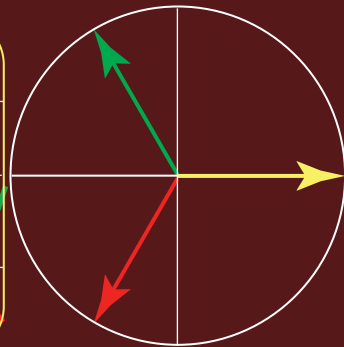
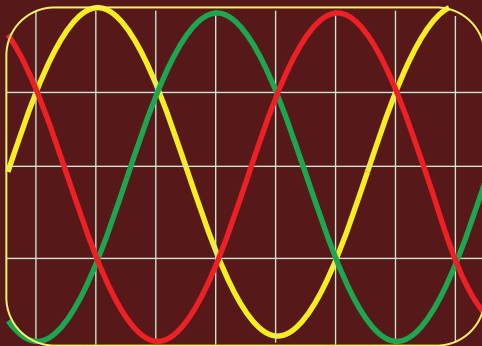
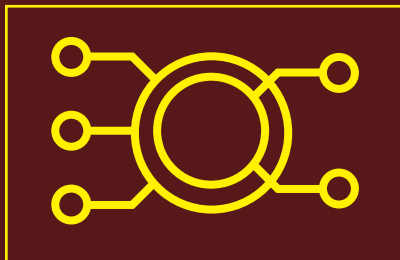


S.Masiokas

# Elektro technika



12



Sinchroninės  
mašinos

VADOVĒLIS  
AUKŠTOSIOMS  
MOKYKLOMS

---

## 12.1. Veikimo principas ir sandara 348

- 12.1.1. Generatoriaus režimas / 348
- 12.1.2. Variklio režimas / 349
- 12.1.3. Sinchroninės mašinos sandara / 349
- 12.1.4. Inkaro reakcija / 351
- 12.1.5. Magnetinių laukų sąveika / 352

---

## 12.2. Inkaro apvijų atstojamoji schema ir mašinos kampinė charakteristika 354

- 12.2.1. Inkaro apvijų varža / 354
- 12.2.2. Inkaro apvijų atstojamoji schema ir vektorinė diagrama / 354
- 12.2.3. Kampinė charakteristika / 355

---

## 12.3. Sinchroninio generatoriaus darbo ypatumai 356

- 12.3.1. Svarbiausios charakteristikos / 356
- 12.3.2. Atskiro generatoriaus darbas / 357
- 12.3.3. Lygiagretus darbas; sinchronizavimas / 357
- 12.3.4. Reaktyviosios galios reguliavimas / 359

---

## 12.4. Sinchroninio variklio darbo ypatumai 360

- 12.4.1. Sukimo momentas ir mechaninė charakteristika / 360
- 12.4.2. Reaktyviosios galios reguliavimas / 360
- 12.4.3. Paleidimas / 361

---

## 12.5. Specialiosios sinchroninės mašinos 362

- 12.5.1. Sinchroninis kompensatorius / 362
- 12.5.2. Mikrovariklis su nuolatiniais magnetais / 363
- 12.5.3. Reaktyvusis mikrovariklis / 363
- 12.5.4. Histerezinis mikrovariklis / 364

---

## Kontroliniai klausimai ir užduotys 364

Sinchroninės mašinos yra tokios kintamosios srovės mašinos, kurių **rotorius sukasi tokia pat kryptimi ir tokiu pačiu greičiu kaip magnetinis laukas, t. y. sinchroniškai**. Kaip ir kitos elektros mašinos, sinchroninės mašinos yra inversinės – jos gali dirbti generatoriaus ir variklio režimu.

Sinchroninės mašinos plačiausiai naudojamos kaip generatoriai. Galingi trifaziai sinchroniniai generatoriai yra visose elektrinėse: šiluminėse ir atominėse – turbogeneratoriai, kuriuos suka garo turbinos; hidroelektrinėse – hidrogeneratoriai, kuriuos suka vandens turbinos. Sinchroniniai varikliai yra naudojami rečiau nei asinchroniniai. Dažniausiai tai aukštos įtampos galingi varikliai, nors pastaruoju laiku plačiau pradėti naudoti ir žemos įtampos mažos bei vidutinės galios sinchroniniai varikliai.

## 12.1

### Veikimo principas ir sandara

Sinchroninės mašinos **induktorius paprastai yra nuolatinis elektromagnetas**. Dažniausiai induktorius yra rotoriuje, o statoriuje yra trifazė inkarų apvija, kurios ritės išdėstomos kaip ir asinchroninėje mašinoje.

**12.1.1. Generatoriaus režimas.** Sukant sinchroninės mašinos (12.1 pav.) **induktorių** pastoviu kampiniu greičiu  $\omega = 2\pi n$ , kiekvienoje inkarų apvijos ritėje indukuojama kintamoji EVJ. Ji yra sinusinė, nes induktoriaus magnetinis laukas sudaromas toks, kad magnetinė indukcija oro tarpe pasiskirstytų sinuso dėsnio. Kadangi visos ritės yra vienodos ir išdėstytos  $120^\circ$  kampais, inkarų apvijoje gaunama simetrinė trifazė EVJ sistema: visos trys EVJ yra vienodų amplitudžių, bet skiriasi  $120^\circ$  faze. EVJ kryptys laidininkuose pažymėtos, taikant dešiniojos rankos taisyklę.

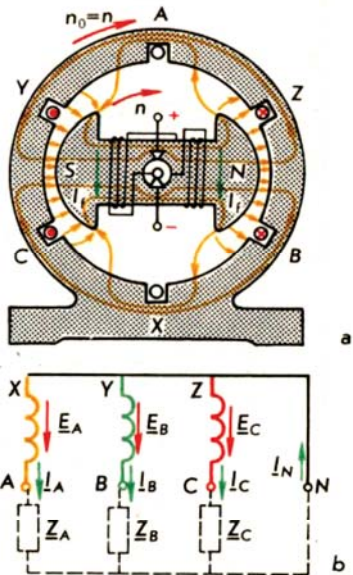
Vienoje inkarų apvijos fazėje indukuotos EVJ efektinė vertė  $E = C_E n \Phi$ ; čia  $C_E$  – tai pačiai mašinai pastovus koeficientas,  $n$  – induktoriaus sūkių dažnis,  $\Phi$  – magnetinis srautas, kertantis apvijos laidininkus. EVJ dažnį galime apskaičiuoti iš (11.6) lygties:

$$f = pn; \quad (12.1)$$

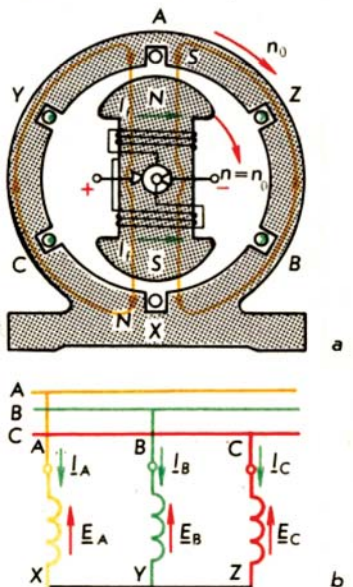
čia  $p$  – induktoriaus polių porų skaičius.

Jei generatoriaus induktorius turi vieną polių porą ( $p = 1$ ), tai pramoniniam 50 Hz EVJ dažniui gauti induktoriaus sūkių dažnis turi būti  $n = 50$  r/s, t. y. 3000 r/min.

Generatoriaus inkarų apvija sujungiama  $\gamma$  arba  $\Delta$  ir



12.1 pav. Sinchroninės mašinos, dirbančios generatoriaus režimu, sandara (a) ir trifazio imtuvo prijungimo prie  $\gamma$  sujungtos inkarų apvijos schema (b)



12.2 pav. Sinchroninės mašinos, dirbančios variklio režimu, sandara (a) ir  $\gamma$  sujungtos inkarų apvijos prijungimo prie trifazio tinklo schema (b)

prie jos prijungiami trifaziai imtuvai. **Apkrauto generatoriaus inkaro apvija teka srovės, kurios sudaro sukamąjį magnetinį lauką** (žr. 11.1.1). Šio lauko sūkių dažnis  $n_0 = f/p$ . Įrašę apvija tekančios srovės dažnį  $f$  iš (12.1) lygybės, turime:

$$n_0 = f/p = n. \quad (12.2)$$

**Induktoriaus ir inkaro magnetiniai laukai sukasi tuo pačiu greičiu – sinchroniškai – ir sudaro bendrą generatoriaus sukamąjį magnetinį lauką.**

**12.1.2. Variklio režimas.** Šiuo atveju sinchroninės mašinos (12.2 pav.) inkaras yra  $\Upsilon$  ar  $\Delta$  prijungiamas prie trifazio tinklo. Kaip ir asinchroninio variklio (žr. 11.1.1), **statoriuje sudaromas sukamasis magnetinis laukas**, kuris sukasi kampiniu greičiu  $\omega_0 = 2\pi n_0$ ; čia  $n_0$  – lauko sūkių dažnis. Tokį inkaro magnetinį lauką galime įsivaizduoti kaip besisukančius polius. **Tarp inkaro ir induktoriaus priešingųjų magnetinių polių susidaro elektromagnetinės traukos jėgos.** Kai jos yra pakankamos, **induktorius sukasi kartu su inkaro magnetiniu lauku.** **Bendrą variklio magnetinį lauką sudaro inkaro ir induktoriaus laukai.**

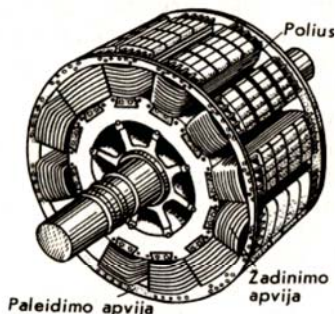
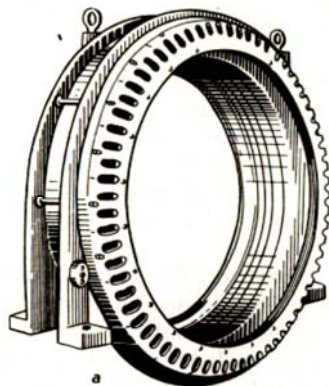
Variklio rotoriaus (induktoriaus) sūkių dažnis yra lygus magnetinio lauko (sinchroniniam) sūkių dažniui (žr. (11.6) lygybę ir 11.1 lentelę):

$$n = n_0 = f/p. \quad (12.2)$$

Esant pramoniniam tinklo įtamos dažniui ( $f = 50$  Hz), didžiausiu greičiu suksis variklis, kurio inkaro apvija sudaro trys ritės. Tokio variklio magnetinis laukas turi vieną polių porą ( $p = 1$ ) ir jo sūkių dažnis  $n_0 = 50$  r/s, t. y. 3000 r/min.

**12.1.3. Sinchroninės mašinos sandara.** Dažniausiai naudojamos trifazės sinchroninės mašinos, kurių inkaro apvija yra statoriuje, o rotoriuje yra induktorius. Tai elektromagnetas, kurio žadinimo apvija per žiedus ir šepėčius prijungiama prie nuolatinės įtamos šaltinio (12.3 pav.). Sinchroninės mašinos, kurių induktorius yra statoriuje, o inkaro apvija – rotoriuje, sutinkamos daug rečiau.

**Statoriaus magnetolaidis surenkamas iš izoliuotų feromagnetinės medžiagos lakštų, o jo išilginiuose grioveliuose sudedama trifazė inkaro apvija.** Toks statorius savo sandara iš principo niekuo nesiskiria nuo asinchroninės mašinos statoriaus (žr. 11.2.3). Galingų aukštos įtamos sinchroninių mašinų statorius turi tam tikrų konstrukcinių ypatumų, nes reikia sudaryti geresnes sąlygas inkaro apvijai aušinti ir pagerinti laidų izoliaciją. **Inkaro apvijos ričių skaičius pa-**



12.3 pav. Sinchroninės mašinos inkaras – statorius (be apvijos) (a), ryškiapolis (b) ir neryškiapolis (c) induktorius – rotorius

renkamas ir jos išdėstomos statoriuje taip, kad inkaro magnetinio lauko polių porų skaičius būtų toks pat kaip ir induktoriaus.

Induktorius gali būti ryškiapolis arba neryškiapolis. **Ryškiapolio induktoriaus-rotoriaus poliai** yra pritvirtinami prie veleno taip, kad susidarytų feromagnetinės medžiagos magnetinė grandinė. Jo žadinimo apvija yra sujungiamas tokiu būdu, kad induktoriaus *N* ir *S* poliai išsidėstytų pakaitomis.

**Neryškiapolis induktorius-rotorius** yra masyvus plieno cilindras, kurio išilginiuose grioveluose yra žadinimo apvija. Jos laidininkai sudedami į griovelius taip, kad, tekant apvija žadinimo srovei, susidaro magnetinių linijų sutankėjimai. Taip sudaromi magnetiniai poliai *N* ir *S*, kurie išsidėsto pakaitomis.

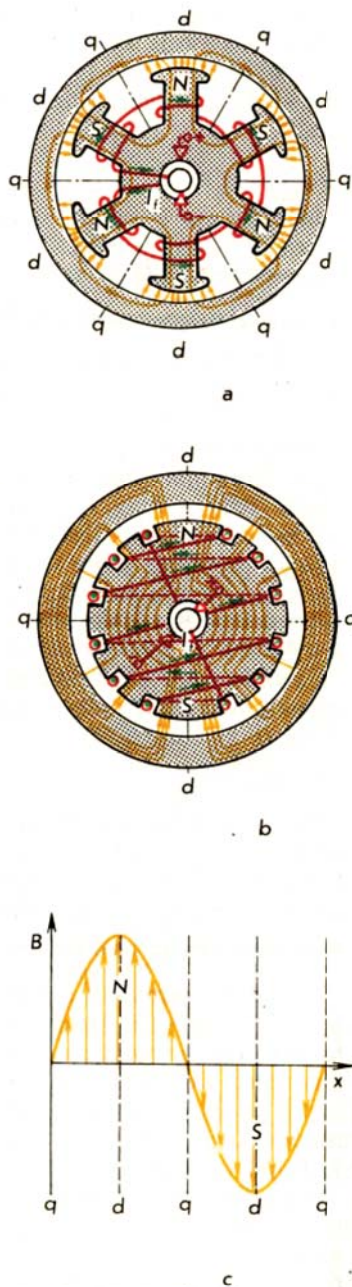
Sinchroninės mašinos gali būti vadinamos ryškiapolėmis arba neryškiapolėmis pagal rotoriaus tipą. Plačiausiai naudojamos **ryškiapolės mašinos** yra **hidrogeneratoriai**. Vandens turbinos juos suka palyginti nedideliu greičiu ( $n_0 = 60 - 500$  r/min). Kad indukuotos EVJ dažnis būtų lygus 50 Hz, hidrogeneratorių magnetinių polių porų skaičius turi būti gana didelis:  $p = 50 - 6$ . Galingų (apie 600 MV·A) generatorių masė esti artima 1700 t. Jų velenas paprastai tiesiogiai sujungiamas su vandens turbina.

**Turbogeneratoriai** yra **neryškiapolės sinchroninės mašinos**. Juos garo turbinos suka dideliu greičiu:  $n_0 = 1500 - 3000$  r/min, todėl turbogeneratorių magnetinis laukas turi dvi arba vieną polių porą. Galingų (1500 MV·A) turbogeneratorių rotorius esti 1,3 m skersmens ir 8 m ilgio. Pažymėtina, kad greitaeigių turbogeneratorių santykinė masė yra mažesnė negu lėtaeigių hidrogeneratorių. Pavyzdžiui, šiuolaikinių vidutinės galios (100–300 MV·A) turbogeneratorių santykinė masė yra 1,1–1,8 kg/kV·A, o panašios galios hidrogeneratorių – 4–10 kg/kV·A.

Prie sinchroninės mašinos rotoriaus veleno pritvirtinami du izoliuoti nuo jo bronziniai kontaktiniai žiedai, sujungti su rotoriaus apvija. Prie jų prispaudžiami angliniai – grafitiniai **šepečiai**, kurių išvadai yra mašinos gnybtų skydelyje.

Sinchroninių mašinų apvijų išvadai žymimi lotyniškais raidėmis ir skaitmenimis šitaip. Inkaro (statoriaus) apvija žymima kaip ir asinchroninių mašinų: ričių pradžios – *U1, V1, W1*; ričių pabaigos – *U2, V2, W2*. Žadinimo apvija žymima  $F_1 - F_2$ . (Senesnių mašinų, pagamintų Tarybų Sąjungoje, apvijos žymimos rusiškais raidėmis ir skaitmenimis atitinkamai: statoriaus apvija – *C1, C2, C3* ir *C4, C5, C6*; žadinimo apvija – *H1 - H2*.)

Galingoms sinchroninėms mašinoms sužadinti yra naudojami nuolatinės srovės generatoriai, vadinami **žadintuvais**. Jų velenas sujungiamas su sinchroninės mašinos vėlu, ir abi mašinos sukasi kartu. Sužadimui reikalinga galia sudaro 2–3% sinchroninės mašinos galios,



12.4 pav. Ryškiapolės (a) bei neryškiapolės (b) mašinų magnetinė grandinė ir sinusinis magnetinės indukcijos pasiskirstymas oro tarpe (c)

todėl galingų sinchroninių mašinų žadintuvai esti taip pat nemažos galios. Vidutinės ir mažos galios sinchroninėms mašinoms sužadinti naudojami trifaziai lygintuvai. Pastaruoju metu taikomos žadinimo sistemos be slankaus kontakto. Jose naudojami du specialūs nedidelės galios sinchroniniai generatoriai ir du trifaziai lygintuvai.

**12.1.4. Inkaro reakcija.** Kai sinchroninė mašina dirba apkrauta, jos inkaro apvija teka srovė, kuri sukuria inkaro magnetinį lauką. Šis laukas vadinamas inkaro reakcijos magnetiniu lauku, o reiškiniai, vykstantys mašinoje jo įtakoje – inkaro reakcija. Inkaro reakcija daro didelę įtaką sinchroninių mašinų savybėms ir charakteristikoms.

Suminį apkrautos sinchroninės mašinos magnetinį lauką sudaro induktoriaus ir inkaro reakcijos magnetiniai laukai. Induktoriaus magnetinis laukas sudaromas toks, kad jo magnetinė indukcija oro tarpe pasiskirstytų sinuso dėsnio. Sujunkime diametraliai priešingus induktoriaus paviršiaus taškus, ties kuriais oro tarpo magnetinė indukcija yra ekstremali (12.4 pav.). Ašys, jungiančios taškus, kuriuose magnetinė indukcija yra didžiausia ( $+B_m$ ;  $-B_m$ ), vadinamos išilginėmis ašimis ir žymimos  $d-d$ . Ašys, jungiančios taškus, kuriuose indukcija yra mažiausia ( $B=0$ ), vadinamos skersinėmis ir žymimos  $q-q$ .

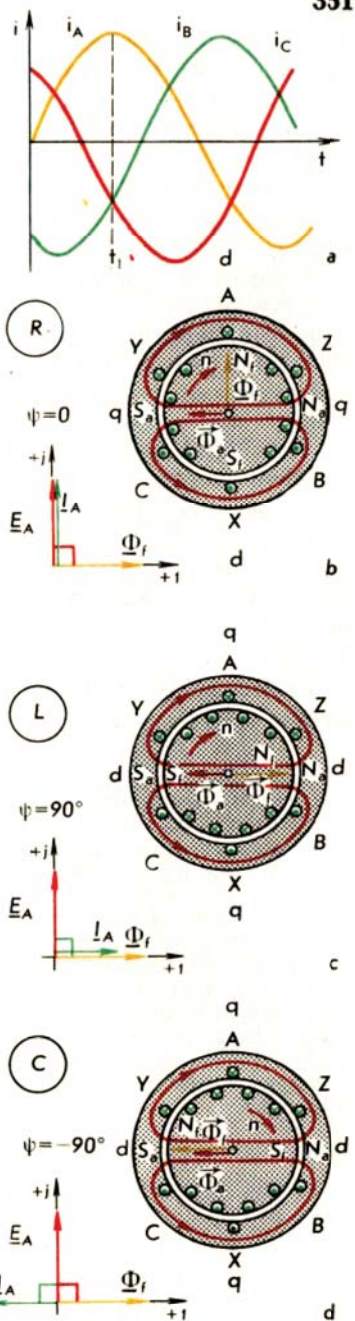
Matome, kad ryškiapolės mašinos oro tarpas išilginės ašies kryptimi yra mažesnis nei skersinės, todėl ir magnetinė varža išilginės ašies kryptimi yra mažesnė. Neryškiapolės mašinos oro tarpas abiejų ašių kryptimi yra vienodas, todėl galime laikyti, kad ir magnetinė varža abiejų ašių kryptimi yra tokia pat.

Inkaro reakcijai paaiškinti pasirinkime vienos polių poros neryškiapolės sinchroninę mašiną (12.5 pav.), dirbančią generatoriaus režimu. Paprastumo dėlei laikysime, kad jos magnetolaidis neįsotintas.

Induktorius sukamas pastoviu greičiu, ir inkaro apvijos ritėse  $A-X$ ,  $B-Y$ ,  $C-Z$  yra indukuojamos EVJ. Kai prie generatoriaus prijungtas simetris imtuvas, inkaro apvija teka vienodų amplitudžių, bet besiskiriančios  $120^\circ$  faze srovės  $i_A$ ,  $i_B$  ir  $i_C$ .

Pavaizduosime mašinos induktoriaus padėtį ir inkaro reakcijos magnetinio lauko linijas laiko momentu  $t_1$ , t.y. kai srovė  $i_A = I_m$  (žr. 12.5 pav., a). Gali būti trys būdingi inkaro reakcijos atvejai.

**1. Inkaro apvijos srovė ir EVJ fazės sutampa:  $\psi = 0$ .** Jei taip, tai laiko momentu  $t_1$  (kai ritėje  $A-X$   $i_A = I_m$ ) EVJ yra taip pat didžiausia:  $e_A = E_m$ . Tai reiškia, kad tuo momentu ritės  $A-X$  laidininkai yra didžiausios magnetinės indukcijos srityje. Taip esti, kai magnetiniai poliai yra ties jais (žr. 12.5 pav., b). Inkaro EVJ (ir srovių) kryptys nustatytos pagal dešinėsios rankos taisyklę. Nubraižę inkaro



12.5 pav. Inkaro apvijos fazių srovės (a), skersinė (b), išilginė išmagnetinanti (c) ir išilginė įmagnetinanti (d) inkaro reakcija

apvijos laidininkus gaubiančias magnetinio lauko linijas, matome, kad **inkaro reakcijos srautas yra skersinėje mašinos ašyje  $q-q$ .**

Tokia inkaro reakcija yra vadinama **skersine**. Sukant induktorių, inkaro reakcijos laukas sukasi sinchroniškai, todėl inkaro reakcijos srauto padėtis induktoriaus atžvilgiu išlieka tokia pat. Jos magnetinis laukas indukuoja nemažas papildomas EVJ inkaro apvijoje.

**2. Inkaro apvijos srovė atsilieka nuo EVJ fazė:  $\psi = 90^\circ$ .** Šiuo atveju srovė  $i_A$  pasiekia amplitudinę vertę ketvirtadaliu periodo vėliau nei  $e_A$ . Per tą laiką induktorius pasisuka  $90^\circ$  kampu jo sukimo kryptimi (žr. 12.5 pav., c). Matome, kad inkaro reakcijos magnetinis srautas yra išilginėje mašinos ašyje  $d-d$  ir priešingas induktoriaus srautui.

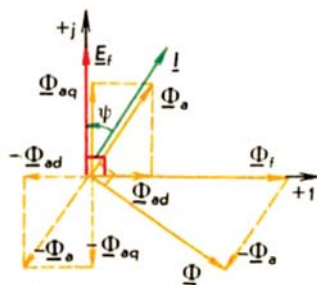
Tai išilginė išmagnetinanti inkaro reakcija. Ji silpnina žadinimo magnetinį lauką.

**3. Inkaro apvijos srovė pralenkia EVJ fazė:  $\psi = -90^\circ$ .** Srovė  $i_A$  pasiekia amplitudinę vertę ketvirtadaliu periodo anksčiau nei  $e_A$ , todėl laiko momentu  $t_1$  induktoriaus padėtis yra tokia, kaip parodyta 12.5 pav., d. Šiuo atveju inkaro reakcijos ir mašinos žadinimo srautai yra tos pačios krypties.

Tai išilginė įmagnetinanti inkaro reakcija. Ji stiprina žadinimo magnetinį lauką.

Matome, kad inkaro apvijos srovė, kurios fazė yra tokia pat kaip EVJ, sudaro skersinę inkaro reakciją. Srovė, kuri skiriasi  $90^\circ$  fazė nuo EVJ, sudaro išilginę inkaro reakciją. **Bendruoju atveju, kai srovės ir EVJ fazių skirtumas yra nelygus nuliui ar  $90^\circ$ , srovė galima išskaidyti į dvi dedamąsias  $I_{sq}$  ir  $I_{sd}$ , sudarančias skersinės ir išilginės inkaro reakcijos magnetinius srautus  $\Phi_{sq}$  ir  $\Phi_{sd}$  (12.6 pav.).** Kai mašinos magneto-laidis yra neįsotintas ir magnetinės grandinės varža išilginės ir skersinės ašies kryptimi yra tokia pat, mašinos inkaro reakcijos srautas  $\Phi_s$  sutampa fazė su inkaro apvijos srove  $I$ .

Prisiminę MVJ pusiausvyros sąlygą (žr. 9.1.3 ir 11.3.4), neįsotintos sinchroninės mašinos (jos MVJ galime laikyti proporcinga magnetiniam srautui) magnetinio srauto vektorių galėsime sudaryti šitaip:  $\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_r - \underline{\Phi}_s$ . Iš vektorinės diagramos taip pat galime įvertinti skersinės ir išilginės inkaro reakcijos srauto įtaką visos mašinos magnetiniam srautui  $\underline{\Phi}$ .



12.6 pav. Inkaro apvijos srovės, EVJ ir inkaro reakcijos magnetinių srautų vektorinė diagrama

**12.1.5. Magnetinių laukų sąveika.** Kaip žinome, sinchroninės mašinos magnetinį lauką sudaro du sukamieji magnetiniai laukai – induktoriaus ir inkaro. Tarkime, kad induktorius yra rotoruje, o inkaras – statoriuje. Jų priešingus magnetinius polių veikia traukos jėgos, todėl jie gali „sukibti“ ir sukrtis kartu sinchroniškai, t.y. tuo pačiu greičiu. Magnetinių laukų sąveiką galime įsivaizduoti M. Faradėjaus pasiūlymu pakeitę magnetines linijas oro tarpe tampriais siūlais – raiščiais (12.7 pav.).

Kai mašina neapkrauta, priešingieji abiejų magnetinių laukų poliai yra mažiausiai nutolę. Statoriaus ir rotoriaus magnetinių laukų išilginės ašys sutampa ir kampas tarp jų  $\Theta = 0$ . Tamprūs siūlai laiko magnetinius laukus taip, kad elektromagnetinės traukos jėgos yra nukreiptos išilginės magnetinių laukų ašies kryptimi. Jos nesudaro jokio elektromagnetinio momento, veikiančio rotorį:  $M_{em} = 0$ .

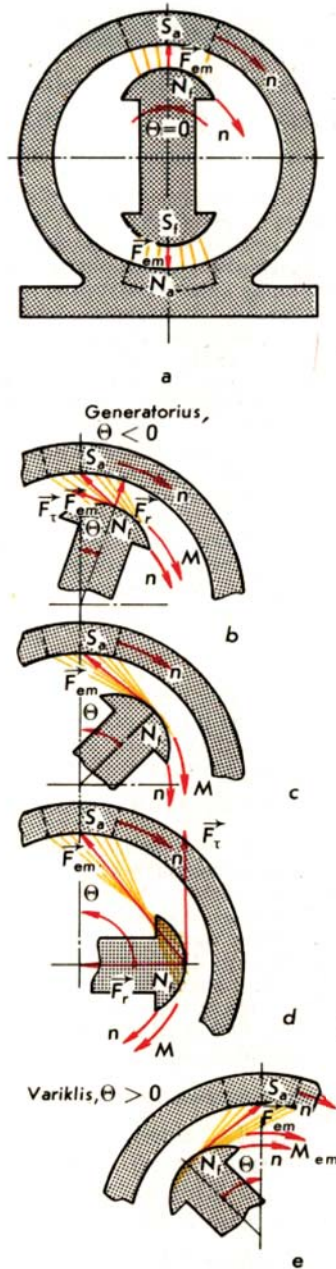
Tarkime, kad mašina dirba aktyviaja arba mišriąja apkrova apkrauto generatoriaus režimu. Šiuo atveju statoriaus magnetinio lauko ašis pasisuka prieš rotoriaus sukimo kryptį. Tarp vienodu greičiu besisukančių magnetinių laukų atsiranda kampas  $\Theta$  (generatoriui jį laikysime neigiamu). Tamprūs siūlai „įsitempia“, bet elektromagnetinės traukos jėgos ir toliau laiko priešinguosius statoriaus ir rotoriaus lauko polius. Jėgą galime išskaidyti į dvi dedamąsias: radialinę  $\vec{F}_r$  ir tangentinę  $\vec{F}_t$ . Tangentinė dedamoji  $\vec{F}_t$  stabdo rotorį. Ji sudaro elektromagnetinį pasipriešinimo momentą  $M_{em}$  generatoriaus rotorį sukančiam varikliui. Kuo didesnė generatoriaus apkrovos aktyvioji galia  $P$ , tuo didesnis kampas  $\Theta$  ir tuo didesnį pasipriešinimo momentą  $M_{em}$  turi įveikti generatoriaus rotorį sukančias variklis, todėl jo galia ( $P = \omega M$ ) turi būti taip pat didesnė.

Kai sinchroninė mašina dirba apkrauto variklio režimu, taip pat gaunamas kampas  $\Theta$  (varikliui jį laikysime teigiamu) tarp magnetinių laukų išilginių ašių. Šiuo atveju rotoriaus magnetinio lauko ašis pasisuka prieš variklio sukimosi kryptį. Tangentinės elektromagnetinių jėgų dedamosios  $\vec{F}_t$  sudaro elektromagnetinį sukimo momentą  $M_{em}$ . Kuo didesnis yra darbo mašinos, kurią varo variklis, pasipriešinimo momentas, tuo didesnis kampas  $\Theta$ . Variklio sukimo momentas yra didesnis ir aktyvioji galia, kurią jis gauna iš tinklo, taip pat turi būti didesnė ( $P = \omega M$ ).

Kai mašina turi daugiau nei vieną polių porą ( $p > 1$ ), geometrinis kampas tarp magnetinių laukų išilginių ašių yra lygus  $\Theta/p$ .

Pažymėtina, kad didinant generatoriaus aktyviają ar variklio mechaninę apkrovą, didėja nuotolis tarp magnetinių laukų priešingųjų polių. Dėl to mažėja juos veikiančių elektromagnetinių jėgų radialinės dedamosios  $\vec{F}_r$ , kurios laiko laukus „sukibusius“. Sinchroninę mašiną neleistinai perkrovis, kampas  $\Theta$  tampa didesnis už krizinę vertę.

Tuomet jėgų radialinės dedamosios  $\vec{F}_r$  esti nepakankamos, kad išlaikytų polių sukibusius. Magnetiniai laukai pradeda sukintis asinchroniškai, mašina desinchronizuojasi, ir ją skubiai reikia atjungti nuo tinklo.



12.7 pav. Magnetinių laukų padėtis ir elektromagnetinės jėgos, kai mašina dirba neapkrauta (a), apkrauto generatoriaus (b, c, d) ir apkrauto variklio (e) režimu



## 12.2

## Inkaro apvijos atstojamoji schema ir mašinos kampinė charakteristika

**12.2.1. Inkaro apvijos varža.** Paprastumo dėlei nagrinėsime neprištiną neryškiapolę mašiną. Kai mašina apkrauta, jos magnetinį lauką sudaro šie magnetiniai laukai: indukatoriaus, inkaro reakcijos ir iki šiol dar neminėtas sklaidos magnetinis laukas. Kiekvieną inkaro apvijos laidininką kerta indukatoriaus sukamasis magnetinis laukas, kurio indukcija  $B_f(t)$  ir magnetinis srautas  $\Phi_f(t)$  kinta sinuso dėsniumi. Dėl to kiekvienoje inkaro apvijos ritėje yra indukuojama sinuso dėsniumi kintanti  $e_f$ , kuri pralenkia magnetinį srautą faze  $\pi/2$ . Nubraižysime inkaro grandinės vektorinę diagramą (12.8 pav.), laikydami, kad inkaro apvijos kiekvienos ritės srovė atsilieka  $\psi$  faze nuo EVJ. Kaip ir asinchroninėms mašinoms, visose vektorinėse diagramose vaizduosime inkaro apvijos tik vienos fazės dydžius.

Tekėdama inkaro apviją, srovė sukuria inkaro reakcijos ir sklaidos magnetinius laukus. Kaip žinome, ir inkaro reakcijos srautas  $\Phi_a$  (pasirinkome neryškiapolę mašiną), ir sklaidos magnetinis srautas  $\Phi_d$  yra tos pačios fazės kaip juos kurianti srovė. Šie magnetiniai srautai kerta inkaro apviją ir indukuoja joje pralenkiančias juos  $\pi/2$  faze elektrovaros jėgas  $E_a$  ir  $E_d$ . Kaip jau esame darę (žr. 9.1.4, 11.3.3), pakeisime šias EVJ įtampų kritimais inkaro induktyviosiose varžose:

$$\underline{E}_a = jX_a I, \quad \underline{E}_d = jX_d I; \quad (12.3)$$

čia  $X_a$  ir  $X_d$  – mašinos inkaro apvijos induktyviosios varžos, atsiradusios dėl inkaro reakcijos ir sklaidos magnetinių laukų.

Matome, kad minėti inkaro laukai jo apvijoje indukuoja EVJ, kurių sumą galime apskaičiuoti šitaip:

$$\underline{E}_a + \underline{E}_d = j(X_a + X_d) I = jX I; \quad (12.4)$$

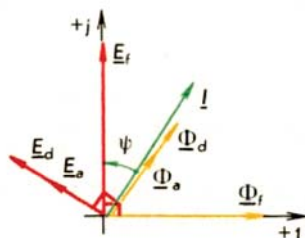
čia  $X = X_a + X_d$  – inkaro apvijos sinchroninė induktyvioji varža,  $jXI$  – kompleksinis įtampos kritimas inkaro apvijoje dėl sinchroninės induktyviosios varžos.

Inkaro apvijos aktyvioji varža yra palyginti nedidelė:  $R \ll X$ . Kai sinchroninė mašina apkrauta vardine apkrova, įtampos kritimas inkaro apvijoje dėl sinchroninės induktyviosios varžos ( $XI$ ) gali sudaryti 20–25% mašinos vardinės fazinės įtampos. Tuo tarpu įtampos kritimas inkaro apvijoje dėl aktyviosios varžos ( $RI$ ) paprastai tesudaro 1–2%. Dėl to inkaro apvijos aktyviosios varžos ir įtampos kritimo dėl jos inkaro apvijoje toliau nepaisysime.

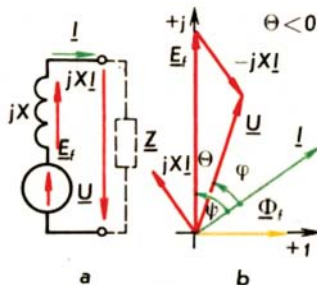
**12.2.2. Inkaro apvijos atstojamoji schema ir vektorinė diagrama.** Atmetę inkaro apvijos aktyviąją varžą ir taikydami II Kirchhofo dėsnį, generatoriaus inkaro apvijos vienai fazei (12.9 pav.) galime parašyti:

$$\underline{U} = \underline{E}_f - jXI. \quad (12.5)$$

Grafiškai generatoriaus inkaro apvijos įtampos vektorių  $\underline{U}$  sudarysime laikydami, kad žadinimo magnetinio srauto  $\underline{\Phi}_f$  pradinė fazė yra lygi nuliui, o inkaro srovė atsilieka  $\psi$  faze nuo inkaro apvijos EVJ  $\underline{E}_f$ . **Fazių skirtumas tarp**



12.8 pav. Sinchroninės mašinos magnetinių srautų ir inkaro apvijos elektrovaros jėgų vektorinė diagrama



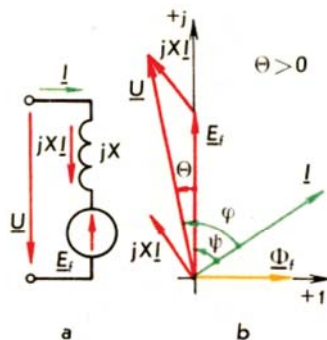
12.9 pav. Generatoriaus inkaro apvijos atstojamoji schema (a) ir vektorinė diagrama (b)

generatoriaus inkaro apvijoj **EVJ ir įtampas yra lygus kampui  $\Theta$** . Matome, kad generatoriaus fazinės įtampos  $\underline{U}$  didumas ir fazė priklauso nuo generatoriaus apkrovos didumo ir pobūdžio.

Sinchroninio variklio inkaro apvijoj vienos fazės atstojamojoje schemoje (12.10 pav.) pavaizduosime šaltinį, kurio EVJ  $\underline{E}_f$  yra nukreipta prieš inkaro apviją tekančią srovę. Pritaikę II Kirchhofo dėsnį užrašome:

$$\underline{U} = \underline{E}_f + jXI. \quad (12.6)$$

Vektorinę diagramą sudarome, pavaizdavę visus (12.6) lygties narius ir atlikę šia lygtimi užrašytą veiksmą grafiškai.



12.10 pav. Variklio inkaro apvijoj atstojamoji schema (a) ir vektorinė diagrama (b)

**12.2.3. Kampinė charakteristika.** Sinchroninės mašinos kampinė charakteristika yra vadinama jos aktyviosios galios arba elektromagnetinio momento priklausomybė nuo kampo  $\Theta$ :  $P = f(\Theta)$  arba  $M = f(\Theta)$ .

Sudarysime ją sinchroniniam generatoriui, nepaisydami generatoriaus nuostolių galios, t. y. laikydami, kad visa trifazio generatoriaus elektromagnetinė galia yra lygi imtuvo aktyviajai galiai:  $P_{em} = P = 3UI \cos \varphi$ ; čia  $U$  ir  $I$  – generatoriaus fazinė įtampa ir srovė. Nubraižysime generatoriaus inkaro apvijoj vektorinę diagramą (12.11 pav.), laikydami, kad generatoriaus įtampos pradinė fazė yra lygi nuliui, ir generatoriaus apkrautas aktyvaus-induktyvaus pobūdžio apkrova ( $\varphi > 0$ ). Generatoriaus inkaro EVJ  $\underline{E}_f = \underline{U} + jXI$ . Žinodami, kad įtampos kritimas inkaro apvijoj dėl sinchroninės induktyviosios varžos pralenkia srovę fase  $\pi/2$ , sudarome  $\underline{E}_f$  vektorių. Iš įtampos vektorių viršūnės išvedame statmenis  $CA$  ir  $CB$  į srovės  $\underline{I}$  bei EVJ  $\underline{E}_f$  vektorių tieses.

Iš stačiųjų  $\triangle OAC$  ir  $\triangle OAD$  statinis  $OA$ :  $U \cos \varphi = E_f \cos \psi$ . Iš stačiųjų  $\triangle BCD$  ir  $\triangle OCB$  statinis  $BC$ :  $XI \cos \psi = U \sin |\Theta|$ . Iš čia  $U \cos \varphi = E_f U \sin |\Theta| / (XI)$ . Įrašę šios lygties dešiniąją pusę į galios išraišką, gauname:  $P = 3(UE_f/X) \sin |\Theta|$ .

Gautą aktyviosios galios išraišką galima taikyti ir sinchroninio variklio naudingajai galiai apskaičiuoti, nepaisant variklio nuostolių galios. Kadangi pasirinkome, jog variklio  $\Theta > 0$ , o generatoriaus  $\Theta < 0$ , mašinos  $P \geq 0$  priklausomai nuo to, koku režimu ji dirba.

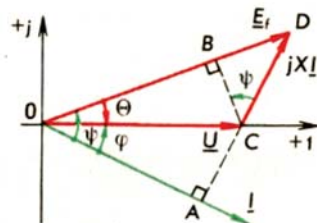
Bendruoju atveju **sinchroninės mašinos aktyvioji galia**

$$P = P_{\max} \sin \Theta; \quad (12.7)$$

čia  $P_{\max} = 3UE_f/X$  – didžiausia tos galios vertė.

Elektromagnetinis generatoriaus pasipriešinimo ar variklio sukimo momentas  $M = P_{em}/\omega$ ; čia  $\omega$  – mašinos rotoriaus kampinis greitis. Prisiminę, kad  $P = P_{em}$  ir įrašę galios vertę iš (12.7) lygties, turime:

$$M = M_{\max} \sin \Theta; \quad (12.8)$$



12.11 pav. Generatoriaus inkaro apvijoj vektorinė diagrama kampinei charakteristikai sudaryti

čia  $M_{\max} = 3UE_f/(\omega X)$  – didžiausio mašinos elektromagnetinio momento vertė.

Kampinė sinchroninės mašinos charakteristika (12.12 pav.) yra sinusinė kampo  $\Theta$  funkcija. Ją galima padalyti į dvi skirtingas dalis: stabilaus darbo sritį –  $0^\circ < |\Theta| < 90^\circ$  ir nestabilaus darbo sritį –  $90^\circ < |\Theta| < 180^\circ$ . Kampas  $|\Theta_c| = 90^\circ$  yra vadinamas kriziniu.

Kai  $|\Theta| < |\Theta_c|$ , padidėjus mašinos apkrovai, didėja kampas  $\Theta$ . Dėl to mašinos aktyvioji galia ir elektromagnetinis momentas taip pat didėja, kol susilygina su apkrovos. Kai  $|\Theta| \geq |\Theta_c|$ , padidėjus apkrovai, kampas  $\Theta$  padidėja, bet mašinos aktyvioji galia sumažėja. Dėl to kampas  $\Theta$  dar labiau padidėja, elektromagnetinės jėgos nebepajėgia išlaikyti sukibusių magnetinių laukų, ir mašina desinchronizuojasi.

Paprastai vardinis kampas  $\Theta_N = 20 - 30^\circ$ . Mašinos perkrovos koeficientas

$$\lambda = M_{\max}/M_N = P_{\max}/P_N. \quad (12.9)$$

Irašę  $P_N = P_{\max} \sin \Theta_N$ , gauname, kad  $\lambda \approx 2,0 - 2,9$ .

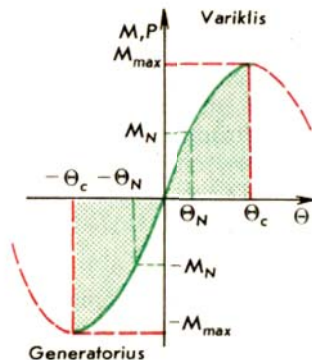
## 12.3

### Sinchroninio generatoriaus darbo ypatumai

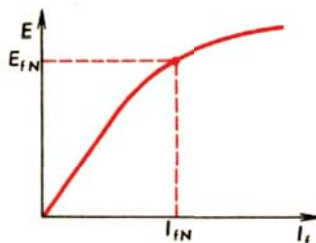
**12.3.1. Svarbiausios charakteristikos.** Kaip ir kitų generatorių, sinchroninio generatoriaus svarbiausios charakteristikos yra trys: **1) tuščiosios eigos** – EVJ priklausomybė nuo žadinimo srovės, kai mašina neapkrovta:  $E_f = f_1(I_f)$ , kai  $I = 0$ ; **2) išorinė** – įtampos priklausomybė nuo apkrovos srovės, kai žadinimo srovė yra pastovi ir apkrovos galios koeficientas nekinta:  $U = f_2(I)$ , kai  $I_f = \text{const}$  ir apkrovos  $\cos \varphi = \text{const}$ ; **3) reguliavimo** – žadinimo srovės priklausomybė nuo apkrovos srovės, kai įtampa palaikoma pastovi ir apkrovos galios koeficientas nekinta:  $I_f = f_3(I)$ , kai  $U = \text{const}$  ir apkrovos  $\cos \varphi = \text{const}$ . Visos charakteristikos sudaromos laikant, kad generatoriaus rotorius yra sukamas greičiu  $\omega = \text{const}$ .

**Tuščiosios eigos charakteristika** (12.13 pav.) yra panaši į generatoriaus magnetolaidžio įmagnetinimo charakteristiką  $\Phi_f = f_1(I_f)$ , nes  $E_f \sim \Phi_f$  ( $E_f = C_E \Phi_f n$ ). Kaip ir daugumai kitų elektros mašinų, vardinė  $E_{fN}$  parenkama tokia, kad jos vertė nelabai priklausytų nuo žadinimo srovės atsiktinių pokyčių, bet dar būtų galima ją reguliuoti, keičiant žadinimo srovę.

**Išorinės charakteristikos pobūdis** priklauso nuo apkrovos didumo



12.12 pav. Kampinė sinchroninės mašinos charakteristika



12.13 pav. Generatoriaus tuščiosios eigos charakteristika

ir pobūdžio. Nubraižysime tris vektorines diagramas (12.14 pav.). Pasirinksimė, kad įtampos  $\underline{U}$  vektorių pradinė fazė yra lygi nuliui, ir sudarysime jos vektorių iš (12.5) lygties:  $\underline{U} = E_f - jX_l I$ . Žinome, kad  $E_f$  pralenkia kampą  $\Theta$  įtampai ir turi būti pastovaus didumo, nes  $I_f = \text{const}$  ir  $n = \text{const}$ . Įtampos kritimas inkaru apvijoje dėl sinchroninės induktyviosios varžos pralenkia fazę  $\pi/2$  srovę.

Matome, kad  $U < E_f$ , kai  $\varphi \geq 0$ , bet gali būti  $U > E_f$ , kai  $\varphi < 0$ . Didėjant apkrovai, didėja inkaru apvijos srovė ir įtampos kritimas inkaru apvijoje dėl jos sinchroninės induktyviosios varžos. Dėl to, esant aktyvaus ar aktyvaus-induktyvaus pobūdžio apkrovai ( $\varphi \geq 0$ ) generatoriaus įtampa mažėja. Esant aktyvaus-talpinio pobūdžio apkrovai ( $\varphi < 0$ ), generatoriaus įtampa didėja (12.15 pav.). Paprastai sinchroniniai generatoriai apskaičiuojami apkrovai, kurios  $\cos \varphi = 0,8$  ir  $\varphi > 0$ . Tuomet santykinis vardinis įtampos pokytis  $\Delta U_{N*} = (\Delta U_N / U_N) \cdot 100$  sudaro 25–35%.

Reguliavimo charakteristika rodo, kaip reikia reguliuoti generatoriaus žadinimo srovę, kintant jo apkrovai, kad įtampa liktų pastovi. Kai įtampa mažėja, reikia žadinimo srovę didinti, t. y. didinti  $E_f = C_E n \Phi_f$ , ir atvirkščiai.

**12.3.2. Atskiro generatoriaus darbas.** Pavieniai sinchroniniai generatoriai paprastai naudojami dviem atvejais: 1) kai imtuvai yra toli nuo energetinės sistemos, pavyzdžiui, tolimose ar laikinosiose gyvenvietėse, statybių ar miško pramonės aikštelėse ir pan.; 2) įvairiose transporto priemonėse.

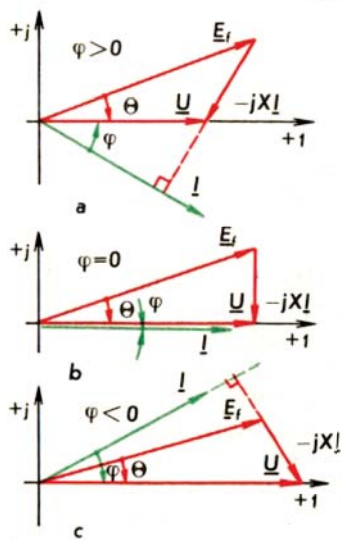
Kai generatorių suka specialiai jam skirtas variklis, sūkių dažnis paprastai palaikomas 3–5% tikslumu, todėl imtuvai gauna praktiškai pastovaus dažnio įtampą. Pažymėtina, kad šis dažnis gali būti ne pramoninis ir dažniausiai esti didesnis. Pavyzdžiui, elektriniai miško pramonės įrankiai yra 200 Hz, lėktuvų įtaisai – 400 Hz, laivų – 427 Hz dažnio.

Kai generatorių suka variklis, kurio sūkių dažnis kinta plačiame diapazone (pavyzdžiui, automobilio), generatoriaus įtampa ir jos dažnis taip pat labai kinta. Paprastai prie tokio sinchroninio generatoriaus yra prijungiamas trifazis lygintuvas ir iš jo maitinami nuolatinės srovės imtuvai bei įkraunami akumuliatoriai.

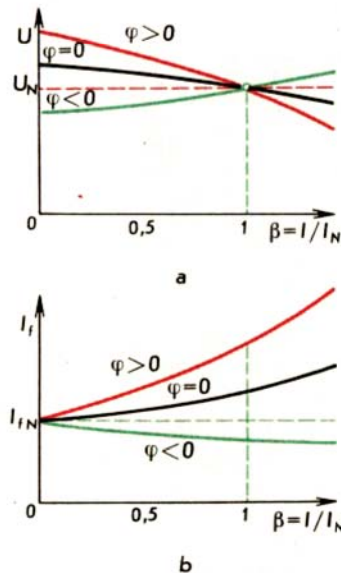
Kadangi generatorių inkaru apvijos sinchroninė induktyvioji varža yra nemaža, jų įtampa gerokai priklauso nuo apkrovos. Kai reikia, kad imtuvai gautų pastovią įtampą, naudojami įtampos reguliatoriai. Jie keičia generatoriaus žadinimo srovę, nuo kurios didumo priklauso generatoriaus EVJ ( $E_f = C_E n \Phi_f$ ).

**12.3.3. Lygiagretus darbas; sinchronizavimas.** Dažniausiai sinchroniniai generatoriai yra naudojami elektrinėse ir dirba prijungti prie energetinės sistemos. Jos tinklo įtampa ir dažnis  $f = 50$  Hz palaikomi pastovūs.

Energetinę sistemą, kurioje sujungta daug elektros stočių, galime pakeisti atstojamuoju galingu sinchroniniu



12.14 pav. Generatoriaus inkaru apvijos vektorinės diagramos, kai apkrovos pobūdis yra aktyvus-induktyvus ( $\varphi > 0$ ) (a), aktyvus ( $\varphi = 0$ ) (b) ir aktyvus-talpinis ( $\varphi < 0$ ) (c)



12.15 pav. Generatoriaus išorinės (a) ir reguliavimo (b) charakteristikos, kai apkrovos pobūdis aktyvus-induktyvus ( $\varphi > 0$ ), aktyvus ( $\varphi = 0$ ) ir aktyvus-talpinis ( $\varphi < 0$ )

generatoriumi (12.16 pav.), kurio vidinė varža palyginti su kiekvieno atskiro generatoriaus sinchronine induktyviaja varža yra tokia maža, kad jos galime nepaisyti.

Jungiant sinchroninį generatorių prie energetinės sistemos, reikia sudaryti tokias sąlygas, kad nebūtų net ir trumpai trunkančių elektromagnetinio momento ar srovės smūgių. Pastarieji gali būti pavojingi ir pačiam generatoriui, ir kitiems energetinės sistemos generatoriams ar tinklams.

Dėl to pradžioje sureguliuojamas neapkrauto generatoriaus darbo režimas, ir tik po to tinkamu laiko momentu generatorius yra prijungiamas prie energetinės sistemos. Visos šios operacijos yra vadinamos generatoriaus **sinchronizavimu**.

**Generatoriaus tinkamo sinchronizavimo sąlygos yra tokios:**

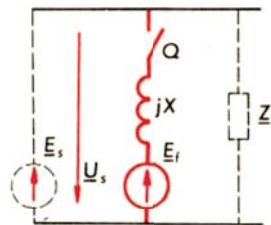
1) generatoriaus įtampa  $U$  turi būti lygi sistemos tinklo įtampai  $U_s$ ; 2) generatoriaus ir tinklo įtampų fazių seka turi būti tokia pat; 3) generatoriaus ir tinklo įtampų dažnis turi būti toks pat; 4) laiko momentu, kai generatorius prijungiamas prie sistemos, jo ir sistemos tinklo įtamos turi būti tos pačios fazės.

Kadangi generatorius sinchronizuojamas neapkrautas, tai jo  $U = E_f = C_{EF}\Phi_f$ . Pirmoji sąlyga įvykdoma reguliuojant generatoriaus žadinimo srovę ir voltmetru kontroliuojant įtampą. EVJ fazių seka priklauso nuo generatoriaus sukimo krypties, kuri paprastai esti nurodyta kiekvienam generatoriui. Kai jis sukamas reikiama kryptimi, EVJ fazių seka  $A \rightarrow B \rightarrow C$  sutampa su jo inkaru apvijos ričių seka  $U_1 \rightarrow V_1 \rightarrow W_1$ . Generatoriaus įtamos dažnis  $f = pn$  reguliuojamas keičiant rotoriaus sukų dažnį ir kontroliuojamas dažniamačiu.

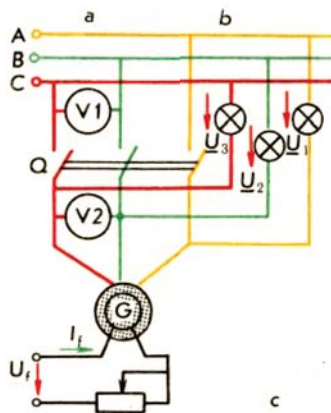
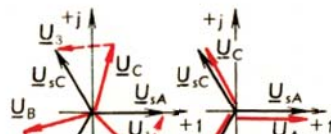
Patenkinus tris pirmąsias sąlygas, sinchroninio generatoriaus įtampa dar gali nesutapti faze su sistemos įtampa (12.17 pav.). Fazių sutapimas kontroliuojamas sinchronoskopu. Paprasčiausias **sinchronoskopas** yra trys kaitinamosios lempos, prijungiamos tarp generatoriaus inkaru apvijų fazių pradžių ir tinklo. Kai generatoriaus ir sistemos įtamos nesutampa faze, lempoms tenka įtamos  $U_1$ ,  $U_2$  ir  $U_3$ , todėl jos šviečia. Kai generatoriaus ir sistemos kiekvienos fazės įtamos visai vienodos, lempos užgesa.

Elektrinėse naudojami sudėtingi automatiniai sinchronizatoriai, kurie visas galingų generatorių sinchronizavimo operacijas atlieka automatiškai.

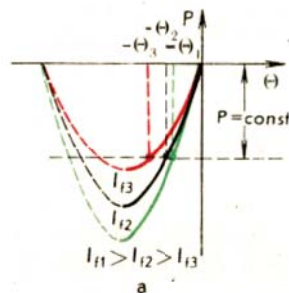
Po sinchronizavimo prijungtas prie sistemos generatorius ir toliau dirba tuščiąja eiga:  $\Theta = 0$  ir jo aktyvioji galia  $P = 0$ . Norint generatorių apkrauti, reikia suteikti jo rotorui didesnę sukimo momentą, tiekiant daugiava vandens ar garo. Generatoriaus rotorius, įgavęs papildomą momentą, pastūmėjamas jo sukimo kryptimi, tarp inkaru bei induktoriaus magnetinių laukų atsiranda kampas  $\Theta$ . Generatorius atiduoda tinklui galią  $P = P_{\max} \sin \Theta$ , kiekviena jo inkaru apvijų faze teka srovė  $I = P / (3U \cos \varphi)$ ; čia  $\varphi$  – fazių skirtumas tarp apkrovos įtamos ir srovės.



12.16 pav. Generatoriaus jungimo prie energetinės sistemos schema



12.17 pav. Nepakankamai (a) bei pakankamai (b) sinchronizuoto generatoriaus fazių ir sistemos įtampų vektorinės diagramos ir lempų sinchronoskopo schema (c)



Tuo būdu generatoriaus aktyvioji galia yra reguliuojama didinant ar mažinant jį sukančios turbinos galią.

**12.3.4. Reaktyviosios galios reguliavimas.** Generatoriaus reaktyvioji galia yra reguliuojama keičiant jo žadinimo srovę. Tarkime, kad sinchroninis generatorius dirba prijungtas prie energetinės sistemos. Kai jį sukančios turbinos galia yra pastovi, generatoriaus aktyvioji galia  $P = 3UI \cos \varphi = \text{const}$ . Keičiant generatoriaus žadinimo srovę  $I_f$ , kinta jo EVJ  $E_f = C_{Eh} \Phi_f$ , todėl kinta didžiausia generatoriaus aktyvioji galia  $P_{\max} = 3UE_f/X$  (žr. (12.7) lygtį). 12.18 pav., a, pavaizduotos trys generatoriaus kampinės charakteristikos, esant trims jo žadinimo srovės vertėms. Kadangi generatoriaus  $P = \text{const}$ , keičiant žadinimo srovę  $I_{f1} \rightarrow I_{f2} \rightarrow I_{f3}$ , keičiasi kampas  $\Theta_1 \rightarrow \Theta_2 \rightarrow \Theta_3$ .

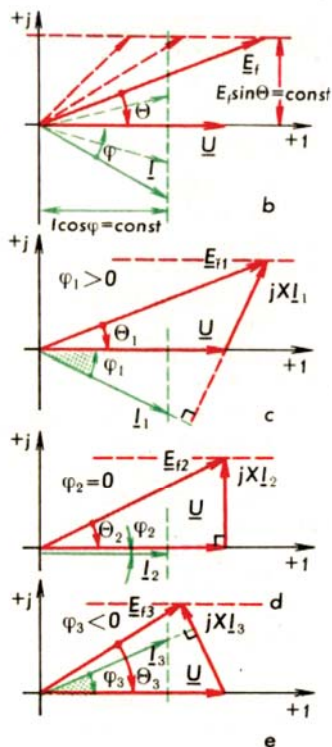
Sudarysime generatoriaus inkaro apvijos vektorines diagramas šiemis trimis atvejais. Jas sudarant reikia atkreipti dėmesį į tai, kad generatorius yra prijungtas prie energetinės sistemos ir jo įtampa, keičiant žadinimo srovę, išlieka pastovi. Kadangi  $P = P_{\max} \sin \Theta = 3(E_f U / X) \times \sin \Theta = \text{const}$ , tai gali būti  $U = \text{const}$  tik tuo atveju, jei  $E_f \sin \Theta = \text{const}$ . Tai reiškia, kad visose vektorinėse diagramose EVJ  $E_f$  vektorių hodografas yra tiesė, lygiagreti įtampos vektoriui. Antra vertus  $P = 3UI \cos \varphi = \text{const}$ , todėl gali būti  $U = \text{const}$  tik tuo atveju, kai  $I \cos \varphi = \text{const}$ . Tai reiškia, kad srovės vektorių  $I$  hodografas yra tiesė, statmena įtampos vektoriui.

Visais atvejais generatoriaus inkaro apvijos kiekvienai fazei galime pritaikyti II Kirchhofo dėsnį:  $E_f = U + jXI$ . Tarkime, kad žadinimo srovė  $I_{f1}$  yra tokia, kad  $E_{f1} > U$  (žr. 12.18 pav., c). Nubraižę  $E_{f1}$  vektorių ir sujungę jo bei įtampos  $U$  vektorių viršūnes, galime pažymėti įtampos kritimo inkaro apvijoje  $\Delta$  generatoriaus sinchroninės induktyviosios varžos vektorių  $jXI_{11}$ . Žinome, kad šis įtampos kritimas pralenkia fazę  $\pi/2$  srovę, todėl galime nubraižyti generatoriaus inkaro srovės vektorių  $I_{11}$ . Matome, kad srovė atsilieka faze  $\varphi_1$  nuo įtampos  $U$ :  $\varphi_1 > 0$ .

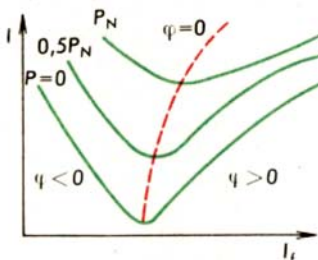
Galime sureguliuoti tokią žadinimo srovę  $I_{f2}$ , kad  $E_{f2}$  būtų status įtampos trikampio įžambinė (žr. 12.18 pav., d). Tuomet srovė ir įtampa yra tos pačios fazės:  $\varphi_2 = 0$ . Kai  $E_{f1} < U$ , nubraižę vektorių  $jXI_{13}$  ir nuo jo fazę  $\pi/2$  atsiliekančią srovę  $I_{13}$ , matome, kad ji pralenkia  $\varphi_3$  fazę įtam-pą:  $\varphi_3 < 0$ .

Iš vektoriinių diagramų matome, kad labai sužadinto sinchroninio generatoriaus reaktyvioji galia yra induktyviojo pobūdžio ( $\varphi > 0$ ), o mažai sužadinto – talpinio pobūdžio ( $\varphi < 0$ ). Tuo būdu, keičiant žadinimo srovę, galima keisti generatoriaus reaktyviosios galios  $Q = 3UI \sin \varphi$  didumą ir pobūdį. Galima pasiekti, kad jo reaktyvioji galia būtų lygi nuliui.

Paprastai generatoriams yra sudaromos srovės priklausomybės nuo žadinimo srovės kreivės:  $I = f(I_f)$ . Iš vektoriinių diagramų matome, kad, didinant žadinimo srovę, generatoriaus inkaro apvijos srovė mažėja, pasiekia mažiausią vertę (aktyviają)  $I_a = I \cos \varphi$  ir po to vėl didėja. Priklausomai nuo aktyviosios galios gaunama šeima kreivių (12.19 pav.), kurios pagal formą yra vadinamos „U“ charakteristikomis. Per šių kreivių mažiausių ordinačių taškus išvesta brūkšninė kreivė yra  $I = f(I_f)$ , kai  $\varphi = 0$  ir  $Q = 0$ . Ji dalija visas kreives į mažų ir didelių žadinimo srovių sritis.



12.18 pav. Generatoriaus kampinės charakteristikos (a), srovės ir EVJ vektorių hodografo (b) ir inkaro apvijos vektorinės diagramos (c, d, e), esant įvairioms žadinimo srovės vertėms



12.19 pav. Generatoriaus „U“ charakteristikos

## 12.4

## Sinchroninio variklio darbo ypatumai

## 12.4.1. Sukimo momentas ir mechaninė charakteristika.

Variklio sukimo momentas  $M = 3UE_f / (\omega X) \sin \Theta$ . Matome, kad  $M \sim U$ , todėl sinchroninis variklis yra mažiau jautrus tinklo įtampos svyravimams nei asinchroninis (priminsime, kad asinchroninio  $M \sim U^2$ ).

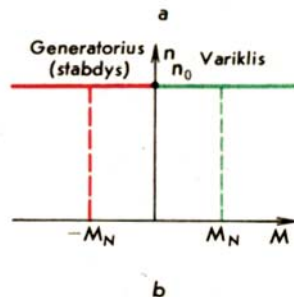
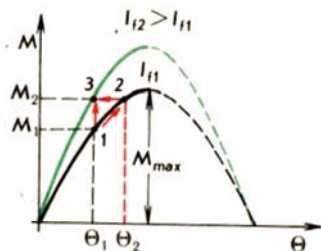
Kadangi sinchroninio variklio  $\omega = \text{const}$ ,  $X = \text{const}$  ir paprastai  $U = \text{const}$ , tai padidėjus apkrovos momentui, padidėja kampas  $\Theta$ . Padidinus žadinimo srovę, padidėja  $E_f$ , ir kampas  $\Theta$  vėl sumažėja. Tarkime, kad variklio žadinimo srovė yra  $I_{f1}$ , jo sukimo momentas yra  $M_1$  ir variklis apkrautas momentu  $M_{s1} = M_1$  (12.20 pav., a, 1 taškas). Padidinus apkrovos momentą iki vertės  $M_{s2} > M_1$ , padidėja kampas  $\Theta_1 \rightarrow \Theta_2$ . Padidėja variklio momentas iki  $M_2 = M_{s2}$  (2 taškas). Matome, kad variklio sukimo momentas padidėjo, bet sumažėjo santykis:  $M_{\max} / M_2 < M_{\max} / M_1$ , vadinasi, sumažėjo darbo stabilumo atsarga. Norėdami, kad ji nepakistų, galime padidinti žadinimo srovę. Tuomet variklis sukurs sukimo momentą lygų  $M_2$ , esant mažesniai kampui  $\Theta_1$  (3 taškas).

Sinchroninio variklio mechaninė charakteristika  $n = f(M)$  yra horizontali tiesė, nes variklio sūkių dažnis  $n = \text{const}$ . Jei variklį perkrausime ir apkrovos momentas bus  $M_s > M_{\max}$ , variklis desinchronizuosis. Tai jam pavojinga. Sinchroninė mašina, dirbanti generatoriaus režimu, sukuria stabdymo momentą (žr. 12.20 pav., b).

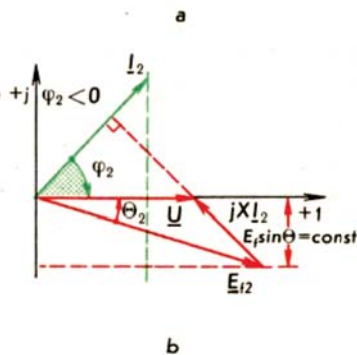
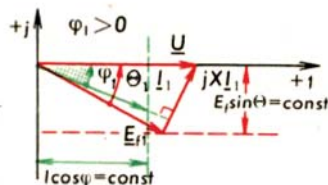
12.4.2. Reaktyviosios galios reguliavimas. Vardinis sinchroninio variklio galios koeficientas yra didesnis nei tos pačios galios asinchroninio variklio. Be to, sinchroninio variklio galios koeficientą dar galima reguliuoti keičiant žadinimo srovę.

Sudarysime vektorines diagramas (12.21 pav.), laikydami, kad variklio apkrova nekinta:  $P = \text{const}$ . Panašiai kaip generatoriui (žr. 12.3.4), variklio inkarų apvijų srovės hodografas yra tiesė, statmena įtampos vektoriui  $\underline{U}$  ( $I \cos \varphi = \text{const}$ ), o EVJ  $\underline{E}_f$  vektorių hodografas yra tiesė, lygiagreti įtampos vektoriui ( $E_f \sin \Theta = \text{const}$ ). Įtampų trikampis sudarytas taikant (12.6) lygtį:  $\underline{U} = \underline{E}_f + jX\underline{I}$ . Srovė  $\underline{I}$  atsilieka faze  $\pi/2$  nuo įtampos kritimo  $jX\underline{I}$ .

Kai variklis sužadintas mažai,  $E_{f1} < U$ . Toks variklis yra aktyvaus-induktyvaus pobūdžio imtuvas. Kai variklis yra labai sužadintas,  $E_{f2} > U$ , ir jis yra aktyvaus-talpinio pobūdžio imtuvas.



12.20 pav. Variklio kampinės charakteristikos (a), esant dviem žadinimo srovės vertėms, ir mechaninė charakteristika (b)



12.21 pav. Variklio inkarų apvijų vektorinės diagramos, kai variklis yra mažai (a) ir labai (b) sužadintas

Kaip ir generatoriui varikliui galime sudaryti „U“ charakteristikų šeimą (12.22 pav.). Matome, kad išnaudojant labai sužadintų sinchroninių variklių savybes, galima pagerinti imtuvų grupės galios koeficientą.

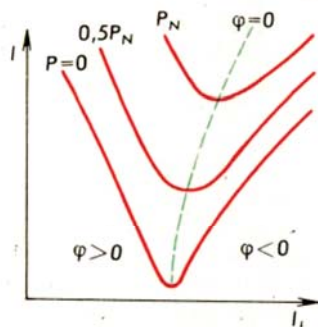
**12.4.3. Paleidimas.** Sinchroninio variklio rotorius turi sukstis tuo pačiu greičiu kaip statoriaus magnetinis laukas. Prijungus statoriaus apviją prie trifazio tinklo, sukamasis magnetinis laukas statoriuje atsiranda akimirksniu, tuo tarpu rotorius, turintis didelę mechaninę inerciją, negali pradėti sukstis staiga. Pralekiantys statoriaus lauko magnetiniai poliai tai atstumtų, tai pritrauktų rotoriaus magnetinius polius, todėl rotorius nesisuktų, o vibruotų.

Kad taip neatsitiktų, sinchroninio variklio rotorius reikia pradžioje įsukti iki sinchroninio (arba jam artimo) greičio. Tam galima panaudoti papildomą variklį, kurio galia gali būti mažesnė už paleidžiamo, jei sinchroninis variklis paleidžiamas tuščiaja eiga. Įsukus rotorius, sinchroninį variklį reikia panašiai kaip generatorių sinchronizuoti, ir tik po to į inkaro apviją galima prijungti prie tinklo.

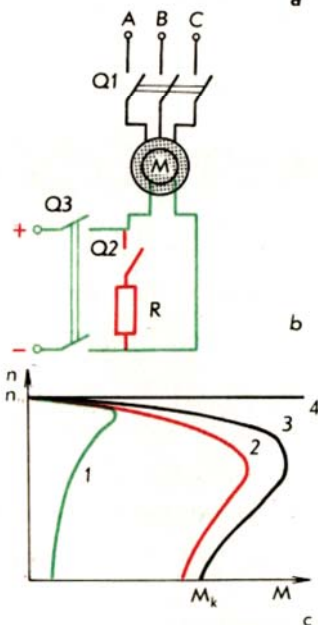
Papildomas variklis sukomplikuoja visą agregatą. Patogiau būtų išnaudoti kai kurias paties sinchroninio variklio ypatybes. Juk variklio inkaro apvijoje, prijungus ją prie trifazio tinklo, susikuria sukamasis magnetinis laukas kaip ir asinchroniniame variklyje. Būna tik rotoriaus magnetolaidyje įmontuoti trumpai sujungtą apviją (12.23 pav.), ir rotorius gali pradėti pats sukstis. Daugumos sinchroninių variklių rotoriai ir yra tokie: jie turi žadinimo ir trumpai sujungtą paleidimo apviją.

Paleidimui sinchroninio variklio statoriaus apviją prijungiamą prie trifazio tinklo, sujungus jungiklį Q1 (12.23 pav., b). Sukamasis magnetinis laukas kerta rotoriaus žadinimo apviją bei trumpai sujungtą paleidimo apviją ir indukuoja jose EVJ. Kol rotorius dar nesisuka, žadinimo apvijoje indukuota EVJ esti apie 20–30 kartų didesnė už vardinę žadinimo įtampą. Kad tokie viršįtampiai nepažeistų izoliacijos, jungikliu Q2 į žadinimo apviją grandinę yra įjungiamas rezistorius R (kai kuriais atvejais žadinimo apviją gali būti sujungiamą trumpai –  $R=0$ ).

Paleidimo metu teka srovė paleidimo ir žadinimo apvijomis, todėl variklio rotorius veikia sukimo momentas – paprastai  $M_k = (0,8-1,0) M_N$  – ir rotorius pradeda sukstis. Kaip žinome, rotorius gali įsukti iki tokio asinchroninio greičio, kuris tik keliasis procentais yra mažesnis už magnetinio lauko greitį. Tuomet jungikliu Q3 žadinimo apviją yra prijungiamą prie nuolatinės įtampos šaltinio. Rotoriuje atsiranda nuolatinis magneti-



12.22 pav. Variklio „U“ charakteristikos



12.23 pav. Variklio paleidimo apviją (a), paleidimo schema (b) ir paleidimo (1, 2, 3) bei sinchroninio darbo (4) mechaninės charakteristikos (c), kai veikia tik žadinimo apviją (1), tik paleidimo apviją (2) ir abi apvijos kartu (3)



nis laukas. Kadangi jis sukasi greičiu, artimu statoriaus magnetinio lauko, statoriaus magnetiniai poliai pri-traukia rotorius priešinguosius polius, ir laukai sukimba. Tuo metu šiek tiek padidėja srovė žadinimo apvijoje bei rotorių veikiantis mechaninis momentas, bet tokios elektrinės bei mechaninės perkrovos yra leistinos. Varikliui įsisukus sinchroniniu greičiu, jungiklis  $Q_2$  atjungiamas.

Galingi sinchroniniai varikliai yra paleidžiami pasitelkus automatines valdymo sistemas. Jos ne tik automatiškai atlieka visus minėtus komutacijos veiksmus, bet ir parrenka tokį sinchronizavimo laiko momentą, kad perkrovos būtų mažiausios.

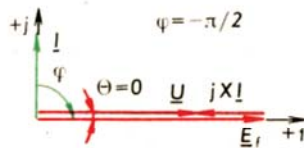
Kai variklio rotorius sukasi pastoviu greičiu, paleidimo apvijoje EVJ ir srovės nėra. Jei variklio apkrova staiga pakinta, pakinta kampas  $\Theta$  tarp magnetinių laukų ašiu. Galime laikyti, kad pakinta magnetinio lauko jėgų linijas vaizduojančių tamprų siūlų įtempimas. Mechaninių momentų pusiausvyra suyra ir, kol nusistovi nauja variklio sukimo momento ir kampo  $\Theta$  vertė, dinaminių mechaninių momentų veikiamas rotorius švytuoja. (Šie švytavimai panašūs į pakabinto ant tamprios spyruoklės kūno švytavimus, pakitus jo masei). Tokio pereinamojo proceso metu rotorius tai atsilieka nuo magnetinio lauko ( $n < n_0$ ), tai jį pralenkia ( $n > n_0$ ). Kai  $n < n_0$ , paleidimo apvija sukuria sukimo momentą (asinchroninio variklio režimas). Kai  $n > n_0$ , paleidimo apvija sukuria stabdymo momentą (asinchroninio generatoriaus režimas). Tuo būdu sinchroninio variklio trumpai sujungta paleidimo apvija veikia kaip slopintuvas. Kaip tik dėl šių savybių trumpai sujungtos apvijos yra įrengiamos ir sinchroninių generatorių rotoriuose.

## 12.5

### Specialiosios sinchroninės mašinos

Prie jų priskirsime sinchroninius kompensatorius ir mikrovariklius. Sinchroninis kompensatorius yra trifazė sinchroninė mašina, naudojama galios koeficientui pagerinti. Sinchroniniai mikrovarikliai labai plačiai taikomi automatikos įtaisuose, savirašiuose prietaisuose, elektriniuose laikrodžiuose ir kitur, kur reikalingas pastovus greitis. Jų statoriaus apvija paprastai esti vienfazė, ir statoriaus sukamasis magnetinis laukas sudaromas taip pat, kaip vienfazių asinchroninių variklių (žr. 11.7). Rotorius žadinimo apvijos dažniausiai neturi, todėl nereikalingi nei kontaktiniai žiedai, nei nuolatinės įtampos šaltinis.

**12.5.1. Sinchroninis kompensatorius.** Tai sinchroninė mašina, dirbanti neapkrauto variklio režimu ( $\Theta = 0$ ). Jos žadinimo srovė yra reguliuojama. Tarkime, kad žadinimo srovė taip sustiprinome, jog inkaro apvijoje indukuojama EVJ, didesnė už tinklo įtampą ( $E_r > U$ ). Inkaro apvijai galime parašyti II Kirchhofo dėsnį:  $\underline{U} = \underline{E}_r + jX_L \underline{I}$ . Atlikę veiksmus grafiškai (12.24 pav.), matome, kad ši lygybė bus patenkinta tik tuo atveju, kai įtampos kritimas inkaro apvijoje dėl sinchroninės induktyviosios varžos yra priešingos fazės nei tinklo įtampa. Inkaro apvijos srovė atsilieka faze  $\pi/2$  nuo įtampos kritimo  $jX_L$ . Fazių skirtumas

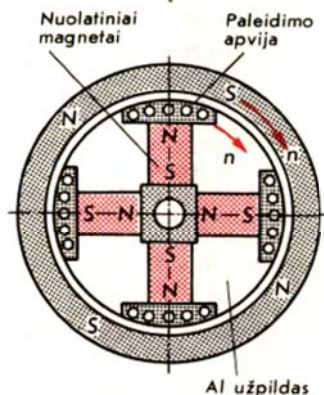


12.24 pav. Sinchroninio kompensatoriaus inkaro apvijos vektorinė diagrama

tarpo kompensatoriaus inkaro apvijos srovės ir tinklo įtampos  $\varphi = -\pi/2$ .  
**Kitaip tariant, synchroninio kompensatoriaus inkaro apvija yra talpinio pobūdžio imtuvas.**

Praktiškai synchroniniame kompensatoriuje susidaro energijos nuostoliai, kurių galia esti apie 2–3 % reaktyviosios galios, todėl inkaro apvijos srovė turi nedidelę aktyviąją dedamąją ir  $|\varphi| < \pi/2$ . Reaktyvioji galia reguliuojama keičiant žadinimo srovę. Beveik visi synchroniniai kompensatoriai turi trumpai sujungta paleidimo apviją. Kadangi jie dirba tik tuščiąja eiga, jų mechaninė konstrukcija (velenas, guoliai ir kt.) esti silpnesnė. Jų neapkrauti rotorai nelinkę švytuoti, todėl magnetinės grandinės oro tarpas daromas mažesnis. Dėl to reikalinga mažesnė MVJ, ir žadinimo apvijos laidų masė esti mažesnė.

Synchroniniai kompensatoriai dažniausiai gaminami aukštos įtampos (6–10 kV), jų vardinė galia esti nuo 10 iki 100 MV·A. Tai ryškiapolės mašinos, kurių polių porų skaičius  $p=3$  arba 4. Kai kada, kai hidroelektrinėms tūksta vandens, jų generatoriai gali būti panaudojami kaip synchroniniai kompensatoriai.



12.25 pav. Mikrovariklis su nuolatiniais magnetais

**12.5.2. Mikrovariklis su nuolatiniais magnetais.** Tai synchroninis variklis, kurio rotoruje yra nuolatiniai magnetai ir trumpai sujungta paleidimo apvija (12.25 pav.). Sudarius statoriuje sukamąjį magnetinį lauką, rotorius ima sukintis. Kai jo greitis tampa artimas lauko greičiui, variklis synchronizuojasi – statoriaus ir rotoriaus magnetiniai poliai sukimba.

Tokie mikrovarikliai yra patikimi, dirba gana stabiliai, jų naudingumo ir galios koeficientai didesni palyginti su kitais panašios galios mikrovarikliais.

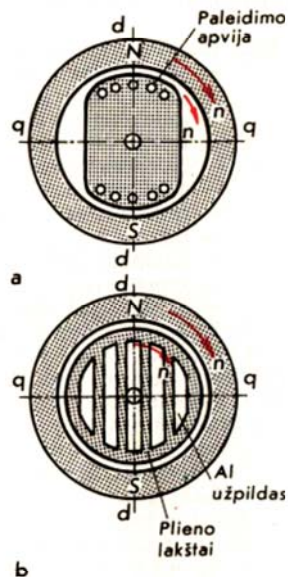
Mikrovarikliai su nuolatiniais magnetais gaminami iki 30–40 W galios. Tačiau specialiems tikslams gaminamų synchroninių variklių su nuolatiniais magnetais galia siekia dešimtis kilovatų.

**12.5.3. Reaktyvusis mikrovariklis.** Tai toks variklis, kurio rotoriaus magnetinė varža yra nevienoda išilginės ir skersinės magnetinės ašies kryptimi (12.26 pav.). Iš esmės yra sudaromas ryškiapolis rotorius, kurį įmagnetina statoriaus magnetinis laukas. Reaktyviųjų mikrovariklių rotorius stengiasi užimti tokią padėtį, kad variklio magnetinės grandinės varža statoriaus sukamojo magnetinio lauko srautui būtų mažiausia. Dėl to, kai rotoriaus greitis yra artimas magnetinio lauko greičiui, variklis synchronizuojasi.

Variklio rotorius, kurio magnetolaidis yra nupjautais šonais cilindras, turi nevienodą magnetinę varžą išilginės ir skersinės ašies kryptimi, nes yra nevienodas oro tarpas. Kai rotorius yra surenkamas iš elektrotechninio plieno lakštų, jame įmontuojama trumpai sujungta paleidimo apvija. Kai rotoriaus magnetolaidis yra masyvus feromagnetikas, paleidimo momentas gaunamas dėl magnetinio lauko ir sukurtinių srovių sąveikos, todėl paleidimo apviją nereikalinga.

Reaktyviojo mikrovariklio rotorius gali būti sudarytas iš feromagnetinės ir laidžios elektros srovei neferomagnetinės medžiagos. Tai gali būti, pavyzdžiui, elektrotechninio plieno lakštų paketai, užlieti aliuminiu. Aluminio sluoksnis veikia kaip paleidimo apvija, o jo magnetinė varža yra didelė.

Reaktyvieji mikrovarikliai gaminami iki 50–100 W galios. Jų naudingumo koeficientas yra nedidelis ( $\eta < 0,5$ ), o masė paprastai didesnė nei tos pačios galios asinchroninių variklių. Sukimo momentui padidinti rotoriuje dar gali būti ir nuolatiniai magnetai.



12.26 pav. Reaktyvusis mikrovariklis, kurio ryškiapolis rotorius sudaromas specialiu magnetolaidžio pavidalu (a) arba dviejų metalų deriniu (b)

**12.5.4. Histerezinis mikrovariklis.** Jo rotoriaus kietamagnetės medžiagos tuščiaaviduris cilindras pritvirtinamas prie aliuminio ar plieno įvorės (12.27 pav.). Kietamagnetės medžiagos histerezės kilpa yra plati ir jos formą galime laikyti artima stačiakampiui. Statoriaus sukamasis magnetinis laukas oro tarpe yra sinusinis (žr. 12.27 pav., c). Jis įmagnetina rotoriaus magnetolaidį. Iš histerezės kilpos matome, kad rotoriaus magnetinė indukcija yra lygi „plius  $B_r$ “, kai statoriaus magnetinio lauko stiprumas kinta: „plius  $H_c$ “  $\rightarrow$  „plius  $H_{max}$ “  $\rightarrow$  0  $\rightarrow$  „minus  $H_c$ “ (žr. 12.27 pav., b ir c, taškai 1, 2, 3, 4). Rotoriaus magnetinė indukcija yra lygi „minus  $B_r$ “, kai statoriaus magnetinio lauko stiprumas kinta: „minus  $H_c$ “  $\rightarrow$  „minus  $H_{max}$ “  $\rightarrow$  0  $\rightarrow$  „plius  $H_c$ “ (4, 5, 6, 1 taškai).

Taip sudaromi rotoriaus magnetiniai poliai S ir N. Kai variklis apkraunamas, jų išilginė ašis sudaro su statoriaus magnetinio lauko išilgine ašimi kampą  $\Theta$ . Dėl to atsiranda tangentinės rotorių sukantios jėgos. Kai jos pakankamos, rotorius įsisuka, ir variklis sinchronizuojasi. Skirtingai nuo reaktyviųjų mikrovariklių čia rotoriaus poliai neturi griežtai fiksuotos vietos ir susidaro tik priklausomai nuo statoriaus magnetinio lauko padėties įjungimo metu.

Histereziniai mikrovarikliai gaminami iki 300–400 W galios. Jų savybės yra geresnės nei reaktyviųjų mikrovariklių: gana didelis paleidimo momentas, geresnis naudingumo koeficientas ( $\eta=0,5-0,6$ ), jie gana greitai įsisuka iki sinchroninio greičio. Pažymėtina, kad histerezinį mikrovariklį perkrovis momentu, didesniu už  $M_{max}$ , jis dirba asinchroninio variklio režimu.

Svarbiausi histerezinių variklių trūkumai yra nedidelis galios koeficientas ( $\cos \varphi \approx 0,4-0,5$ ) ir tai, kad kietamagnetės medžiagas yra sunkiau apdirbti.

## Kontroliniai klausimai ir užduotys

12.1. Paaiškinkite, kas tai yra:

- sinchroninė mašina;
- sinchroninis generatorius, variklis;
- induktorius, inkaras;
- ryškiapolis, neryškiapolis rotorius;
- hidrogeneratorius, turbogeneratorius;
- sinchroninis kompensatorius;
- sinchroninis mikrovariklis;
- inkaro reakcija;
- kampinė charakteristika;
- generatoriaus sinchronizavimas;
- variklio paleidimas ir sinchronizavimas.

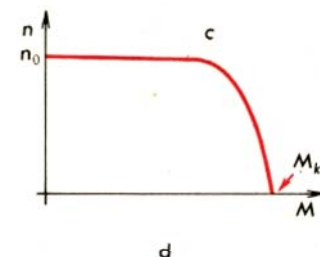
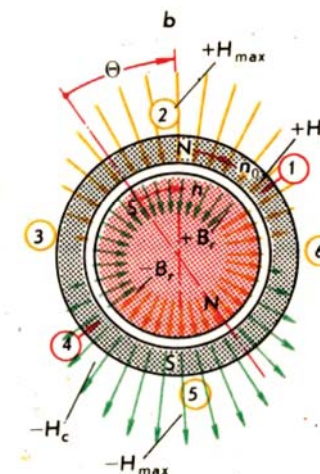
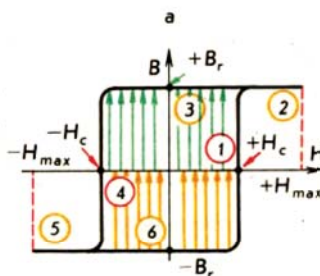
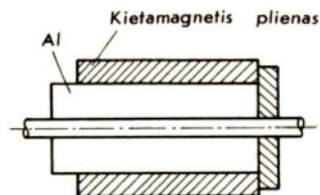
12.2. Kaip generatoriuje sudaroma trifazių EVJ sistema? Kodėl jos sinusinės? Kaip pasiekama, kad visos EVJ būtų vienodų amplitudžių, bet skirtingų (kokių?) fazių?

12.3. Nubraižykite trifazio generatoriaus sandaros schemą. Pažymėkite žadinimo srovės ir žadinimo srauto kryptį. Sužymėkite inkarą apvijoje indukuotų EVJ kryptis. Kokiomis taisyklėmis remiatės srauto ir EVJ kryptims žymėti?

12.4. Kaip generatoriaus inkarą apvijoje sukuriamas sukamasis magnetinis laukas? Kokių greičiu jis sukasi rotoriaus atžvilgiu? Kaip apskaičiuoti jo sūkių dažnį? Koks turi būti rotoriaus sūkių dažnis, jei induktorius turi 4 polių poras ir norime gauti pramoninio dažnio EVJ?

12.5. Kaip ir prie kokio tinklo prijungiami sinchroninio variklio inkarą apvija? Koks magnetinis laukas sudaromas inkarą apvijoje? Kokios jėgos verčia sukis rotorius ir dėl ko jos atsiranda?

12.6. Nubraižykite trifazio sinchroninio variklio sandaros schemą. Pažymėkite statoriaus magnetinio lauko ir rotoriaus sukimosi kryptį.



12.27 pav. Histerezinio mikrovariklio rotoriaus sandara (a), magnetolaidžio histerezės kilpa (b), magnetinio lauko indukcija (c) ir mechaninė charakteristika (d)

Nuo ko priklauso, kokia kryptimi sukasi magnetinis laukas ir rotorius?

12.7. Kokiu greičiu sukasi rotorius magnetinio lauko atžvilgiu? Kaip apskaičiuoti rotoriaus sūkių dažnį? Apskaičiuokite rotoriaus sūkių dažnį, jei variklis prijungtas prie pramoninio dažnio tinklo ir jo induktorius turi 2 polių poras?

12.8. Kaip sudaryta sinchroninė mašina? Nuo ko priklauso, kiek statoriaus apvijoje turi būti ričių ir kaip jos turi būti išdėstytos? Koks gali būti induktorius? Kaip ir kodėl skiriasi hidrogenatorių ir turbogeneratorių sandara?

12.9. Kodėl atsiranda ir kokią įtaką sinchroninės mašinos magnetiniam srautui turi inkaro reakcija?

12.10. Koks kampas susidaro tarp inkaro ir induktoriaus magnetinių laukų, kai mašina:  $a$  – neapkrauta;  $b$  – veikia generatoriaus ir  $c$  – variklio režimu? Kas atsitinka neleistinai perkrovus mašina ir kodėl?

12.11. Kokią varžą turi inkaro apvija? Dėl ko ta varža atsiranda ir kaip ją apskaičiuoti? Kokios inkaro apvijos varžos galima nepaisyti? Kokio pobūdžio elementu laikoma inkaro apvija?

12.12. Nubraižykite generatoriaus inkaro apvijos vienos fazės grandinės atstojamąją schemą. Pagal II Kirchhofo dėsnį parašykite kompleksinės įtampos lygtį. Sudarykite tos įtampos vektorių grafiškai. Palyginkite sinchroninio ir nuolatinės srovės generatoriaus įtampos lygtis: kuo jo panašios ir kuo skiriasi?

12.13. Nubraižykite variklio inkaro apvijos vienos fazės grandinės atstojamąją schemą. Pagal II Kirchhofo dėsnį parašykite kompleksinės įtampos lygtį. Sudarykite tos įtampos vektorių grafiškai. Palyginkite sinchroninio ir nuolatinės srovės variklio įtampos lygtis: kuo jos panašios ir kuo skiriasi?

12.14. Kokia funkcija vadinama sinchroninės mašinos kampine charakteristika? Nubraižykite ją ir paaiškinkite. Koks kampas vadinamas kriziniu? Kodėl?

12.15. Kokios svarbiausios sinchroninio generatoriaus charakteristikos? Kokios charakteristikos priklauso nuo apkrovos didumo ir pobūdžio? Kaip ir kodėl?

12.16. Kodėl ir kaip sinchronizuojamas generatorius jungiant jį prie energetinės sistemos? Kaip reguliuojama generatoriaus aktyvioji galia?

12.17. Nuo ko priklauso variklio sukimo momentas? Kaip jį galima keisti? Nubraižykite sinchroninio variklio mechaninę charakteristiką ir paaiškinkite.

12.18. Kaip reguliuojama sinchroninio variklio reaktyvioji galia keičiant žadinimo srovę? Nubraižykite „U„ charakteristikas ir paaiškinkite. Kaip tokią variklio savybę galima išnaudoti praktiškai?

12.19. Kaip paleidžiamas sinchroninis variklis? Kokia apvija vadinama paleidimo? Kaip veikia paleidimo apvija variklį paleidžiant ir jam dirbant? Ar naudinga paleidimo apvija generatoriui? Kodėl?

12.20. Kokiu režimu veikia sinchroninis kompensatorius? Kuo ypatinga jo konstrukcija? Kodėl naudojant sinchroninį kompensatorių gerėja visos imtuvų grupės galios koeficientas?

12.21. Kaip sudarytas ir kaip veikia mikrovariklis su nuolatiniais magnetais? Kodėl jis pradeda suktis paleidžiant?

12.22. Kaip veikia reaktyvusis mikrovariklis? Kokia gali būti jo rotoriaus sandara? Kodėl ji tokia?

12.23. Kaip sudarytas ir kaip veikia histerezinis mikrovariklis?