. Variklio pagrindinį magnetinį srautą sukuria žadinimo srovė. Tekant vardinei žadinimo srovei, mašinos magnetinė grandinė yra arti magnetinės soties. Dėl to dar stiprinant žadinimo srovę, magnetinis srautas lieka artimas vardiniam ir beveik nebedidėja. Tuo būdu žadinimo srovę, taigi ir magnetinį srautą, tikslinga tik silpninti. Laikydami, kad $R_{r,a} = 0$, iš (10.15) lygties matome, kad, mažindami

žadinimo srautą, variklio greitį galime didinti. 10.18 pav. parodyta variklio žadinimo magnetinio srauto ir tuščiosios eigos sūkių dažnio n_0 priklausomybė nuo žadinimo srovės. $n_0 = f(I_f)$ vadinama **reguliavimo charakteristika**.

Šis būdas labai paprastas, variklio greitis keičiamas sklandžiai, reostatu mažinant žadinimo srovę. Kadangi žadinimo galia maža, tai nuostoliai reguliavimo reostate nedideli, o variklio naudingumo koeficientas išlieka didelis, todėl šis būdas yra ekonomiškąs.

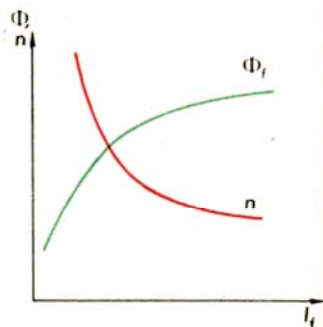
Didžiausią leistinąjį variklio greitį apriboja mašinos mechaninis atsparumas ir pablogėjusi komutacija (padidėja šepėčių ir kolektoriaus vibracija, sustiprėja inkaro reakcija).

2. Didinami reguliavimo reostato varžą $R_{r,a}$ nuo vertės $R_{r,a} = 0$, variklio greitį galime mažinti. Kadangi reguliavimo reostatu teka stipri inkaro grandinės srovė, jame gaunami dideli nuostoliai. Pavyzdžiui, sumažinus sūkių dažnį du kartus, reguliavimo reostato nuostolių galia sudaro apie 48% visos inkaro grandinės galios.

Šis būdas paprastas, bet neekonomiškas, todėl taikomas rečiau ir tik nedidelės galios varikliams arba trumpalaikio reguliavimo atveju.

3. Variklio inkaro apvijų įtampa neturėtų būti didesnė už vardinę U_N , todėl ją ir tuo pačiu variklio greitį tikslinga tik mažinti. Šis būdas ekonomiškąs, nes variklio naudingumo koeficientas išlieka didelis. Didžiausias jo trūkumas – reikia turėti reguliuojamos įtampos šaltinį.

Kai reikia gauti platesnį greičio reguliavimo diapazoną, greitis mažinamas, mažinant įtampą, o didinamas – mažinant žadinimo srautą.



10.18 pav. Variklio vėberamperinė – $\Phi = f(I_f)$ – ir reguliavimo – $n = f(I_f)$ – charakteristikos

10.5.4. Mechaninė charakteristika. Mechaninė charakteristika vadinama elektros mašinos sūkių dažnio priklausomybė nuo jos statinio mechaninio momento $n = f(M)$. Laikome, kad kiekvienas charakteristikos taškas apibūdina nusistovėjusį ($n = \text{const}$) darbo režimą, kai dinaminė momentų nėra.

Jei iš (10.4) lygybės išreikšime variklio inkaro apvijų srovę I_a ir įrašysime ją į (10.16) lygybę, gausime šitokią jo mechaninės charakteristikos lygtį:

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_{r,a}}{C_E C_M \Phi^2} M. \quad (10.17)$$

Kai variklis veikia idealia tuščiąja eiga, jo $M = 0$ (nepaisoma trinties, oro pasipriešinimo ir kitų momentų). Variklio tuščiosios eigos sūkių dažnis $n_0 = U / (C_E \Phi)$, t. y. priklauso tik nuo įtampos ir magnetinio srauto.

Kai variklio įtampa ir srautas yra vardiniai – U_N, Φ_N – ir inkaro grandinėje reostatas neįjungtas ($R_{r,a}=0$), variklio mechaninė charakteristika $n=f(M)$ yra vadinama **natūraliąja**. Jeigu inkaro apvijų grandinėje yra dar nuosekliai sujungtų kitų apvijų (pagalbinių polių, nuoseklaus žadinimo), jų varžos yra laikomos inkaro apvijų varža ir įskaitomos į R_a dydį.

Mechaninė charakteristika yra vadinama **dirbtinąja**, kai $U \neq U_N$, arba $\Phi \neq \Phi_N$, arba inkaro $R_{r,a} \neq 0$.

10.6

Skirtingų variklių tipų ypatumai

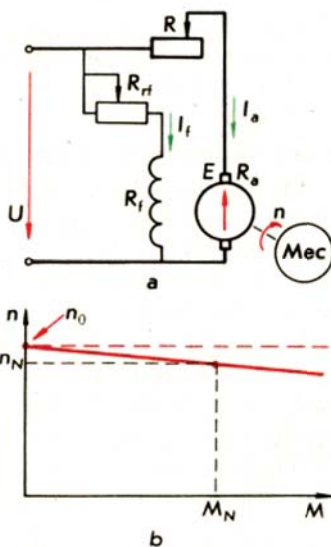
10.6.1. Nepriklausomo ir lygiagreto žadinimo variklis.

Nepriklausomo žadinimo variklio žadinimo ir inkaro grandinės yra prijungiamos prie dviejų atskirų nuolatinės įtampos šaltinių. Svarbiausias tokio variklio pranašumas yra tas, kad jo inkaro įtampą galima reguliuoti, nekeičiant magnetinio srauto. Antra vertus, kai žadinimo ir inkaro apvijų įtampos yra vardinės, nepriklausomo žadinimo variklio savybės ir natūralioji charakteristika yra tokios pat kaip lygiagreto žadinimo variklio.

Lygiagreto žadinimo variklis yra praktiškai naudojamas žymiai plačiau, nes jam pakanka vieno nuolatinės įtampos šaltinio, prie kurio lygiagrečiai prijungiamos žadinimo ir inkaro apvijų grandinės (10.19 pav.). Inkaro grandinėje yra **įjungtas reostatas R paleidimo srovei mažinti**, kurio varža paleidimo metu turi būti didžiausia. Varikliui veikiant, $R=0$. Žadinimo grandinėje yra **įjungtas reguliavimo reostatas $R_{r,f}$, kuriuo reguliuojama žadinimo srovė** (magnetinis srautas). Variklį paleidžiant, nustatoma $R_{r,f}=0$, kad žadinimo srautas Φ_f ir paleidimo momentas būtų didžiausi.

Šiam varikliui būdinga tai, kad jo žadinimo srautas Φ_f yra pastovus, jei $U = \text{const}$ ir nekeičiama žadinimo grandinės varža: $I_f = U / (R_f + R_{r,f})$. Varikliui normaliai veikiant, $U = U_N, \Phi_f = \Phi_{fN}$ ($R_{r,f}=0$), $R_{r,a}=0$. Visi dydžiai, nuo kurių priklauso sūkių dažnis n (žr. (10.17) lygtį), išskyrus argumentą M , yra pastovūs. Lygiagreto žadinimo variklio **natūralioji mechaninė charakteristika yra tiesė**. Didinant apkrovos momentą, variklio mechaninis momentas M taip pat didėja, o sūkių dažnis tiesiškai mažėja. Tuščiosios eigos ($M=0$) sūkių dažnis $n_0 = U / (C_E \Phi_f)$. Vardinis sūkių dažnis n_N yra, kai $M = M_N$.

Lygiagreto žadinimo **variklio sūkių dažnis mažai**



10.19 pav. Lygiagreto žadinimo variklio schema (a) ir natūralioji mechaninė charakteristika (b)

priklauso nuo apkrovos (n_N yra 5–10% mažesnis už n_0): jo natūralioji mechaninė charakteristika yra kieta. Kadangi žadinimo ir inkaro grandinės srovės viena nuo kitos nepriklauso, lygiagretaus žadinimo variklio greitį labai patogu reguliuoti, keičiant reostato $R_{r,f}$ varžą.

Kad variklis normaliai veiktų, variklio žadinimo grandinė būtinai turi tekėti srovė. Jei darbo metu žadinimo grandinė nutrūktų, tai gali būti pavojinga varikliui ir jį reikia skubiai atjungti nuo tinklo.

Galimi du pavojingi atvejai.

1. Kai variklis veikia idealia tuščiąja eiga, apkrovos momentas $M_r=0$. Nutrūkus žadinimo grandinei, $I_r=0$, bet $\Phi_r \neq 0$, nes poliuose lieka, nors ir nedidelis, liktinis srautas Φ_r . Variklio sukimo momentas yra labai mažas, bet $M = C_E \Phi_r I_a \neq 0$, todėl $M > M_s$, ir variklis sukasi. Kadangi Φ_r yra labai mažas, variklio $n_0 = U / (C_E \Phi_r)$ yra labai didelis. Praktiškai variklio greitis labai padidėja (žr. 10.18 pav.), o tai jam gali būti pavojinga ir mechaniškai, ir elektriškai (labai pablogėja komutacija).

2. Kai variklis veikia apkrautas, nutrūkus žadinimo grandinei, jo momentas yra labai mažas, todėl $M \ll M_s$. Variklis sustoja ($n=0$). Iš (10.12) matome, kad nesisukančio variklio inkaro apvija teka stipri ir jam pavojinga srovė, kuri lygi paleidimo srovei I_k .

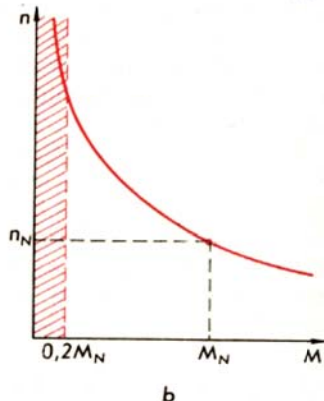
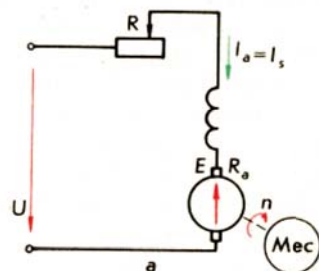
10.6.2. Nuoseklus žadinimo variklis. Šio variklio (10.20 pav.) inkaro ir žadinimo srovė yra ta pati: $I_a = I_s$. Paleidžiant variklį, reostato varža R turi būti didžiausia. Darbo metu $R=0$. **Paleidimo metu žadinimo srautas Φ_s didesnis už vardinį, nes žadinimo apvija teka paleidimo srovė.**

Kai mašinos magnetolaidis neįsotintas, žadinimo srautas yra proporcingas žadinimo apvija tekančiai srovei: $\Phi_s = k I_s = k I_a$. Iš čia $I_a = \Phi_s / k$. Įrašę gautą srovę į (10.4) lygybę, turime: $M = C_M \Phi_s^2 / k$. Iš čia išreiškę Φ_s ir įrašę į (10.17) lygtį, gauname **nuoseklus žadinimo variklio mechaninę charakteristiką:**

$$n = \frac{\sqrt{C_M}}{C_E \sqrt{k}} \cdot \frac{U}{\sqrt{M}} - \frac{R_s + R_{r,a}}{C_E k} \quad (10.18)$$

Iš (10.18) lygties matome, kad natūralioji variklio charakteristika ($U = U_N$; $R_{r,a} = 0$) turėtų būti hiperbolinė funkcija, kurią, pastovius narius pažymėję raidėmis a ir b , galėtume užrašyti šitaip: $n = a / \sqrt{M} - b$. Iš tiesų ji bus šiek tiek kitokia, nes polių plienas įsisotina ir $\Phi_s \approx \text{const}$, kai apkrovos momentas (ir variklio srovė) yra artimas vardiniam. Natūralioji variklio mechaninė charakteristika (žr. 10.20 pav., b) yra **minkšta, nes sūkių dažnis labai priklauso nuo apkrovos.**

Nuoseklus žadinimo variklis negali veikti neapkrautas: kai $M \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$. Pavyzdžiui, darbo mašinos su juo negali-



10.20 pav. Nuoseklus žadinimo variklio schema (a) ir natūralioji mechaninė charakteristika (b)

ma jungti diržu, nes diržas gali praslysti, nutrūkti ar nukristi. Variklio apkrovos momentas turi būti $M_s \geq (0,2 - 0,25)M_N$.

Kadangi variklio mechaninis momentas $M \sim I_a$, o paleidimo metu $I_a = (1,25 - 2)I_N$, tai nuoseklaus žadinimo variklis turi didelį paleidimo momentą (lyginant su lygiagretaus žadinimo varikliu). Kadangi jo mechaninė charakteristika minkšta, tai jam nepavojingi dideli apkrovos momento pokyčiai. Dėl šių savybių nuoseklaus žadinimo varikliai plačiai naudojami elektrinio transporto ir kėlimo mašinose.

Reguluoti nuoseklaus žadinimo variklių greitį yra sudėtingiau.

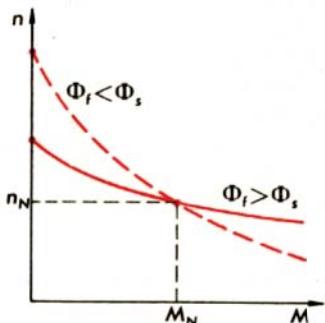
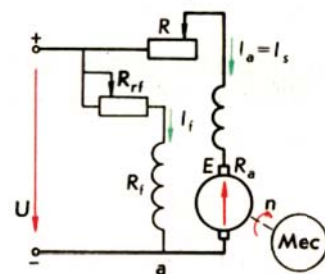
10.6.3. Mišraus žadinimo variklis. Šio variklio (10.21 pav.) savybės ir mechaninės charakteristikos yra tarpinės, lyginant jas su lygiagretaus ir nuoseklaus žadinimo varikliu. Dažniausiai jo žadinimo apvijų sujungiamos taip, kad žadinimo srautai Φ_f ir Φ_s būtų tos pačios krypties. Viena iš apvijų paprastai sudaro ~70% visos žadinimo MVJ.

Kai pagrindinė yra lygiagretaus žadinimo apvija (žr. 10.21 pav., b, ištininė kreivė), mechaninė charakteristika yra kietesnė. Kai pagrindinė – nuoseklaus žadinimo apvija (brūkšninė kreivė), mechaninė charakteristika yra minkšta, bet variklis gali veikti neapkrautas, nes yra lygiagretaus žadinimo apvija. Tuščiosios eigos metu $I_a = I_s \approx 0$, $\Phi_s \approx 0$, bet $\Phi_f \neq 0$, todėl sukčių dažnis $n_0 = U / (C_E \Phi_f)$.

Mišraus žadinimo varikliai turi didelius paleidimo momentus, nes paleidimo metu padidėja žadinimo srautas Φ_s . Jie naudojami valcavimo staklunuose, spaustuvės įrengimuose, keltuvuose. Jų greitis paprastai reguliuojamas kaip ir lygiagretaus žadinimo varikliu. Pastaruoju metu juos pradėta taikyti elektriniame transporte, nes juos paprasčiau naudoti generatorinio stabdymo režimu (žr. 13.5).

10.6.4. Universalūs kolektoriniai varikliai. Nuolatinės srovės varikliai turi praktiniam taikymui vertingų savybių: galima paprastai, sklandžiai ir ekonomiškai reguliuoti jų greitį, sudaryti reikiamo pobūdžio (minkštas ar kietas) mechanines charakteristikas. Antra vertus, pramonei visa elektros energija tiekama trifazės srovės tinklais, todėl nuolatinės srovės varikliams maitinti reikia įrengti specialius kintamosios srovės lygintuvus. Jų įrengimui ir eksploatacijai reikalingos papildomos išlaidos, todėl naudoti nuolatinės srovės variklius yra brangiau.

Kaip žinome (žr. 10.1.1. ir 10.4.1.), nuolatinės srovės variklis nekeičia sukimo momento krypties, jei tuo pat metu pakeičiame jo srovės ir magnetinio srauto kryptį. Jei prijungtume variklį prie kintamosios srovės tinklo, vieną pusperiodį inkaro ir žadinimo ap-



b

10.21 pav. Mišraus žadinimo variklio schema (a) ir natūraliosios mechaninės charakteristikos (b)

vija srovė tekėtų viena kryptimi, o kitą pusperiodį – priešinga. Variklio inkarą veiktu dvigubu tinklo dažniu pulsuojantis sukimo momentas. Dėl inercijos inkaro greitis yra pastovus, o variklio sukimo momentas lygus vidutinei pulsuojančio momento vertei. Kolektorinio variklio sandara yra šiek tiek kitokia nei nuolatinės srovės variklio. Kadangi jo žadinimo apvija teka kintamoji srovė, sukūrinėms srovėms mažinti statoriaus magnetolaidis surenkamas iš izoliuotų elektrotechninio plieno lakštų. Komutacijai pagerinti ir inkaro reakcijai susilpninti kolektoriniams varikliams įtaisoma pagalbinė polių apvija, kuri kartu su žadinimo apvija sudeda į cilindrinio statoriaus išilginius griovelius. Tokį neryškiapolį statorių turi dauguma šiuolaikinių kolektorinių variklių. Komutacijai pagerinti inkaro apvija yra daroma iš didesnės sekcijų, o kolektorius – iš didesnės plokštelių skaičiaus. Ir nors taikomos visos minėtos priemonės, kintamosios srovės kolektorinių variklių komutacija yra blogesnė už nuolatinės srovės variklių.

Gaminami universalūs kolektoriniai varikliai, kurie gali būti jungiami ir į nuolatinės, ir į kintamosios įtampos tinklą. Paprastai jie būna nuoseklus žadinimo (lygiagretaus žadinimo kolektorinių variklių vidutinis mechaninis momentas yra mažesnis). Jų mechaninės charakteristikos yra minkštos.

Mažos galios ($P_N \leq 0,5$ kW) vienfaziai kolektoriniai varikliai pramonėje ir buityje naudojami tais atvejais, kai sūkių dažnis turi būti didelis ($n = 5000 - 30000$ r/min) ar jį reikia reguliuoti: rankiniai metalo apdirbimo įrankiai, šlifavimo staklės, dulkių siurbiai, siuvimo mašinos. Didelės galios varikliai (iki 300–1000 kW) naudojami elektriniame kintamosios srovės transporte (užsienyje yra aukštes įtampos (15–25 kV) ir žemo dažnio (16–25 Hz) elektrinių traukinių varikliai).

10.7

Generatorių ypatybės ir charakteristikos

Pagal žadinimo būdą elektromagnetinius nuolatinės srovės generatorius galima suskirstyti į dvi grupes.

Nepriklausomo žadinimo generatoriaus žadinimo apvijai elektros energiją tiekia kitas nuolatinės srovės šaltinis. Tokio generatoriaus žadinimo srovė nepriklauso nuo jo apkrovos.

Savojo žadinimo generatoriaus žadinimo apvija paprastai gauna elektros energiją iš jo paties inkaro apvijos. Tokio – susižadinančio – generatoriaus žadinimo srovė daugiau arba mažiau priklauso nuo jo apkrovos. Savojo žadinimo generatoriai gali būti lygiagretaus, nuoseklus arba mišraus žadinimo.

10.7.1. Svarbiausios charakteristikos. Generatorius galima apibūdinti trimis pagrindinėmis charakteristikomis. Visos jos nagrinėjamos, laikant, kad variklis suka generatoriaus inkarą vardinu sūkių dažniu $n = n_N = \text{const}$.

1. Tuščiosios eigos (vidinė) charakteristika yra generatoriaus EVJ priklausomybė nuo jo žadinimo srovės – $E =$

$=f(I_f)$. Kadangi $I_a=0$, tai generatoriaus tuščiosios eigos įtampa yra lygi EVJ: $U_0=E-R_a I_a=E$.

Prisiminę, kad $E \sim \Phi$ (žr. (10.3)), matome, kad tuščiosios eigos charakteristika yra tokio pat pobūdžio kaip ir generatoriaus magnetinės grandinės vėberamperinė charakteristika $\Phi_f=f(I_f)$.

2. Išorinė charakteristika yra generatoriaus įtampos priklausomybė nuo apkrovos srovės – $U=f(I)$, kai žadinimo grandinės reguliavimo reostato varža $R_{rf}=\text{const}$. Nuo šios charakteristikos pobūdžio priklauso, kokie imtuvai gali būti jungiami ir kaip plačiai generatorius taikytinas praktikoje.

3. Reguliavimo charakteristika yra generatoriaus žadinimo srovės priklausomybė nuo apkrovos srovės $I_f=f(I)$, kai $U=\text{const}$. Ji rodo, kaip reikia keisti žadinimo srovę, kad keičiantis generatoriaus apkrovai, jo įtampa išliktų pastovi.

10.7.2. Nepriklausomo žadinimo generatorius. Tokio generatoriaus (10.22 pav.) žadinimo apvija yra prijungiama prie kito nuolatinės įtampos šaltinio (gali būti lygintuvas, akumuliatorius ar kitas generatorius). Laikoma, kad $U_f=\text{const}$, todėl generatoriaus žadinimo srovė (taikome Omo dėsnį): $I_f=U_f/(R_f+R_{rf})$. Ji paprastai sudaro 1–3% inkaro srovės, kuri yra ir apkrovos srovė: $I_a=I$. Kaip matome, žadinimo srovė ir srautas nuo generatoriaus apkrovos nepriklauso.

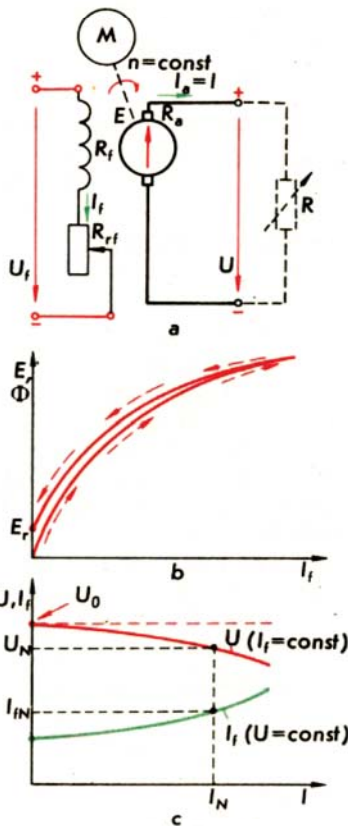
Tuščiosios eigos charakteristika $E=f(I_f)$ gaunama, keičiant reguliavimo reostato varžą R_{rf} nuo didžiausios (žadinimo grandinė atjungta, $R_{rf}=\infty$) iki mažiausios ($R_{rf}=0$). Iš esmės $E=f(I_f)$ kreivė yra generatoriaus magnetinės grandinės histerzės kilpos $\Phi_f=f(I_f)$ dalis. Toliau ją vaizduosime tik viena kreive.

Paprastai, kai $I_f=0$, generatoriaus EVJ sudaro 2–3% vardinės E_N vertės dėl statoriaus liktinės magnetinės indukcijos. Vardinės EVJ ir I_{fN} vertės konstruojant mašiną parenkamos tokios, kad vardinio taško koordinatės būtų jau užlinkusioje $E=f(I_f)$ dalyje. Dėl to atsitiktiniai nedideli žadinimo srovės pokyčiai EVJ pakeičia nedaug, bet dar galima ją reguliuoti, keičiant žadinimo srovę.

Išorinė charakteristika $U=f(I)$ gaunama, didinant apkrovos srovę, kai $R_{rf}=\text{const}$. Generatoriaus įtampa:

$$U=E-R_a I_a=E-R_a I=C_E \Phi n-R_a I. \quad (10.19)$$

Didinant apkrovą, EVJ šiek tiek mažėja dėl inkaro reakcijos, todėl $U=f(I)$ ne visai tiesinė (žr. 10.22 pav., c). Kaip



10.22 pav. Nepriklausomo žadinimo generatoriaus schema (a), tuščiosios eigos (b), išorinė ir reguliavimo charakteristikos (c)

matome, **svarbiausia įtampos mažėjimo priežastis yra ta, kad gaunamas įtampos kritimas inkare.**

Paprastai generatorių santykinis vardinis įtampos pokytis yra apskaičiuojamas šitaip:

$$\Delta U_{N*} = (U_0 - U_N) / U_N. \quad (10.20)$$

Padauginę gautą santykį iš šimto, turėsime ΔU_{N*} procentais. Nepriklausomo žadinimo generatorių $\Delta U_{N*} = (5 - 15)\%$.

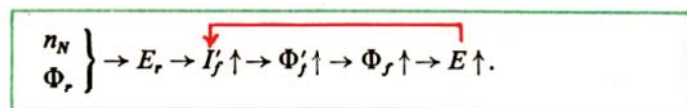
Reguliavimo charakteristika $I_f = f(I)$ (žr. 10.22 pav., d) taip pat yra beveik tiesė, kol mašinos magnetolaidis neįsotintas. Kai, **didėjant generatoriaus apkrovai, įtampa mažėja** (žr. (10.19) lygtį), **reikia didinti žadinimo srovę, tuo pačiu srautą ir EVJ, kad įtampa nesikeistų.**

Kaip matome iš charakteristikų, keičiant nepriklausomo žadinimo generatoriaus apkrovą, jo santykinis įtampos pokytis yra nedidelis. Jei imtuvams tokie įtampos pokyčiai yra per dideli, tenka ją reguliuoti, automatiškai keičiant žadinimo srovę.

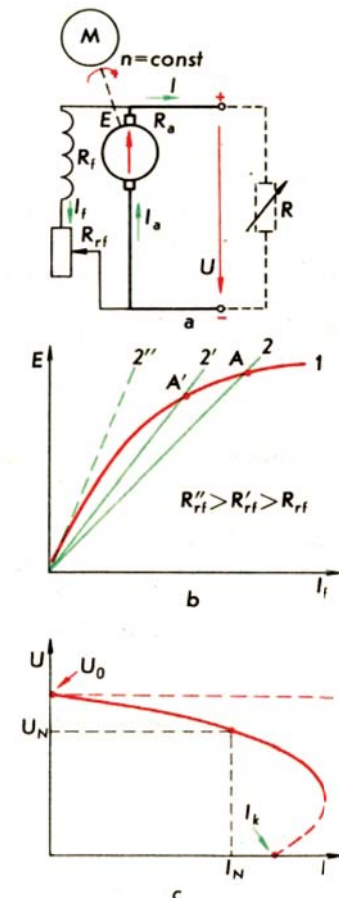
10.7.3. Lygiagretaus žadinimo generatorius. Prijungę nepriklausomo žadinimo generatoriaus žadinimo apviją lygiagrečiai jo inkaro apvijai, turėsime lygiagretaus žadinimo generatorių (10.23 pav.). Tai savojo žadinimo generatorius, kurio gaminamos elektros energijos dalis yra suvartojama magnetiniam laukui sukurti.

Išnagrinėsime generatoriaus susižadinimą jo tuščiosios eigos metu (imtuvus atjungtas). Pradėjus inkarą sukuti, jo žadinimo apvija srovė neteka, nes įtampos tarp jo gnybtų nėra. Kadangi statoriaus poliuose paprastai visada yra **liktinis magnetinis laukas, sukamo inkaro apvijoje yra indukuojama nedidelė (ji sudaro (1-3)% vardinės vertės) liktinė EVJ: $E_r = C_E \Phi_r n$.** Dėl to uždara inkaro ir žadinimo grandine teka nedidelė žadinimo srovė $I_f' = E_r / (R_a + R_f + R_{r,f})$, kuri **sukuria nedidelį žadinimo srautą Φ_f' .** Pastarasis **sustiprina mašinos polių srautą, todėl padidėja EVJ.** Dėl to žadinimo srovė sustiprėja, sukurdamą didesnę žadinimo srautą.

Susižadinimo procesą galima trumpiau užrašyti šitaip:



Generatoriui susižadinus, automatiškai nusistovi tam tikra EVJ vertė. Ją galima aprašyti dviem lygtimis: 1) tuščiosios eigos charakteristika; 2) voltamperinė charakteristika, taikant Omo dėsnį inkaro – žadinimo grandinei:



10.23 pav. Lygiagretaus žadinimo generatoriaus schema (a), tuščiosios eigos (b) ir išorinė charakteristika (c)

$$(1) E = f(I_f),$$

$$(2) E = (R_a + R_f + R_r) I_f. \quad (10.21)$$

Šios lygčių sistemos sprendiniai yra jų sankirtos koordinatės (žr. 10.23 pav., b): automatiškai nusistovėjusios E ir I_f vertės. Kuo didesnė reguliavimo varža R_{rf} , tuo didesnis (2) tiesės kampas su abscise, tuo mažesnė susižadinusio generatoriaus EVJ. Jei žadinimo grandinės varža yra didesnė už tam tikrą vertę, vadinamą krizine, tiesė (žr. 10.23 pav., b, 2'' tiesė) su tuščiosios eigos charakteristika nesusikerta. Tokiu atveju generatorius nesusižadina, t. y. jo EVJ išlieka lygi liktinei E_r .

Kaip matome, generatoriaus susižadinimui yra būtinos trys sąlygos: 1) poliuose turi būti liktinis magnetinis laukas; 2) žadinimo srovės kryptis turi būti tokia, kad žadinimo ir liktinio srauto kryptys sutaptų; 3) žadinimo grandinės varža turi būti mažesnė už krizinę. Jei žadinimo grandinės varža mažesnė už krizinę, bet generatorius nesusižadina, dažniausiai yra nepatenkinta antroji sąlyga. Tam, kad generatorius susižadintų, reikia sukeisti jo žadinimo apvijos išvadus, t. y. pakeisti žadinimo srovės (ir srauto) kryptį.

Lygiagretaus žadinimo generatoriaus įtampa labiau mažėja, didinant jo apkrovą (žr. 10.23 pav., c), nei nepriklausomo žadinimo generatoriaus. Tai suprantama, nes be anksčiau minėtų dviejų priežasčių (inkaro reakcijos ir įtampos kritimo inkare) yra dar trečia labai svarbi įtampos mažėjimo priežastis. Mažėjant įtampai dėl inkaro reakcijos ir įtampos kritimo inkare, mažėja generatoriaus žadinimo srovė: $I_f = U / (R_f + R_{rf})$. Generatoriaus apkrovą didinant iki vardinės, įtampos pokytis $\Delta U_{n*} = (10-20)\%$.

Praktiškai patogų prijungti generatoriaus žadinimo apviją lygiagrečiai, nes tada nereikia specialaus nuolatinės įtampos šaltinio jai maitinti. Antra vertus, jei norime, kad imtuvai gautų pastovią įtampą, reikia, kad generatoriaus apkrova beveik nekistų, arba specialiai reguliuoti žadinimo srovę.

10.7.4. Nuoseklaus žadinimo generatorius. Jo inkaro, žadinimo apvija (10.24 pav.) ir apkrova teka ta pati srovė: $I_a = I_s = I$. Kai generatorius neapkrautas, $I = 0$, todėl jo EVJ lygi liktinei $E_r = U_0$. Šio generatoriaus savybės apibūdinamos tik viena – išorine charakteristika.

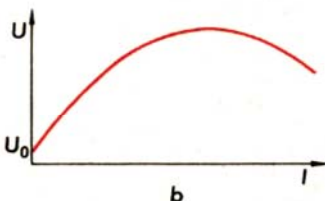
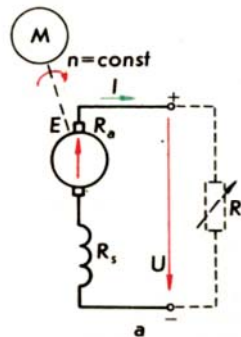
Didinant generatoriaus apkrovą, didėja jo srovė ir magnetinis srautas. Pradžioje jo įtampa didėja (žr. (10.19) lygtį), nes sparčiai didėja EVJ. Kai apkrova tampa artima vardinai, magnetinė grandinė įsisiotina, EVJ beveik nebedidėja, todėl dėl įtampos kritimo inkare generatoriaus įtampa šiek tiek sumažėja.

Dėl to, kad įtampa labai priklauso nuo apkrovos, nuoseklaus žadinimo generatoriai plačiai nenaudojami.

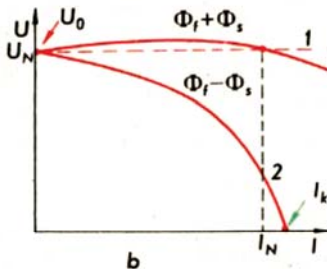
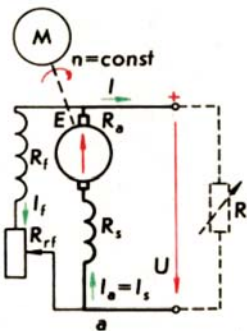
10.7.5. Mišraus žadinimo generatorius. Dvi jo žadinimo apvijos (10.25 pav.) gali būti sujungtos taip, kad magnetiniai srautai būtų: 1) tos pačios krypties arba 2) priešingi vienas kitam.

Tuščiosios eigos metu nuoseklaus žadinimo apvija teka labai silpna srovė ($I_f \ll I$), todėl generatorius susižadina taip pat kaip lygiagretaus žadinimo. Jo tuščiosios eigos charakteristika – praktiškai tokia pat.

1. Tarkime, kad generatoriaus apvijos sujungtos suderintai, t. y. taip, kad srautai vienas kitą stiprintų. Didėjant apkrovai, mažėja lygiagretaus žadinimo srovė I_f , bet didėja nuoseklaus – I_s , todėl generatoriaus srautas ne tik nemažėja, bet dar šiek tiek didėja. Kol apkrova nedidelė ir įtampos kritimas inkare palyginti mažas (žr. (10.19) lygtį), generatoriaus įtampa šiek tiek didėja (žr. 10.25 pav., b, 1 kreivė). Toliau didinant apkrovą, įtampa šiek tiek sumažėja.



10.24 pav. Nuoseklaus žadinimo generatoriaus schema (a) ir išorinė charakteristika (b)



10.25 pav. Mišraus žadinimo generatoriaus schema (a) ir išorinės charakteristikos (b)

Įtampos pokytis priklauso nuo to, kurią dalį MVJ sukuria lygiagretais ir kurią nuoseklaus žadinimo apvija. Paprastai tas jų MVJ santykis parenkamas toks, kad generatoriaus išorinė charakteristika yra beveik horizontali tiesė. Tokio generatoriaus įtampa beveik nekinta, keičiant apkrovą plačiose ribose, todėl jis yra laikomas geriausiu, kai imtuvai turi gauti pastovią ar labai mažai kintančią įtampą.

2. Kai nuoseklus ir lygiagretais žadinimo apvijų sujungiamos priešpriešais, Φ_r ir Φ_s kryptys yra priešingos, ir generatoriaus įtampa labai priklauso nuo apkrovos (žr. 10.25 pav., b, 2 kreivė). Ją didinant, didėja įtampos kritimas inkare (žr. (10.19) lygtį), magnetinis srautas staiga mažėja: dėl mažėjančios įtampos mažėja žadinimo srovė I_r ir srautas Φ_r , o nuoseklaus žadinimo apvijų srautas didėja, bet jis generatorių išmagnetina. Netgi trumpojo jungimo režimas, kai imtuvo $R=0$, generatoriui nėra labai pavojingas ($I_k \approx I_N$), nes magnetinis srautas $\Phi_r \approx 0$, o Φ_s nėra didelis.

Tokia staigiai mažėjanči $U=f(I)$ kai kuriais atvejais yra reikalinga. Pavyzdžiui, taip yra sujungiamos elektrinio lankinio suvirinimo generatorių žadinimo apvijų. Suvirinimo pradžioje elektrodai sujungiami trumpai, todėl generatorius turi dirbti trumpojo jungimo režimu. Elektrodus atitolinus, tarp jų atsiranda lankinis išlydis, kuriam stabilizuoti reikia, kad generatoriaus $U=f(I)$ būtų staiga mažėjanti (žr. 6.7.1 ir 9.5.1). Toks generatorius taip pat tinka tiekti energiją specialių elektros pavarų varikliams, kurie gali būti netikėtai ir staiga perkraunami. Pavyzdžiui, ekskavatoriaus kaušo mechanizmo pavara netikėtai perkrauta turi sustoti. Tarkime, kad pavara yra nuolatinės srovės ir jos variklis yra prijungtas prie mišraus žadinimo generatoriaus, turinčio staiga mažėjančią $U=f(I)$. Užstrigus kaušui grunte, variklis sustoja. Nesisukančių varikliu turėtų tekėti stipri (paleidimo) srovė $I_k = U/R_a$. Kadangi generatoriaus įtampa labai sumažėja, tai ši srovė nėra labai stipri ir ji nepavojinga nei varikliui, nei generatoriui.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

10.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- elektros mašina;
- variklis, generatorius;
- induktorius, inkaras, kolektorius;
- inkaro apvija, žadinimo apvija;
- universalus kolektorinis variklis;
- inkaro reakcija, komutacija;
- variklio mechaninė charakteristika;
- generatoriaus išorinė, tuščiosios eigos, reguliavimo charakteristika.

10.2. Kokias elektros mašinos dalis galima išskirti: a – mechaniniu; b – elektrotechniniu požiūriu?

10.3. Kaip sudaroma ir kokia turi būti mašinos magnetinė grandinė?

10.4. Kuo ypatingos ir kur naudojamos nuolatinės srovės mašinos?

10.5. Kokie elektromechaniniai ir elektromagnetiniai reiškiniai vyksta elektros mašinose? Kuo jie pasireiškia?

10.6. Kaip apskaičiuoti laidininką veikiančią elektromagnetinę jėgą? Kokia taisykle naudosis jėgos kryptį nustatyti? Pažymėkite ją brėžinyje.

10.7. Kaip apskaičiuoti indukuotą laidininke EVJ? Kokia taisykle naudosis jos kryptį nustatyti? Pažymėkite EVJ brėžinyje.

10.8. Paašškinkite nuolatinės srovės variklio veikimo principą. Pažymėkite elektromagnetinės jėgos ir EVJ kryptį.

10.9. Kam reikalingas nuolatinės srovės varikliui kolektorius? Ar veiktų variklis, jei vietoje kolektorius būtų žiedai? Kodėl?

10.10. Paašškinkite nuolatinės srovės generatoriaus veikimo principą. Pažymėkite EVJ, srovės ir elektromagnetinės jėgos kryptį. Kaip

veikia inkarą elektromagnetinė jėga? Kaip tas poveikis priklauso nuo apkrovos?

10.11. Kokia nuolatinės srovės generatoriaus kolektorius paskirtis? Kokia srovė teka inkaro apvija ir apkrova? Kokią įtaką įtampos pulsacijai turi kolektorius segmentų skaičius?

10.12. Parašykite inkaro apvijos EVJ ir mašinos elektromagnetinio momento išraiškas. Kaip apskaičiuojama mašinos elektromagnetinė ir naudingoji galia? Kuri iš jų yra vardinė galia?

10.13. Pažymėkite mechaninių momentų ir inkaro sukimo(si) kryptis, kai mašina veikia kaip: a – variklis; b – generatorius.

10.14. Nubraižykite inkaro grandinės atstojamąją schemą ir užrašykite inkaro apvijos įtampos lygtį: a – varikliui; b – generatoriui.

10.15. Paaškindite, kokios dalys sudaro nuolatinės srovės mašiną. Kaip sudarytas induktorius? Kaip sudaromi ir išdėstomi jo poliai? Kodėl inkaro magnetolaidis surenkamas iš lakštų? Kokia yra inkaro apvija? Kaip sudaromas kolektorius ir šepečiai?

10.16. Kokia mašina yra magnetoelektrinio ir kokia – elektromagnetinio žadinimo? Kokios gali būti žadinimo apvijos ir kaip jos jungiamos?

10.17. Kokie yra nuolatinės srovės mašinų energijos nuostoliai ir nuo ko jie priklauso? Nubraižykite energetinę diagramą.

10.18. Kaip priklauso nuolatinės srovės mašinos naudingumo koeficientas nuo apkrovos ir kodėl?

10.19. Koks reiškinys vadinamas inkaro reakcija? Dėl ko jis atsiranda? Kokios jo pasekmės? Ar priklauso inkaro reakcija nuo apkrovos?

10.20. Kokios EVJ indukuojamos inkaro apvijos sekcijoje ją perjungiant? Kokia jų įtaka komutacijai? Kaip galima komutaciją pagerinti?

10.21. Dėl ko kibirkščiuoja nuolatinės srovės mašinos kolektorius ir šepečiai? Kokios to kibirkščiavimo pasekmės? Kaip jį susilpninti?

10.22. Kodėl didelė nuolatinės srovės variklio paleidimo srovė ir kaip ją sumažinti?

10.23. Kaip pakeisti nuolatinės srovės variklio sukimosi kryptį?

10.24. Kaip susireguliuoja nuolatinės srovės variklis kintant apkrovai?

10.25. Kaip galima reguliuoti nuolatinės srovės variklio sukimosi greitį?

10.26. Kokia funkcija yra variklio reguliavimo charakteristika? Nubraižykite ją ir paaškindite.

10.27. Kokia funkcija yra nuolatinės srovės variklio mechaninė charakteristika? Užrašykite ją matematiškai.

10.28. Nubraižykite šių variklių elektrines schemas ir natūraliąsias mechanines charakteristikas: a – nepriklausomo; b – lygiagretaus; c – nuoseklaus; d – mišraus žadinimo. Kuo ypatingas kiekvienas iš jų?

10.29. Kaip sudaryti universalūs kolektoriniai varikliai? Koks jų veikimo principas?

10.30. Kaip susižadina lygiagretaus žadinimo generatorius? Ar jis gali nesusižadinti? Ką reikia padaryti, kad susižadintų?

10.31. Nubraižykite šių generatorių elektrines schemas ir charakteristikas: a – nepriklausomo; b – lygiagretaus; c – nuoseklaus; d – mišraus žadinimo. Kuo ypatingas kiekvienas iš jų?

10.32. Kodėl lygiagretaus žadinimo generatoriaus įtampa labiau priklauso nuo apkrovos negu nepriklausomo žadinimo?