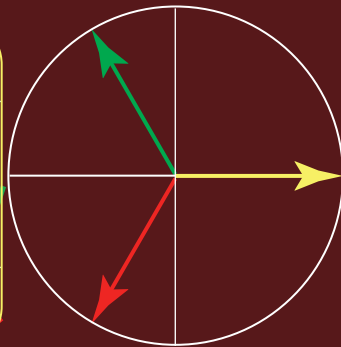
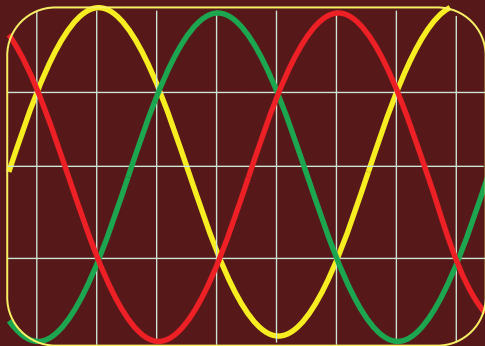
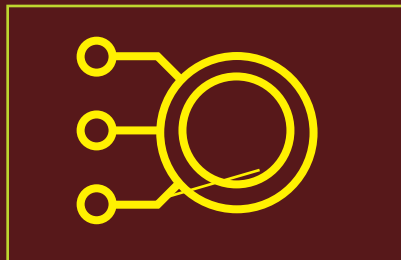


S.Masiokas

# Elektro technika



11



Asinchroninės  
mašinos

VADOVĒLIS  
AUKŠTOSIOMS  
MOKYKLOMS

---

## 11.1. Statoriaus magnetinis laukas 314

- 11.1.1. Trifazis sukamasis magnetinis laukas / 314
- 11.1.2. Dvifazis sukamasis magnetinis laukas / 317
- 11.1.3. Vienfazis pulsuojantis magnetinis laukas / 317

---

## 11.2. Asinchroninio variklio veikimo principas ir sandara 318

- 11.2.1. Variklio režimas / 318
- 11.2.2. Stabdymo režimas / 319
- 11.2.3. Statorius / 320
- 11.2.4. Rotorius / 320

---

## 11.3. Elektromagnetiniai reiškiniai asinchroniniame variklyje 321

- 11.3.1. Statoriaus ir rotoriaus apvijų EVJ / 322
- 11.3.2. Statoriaus ir rotoriaus apvijų varžos / 323
- 11.3.3. Statoriaus ir rotoriaus grandinių atstojamosios schemos ir vektorinės diagramos / 324
- 11.3.4. Variklio magnetinis laukas ir srovių vektorinė diagrama / 325
- 11.3.5. Variklio atstojamoji schema / 327

---

## 11.4. Asinchroninio variklio nuostoliai ir mechaninė charakteristika 327

- 11.4.1. Energetinė diagrama / 327
- 11.4.2. Sukimo momentas / 328
- 11.4.3. Variklio su trumpai sujungtu rotoriumi mechaninė charakteristika / 330
- 11.4.4. Variklio su faziniu rotoriumi mechaninė charakteristika / 332

---

## 11.5. Asinchroninio variklio įvairios charakteristikos ir greičio reguliavimas 333

- 11.5.1. Paso ir katalogo duomenys / 333
- 11.5.2. Darbo charakteristikos / 335
- 11.5.3. Samprata apie greičio reguliavimą / 336

---

## 11.6. Asinchroninių variklių paleidimas 337

- 11.6.1. Tiesioginis prijungimas prie tinklo / 337
- 11.6.2. Statoriaus apvijos įtampos mažinimas / 338
- 11.6.3. Pagerintų paleidimo savybių varikliai / 339
- 11.6.4. Variklis su faziniu rotoriumi / 340

---

## 11.7. Vienfaziai asinchroniniai varikliai 341

- 11.7.1. Variklis su vienfaze apvija / 341
- 11.7.2. Variklis su dvifaze apvija / 342
- 11.7.3. Trifazis variklis vienfaziam tinkle / 343

---

## Kontroliniai klausimai ir užduotys 343

Tai kintamosios srovės mašinos, kurių veikimo ypatumą nusako pats pavadinimas. **Statoriuje sudaromas sukamasis magnetinis laukas. Rotorius sukasi greičiu, kuris nelygus magnetinio lauko greičiui, todėl sakoma, kad rotorius sukasi nesinchroniškai (arba asinchroniškai).**

Kaip ir visos elektros mašinos, asinchroninės gali dirbti **variklio ir generatoriaus** režimu. Kadangi asinchroniniai generatoriai dėl savo ypatybių naudojami labai retai, nagrinėsime tik asinchroninių variklių savybes ir charakteristikas.

Plačiausiai naudojami **asinchroniniai trifaziai varikliai**, kurie šiuo metu sudaro daugiau kaip 90 % visų pramonėje ir žemės ūkyje naudojamų variklių. Gaminama ir naudojama nemažai asinchroninių variklių, jungiamų į vienfazį tinklą, bet jų galia paprastai ne didesnė kaip 500 W. Vienfaziai asinchroniniai varikliai yra ne tokie ekonomiškai kaip tos pačios galios trifaziai.

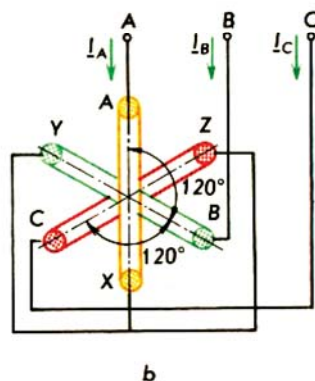
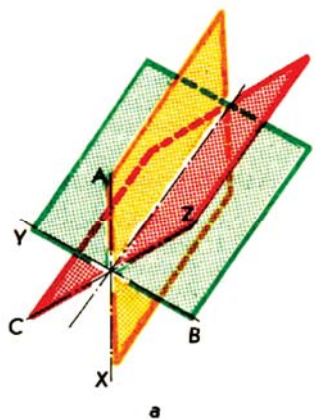
Palyginti su nuolatinės srovės mašinomis asinchroninių variklių sandara yra gana paprasta, jie patikimi ir ekonomiškai. Svarbiausias jų trūkumas tas, kad yra sudėtingiau pakeisti jų darbo charakteristikas, pavyzdžiui, reguliuoti greitį.

## 11.1

### Statoriaus magnetinis laukas

**11.1.1. Trifazis sukamasis magnetinis laukas.** Tokiam magnetiniam laukui gauti galime panaudoti apviją, kurią sudaro trys vienodos ritės, išdėstytos taip, kad tarp jų ašių būtų  $120^\circ$  kampai (11.1 pav.). Paprastumo dėlei tarkime, kad ši apvija yra neferomagnetinėje aplinkoje – ore. Prijungus tokią apviją prie trifazio tinklo, jos ritėmis teka trys lygios, bet besiskiriančios  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ) faze srovės:  $i_A = I_m \sin \omega t$ ;  $i_B = I_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ;  $i_C = I_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$  (11.2 pav., a). Kiekviena srovė, tekėdama rite, sukuria apie ją kintamąjį magnetinį lauką, o visi kartu šie laukai sudaro visos apvijos suminį magnetinį lauką.

Norėdami pavaizduoti suminį magnetinį lauką, pasirinkime kelis laiko momentus ir sužymėsime kiekvienos ritės srovės bei magnetinio lauko linijų kryptis. Kaip žinome (žr. 3.1.4), srovės kryptis laikoma teigiama, jei srovė teka iš ritės pradžios (A, B, C) į jos pabaigą (X, Y, Z). (11.2 pav., b, c ir d kryželiu pažymėta srovė, kuri teka „nuo mūsų“, o taškeliu – „į mus“.)



11.1 pav. Asinchroninio variklio statoriaus apvijos modelis (a) ir jungimo žvaigždė prie trifazio tinklo schema (b)

Pirmuoju laiko momentu  $t_1$  (11.2 pav., a)  $i_A > 0, i_B < 0, i_C < 0$ , todėl jų kryptys yra tokios: iš  $A$  į  $X$ , iš  $Y$  į  $B$  ir iš  $Z$  į  $C$ . Antruoju laiko momentu  $t_2$ :  $i_A > 0, i_B > 0, i_C < 0$ ; jų kryptys:  $A \rightarrow X$ ;  $B \rightarrow Y$ ,  $Z \rightarrow C$ . Trečiuoju laiko momentu  $t_3$ :  $i_A < 0, i_B > 0, i_C < 0$ ; jų kryptys:  $X \rightarrow A$ ,  $B \rightarrow Y$ ,  $Z \rightarrow C$ . Pritaikę dešiniojo sraigto taisyklę, nubraižome magnetinio lauko linijas, gaubiančias apvijų laidininkus. Kaip matome, visų trijų ričių magnetinių laukų linijos apvijų vidinėje erdvėje yra tos pačios krypties. Gaunamas vienos polių poros magnetinis laukas, kurio padėtis įvairiais laiko momentais yra kitokia.

Kadangi kiekvienos ritės MVJ yra kintamoji, apvijų magnetinio lauko indukciją  $\vec{B}$  galime pavaizduoti, geometriškai sudėję  $\vec{B}_A$ ,  $\vec{B}_B$  ir  $\vec{B}_C$ . Magnetinė indukcija yra proporcinga magnetiniam srautui, o pastarasis – jį kuriančiai srovei. Tai reiškia, kad bet kuriuo laiko momentu kiekvienos ritės magnetinės indukcijos momentinė vertė yra proporcinga rite tekančios srovės momentinei vertei.

Prisiminę svarbią simetrinio trifazio imtuvo srovių savybę:  $i_A + i_B + i_C = 0$ , galime apskaičiuoti kiekvienos ritės magnetinę indukciją  $B_A$ ,  $B_B$  ir  $B_C$  ir nubraižyti jų vektorius.

**Laiko momentu  $t_1$ :**  $i_A = -i_B - i_C$ . Kadangi  $i_A = I_m$ , o  $i_B = i_C$  (11.2 pav., a), tai  $|i_B| = |i_C| = I_m/2$ . Iš čia:  $B_A(t_1) = B_m$ ,  $B_B(t_1) = B_C(t_1) = B_m/2$ . Magnetinės indukcijos vektoriai (11.2 pav., b) braižomi kiekvienos ritės ašyje. Jų kryptys gaunamos priklausomai nuo srovės kiekvienoje ritėje krypties, taikant dešiniojo sraigto taisyklę.  $\vec{B}_B$  ir  $\vec{B}_C$  ilgai yra lygūs pusei pasirinktojo  $\vec{B}_A$  vektoriaus ilgio.

Visos apvijų magnetinė indukcija

$$\vec{B}(t) = \vec{B}_A(t) + \vec{B}_B(t) + \vec{B}_C(t). \quad (11.1)$$

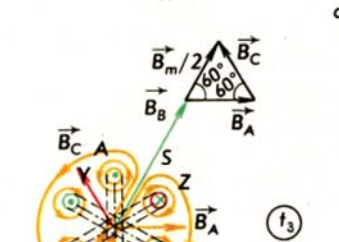
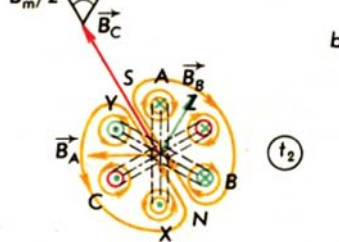
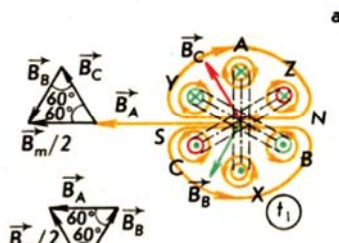
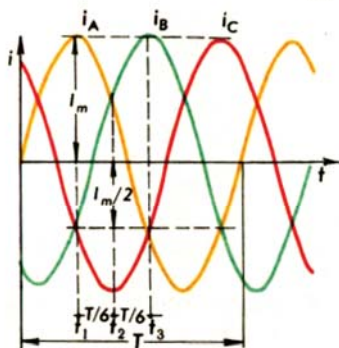
Geometriškai apskaičiavę jos modulį gauname:

$$B = 1,5B_m. \quad (11.2)$$

Panašiai yra braižomi magnetinės indukcijos vektoriai kitais dviem laiko momentais (11.2 pav., c ir d). **Laiko momentu  $t_2$ :**  $i_A = i_B = I_m/2, |i_C| = I_m$ , todėl  $B_A(t_2) = B_B(t_2) = B_m/2, B_C(t_2) = B_m$ . **Laiko momentu  $t_3$ :**  $|i_A| = |i_C| = I_m/2, i_B = I_m$ , todėl  $B_A(t_3) = B_C(t_3) = B_m/2, B_B(t_3) = B_m$ .

Palyginę 11.2 pav. gautų magnetinių laukų linijų bei indukcijos vektorių padėtį, galime pastebėti tokias sudaryto suminio magnetinio lauko ypatybes.

1. Kai trifazę apviją sudaro trys ritės, išdėstytos erdvėje  $120^\circ$  kampais, gaunamas vienos polių poros ( $p=1$ ) sukamas magnetinis laukas.



11.2 pav. Statoriaus apvijų ričių srovės (a), magnetiniai laukai ir magnetinės indukcijos vektoriai laiko momentais  $t_1, t_2$  ir  $t_3$  (b, c, d)

2. Gauta magnetinio lauko indukcija kiekvienu laiko momentu  $B = 1,5B_m = \text{const}$ .

3. Statoriaus magnetinis laukas sukasi tos ritės, kurioje srovė atsilieka faze, kryptimi, kitaip tariant, tiesioginės fazių sekos kryptimi:  $A \rightarrow B \rightarrow C$ .

**Magnetinio lauko sukimosi kryptį galima pakeisti sukeičiant apvijų ričių prijungimo prie tinklo seką, t. y. pakeitus srovių fazių seką. Tam tereikia sukeisti vietomis bet kurių dviejų ričių pradžias, pavyzdžiui, A su B, B su C ar A su C (11.3 pav.).**

4. Magnetinis laukas sukasi pastoviu kampiniu greičiu  $\omega_0 = \alpha/t$ . Per nagrinėtą laikotarpį  $t = t_3 - t_1 = T/3$  laukas pasisuko kampu  $\alpha = 2\pi/3$ . Padaliję posūkio kampą iš laiko gauname

$$\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f; \quad (11.3)$$

čia  $f$  – statoriaus apvijų srovių (tinklo) dažnis.

Prisiminę, kad  $\omega_0 = 2\pi n_0$ , galime parašyti, kad vienos polių poros magnetinio lauko sūkių dažnis

$$n_0 = f. \quad (11.4)$$

Kai tinklo dažnis pramoninis, magnetinio lauko sūkių dažnis  $n_0 = 50$  r/s.

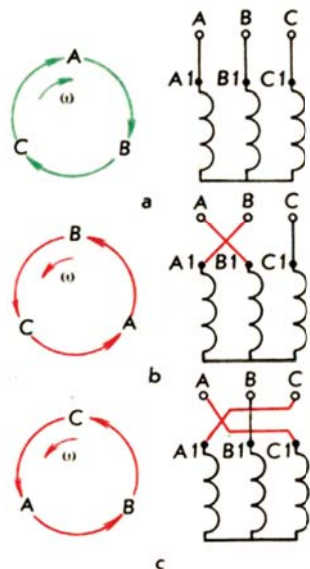
Trifazis **dvejų polių porų** ( $p=2$ ) magnetinis laukas sudaromas panaudojant šešių ričių apviją (11.4 pav.). Kadangi ričių yra dvigubai daugiau, gaunami dvigubai mažesni kampai tarp jų pradžių ( $60^\circ$ ) ir tarp kiekvienos ritės pradžios ir pabaigos ( $90^\circ$ ). Dvejų polių porų magnetinį lauką galima gauti, kai kiekviena apvijos fazė sudaryta iš dviejų, pavyzdžiui, nuosekliai sujungtų ričių. Sužymėję ritėmis tekančių srovių kryptis pagal 11.2 pav., a, kuriuo nors laiko momentu (pavyzdžiui,  $t_1$  ir  $t_2$ ) ir nubraižę magnetinio lauko linijas, pamatysime, kad gautas magnetinis laukas turi dvi polių poras (11.4 pav., c ir d).

Taikant ankstesnę metodiką, galima įsitikinti, kad: 1) toks magnetinis laukas sukasi taip pat fazių sekos  $A \rightarrow B \rightarrow C$  kryptimi; 2) jo kampinis greitis ir sūkių dažnis yra dvigubai mažesni:  $\omega_0 = 2\pi f/2$ ;  $n_0 = f/2$ .

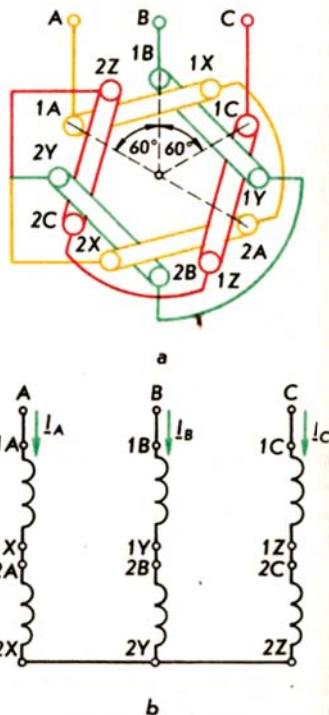
Pagaminus kiekvieną apvijos fazę iš dar daugiau ričių, galima sudaryti magnetinius laukus, kurie turi polių porų  $p=3, 4, 5$  ir t. t. Bendroju atveju apvijos ričių skaičius turi būti lygus  $3p$ , o kampai tarp jų pradžių –  $360^\circ/(3p)$ . **Magnetinio lauko kampinis greitis**

$$\omega_0 = 2\pi f/p, \quad (11.5)$$

**sūkių dažnis**



11.3 pav. Statoriaus magnetinio lauko sukimosi kryptis (a) ir jos pakeitimas priešinga (b, c)



$$n_0 = f/p. \quad (11.6)$$

Praktikoje sūkių dažnį įprasta matuoti sūkais per minutę (r/min). Tuo atveju jam skaičiuoti taikomas koeficientas:

$$n_0 = 60f/p. \quad (11.7)$$

**Magnetinio lauko sūkių dažnis dar vadinamas sinchroniniu.** Didžiausias dažnis, kuriuo gali sukintis magnetinis laukas, kai apvija įjungiamo į 50 Hz tinklą, yra 50 r/s, t. y. 3000 r/min (11.1 lentelė).

**11.1.2. Dvifazis sukamasis magnetinis laukas.** Šiam magnetiniam laukui gauti reikia apviją sudaryti iš dviejų, geriausia – statmenų, ričių, kuriose srovės skiriasi  $90^\circ$  faze (11.5 pav.).

Pasirinkę tris laiko momentus, sužymėsime srovių kryptis apvijose. Laiko momentu  $t_1$ :  $i_1 > 0$ ;  $i_2 = 0$ ;  $t_2$ :  $i_1 = 0$ ;  $i_2 > 0$ ;  $t_3$ :  $i_1 < 0$ ;  $i_2 = 0$ . Kadangi magnetinė indukcija proporcinga srovei, gauname:  $t_1 - B_1(t_1) = B_m$ ;  $B_2(t_1) = 0$ ;  $t_2 - B_1(t_2) = 0$ ;  $B_2(t_2) = B_m$ ;  $t_3 - B_1(t_3) = B_m$ ;  $B_2(t_3) = 0$ .

Iš vektorių padėčių (11.5 pav., c–e) matome, kad gautas pastovios magnetinės indukcijos  $B = B_m = \text{const}$  vienos polių poros ( $p=1$ ) magnetinis laukas sukasi. Jis sukasi link tos ritės pradžios, kurioje srovė faze atsilieka. Laikydami tokią srovių sistemą dvifaze, galime sakyti, kad magnetinis laukas sukasi srovių fazių sekos kryptimi.

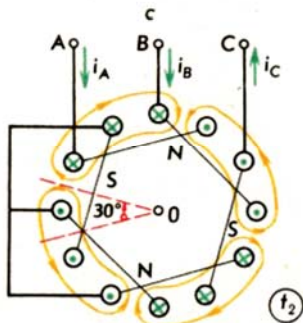
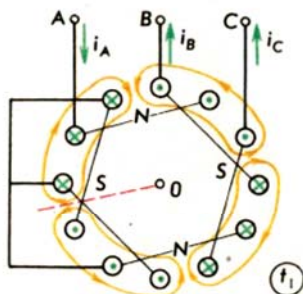
Norėdami pakeisti srauto sukimosi kryptį, turime pakeisti fazių seką. Praktiškai galima sukeisti bet kurios ritės pradžią su galu. Pavyzdžiui, sukeičiame 1 ir 1', srovės  $i_1$  fazė pasikeičia priešinga. Srovė  $i_1$  atsilieka  $90^\circ$  kampu nuo srovės  $i_2$ , ir laukas sukasi priešinga kryptimi.

Per laikotarpį  $t = t_3 - t_1 = T/2$  magnetinis laukas pasisuka  $180^\circ$  kampu, todėl per visą periodą pasisuka  $360^\circ$ , ir jo sūkių dažnį  $n_0$  galima apskaičiuoti (kaip ir trifazio vienos polių poros) iš (11.4) lygybės.

Norint gauti didesnio polių porų  $p$  skaičiaus magnetinį lauką, reikia statoriaus apviją sudaryti iš  $2p$  ričių, kurios išdėstomos  $360^\circ/(4p)$  kampais. Magnetinio lauko sūkių dažnis apskaičiuojamas iš (11.6) ir (11.7) lygybių (žr. 11.1 lentelė).

**11.1.3. Vienfazis pulsuojantis magnetinis laukas.** Jis sudaromas vienos ritės apvijoje, įjungus ją į vienfazį tinklą (11.6 pav.). Rite teka sinusinė srovė ir sukuria apvijoje kintamąjį magnetinį lauką, kurio indukcija ( $B \sim i$ ):  $B(t) = B_m \sin \omega t$ . Tokio lauko indukcija pusę periodo yra vienos, o kitą pusę periodo – kitos krypties. Magnetinis laukas nesiskiria, bet periodiškai keičia dydį ir kryptį – pulsuoja.

Tokį vienfazį magnetinį lauką galima išskaidyti į du sukamuosius magnetinius laukus, kurių indukcijos yra  $B_1 = B_2 = B_m/2 = \text{const}$ . Laukai sukasi vienodu kampiniu greičiu  $\omega_0$ , bet priešingomis kryptimis. Kiekvienu laiko momentu  $\vec{B}_1(t) + \vec{B}_2(t) = \vec{B}(t)$  (žr. 11.6 pav., c–f). Pavyzdžiui, kai  $t_0 = 0$ , abiejų sukamųjų laukų magnetinės indukcijos yra priešingų kryptei, todėl  $\vec{B} = \vec{B}_1 - \vec{B}_2 = 0$ . Laiko momentu  $t_1$  (po laiko  $T/8$ )  $\vec{B}_1$  ir  $\vec{B}_2$  vektoriai pasisukę kampu  $\alpha = 360^\circ/8 = 45^\circ$ , todėl  $B(t_1) = (B_m/2)/\cos 45^\circ = B_m/\sqrt{2}$ .



d

11.4 pav. Statoriaus apvijų šešių ričių išdėstymas (a), jungimo schema (b), magnetinis laukas laiko momentais  $t_1$  ir  $t_2$  (c ir d)

11.1 lentelė. Magnetinio lauko sūkių (sinchroninis) dažnis, kai  $f = 50$  Hz ir polių porų skaičius lygus  $p$

$p$	$n_0$ r/s	$n_0$ r/min
1	50,00	3000
2	25,00	1500
3	16,6(6)	1000
4	12,50	750
5	10,00	600
6	8,3(3)	500
8	6,25	375
10	5,00	300
30	1,6(6)	100
50	1,00	60

Per vieną srovės periodą abu magnetiniai laukai apsisuka vieną kartą, todėl jų kampinis greitis  $\omega$ , ir sūkių dažnis  $n_0$  apskaičiuojami iš (11.3) ir (11.4) lygybių.

## 11.2

### Asinchroninio variklio veikimo principas ir sandara

**11.2.1. Variklio režimas.** Tarkime, kad turime magnetinį lauką, kurio indukcija yra  $\vec{B}$  ir kuris sukasi dažniu  $n_0$ , pavyzdžiui, laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi. Šiame magnetiniame lauke yra du laidininkai, kurie sujungti taip, kad sudaro uždara grandinę (11.7 pav.).

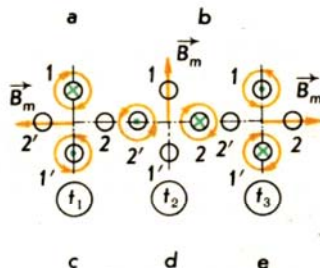
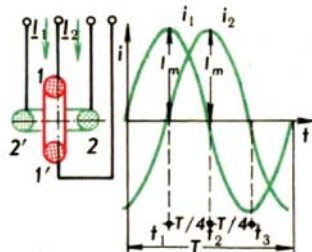
Sukamasis magnetinis laukas kerta laidininkus, todėl juose indukuojamos EVJ. EVJ kryptis nusakoma dešinėsios rankos taisykle (žr. 10.1.3). Šiuo atveju svarbu tai, kad laidininkai nejuda, o juda magnetinis laukas. Dėl to dešinėsios rankos nykštį reikia nukreipti taip, kad jis rodytų laidininko santykinio (reliatyviojo) judėjimo kryptį. Ta kryptis yra priešinga magnetinio lauko judėjimo kryptčiai. Gauname, kad EVJ kryptis viršutiniame laidininke yra „į mus“, o apatiniame – „nuo mūsų“.

Kadangi laidininkų grandinė yra uždara, tai ja teka srovė, kurios kryptis tokia pat kaip ją sukūrusių indukuotų EVJ. Turime laidininkus, kuriais teka srovė ir kurie yra magnetiniame lauke. Juos veikia elektromagnetinės jėgos, kurių kryptis nusakoma kairiosios rankos taisykle (žr. 10.1.3). Matome, kad šios jėgos stengiasi sukti laidininkus magnetinio lauko sukimosi kryptimi.

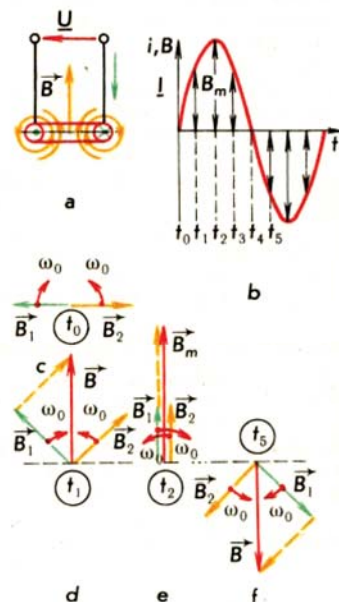
Tarkime, kad laidininkai gali sukstis, ir pažymėkime jų sūkių dažnį  $n$ . Tik tuo atveju, kai skirtumas  $\Delta n = n_0 - n > 0$ , t. y.  $n < n_0$ , santykinio laidininkų judėjimo kryptis išlieka tokia, kokia parodyta 11.7 pav., a, ir laidininkus veikia juos sukančios elektromagnetinės jėgos.

Jei dėl kokių nors išorinių priežasčių, pavyzdžiui, suteikus laidininkams trumpą mechaninį impulsą jų sukimosi kryptimi, lauko ir laidininkų sūkių dažnis susitvirtina, laidininkai lauko atžvilgiu nejudėtų. Kai  $n = n_0$ ,  $\Delta n = n_0 - n = 0$ , laidininkuose nebūtų indukuojamos EVJ, netekėtų srovės ir išnyktų juos sukančios jėgos. Dėl to laidininkų sūkių dažnis sumažėtų. Kai tik atsiranda skirtumas  $\Delta n = n_0 - n > 0$ , laidininkus vėl ima veikti elektromagnetinės jėgos, sudarančios elektromagnetinį sukimo momentą.

Matome, kad laidininkai, esantys sukamajame magnetiniame lauke, varomi elektromagnetinio momento, gali



11.5 pav. Statoriaus dviejų ričių apvijos schema (a), srovės (b) ir magnetinės indukcijos vektoriai laiko momentais  $t_1, t_2, t_3$  (c, d, e)



11.6 pav. Vienfazės apvijos jungimo schema (a), srovės bei  $B=f(t)$  (b) ir magnetinės indukcijos vektoriai įvairiais laiko momentais (c, d, e, f)

suktis tik asinchroniškai, t. y. atsilikdami nuo magnetinio lauko. Dėl to asinchroninės mašinos, dirbančios variklio režimu, rotorius sūkių dažnis yra mažesnis nei magnetinio lauko:  $n < n_0$ .

Rotoriaus atsilikimas nuo statoriaus magnetinio lauko įvertinamas santykiniu dažnių skirtumu, kuris vadinamas slydimu:

$$s = (n_0 - n) / n_0 \quad (11.8)$$

Slydimą galima apskaičiuoti santykiniais vienetais arba, padauginus (11.8) lygybės skaitiklį iš šimto, procentais.

Asinchroninės mašinos, dirbančios variklio režimu, slydimas  $1 \geq s \geq 0$ . Paleidimo metu, kai magnetinis laukas sukasi, o rotorius dar nesisuka,  $n=0$ , slydimas  $s_k=1$ . Rotoriui įsisukant,  $n \rightarrow n_0$ , o  $s \rightarrow 0$ . **Vardinis asinchroninių variklių slydimas  $s_N = 0,01 - 0,07$ .** Paprastumo dėlei skaičiuodami apytiksliai laikysime  $s_N \approx 0,05$ .

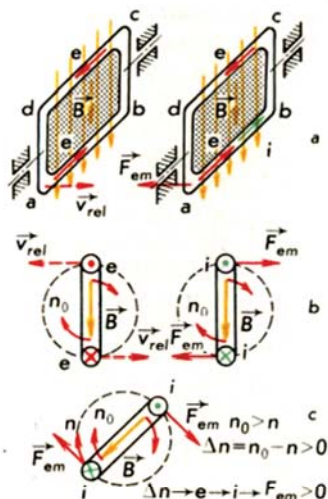
**11.2.2. Stabdymo režimas.** Yra atveju, kai variklio rotorių veikiantis elektromagnetinis momentas yra priešingas jo rotoriaus sukimo kryptiai. Tuomet variklis veikia kaip stabdys, t. y. stabdymo režimu.

Tarkime, kad uždara laidininkų grandinė yra sukamajame magnetiniame lauke. Ją sukame to lauko sukimosi kryptimi. Jei sukame magnetinio lauko greičiu ( $n=n_0$ ,  $s=0$ ), laidininkuose EVJ neindukuojamos ir elektromagnetinės jėgos jų neveikia (11.8 pav., a). Jei laidininkus sukame greičiu, didesniu negu sukasi laukas ( $n > n_0$ ), laidininkai magnetinį lauką kerta. Juose indukuojamas EVJ, teka srovė ir atsiranda juos veikiančios elektromagnetinės jėgos. Santykiu laidininkų judėjimo kryptis sutampa su tikrąja. Pažymėję indukuotą EVJ, srovės ir elektromagnetinių jėgų kryptis, matome (11.8 pav., b), kad laidininkus veikia jų judėjimą stabdantis elektromagnetinis momentas. Toks variklio režimas vadinamas **generatorinio stabdymo režimu**, nes variklis tiekia energiją šaltiniui, prie kurio prijungta jo statoriaus apvija. Variklio rotoriaus slydimas  $s < 0$ , nes  $n > n_0$  (žr. (11.8) lygtį).

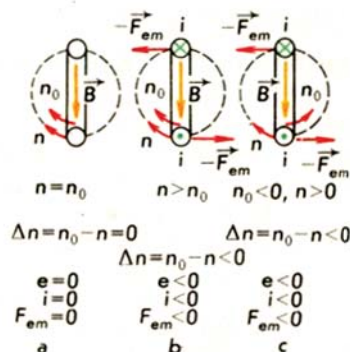
Variklis dirba kaip stabdys ir tuo atveju, kai jo rotorius yra sukamas priešinga kryptimi negu sukasi statoriaus magnetinis laukas. Tarkime, kad variklio darbo metu staiga pakeitėme lauko sukimosi kryptį (11.8 pav., c). Variklio rotorius ir toliau sukasi ankstesne kryptimi. Laidininkai kerta magnetinį lauką, ir juose indukuojamas EVJ. Laidininkų santykiu judėjimo kryptis lauko atžvilgiu yra tokia pat kaip jų tikrojo judėjimo kryptis. Pažymėję EVJ, srovės ir elektromagnetinių jėgų kryptis, gauname, kad elektromagnetinio momento kryptis yra priešinga rotoriaus sukimosi kryptiai. Šis momentas stabdo rotoriaus judėjimą.

Panašiai atsitinka, kai variklio rotorių veikia pasipriešinimo momentas, kuris yra didesnis už variklio elektromagnetinį momentą. Tuo atveju darbo mašina, pavyzdžiui, kroviniu keltuvas, suka rotorių priešinga kryptimi negu sukasi magnetinis laukas. Variklio elektromagnetinis momentas tam priešinasi, t. y. stabdo.

Toks režimas, kai variklio rotoriaus ir magnetinio lauko sukimosi kryptys yra priešingos, vadinamas **priešinio jungimo stabdymo režimu**. Sūkių dažnių skirtumas  $\Delta n = -n_0 - n$ , todėl rotoriaus slydimas  $s > 1$ .



11.7 pav. Schema asinchroninio variklio veikimo principui aiškinti: rotoriaus apvijos EVJ kryptis (a), srovės ir laidininkus veikiančių elektromagnetinių jėgų kryptys (b), asinchroniškai besisukančio rotoriaus judėjimo ir elektromagnetinių jėgų kryptys (c)



11.8 pav. Asinchroninio variklio rotoriaus apvijos pjuvio schemos: a – laidininkų neveikia elektromagnetinės jėgos; b – mašina veikia generatorinio ir c – priešinio jungimo stabdymo režimu



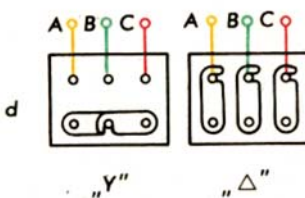
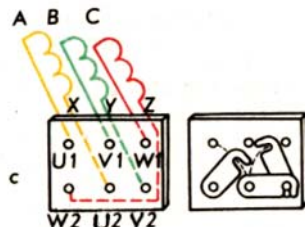
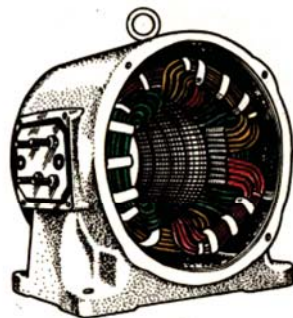
**11.2.3. Statorius.** Asinchroninio variklio statorius (11.9 pav.) yra jo nejudamoji dalis, kurioje sudaromas sukamasis magnetinis laukas. Tai feromagnetinės medžiagos cilindras su išilginiais grioveliais vidinėje pusėje. Sūkuriams srovėms sumažinti statoriaus magnetolaidis surenkamas iš oksiduoto paviršiaus elektrotechninio plieno lakštų. Į statoriaus griovelius klojama tolygiai paskirstyta vario ar aliuminio laidų apvija.

Statoriaus apvijos ričių išvadai prijungiami prie variklio skydelio gnybtų. Ričių pradžios (srovių fazių sekos kryptimi) žymimos lotyniškėmis raidėmis ir skaitmenimis  $U_1, V_1, W_1$ , o atitinkami galai –  $U_2, V_2, W_2^*$ . (Senesnių mašinų, pagamintų Tarybų Sąjungoje, – rusiškėmis raidėmis ir skaitmenimis: pradžios –  $C_1, C_2, C_3$ ; galai –  $C_4, C_5, C_6$ ).

Trifazio variklio statoriaus apvijos mažiausias ričių skaičius gali būti trys. Paprastai tokios apvijos išvadai variklio skydelyje išdėstomi tam tikra tvarka (žr. 11.9 pav., *d*). Kaip ir visi trifaziai imtuvai, statoriaus apvija gali būti jungiama į tinklą žvaigžde arba trikampi. Jungiant žvaigžde, apvijos ričių galai  $X, Y, Z$  sujungiami į vieną neutralųjį mazgą, o pradžios –  $A, B, C$  – prijungiamos prie trifazio tinklo (galima ir atvirkščiai). Trikampiu išvadai sujungiami taip:  $A$  su  $Z, B$  su  $X$  ir  $C$  su  $Y$ ; gautos išvadų poros prijungiamos prie trifazio tinklo. Kaip matome, išvadai specialiai išdėstomi taip, kad juos būtų patogu sujungti trikampi.

Kai statoriaus apvija turi daugiau ričių (6, 9 ir t. t.), jų galai išvedami į gnybtų skydelį tik tuo atveju, jei reikia juos perjunginėti (pavyzdžiui, variklio sukčių dažniui reguliuoti). Kai perjunginėti nebūtina, visos apvijos dalys sujungiamos mašinos viduje, o gnybtų skydelyje yra tik trys poros statoriaus apvijos išvadų.

**11.2.4. Rotorius.** Rotorius yra feromagnetinės medžiagos cilindras, kurio išoriniuose išilginiuose grioveliuose yra rotoriaus apvija. Rotoriaus magnetolaidis taip pat surenkamas iš oksiduotų dantytų elektrotechninio plieno lakštų. Rotoriaus sandara gali būti dvejopa. Paprastesnis yra **trumpai sujungtas rotorius** (11.10 pav.). Jo narvelio tipo apvija sudaryta iš varinių ar aliumininių neizoliuotų strypų, kurie iš abiejų rotoriaus pusių sujungiami žiedais. Tie strypai yra įveriami į rotoriaus griovelius arba išliejami, užpildant rotoriaus griovelius skystu aliuminiu ar siluminu (Si ir Al lydiniu).



11.9 pav. Asinchroninio variklio statoriaus bendras vaizdas (*a*), magnetolaidis (*b*), apvijos išvadų išdėstymo (*c*) ir jų jungimo (*d*) schemas

\* Vadovėlyje ir toliau apvijų išvadus (kaip ir visų trifazių imtuvų bei šaltinių) žymėsime  $A-X, B-Y, C-Z$ , nes toks žymėjimas yra vaizdesnis dėstymo metodikos požiūriu.

Trumpai sujungto rotoriaus žiedai su sparneliais iš abiejų pusių pagerina rotoriaus aušinimą. Tokia rotoriaus konstrukcija yra paprasta, technologiška. **Daugumos asinchroninių variklių**, ypač mažos ir vidutinės galios, **rotorius yra trumpai sujungtas**. Trumpai sujungto rotoriaus apvijos sravė sukuria magnetinį srautą, kurio polių porų skaičius savaime gaunasi toks pat kaip statoriaus magnetinio lauko.

**Faziniame rotoriuje** (11.11 pav.) yra izoliuoto varinio laidų apvija, kuri sudaroma taip, kad jos magnetinio lauko polių porų skaičius būtų toks pat kaip statoriaus lauko. Rotoriaus apvija dažniausiai yra **sujungiama žvaigžde: neutralusis mazgas izoliuojamas**, o kiti trys apvijos **ričių išvadai prijungiami prie trijų bronzinių kontaktinių žiedų**. Šie žiedai sukasi kartu su rotoriumi, jie yra izoliuoti nuo veleno ir prieš jų prispaudžiami šepetėliai. Šepetėlių kontaktai išvedami į variklio skydelį ir žymimi šitaip: *K, L, M* (rusiškais raidėmis ir skaitmenimis – *P1, P2, P3*).

Prie šepetėlių išvadų **galima prijungti trifazį reostatą, kuriuo reguliuojama rotoriaus grandinės varža**. Jei reostatas neprijungiamas, šepetėlių išvadus reikia sujungti trumpai, kad rotoriaus grandinė būtų uždara. Fazinio rotoriaus sandara yra sudėtingesnė, bet, **keičiant rotoriaus grandinės varžą, galima keisti variklio charakteristikas**.

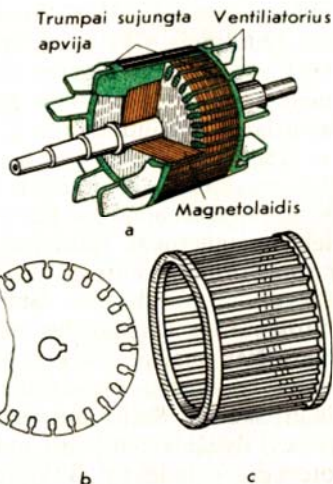
**Rotoriaus ir statoriaus magnetolaidžiai kartu su oro tarpu tarp jų sudaro variklio magnetinę grandinę** (11.12 pav.). Kuo geresnės plieno magnetinės savybės ir kuo mažesnis oro tarpas, tuo mažesnė yra šios grandinės magnetinė varža. (Mažos galios asinchroninių variklių oro tarpas yra 0,4–0,5 mm, o galingų – keletas milimetrų.) Tai reiškia, kad tokia pat MVJ sudaro didesnę magnetinę indukciją oro tarpe, gaunama didesnė rotoriaus apvijos EVJ ir stipresnė srovė, rotoriaus laidininkus veikia didesnė elektromagnetinė jėga. Tuo būdu, kuo mažesnė variklio magnetinės grandinės magnetinė varža, tuo mažesnė yra tokios pat galios variklio masė ir matmenys.

Kitos mašinos dalys yra tokios pat kaip ir kitų elektros mašinų. Tai velenas, guoliai, ventilatorius. Mašinos korpusas ir dangčiai dažniausiai gaminami iš aliuminio ar ketaus. Aušinimui pagerinti korpuso paviršius daromas briaunotas.

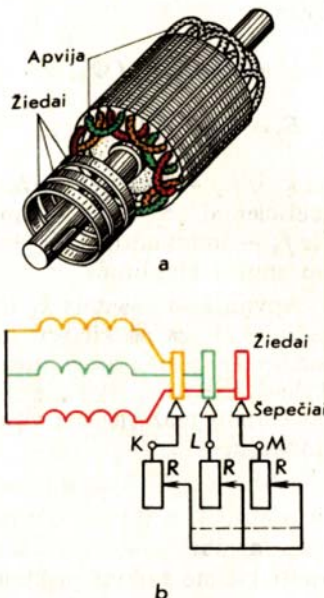
## 11.3

### Elektromagnetiniai reiškiniai asinchroniniame variklyje

Elektromagnetiniai reiškiniai asinchroninio variklio statoriuje ir rotoriuje **daug kuo panašūs į tuos, kurie vyksta**

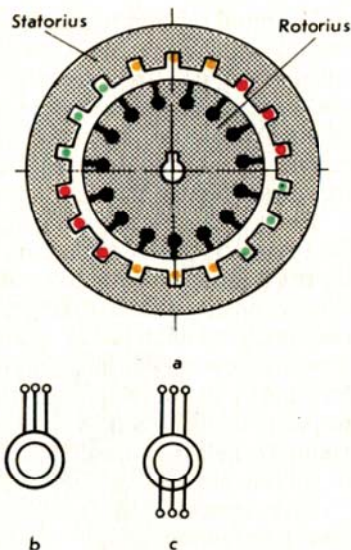


11.10 pav. Trumpai sujungto rotoriaus bendras vaizdas (a), magnetolaidžio lakštas (b), trumpai sujungta apvija (c)



11.11 pav. Fazinio rotoriaus bendras vaizdas (a) ir jungimo schema (b)

**transformatoriuje.** Variklio magnetinis srautas besisukdamas indukuoja EVJ statoriaus ir rotoriaus apvijose (kaip transformatoriaus kintamasis srautas – pirminėje ir antrinėje apvijose). Rotoriaus apvija (kaip ir antrinė transformatoriaus) dėl indukuotos EVJ teka srovė. **Skirtumas yra tas, kad transformatoriaus magnetinis srautas yra laiko funkcija, o asinchroninio variklio magnetinis laukas juda erdvėje. Be to, asinchroninio variklio rotorius sukasi.** Kaip tik dėl to elektromagnetiniai reiškiniai asinchroniniuose varikliuose ir transformatoriuose **aprašomi panašiomis lygtimis, tik įvertinant minėtus skirtumus.** Sudaromos asinchroninio variklio atstojamosios schemas bei vektorinės diagramos. Kad būtų paprasčiau nagrinėti, **lygtys bei schemas sudaromos tik vienai variklio statoriaus ar rotoriaus apvijos fazei, laikant apvijas simetriškomis.** Statoriaus elektrinius (ir kai kuriuos neelektrinius) dydžius žymėsime indeksu „1“ (pirminė apvija), o rotoriaus – indeksu „2“ (antrinė apvija).



11.12 pav. Asinchroninio variklio magnetinė grandinė (a) ir jo sutartiniai ženklai: b – su trumpai sujungtu rotoriumi; c – su faziniu rotoriumi

**11.3.1. Statoriaus ir rotoriaus apvijų EVJ. Sukamasis magnetinis laukas kerta statoriaus ir rotoriaus apvijų laidininkus ir indukuoja juose kintamąsias EVJ  $e_1$  ir  $e_2$ .** Jų efektyves vertes galime apskaičiuoti taip kaip skaičiavome transformatoriaus apvijų EVJ (žr. 9.1.2).

Tuo būdu statoriaus ir rotoriaus apvijos vienos fazės EVJ:

$$E_1 = 4,44 k_1 N_1 f \Phi_m, \quad (11.9)$$

$$E_2 = 4,44 k_2 N_2 f_2 \Phi_m; \quad (11.10)$$

čia  $k_1$  ir  $k_2$  – šiek tiek mažesni už vienetą (apie 0,95) apvijų koeficientai,  $N_1$  ir  $N_2$  – apvijų vienos fazės vijų skaičiai,  $f$  ir  $f_2$  – indukuotų EVJ dažniai,  $\Phi_m$  – variklio magnetinio srauto amplitudė.

Apvijų koeficientais  $k_1$  ir  $k_2$  įvertinama tai, kad apvijų laidininkai yra paskirstyti statoriaus ir rotoriaus magnetolaidžio paviršiuje, todėl juose indukuotų EVJ fazės šiek tiek skiriasi. Dėl to apvijos kiekvienos fazės EVJ efektyvė vertė yra truputį mažesnė nei vijų skaičiaus ir vienos vijos EVJ sandauga.

**Statoriaus EVJ dažnis yra lygus** ją indukavusio magnetinio srauto, t. y. įtampos, prie kurios prijungta statoriaus apvija, dažniui:  $f_1 = f$ . **Rotoriaus apvijos EVJ dažniui** apskaičiuoti galime taikyti priklausomybę, analogišką (11.6) lygbei. Kadangi sukasi ir statoriaus magnetinis laukas, ir rotorius, tai EVJ  $e_2$  dažnis yra proporcingas lauko ir rotoriaus sūkių dažnių skirtumui  $\Delta n = n_0 - n$ .

Pritaikę (11.6) lygybę, galime parašyti:  $f_2 = p \cdot \Delta n = p(n_0 - n)$ . Iš (11.8) išrašę  $n_0 - n = n_0 s$  gauname:

$$f_2 = pn_0 s = fs. \quad (11.11)$$

Kaip matome, rotoriaus apvijos EVJ dažnis priklauso nuo to, greitai ar lėtai sukasi rotorius, t. y. nuo slydimo. Paleidimo metu, kol rotorius dar nesisuka,  $n=0$ ,  $s_k=1$  ir  $f_2=f$ . Tuo metu rotoriaus apvijos EVJ dažnis yra didžiausias ir lygus statoriaus apvijos įtampos dažniui. Rotoriui įsisukant  $n \rightarrow n_0$ ,  $s \rightarrow 0$ ,  $f_2 \rightarrow 0$ .

Varikliui normaliai dirbant, jo rotoriaus apvijos EVJ dažnis palyginti su tinklo dažniu yra nedidelis. Pavyzdžiui, prie 50 Hz tinklo prijungto variklio, kurio apkrova vardinė, rotoriaus apvijos EVJ dažnis  $f_2 \approx 50 \cdot 0,05 \approx 2,5$  Hz.

Išrašę  $f_2 = fs$  reikšmę į (11.10), gauname:

$$E_2 = 4,44 k_2 N_2 f \Phi_m s. \quad (11.12)$$

Matome, kad ne tik dažnis, bet ir efektinė rotoriaus apvijos EVJ vertė priklauso nuo rotoriaus greičio. Paleidimo momentu  $n=0$ ,  $s_k=1$ , todėl EVJ yra didžiausia:

$$E_{2k} = 4,44 k_2 N_2 f \Phi_m. \quad (11.13)$$

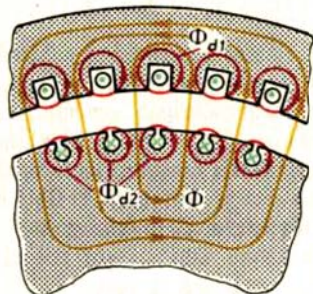
Rotoriui įsisukant,  $n \rightarrow n_0$ ,  $s \rightarrow 0$ , todėl EVJ mažėja. Padaliję (11.13) iš (11.12), turime:

$$E_2 = E_{2k} s. \quad (11.14)$$

Išrašę vardines  $E_{2N}$  ir  $s_N$  vertes, gauname:  $E_{2k} = E_{2N}/s_N \approx \approx E_{2N}/0,05 \approx 20E_{2N}$ . Matome, kad paleidimo metu rotoriaus apvijos EVJ  $E_{2k}$  gali būti 20 (ar daugiau) kartų didesnė už vardinę  $E_{2N}$ .

**11.3.2. Statoriaus ir rotoriaus apvijų varžos.** Statoriaus ir rotoriaus apvijų vienos fazės aktyviausias varžas pažymėsime  $R_1$  ir  $R_2$ . Tai pačiai mašinai jas laikysime pastoviomis.

Kaip ir transformatoriuje, be pagrindinio magnetinio srauto  $\Phi$ , kuris veria statoriaus ir rotoriaus apvijas, asinchroniniame variklyje yra statoriaus ir rotoriaus sklaidos srautai  $\Phi_{d1}$  ir  $\Phi_{d2}$ . Sklaidos magnetinių laukų linijos užsidauro apie laidininkus ar jų grupes (11.13 pav.). Kadangi apvijomis teka kintamoji srovė, sklaidos srautai yra kintamieji. Statoriaus bei rotoriaus apvijose jie indukuoja sklaidos EVJ  $e_{d1}$  ir  $e_{d2}$ , kurios faze skiriasi nuo iki tol nagrinėtų EVJ  $e_1$  ir



11.13 pav. Statoriaus ir rotoriaus apvijos sklaidos srautai

$e_2$  (žr. 5.5.1). Kaip ir transformatoriui, **jas pakeisime įtampos kritimais statoriaus ir rotoriaus apvijų sklaidos induktyviosiose varžose**:  $\underline{E}_{d1} = jX_{d1}I_1$  ir  $\underline{E}_{d2} = jX_{d2}I_2$ ; čia  $I_1$  ir  $I_2$  – statoriaus ir rotoriaus kompleksinės srovės.

Sklandos induktyviosios varžos (paprastumo dėlei žodis „sklandos“ bei indeksas „d“ dažnai yra praleidžiamas):

$$X_1 = 2\pi fL_1; \quad X_2 = 2\pi fL_2 = 2\pi fL_2s. \quad (11.15)$$

Kaip matome, **rotoriaus apvijų induktyvioji varža priklauso nuo slydimo**. Paleidimo momentu  $n=0$ ,  $s_k=1$ :

$$X_{2k} = 2\pi fL_2. \quad (11.16)$$

Iš (11.15) ir (11.16) gauname:

$$X_2 = X_{2k}s. \quad (11.17)$$

Paleidimo momentu, kai  $n=0$ , rotoriaus apvijų induktyvioji varža yra didžiausia. Varikliui išisukant ji mažėja.

**Kompleksinės statoriaus ir rotoriaus apvijų varžos:**

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + jX_2. \quad (11.18)$$

**11.3.3. Statoriaus ir rotoriaus grandinių atstojamosios schemos ir vektorinės diagramos.** Kaip ir transformatoriui, statoriaus ir rotoriaus apvijų vienai fazei galime sudaryti atstojamąją schemą ir nubraižyti vektorinę diagramą.

Statoriaus apvijų vienos fazės atstojamojoje schemoje (11.14 pav.) yra pavaizduoti tokie pat elementai kaip ir transformatoriaus pirminės apvijų. Tokiai grandinei galime užrašyti II Kirchhofo dėsnį:

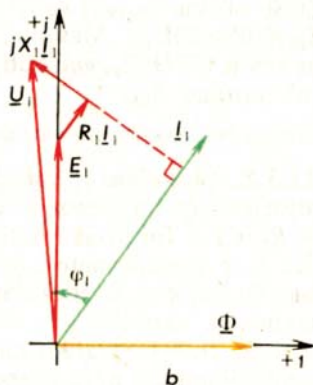
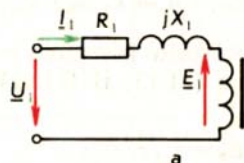
$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + (R_1 + jX_1)I_1. \quad (11.19)$$

**Statoriaus apvijų vektorinė diagrama** yra tokia pat kaip ir transformatoriaus pirminės apvijų (žr. 9.1.4).

Paprasčiausią **rotoriaus apvijų vienos fazės atstojamąją schemą** (11.15 pav., a) sudaro trys elementai: ritė, kurioje sukamasis magnetinis laukas indukuoja EVJ  $\underline{E}_2$ , induktyvumo ritė ir rezistorius. EVJ efektinė vertė  $E_2$  ir induktyvumo ritės varža  $X_2$  priklauso nuo rotoriaus slydimo, o  $R_2 = \text{const}$ . Taikome Omo dėsnį rotoriaus apvijų vienai fazei:

$$\underline{I}_2 = \underline{E}_2 / (R_2 + jX_2). \quad (11.20)$$

Prisiminę, kad  $E_2 = E_{2k}s$  ir  $X_2 = X_{2k}s$  (žr. (11.14) ir (11.17) lygbes) ir įrašę jas į (11.20), gauname:



11.14 pav. Statoriaus vienos fazės atstojamoji schema (a) ir vektorinė diagrama (b)

$$\underline{I}_2 = \underline{E}_{2k} s / (R_2 + jX_{2k} s). \quad (11.21)$$

Kaip matome, paleidimo momentu, kai  $s_k = 1$ , rotoriaus apvijos EVJ ir induktyvioji varža yra didžiausios. Padalykime (11.21) skaitiklį ir vardiklį iš slydimo  $s$ , kad nuo jo priklausytų tik vienas šios lygybės dešinėsios pusės narys:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_{2k}}{(R_2/s) + jX_{2k}}. \quad (11.22)$$

Ekvivalentinę atstojamąją grandinę (11.15 pav., b), kuriai tiktų (11.22) lygtimi užrašytas Omo dėsnis, sudaro apvija, kurios  $E_{2k} = \text{const}$ , ritė su  $X_{2k} = \text{const}$  ir keičiamos varžos  $R_2/s$  reostatas. Toks rotoriaus matematinis modelis fizikinių reiškinių požiūriu yra neteisingas. Iš tiesų  $R_2 = \text{const}$ , o kinta  $E_2$  ir  $X_2$ , bet juo paprasčiau matematiškai modeliuoti ryšius tarp rotoriaus apvijos elektrinių dydžių.

Kaip matome, rotoriaus srovė ir fazių skirtumas  $\psi_2$  tarp  $E_2$  ir  $I_2$  priklauso nuo rotoriaus slydimo:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_{2k}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2k}^2}}; \quad \text{tg } \psi_2 = \frac{X_{2k}}{R_2/s}. \quad (11.23)$$

Paleidimo momentu:

$$n = 0 \rightarrow s_k = 1 \text{ (max)} \rightarrow R_2/s = R_2 \text{ (min)} \begin{cases} \nearrow I_2 - \text{max} \\ \searrow \psi_2 - \text{max} \end{cases}$$

Varikliui įsisukant, sūkių dažnis didėja, todėl mažėja slydimas, rotoriaus apvijos srovė ir fazių skirtumas  $\psi_2$ :

$$n \uparrow \rightarrow s \downarrow \rightarrow (R_2/s) \uparrow \begin{cases} \nearrow I_2 \downarrow \\ \searrow \psi_2 \downarrow \end{cases}$$

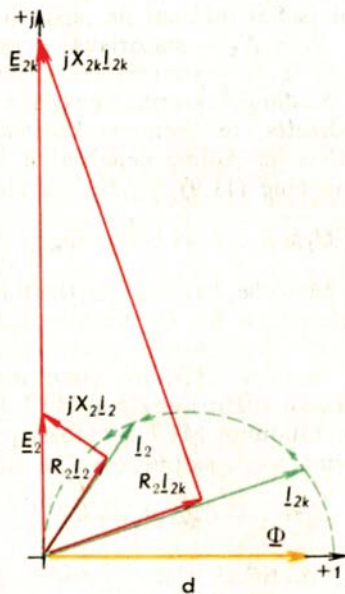
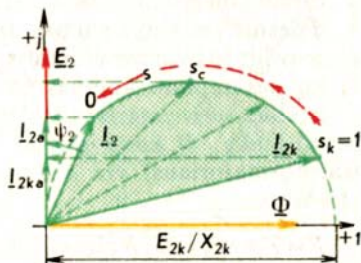
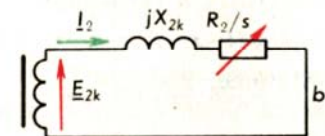
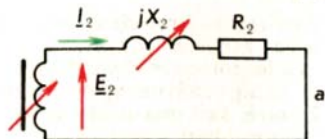
Rotoriaus srovės kitimą, varikliui įsisukant, iliustruoja nubraižyta apskritiminė vektorinė diagrama (11.15 pav., c). Srovės  $I_2$  vektorius hodografas yra apskritimo dalis.

Norėdami nubraižyti įtampų vektorinę diagramą, parašysime rotoriaus grandinei (11.15 pav., a) II Kirchhofo dėsnį:

$$R_2 \underline{I}_2 + jX_{2k} \underline{I}_2 = \underline{E}_2. \quad (11.24)$$

11.15 pav., d pavaizduota rotoriaus grandinės vektorinė diagrama dviem atvejais: 1) paleidimo momentu ( $I_{2k}$ ;  $E_{2k}$ ) ir 2) kai rotorius sukasi ( $E_2$ ;  $I_2$ ). Kuo didesnis rotoriaus sūkių dažnis, tuo mažesnė  $E_2$ ,  $I_2$  ir kampas  $\psi_2$ .

**11.3.4. Variklio magnetinis laukas ir srovių vektorinė diagrama.** Kai rotoriaus apvijos laidininkais teka srovės, jos sukuria rotoriaus magnetinį lauką. Jis turi tiek pat polių porų kiek ir statoriaus magnetinis laukas ir sukasi ta pačia kryptimi.



11.15 pav. Rotoriaus vienos fazės atstojamosios schemos (a, b), srovės (c) ir įtampų (d) vektorinės diagramos

Tarkime, kad rotoriaus magnetinio lauko sūkių dažnis (nejudamo rotoriaus atžvilgiu) yra  $n_{21}$ . Jį galime suskaidyti į dvi dedamąsias:  $n$  – paties rotoriaus sūkių dažnį ir  $n_{22}$  – rotoriaus magnetinio lauko sūkių dažnį rotoriaus apvijos atžvilgiu:  $n_{21} = n + n_{22}$ .

Žinome, kad magnetinio lauko sūkių dažnis jį kuriančios apvijos atžvilgiu gali būti apskaičiuotas iš (11.6) lygybės:  $n_{22} = f_2/p$ . Įrašę  $f_2 = fs$  iš (11.11), ir pasinaudoję (11.6) ir (11.8) lygybėmis, gauname:

$$n_{21} = n_0(1-s) + fs/p = n_0 - n_0s + n_0s = n_0. \quad (11.25)$$

Matome, kad rotoriaus apvijos magnetinis laukas sukasi tuo pačiu dažniu kaip ir statoriaus.

Rotoriaus magnetinis laukas erdvėje nesutampa su statoriaus magnetiniu lauku (11.16 pav.) ir jį silpnina. Kuo didesnis variklio slydimas, tuo stipresnė rotoriaus apvijos srovė ir jos išmagnetinantis poveikis, ir tuo didesnis laukų nesutapimo kampas  $\Theta$ .

Statoriaus ir rotoriaus laukai sudaro suminį variklio magnetinį lauką. Jį kuria suminė variklio MVJ, kuri (kaip ir transformatoriaus) yra statoriaus ir rotoriaus apvijų MVJ skirtumas:

$$\underline{F} = \underline{F}_1 - \underline{F}_2 = C_1 N_1 \underline{I}_1 - C_2 N_2 \underline{I}_2; \quad (11.26)$$

čia  $C_1$  ir  $C_2$  – koeficientai, priklausantys nuo mašinos statoriaus ir rotoriaus apvijų fazių skaičiaus bei konstrukcijos (tai pačiai mašinai jie pastovūs);

$N_1$  ir  $N_2$  – statoriaus ir rotoriaus apvijų vijų skaičius;  $\underline{I}_1$  ir  $\underline{I}_2$  – statoriaus ir rotoriaus kompleksinės srovės.

Kadangi statoriaus apvijos varžos  $R_1$  ir  $X_1$  yra palyginti nedidelės, tai įtampos kritimai jose nedideli:  $Z_1 \underline{I}_1 \ll E_1$ . Dėl to jų galime nepaisyti ir iš (11.19) parašyti:  $\underline{U}_1 \approx \underline{E}_1$ . Prisiminę (11.9) lygybę, galime užrašyti:

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E}_1 = 4,44 k_1 N_1 f \Phi_m. \quad (11.27)$$

Matome, kad variklio (kaip ir transformatoriaus) magnetinis srautas  $\Phi \sim U_1$ . Kai statoriaus apvijos įtampa  $\underline{U}_1 = \text{const}$ , srautas  $\Phi \approx \text{const}$ , ir variklio suminė MVJ  $\underline{F} \approx \text{const}$ .

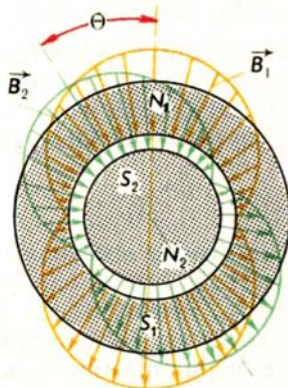
Idealios tuščiosios eigos metu  $n = n_0$ ,  $I_2 \approx 0$ , todėl (žr. (11.26)) tuščiosios eigos MVJ  $\underline{F}_0 = C_1 N_1 \underline{I}_0$ . Kadangi nekeičiant įtampos MVJ lieka tokia pat, tai varikliui, kaip ir transformatoriui, galime užrašyti šitokią MVJ lygtį:

$$C_1 N_1 \underline{I}_1 - C_2 N_2 \underline{I}_2 = C_1 N_1 \underline{I}_0. \quad (11.28)$$

Praktiškai  $C_1 \approx C_2$ , todėl, padaliję abi (11.28) lygties puses iš  $C_1 N_1$  sandaugos, gauname šitokią srovių lygtį:

$$\underline{I}_1 - (N_2/N_1) \underline{I}_2 = \underline{I}_0. \quad (11.29)$$

arba



11.16 pav. Sukamieji statoriaus ir rotoriaus magnetiniai laukai





Tuomet asinchroninio variklio naudingoji galia

$$P_2 = P_1 - P_d = P_1 - P_{d m1} - P_{d e1} - P_{d e2} \approx \\ \approx P_{em} - P_{d e2}; \quad (11.31)$$

čia  $P_d$  – statoriaus ir rotorius nuostolių galia.

Antra vertus, elektromagnetinę ir naudingąją galią galima užrašyti šitaip:

$$P_{em} = \omega_0 M_{em}, \quad (11.32)$$

$$P_2 = \omega M; \quad (11.33)$$

čia  $\omega_0$  ir  $\omega$  – statoriaus magnetinio lauko ir rotorius kampiniai greičiai,

$M_{em}$  ir  $M$  – variklio elektromagnetinis ir sukimo momentai.

Nepaisant trinties, galima laikyti, kad  $M \approx M_{em}$ . Iš (11.31)–(11.33) lygybių:  $P_{d e2} = P_{em} - P_2 = \omega_0 M - \omega M = (\omega_0 - \omega)M$ . Prisiminę, kad  $\omega = 2\pi n$ , o  $n_0 - n = n_0 s$  (žr. (11.18)), gauname:

$$P_{d e2} = s \omega_0 M = s P_{em}. \quad (11.34)$$

Įrašę gautą nuostolių galios reikšmę į (11.31), turime variklio naudingąją galią

$$P_2 = (1 - s) P_{em}. \quad (11.35)$$

**Kai variklio rotorius nesisuka**, pavyzdžiui, paleidžiant variklį,  $s_k = 1$ ,  $P_2 = 0$ . Tuo metu **visa iš tinklo imama aktyvioji energija variklyje pavirsta šiluma**. Kai slydimas vardinis ( $s_N \approx 0,05$ ), beveik visa elektromagnetinė energija paverčiama mechanine.

**11.4.2. Sukimo momentas.** Variklio sukimo momentas yra vienas svarbiausių jo mechaninių dydžių. Prisiminę, kad  $\omega_0 = 2\pi f/p$  (žr. 11.15), iš (11.34) lygties galime parašyti:

$$M = P_{d e2} / (s \omega_0) = p P_{d e2} / (2\pi f s). \quad (11.36)$$

Laikydami, kad rotorius apvija yra trifazė, rotorius elektrinių nuostolių galią galime apskaičiuoti šitaip:  $P_{d e2} = 3E_2 I_2 \cos \psi_2$ . Įrašysime į šią lygtį  $E_2 = 4,44 k_2 N_2 \Phi_m s$  (žr. (11.14) lygybę) ir po to gautąją  $P_{d e2}$  išraišką – į (11.36) lygtį. Pakeitę amplitudinę magnetinio srauto vertę efektine ( $\Phi_m = \sqrt{2} \Phi$ ) ir pastovių dydžių reiškinį pažymėję raide  $C_M$ , turime:

$$M = C_M \Phi I_{2a}; \quad (11.37)$$

čia  $C_M$  – pastovus tai pačiai mašinai koeficientas,  
 $I_{2a} = I_2 \cos \psi_2$  – aktyvioji rotoriaus apvijos srovės dedamoji.

Kai statoriaus apvijos įtampa  $U_1 = \text{const}$ ,  $\Phi \approx \text{const}$ , todėl  $M \sim I_{2a}$ , t. y. proporcingas aktyviajai rotoriaus apvijos srovės dedamajai. Pažvelgę į rotoriaus apvijos srovės apskritiminę diagramą (11.15 pav., c) matome, kad  $I_{2a}$  yra  $I_2$  vektorių projekcija į  $\underline{E}_2$  vektorių. Paleidžiant variklį,  $I_{2a}$  didėja, kol  $I_2$  vektorių viršūnė patenka į aukščiausią apskritimo tašką. Tuomet momentas didžiausias  $M = M_{\max}$ ; slydimas (vadinamas kriziniu)  $s = s_c$ ;  $\psi_{2c} = 45^\circ$ , todėl  $\text{tg } \psi_{2c} = X_{2c}/R_2 = 1,0$  ir  $X_{2c} = R_2$ . Matome, kad priklausomybė  $M = f(s)$  turi dvi skirtingas sritis. Pirmoji sritis: slydimas kinta nuo 1 iki  $s_c$ ; antroji – nuo  $s_c$  iki 0. Pirmojoje srityje, kai slydimas mažėja,  $I_{2a}$  didėja, o antrojoje – slydimui mažėjant,  $I_{2a}$  mažėja. Tai galima užrašyti šitaip:

1.  $1 \geq s \geq s_c$ :  $s \downarrow \rightarrow I_{2a} \uparrow \rightarrow M \uparrow$  iki  $M_{\max}$ ;
2.  $s_c \geq s \geq 0$ :  $s \downarrow \rightarrow I_{2a} \downarrow \rightarrow M \downarrow$  iki 0.

Kokybiškai  $M = f(s)$  galime pavaizduoti kreive (11.20 pav. a). Joje sužymėti du būdingieji taškai: paleidimo (K) –  $s_k = 1$ ,  $M = M_k$ ; krizinis (C) –  $s = s_c$ ,  $M = M_{\max}$ .

Kai variklis dirba generatorinio stabdymo režimu (žr. 11. 2.2), jo  $M = f(s)$  pobūdis yra toks pat kaip ir jam dirbant variklio režimu, bet laikoma, kad  $M < 0$  ir  $s < 0$  (žr. 11.20 pav., b). Kai variklio rotorių darbo mašina priverstinai suka prieš jo magnetinio lauko sukimosi kryptį, variklis dirba priešinio jungimo stabdymo režimu:  $M > 0$  ir  $s > 1$ .

Analizinę priklausomybę  $M = f(s)$  galime gauti, į (11.37) lygtį įrašę  $I_2$  ir  $\cos \psi_2$  vertes (žr. (11.23)):

$$M = C_M \Phi \frac{E_{2k}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2k}^2}} \cdot \frac{R_2/s}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2k}^2}}$$

Padaliję šios lygybės skaitiklį bei vardiklį iš  $(R_2/s)$  ir padauginę vardiklį iš  $(X_{2k}/X_{2k})$ , gauname:

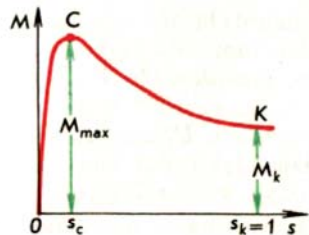
$$M = C_M \Phi \frac{E_{2k}}{X_{2k}} \cdot \frac{1}{R_2/(sX_{2k}) + (sX_{2k})/R_2} \quad (11.38)$$

Funkcijos  $M = f(s)$  ekstremumui rasti pirmąją išvestinę prilyginsime nuliui:  $dM/ds = 0$ . Gauname:

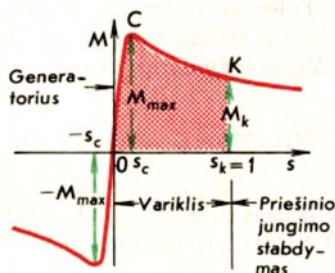
$$M_{\max} = C_M \Phi E_{2k} / (2X_{2k}); \quad s_c = R_2 / X_{2k} \quad (11.39)$$

Įrašę gautas  $M_{\max}$  ir  $s_c$  reikšmes į (11.38), gauname lygtį, vadinamą Kłoso lygtimi:

$$M = \frac{2M_{\max}}{s/s_c + s_c/s} \quad (11.40)$$



a



b

11.20 pav. Mechaninio momento priklausomybė nuo slydimo, kai asinchroninė mašina dirba variklio režimu (a) ir įvairiais režimais (b)

Taikant (11.40) lygtį, patogu iš variklio katalogo duomenų apskaičiuoti  $M=f(s)$  ir, jei reikia, pavaizduoti šią priklausomybę grafiškai (žr. 11.20 pav., a). Reikia pastebėti, kad ši lygtis tik apytikslė, nes buvo padaryta ne viena prielaida (pavyzdžiui,  $U_1 \approx E_1$ ,  $E_1 \sim \Phi$ ,  $R_2 = \text{const}$ , atsižvelgta tik į rotoriaus elektrinius nuostolius ir pan.), šiek tiek pakeičianti variklyje vykstančių reiškinų tikrąjį vaizdą.

Iš šios gana nesudėtingos lygties galime apskaičiuoti mechaninį momentą praktinėms reikšmėms pakankamu tikslumu, kai slydimas  $|s| \leq 0,3 - 0,4$ .

Tolesniam tyrimui įrašykime į didžiausio momento (11.39) lygtį  $E_{2k}$  reikšmę iš (11.13):  $M_{\max} = 4,44 C_M' k_2 N_2 f \Phi^2 / (2X_{2x})$ . Pakeitę magnetinį srautą jo reiškiniais iš (11.27), turime:

$$M_{\max} = CU_1^2, \quad (11.41)$$

čia  $C$  – tai pačiai mašinai pastovus koeficientas.

Įrašę gautą  $M_{\max}$  į (11.40), variklio sukimo momentą galime užrašyti šitaip:

$$M = 2C \frac{U_1^2}{s/s_c + s_c/s}. \quad (11.42)$$

Iš viso to, kas buvo čia išdėstyta, galima padaryti tokias praktikai labai svarbias išvadas.

1. Sukimo momentas yra proporcingas variklio statoriaus apvijos įtampos kvadratui. Sumažėjus įtampai  $U_1$ , sukimo momentas sumažėja pagal kvadratinę priklausomybę.

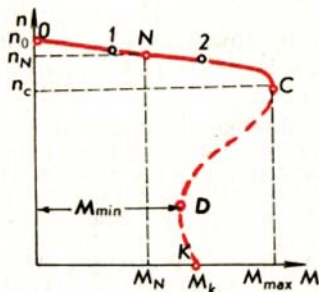
2. Krizinis slydimas  $s_c \sim R_2$ , o  $M_{\max}$  nuo rotoriaus varžos  $R_2$  nepriklauso. Padidinus rotoriaus aktyviają varžą  $R_2$ ,  $s_c$  padidėja, o  $M_{\max}$  išlieka toks pat (žr. (11.39)).

3. Kai  $s \leq s_N$ ,  $M = f(s)$  funkciją apytiksliai galima užrašyti tiesės lygtimi:

$$M = (M_N/s_N) s. \quad (11.43)$$

**11.4.3. Variklio su trumpai sujungtu rotoriumi mechaninė charakteristika.** Tokių variklių yra dauguma. Kai tokio variklio statoriaus apvija prijungiama prie varinės įtampos  $U_{1N}$ , kurios dažnis yra lygus variklio vardiniam dažniui  $f_N$ , variklio mechaninė charakteristika vadinama natūraliąja.

Natūraliąją mechaninę charakteristiką galime sudaryti iš  $M=f(s)$  (žr. (11.40) lygtį ir 11.20 pav.), prisiminę, kad rotoriaus sūkių dažnis  $n = n_0(1-s)$  (11.8). Matome, kad  $n$  yra tiesinė mažėjanti slydimo  $s$  funkcija, todėl, pakeitę slydimą sūkių dažniu, iš  $M=f(s)$  gauname  $n=f(M)$ . Gautosios kreivės forma yra panaši į anksčiau nubraižytos  $M=f(s)$  (11.21 pav.).



11.21 pav. Asinchroninio variklio natūralioji mechaninė charakteristika

Natūraliosios mechaninės charakteristikos  $n=f(M)$  dalis, kol  $M \leq 0,9M_{\max}$ , yra beveik tiesė, todėl laikoma, kad ją apytiksliai galima nubrėžti per du taškus: idealios tuščiosios eigos ( $O$ ) –  $n=n_0$ ;  $M=0$  ir vardinio režimo ( $N$ ) –  $n=n_N$ ;  $M=M_N$ . Tokiu atveju natūraliosios mechaninės charakteristikos tiesinę dalį apytiksliai galima užrašyti tiesės lygtimi (žr. (11.43)):

$$n = n_0 - \frac{n_0 - n_N}{M_N} M. \quad (11.44)$$

Be tuščiosios eigos ir vardinio režimo taškų, mechaninėje charakteristikoje yra pažymėti dar trys. Vienas iš jų yra **paleidimo taškas**  $K$ , kuriame charakteristika kerta abscisų ašį:  $n=0$ ,  $M=M_k$ . Paleidimo momentas  $M_k \geq M_N$ . Charakteristikos taškas  $C$  ( $M=M_{\max}$ ,  $n=n_c$ ) vadinamas kriziniu. Jis skiria variklio charakteristiką į dvi dalis:  $O-C$  – stabilaus darbo sritį ir  $C-K$  – pereinamųjų režimų sritį.

Dėl aukštesniųjų statoriaus apvijų srovės harmonikų statoriuje susidaro priešingos sukimosi krypties magnetinis laukas. Todėl, kai  $s \approx 0,8$ , praktiškai dažnai esti  $M_{\min} \leq (0,85 - 0,90)M_k$  (charakteristikos taškas  $D$ ).

Asinchroninis, kaip ir kiti elektros varikliai, yra **susireguliuojantis**. Tarkime, kad jis dirba apkrautas mechaniniu momentu  $M_{s1}$ . Jo sukimo momentas  $M_1 = M_{s1}$  ir  $n = n_1$  (žr. 11.21 pav., mechaninės charakteristikos 1 tašką). Jei apkrovos momentas padidėjo iki vertės  $M_{s2} > M_{s1}$ , bet  $M_{s2} < M_{\max}$ , variklio sukimo momentas  $M_1 < M_{s2}$ , todėl jo sūkių dažnis ima mažėti. Iš mechaninės charakteristikos  $n=f(M)$  matome, kad jos dalyje  $O-C$ , mažėjant  $n$ , didėja  $M$ . Variklio momentas didėja tol, kol naujasis sukimo momentas tampa lygus naujam apkrovos momentui:  $M_2 = M_{s2}$ , o  $n = n_2$ . Variklis pereina į charakteristikos 2 tašką.

Kintant apkrovos momentui, keičiasi ne tik variklio mechaniniai dydžiai, bet ir rotoriaus bei statoriaus apvijų srovės. Apkrovos momentui padidėjus ir sumažėjus rotoriaus greičiui, padidėja slydimas, todėl sustiprėja rotoriaus apvijų srovė  $I_2$  (žr. (11.23)). Kadangi įtampa  $U_1 = \text{const}$ ,  $\Phi \approx \text{const}$ , padidėjus išmagnetinimui, turi sustiprėti statoriaus apvijų srovė  $I_1$  (žr. (11.30)).

Šiuos reiškinius trumpiau būtų galima užrašyti šitaip:

$$\begin{array}{l} M_s \uparrow \rightarrow n \downarrow \nearrow M \uparrow \\ \searrow I_2 \uparrow \xrightarrow{(\Phi \approx \text{const})} I_1 \uparrow \\ (M_s < M_{\max}) \end{array}$$

Jei apkrovos momentas sumažėja, vyksta priešingi reiškiniai: variklio momentas sumažėja, padidėja rotoriaus greitis, susilpnėja rotoriaus ir statoriaus srovės.

Kitaip bus, jei variklį perkrausime momentu  $M_{s3} > M_{\max}$ . Sumažėjus rotoriaus greičiui, variklio momentas dar labiau sumažėja:  $M \ll M_{s3}$ , todėl rotoriaus greitis mažėja tol, kol variklis sustoja:

$$\begin{array}{l} M_s \uparrow \rightarrow n \downarrow \nearrow M \downarrow \rightarrow n \downarrow \rightarrow 0 \\ \searrow I_2 \uparrow \xrightarrow{(\Phi \approx \text{const})} I_1 \uparrow \rightarrow I_{1k} \\ (M_s > M_{\max}) \end{array}$$

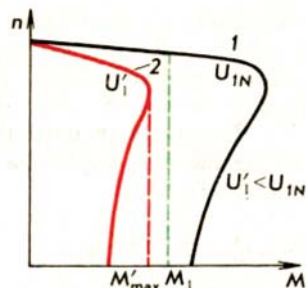
Variklis prisitaiko prie pakitusios apkrovos tik tuo atveju, jei apkrovos pasipriešinimo momentas yra ne didesnis už variklio  $M_{\max}$ . Perkrautas variklis sustoja. Labai dažnai  $n=f(M)$  dalis, atitinkanti variklio nestabilaus darbo sritį, net nebraižoma, o vaizduojama tik variklio stabilaus darbo tiesinė charakteristikos dalis. Asinchroninio variklio su trumpai sujungtu rotoriumi natūralioji mechaninė charakteristika yra kieta. Jo sūkių dažnis mažai priklauso nuo apkrovos: vardinis  $n_N$  esti tik apie 10% mažesnis už  $n_0$ .

Asinchroninis variklis gali būti perkrautas ir sustoti dar tuo atveju, kai netikėtai sumažėja jo statoriaus apvijos įtampa. Tarkime, kad variklis apkrautas momentu  $M_{s1}=M_1$ , jo sūkių dažnis  $n_1$  (11.22 pav.). Sumažėjus tinklo įtampai ( $U'_1 < U_{1N}$ ), variklio sukimo momentas dar labiau sumažėja, nes  $M \sim U_1^2$  (žr. (11.42)). Dėl to pasikeičia visa variklio mechaninė charakteristika. Gali būti, kad naujasis variklio sukimo momentas  $M'_{\max} < M_{s1}$ , todėl variklis gali sustoti. Dėl šių priežasčių netikėti tinklo įtampos sumažėjimai gali turėti nepageidautinų pasekmių ir būti pavojingi darbo apsaugos požiūriu.

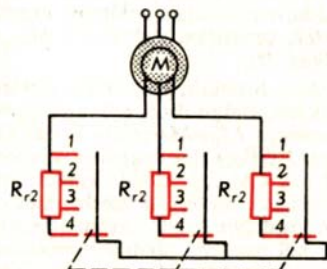
**11.4.4. Variklio su faziniu rotoriumi mechaninė charakteristika.** Į tokio variklio (11.23 pav.) rotoriaus grandinę galima įjungti reostatą, kurio varžą  $R_{r2}$  gali būti keičiama nuo nulio iki didžiausios vertės. Kai statoriaus apvija yra prijungta prie vardinės įtampos  $U_{1N}$  ir vardinio dažnio  $f_N$  šaltinio, o rotoriaus grandinėje papildomos varžos nėra ( $R_{r2}=0$ ), variklio su faziniu rotoriumi mechaninė charakteristika yra vadinama natūraliąja. Jos pobūdis ir variklio savybės yra tokie pat kaip ir variklio su trumpai sujungtu rotoriumi (žr. 11.23 pav., b, 1 kreivę).

Padidinus reostato varžą, variklio  $M_{\max}$  nepasikeičia, o krizinis slydimas  $s_c$  padidėja (žr. (11.39)). Variklio mechaninė charakteristika pasikeičia: tos pačios mechaninio momento vertės, pvz.,  $M_1$ , gaunamos esant mažesniai rotoriaus sūkių dažniui (didesniai slydimui). Pakinta ir paleidimo momentas  $M_k$ . Didinant  $R_{r2}$ , paleidimo momentą galima padidinti tiek, kad būtų  $M_k = M_{\max}$ . Jei varžą  $R_{r2}$  dar didinsime, paleidimo momentas pradės mažėti:  $M_{k4} < M_{\max}$ . Didinant varžą  $R_{r2}$  variklio darbo metu, galima priversti variklį dirbti priešinio jungimo stabdymo režimu, jei apkrovos momentas  $M_s > M_{k4}$ .

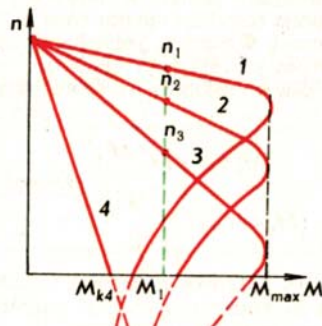
Natūralioji variklio su faziniu rotoriumi mechaninė charakteristika yra kieta. Padidinus  $R_{r2}$  charakteristikos yra minkštesnės: sūkių dažnis, didėjant apkrovai, mažėja labiau.



11.22 pav. Asinchroninio variklio natūralioji (1) ir dirbtinė (2) mechaninė charakteristika



a



b

11.23 pav. Asinchroninio variklio su faziniu rotoriumi schema (a) ir natūralioji (1) bei dirbtinės (2, 3, 4) mechaninės charakteristikos (b)

## 11.5

## Asinchroninio variklio įvairios charakteristikos ir greičio reguliavimas

**11.5.1. Paso ir katalogo duomenys.** Prie kiekvieno variklio yra pritvirtinta lentelė – jo pasas, kuriame surašyti svarbiausi variklio duomenys. **Asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi pase įrašyta:** vardinė aktyvioji galia  $P_N$ ; vardinis sūkių dažnis  $n_N$ ; linijinė tinklo įtampa ir variklio statoriaus apvijų jungimo būdas į nurodytos įtampos tinklą; vardinė linijinė statoriaus apvijų srovė  $I_N$  (priklausomai nuo jungimo būdo); vardiniai naudingumo ir galios koeficientai  $\eta_N$  ir  $\cos \varphi_N$ ; vardinis dažnis  $f_N$  bei kiti mažiau reikšmingi parametrai.

Iš paso duomenų galime apskaičiuoti ir kitus variklio parametrus: vardinį sukimo momentą; aktyviąją galią, kurią vardine apkrova apkrautas variklis ims iš tinklo; tuščiosios eigos sūkių dažnį, magnetinio lauko polių porų skaičių ir pan.

Variklių kataloguose, be jau minėtų paso duomenų, dar nurodomi tokie santykiai: paleidimo ir vardinės srovės –  $I_k/I_N$ ; paleidimo ir vardinio momento  $M_k/M_N$ . Žinodami šiuos santykius, galime apskaičiuoti variklio paleidimo ir didžiausią sukimo momentą ir sudaryti variklio mechaninę charakteristiką.

Labai svarbus variklio parametras yra didžiausio ir vardinio momentų santykis

$$\lambda = M_{\max}/M_N, \quad (11.45)$$

kuris nusako variklio perkrovimo galimybes, todėl yra vadinamas perkrovos koeficientu.

Žinodami  $\lambda$  ir vardinis  $M_N$  bei  $s_N$ , iš Klose lygties (žr. (11.40)) galime apskaičiuoti krizinį variklio slydimą

$$s_c = s_N (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (11.46)$$

Krizinis sūkių dažnis

$$n_c = n_0 (1 - s_c). \quad (11.47)$$

Daugumos asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi:  $I_k/I_N = 5-7$ ;  $M_k/M_N = 1,0-2,0$ ;  $\lambda = 2,0-2,5$ .

11.1 pavyzdys. Asinchroninio su trumpai sujungtu rotoriumi variklio pase įrašyta:  $P=5,5$  kW,  $f=50$  Hz,  $n=960$  r/min,  $\Delta/\gamma$ , 220/380 V,  $I=21,1/12,2$  A,  $\eta=0,85$ ,  $\cos\varphi=0,8$ . Išsiaiškinkime, kokiu būdu ir prie kokios tinklo įtampos galime jungti šį variklį. Apskaičiuokime variklio vardinį momentą, aktyviąją galią, kurią vardine apkrova apkrautas variklis ima iš tinklo, tuščiosios eigos sūkių dažnį, magnetinio lauko polių porų skaičių ir vardinį slydimą.

Sprendimas. Variklio pase įrašytas ženklelis  $\Delta/\gamma$  ir įtampos 220/380 V reiškia, kad šio variklio statoriaus apviją reikia sujungyti taip: kai tinklo linijinė įtampa  $U_l=220$  V,  $-\Delta$ ; kai  $U_l=380$  V,  $-\gamma$ . Pirmuoju atveju linijinė vardinė srovė  $I_{l\Delta}=21,1$  A, o antruoju  $I_{l\gamma}=12,2$  A. Kadangi mūsų respublikoje trifazių tinklų (išskyrus specialius atvejus) mažiausia  $U_l=380$  V, tokį variklį praktiškai visada jungsime  $\gamma$ .

Vardinė variklio galia yra lygi jo vardinėi naudingajai mechaninei galiai:  $P_N=P_{2N}=5,5$  kW. Variklio vardinis sukimo momentas (žr. (11.32)):  $M_N=P_N/\omega_N=P_N/(2\pi n_N)$ . Į šią lygybę reikia įrašyti sūkių dažnį, išreikštą sūkiiais per sekundę. Perskaičiuojame:  $n_N=960/60=16,0$  r/s. Tuomet  $M_N=5,5 \cdot 10^3 / (2\pi \cdot 16,0)=54,7$  N·m.  $P_{1N}=P_N/\eta_N=5,5 \cdot 10^3/0,86=6,40$  kW arba  $P_{1N}=\sqrt{3} U_N I_N \cos\varphi_N=\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 12,2 \cdot 0,8=6,42$  kW.

Idealos tuščiosios eigos sūkių dažnis yra lygus magnetinio lauko sūkių dažniui, kuris yra nežinomas. Jį būtų galima apskaičiuoti iš (11.7) lygties:  $n_0=50 \cdot 60/p$  (sūkių dažnį skaičiuodami išreikšime praktiškai plačiau vartojamais vienetais – sūkiiais per minutę). Šioje lygtyje abu dydžiai –  $n_0$  ir  $p$  – nežinomi, bet žinome, kad: 1)  $p$  yra sveikasis skaičius (1, 2, 3, 4 ir t. t.); 2)  $n_0 > n_N=960$  r/min; 3)  $n_0$  yra nedaug (tik keletu procentų) didesnis už  $n_N$ , nes vardinis slydimas  $s_N=0,01-0,07$ , t. y. nuo 1% iki 7%.

Dalydami 3000 iš  $p$ , gauname tokią  $n_0$  eilę (žr. 11.1 lentelę): 3000, 1500, 1000, 750 ir t. t. Paskutinė  $n_0$  vertė netinka, nes  $750 < 960$ . Pirmosios dvi taip pat netinka, nes jos daug didesnės už  $n_N$  (68% ir 36%).

Gavome, kad idealios tuščiosios eigos sūkių dažnis  $n_0=1000$  r/min, magnetinio lauko polių porų skaičius  $p=3$ , vardinis rotoriaus slydimas  $s_N=(n_0-n_N)/n_0=(1000-960)/1000=0,04$ , t. y. 4,0%.

11.2 pavyzdys. Iš katalogo žinome, kad to paties variklio (žr. 11.1 pavyzdį)  $I_k/I_N=6,5$ ;  $M_k/M_N=1,2$ ;  $\lambda=2,5$ . Apskaičiuokime variklio paleidimo srovę ir sudarykime jo mechaninę charakteristiką.

Sprendimas. Iš katalogo duomenų žinome, kad  $I_N=12,2$  A, kai variklis jungiamas prie 380 V tinklo. Jo paleidimo srovė  $I_k=6,5 \cdot 12,2=79,3$  A. Apskaičiuokime sūkių dažnį ir sukimo momentus mechaninei charakteristikai sudaryti: 1) ideali tuščioji eiga:  $M=0$ ,  $n=n_0=1000$  r/min; 2) vardinis režimas:  $M_N=54,7$  N·m;  $n_N=960$  r/min; 3) krizinis režimas:  $M_{\max}=\lambda M_N=2,5 \cdot 54,7=136,8$  N·m; krizinis slydimas  $s_c=s_N(\lambda + \sqrt{\lambda^2-1})=0,04 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2-1})=0,20$ ; krizinis sūkių dažnis:  $n_c=n_0 \cdot (1-s_c)=1000(1-0,20)=800$  r/min; 4) paleidimas:  $M_k=1,2 M_N=1,2 \cdot 54,7=65,6$  N·m;  $n=0$ .

Mechaninei charakteristikai  $n=f(M)$  sudaryti pirmiausia pažymime visus iš katalogo duomenų apskaičiuotus jos taškus (11.24 pav.). Tuščiosios eigos tašką (1) sujungiamo su vardinio tašku (2) ( $M_N$ ;  $n_N$ ). Tolesnei charakteristikos daliai nubraižyti iš Kłoso lygties (11.40) apskaičiuojame tarpinius kreivės taškus, kurių skaičių pasirenkame atsižvelgdami į reikiamą tikslumą. Tam reikia pasirinkti slydimų vertes, apskaičiuoti mechaninio momento vertes ir iš (11.8) lygties – sūkių dažnį  $n=n_0(1-s)$ .

Skaičiavimo rezultatai surašyti 11.2 lentelėje. Pavyzdžiui, charakteristikos taško koordinatės, kai  $s=0,08$ , buvo apskaičiuotos šitaip. Momentas:  $M=2M_{\max}/(s/s_c + s_c/s)=2 \cdot 136,8/(0,08/0,20 + 0,20/0,08)=94,3$  N·m;  $n=n_0(1-s)=1000(1-0,08)=920$  r/min. Reikia įsidėmėti, kad nestabilaus darbo charakteristikos dalies apskaičiuotų

11.2 lentelė. Mechaninės charakteristikos skaičiavimo rezultatai

$s$	$M$ N·m	$n$ r/min
0,00	0	1000
0,02	27	980
0,04	53	960
0,06	75	940
0,08	94	920
0,10	109	900
0,12	120	880
0,14	128	860
0,16	133	840
0,18	136	820
0,20	137	800
0,24	134	760
0,30	126	700
0,36	116	640
0,40	109	600

taškų koordinatinių tikslumas mažesnis, todėl apskaičiuota paleidimo momento vertė  $M_k$  yra mažesnė už tikrąją. Kuo didesnis kataloginis  $M_k/M_N$ , tuo didesnis skirtumas tarp skaičiuotos ir tikrosios  $M_k$  vertės. Taip yra todėl, kad pagerintų paleidimo savybių varikliuose paleidimo metu vyksta fiziniai procesai, kurie nebuvo įvertinti, išvedant (11.40) lygtį.

Praktiškai nestabilus darbo mechaninės charakteristikos dalis (išskyrus paleidimo tašką) dažniausiai mažiau svarbi, todėl ją nubrėšime (žr. 11.24 pav., ištisinė linija), laisvai sujungdami ją sudarytą kreivę su paleidimo taško koordinatėmis  $M=M_k$ ;  $n=0$ .

**11.5.2. Darbo charakteristikos.** Taip yra vadinamos įvairių variklio dydžių –  $M$ ,  $n$ ,  $I_1$ ,  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  – priklausomybės nuo variklio apkrovos koeficiento  $\beta = P_2/P_N$  (11.25 pav.).

Didėjant galiai, kuria variklis suka darbo mašiną ( $P_2 = 2\pi nM$ ), variklio sukimo momentas  $M$  didėja, o sūkių dažnis  $n$  šiek tiek mažėja. Statoriaus apvijų tuščiosios eigos srovė  $I_0$ , kai  $\beta=0$ , yra artima savo reaktyviajai dedamajai  $I_{1u}$  – įmagnetinimo srovei, kuriančiai statoriaus magnetinį lauką. Ji gana stipri –  $(0,3-0,4) I_{1N}$  – dėl didelės oro tarpo magnetinės varžos. Apkrovai didėjant, kaip matėme (žr. 11.4.3), statoriaus apvijų srovė stiprėja.

**Variklio naudingumo koeficientas**

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_d); \quad (11.48)$$

čia  $P_d$  – nuostolių galia;  $P_1$  – variklio statoriaus apvijų imama iš tinklo aktyvioji galia.

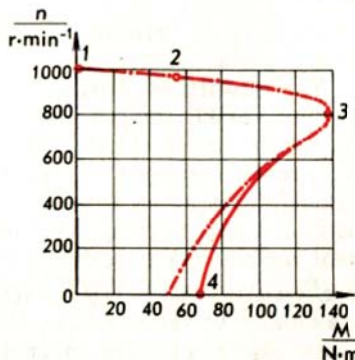
Visų elektros mašinų nuostolius galima suskirstyti į dvi grupes. Vieni jų (magnetiniai, mechaniniai) nuo apkrovos nepriklauso ir yra vadinami **pastoviais** (jų galią pažymėsime  $P_{dc}$ ). Kiti (elektriniai), didėjant apkrovai, didėja kvadratine priklausomybe ir yra vadinami **kintamaisiais** (jų galią pažymėsime  $P_{dv}$ ).

Kai variklis prijungtas prie vardinės įtampos ir nelabai apkrautas, elektriniai nuostoliai yra nedideli, o magnetiniai ir mechaniniai – vardiniai. Naudingumo koeficientas pagal (11.48) lygybę:  $\eta = 1/(1 + P_d/P_2) = 1/(1 + P_{dc}/P_2 + P_{dv}/P_2)$  yra nedidelis, nes pastoviųjų nuostolių galia yra gana didelė, palyginti su nedidele galia  $P_2$ . Didinant apkrovą, naudingumo koeficientas didėja, kol kintamieji nuostoliai susilygina su pastoviaisiais. Dar labiau apkraunant variklį, kintamieji nuostoliai padidėja tiek, kad naudingumo koeficientas ima mažėti.

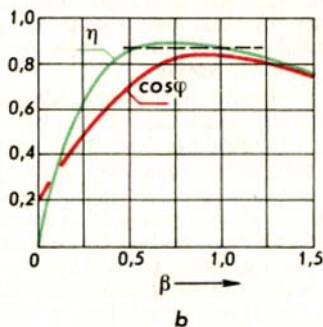
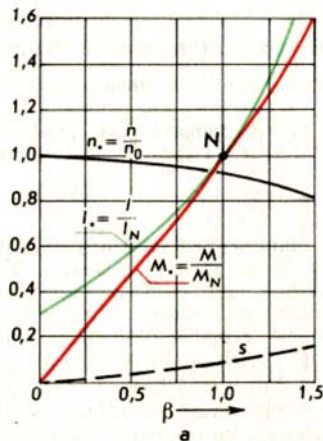
Paprastai elektros mašinos konstruojamos taip, kad naudingumo koeficientas būtų gana didelis, kai  $\beta=0,5-1,0$ . Asinchroninių variklių, kurių vardinė galia yra nuo 1 iki 20 kW, vardiniai naudingumo koeficientai esti 0,7–0,9.

**Galios koeficientas**

$$\cos \varphi = P_1/\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}; \quad (11.49)$$



11.24 pav. Mechaninė charakteristika, sudaryta iš katalogo duomenų



11.25 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos: a – slydimo bei santykių srovės, momento, sūkių dažnio; b – naudingumo bei galios koeficiento priklausomybė nuo apkrovos koeficiento  $\beta = P_2/P_N$



čia  $P_1$  ir  $Q_1$  – variklio statoriaus apvijos aktyvioji ir reaktyvioji galia.

Kai statoriaus apvijos įtampa  $U_1 = \text{const}$ ,  $\Phi \approx \text{const}$ . Tuomet variklį įmagnetinanti reaktyvioji srovės dedamoji  $I_{1\mu} \approx \text{const}$  ir  $Q_1 = U_1 I_{1\mu} \approx \text{const}$ . Esant vardinei įtampai  $U_{1N}$ , tuščiosios eigos  $\cos \varphi_0 = 0,1 - 0,2$ . Galios koeficientas nedidelis, nes  $P_2 = 0$  ir variklio aktyviąją galią sudaro magnetinių ir mechaninių nuostolių galia:  $P_1 = P_{dc} \leq Q_1$ . Didinant variklio apkrovą, didėja  $P_1 = U_1 I_{1a}$ . Dėl to didėja galios koeficientas  $\cos \varphi = 1/\sqrt{1 + (Q_1/P_1)^2}$ . Kai variklio apkrova yra didesnė už vardinę,  $\cos \varphi$  šiek tiek sumažėja, nes padidėja statoriaus ir rotoriaus magnetiniai sklaidos srautai. Asinchroninių variklių, kurių galia yra nuo 1 iki 20 kW, vardiniai galios koeficientai yra 0,7–0,9.

Kaip matome, **mažai apkrauti asinchroniniai** (kaip ir kiti) elektros varikliai yra **neekonomiški: jų naudingumo ir galios koeficientai yra maži**. Kuo didesnė galia ir greitaiegiškesnis variklis, tuo geresni jo ekonominiai rodikliai.

**11.5.3. Samprata apie greičio reguliavimą.** Rotoriaus sūkių dažnį iš (11.6) ir (11.8) lygčių galime užrašyti šitaip:

$$n = f(1-s)/p. \quad (11.50)$$

Matome, kad variklio greitį galime reguliuoti keisdami: 1) magnetinio lauko polių porų skaičių; 2) tinklo įtampos dažnį; 3) rotoriaus grandinės varžą (keičiamas krizinis slydimas). Pirmasis būdas taikomas varikliui su trumpai sujungtu rotoriumi, o trečiasis – su faziniu rotoriumi. Trumpai peržvelgsime šiuos būdus.

1. Statoriaus magnetinio lauko polių porų skaičius priklauso nuo apvijos ričių skaičiaus (žr. 11.1.1) ir jų sujungimo schemas. Paprastai viena statoriaus apvijos fazė yra sudaroma iš dviejų ar daugiau dalių, kurias galima sujungti nuosekliai arba lygiagrečiai. Trumpai sujungto rotoriaus magnetinis laukas turi tiek pat polių porų, kiek ir statoriaus, todėl rotoriaus sandaroje jokių pakeitimų daryti nereikia. Varikliui su faziniu rotoriumi šis būdas netaikomas, nes tektų perjunginėti dar ir rotoriaus apviją.

Šis greičio reguliavimo būdas turi tokių trūkumų: 1) **greitį galima keisti tik šuoliais** (2, 3 ir t. t. kartus); 2) sudėtinga variklio konstrukcija; 3) reikalinga komutacijos aparatūra.

2. Asinchroninio variklio greitį galima keisti **prijungiant jo statoriaus apviją prie reguliuojamo dažnio  $f = \text{var šaltinio}$** . Jei norime, kad nesikeistų variklio magnetinis srautas  $\Phi_m \approx U_1 / (4,44/k_1 N_1)$  (žr. (11.27)), reikia palaikyti santykį  $U_1/f \approx \text{const}$ . Tai reiškia, kad, keičiant dažnį  $f$ , proporcingai jam reikia keisti statoriaus apvijos įtampą.

Kaip šaltiniai dažniausiai yra naudojami tiristoriniai dažnio keitikliai. Šis būdas perspektyvus ir vis plačiau taikomas praktikoje. **Greitį galima reguliuoti sklandžiai.**

3. **Variklių su faziniu rotoriumi greitis reguliuojamas, keičiant rotoriaus grandinės varžą.** Ją didinant keičiasi variklio mechaninė charakteristika: esant tam pačiam sukimo momentui, gaunamas mažesnis rotoriaus sūkių dažnis (žr. 11.23 pav.). Pavyzdžiui, kai variklio sukimo momentas yra  $M_1$ , didinant  $R_{r2}$ , rotoriaus sūkių dažnis mažėja nuo  $n_1$  iki  $n_2$ .

Šiuo būdu greitį galima reguliuoti sklandžiai. Svarbiausi tokio metodo trūkumai: reguliavimo reostate gaunami dideli energijos nuostoliai, variklio mechaninės charakteristikos, padidinus rotoriaus grandinės varžą, yra minkštos.

Kai kuriais atvejais greitį galima šiek tiek pareguliuoti, keičiant variklio statoriaus apvijų įtampą. Kadangi turi būti  $U_1 \leq U_{1N}$ , tai įtampą (ir greitį) galima tik mažinti, lyginant su jos vardine verte. Kaip žinome,  $M \sim U_1^2$ , todėl sukimo momentas labai sumažėja. Šį būdą galima taikyti mažai apkrautiems varikliams.

Kaip matome, nors asinchroniniai varikliai turi daug gerų savybių, reguliuoti jų greitį yra gana keblu. Tai ir yra vienas didžiausių šių variklių trūkumų.

## 11.6

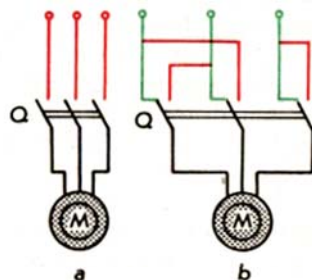
### Asinchroninių variklių paleidimas

**11.6.1. Tiesioginis prijungimas prie tinklo.** Dauguma asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi prie trifazio tinklo prijungiami tiesiogiai (11.26 pav.). Tam gali būti panaudoti kirtikliai arba automatinio valdymo aparatai.

Pakeisti variklio sukimosi kryptį (jį reversuoti) galima, pakeitus magnetinio lauko sukimosi kryptį (žr. 11.1.1). Variklio rotorius sukasi magnetinio lauko sukimosi kryptimi, t. y. priešinga buvusiai.

Kaip žinome (žr. 11.3.4), pradinio paleidimo laikotarpiu rotoriaus ir statoriaus apvijų srovės yra didžiausios. Daugumos variklių paleidimo srovė  $I_k/I_N = 5-7$ . Varikliui įsisukant, mažėja skirtumas tarp magnetinio lauko ir rotoriaus sūkių dažnių  $n_0 - n$ . Mažėjant slydimui, silpnėja rotoriaus, taip pat ir statoriaus apvijų srovės. Variklio sukimo momentas kinta nuo vertės  $M_k$  iki  $M_{max}$ , po to mažėja (žr. 11.21 pav.), kol susilygina su darbo mašinos pasipriešinimo momentu. Toliau variklio darbo režimas nusistovi, ir, jei apkrovos momentas nekinta, variklis suka darbo mašiną pastoviu sūkių dažniu  $n = \text{const}$ .

Paleidimo metu statoriaus ir rotoriaus grandinėse išskiriama daug šilumos. Ji nėra varikliui pavojinga, jei paleidimas trunka ne pernelyg ilgai. Paleidimo trukmė priklauso nuo variklio paleidimo momento  $M_k$  ir darbo mašinos statinio pasipriešinimo momento skirtumo. Paprastai paleidimo trukmė esti nuo kelių iki keliolikos sekundžių, ir tik ypatingais atvejais paleidimas gali trukti kelias dešimtis sekundžių. Net ir uždelsto paleidimo srovės varikliui nepavojingos, jei tik tokie paleidimai nėra labai dažni. Nedidelės galios (3–10 kW) asinchroninius variklius galima paleisti visiškai apkrautus, jungiant juos tiesiogiai į tinklą, 5–10 kartų per valandą.



11.26 pav. Asinchroninio variklio tiesioginio jungimo prie tinklo schemas: a – paleidimo viena kryptimi, b – reversinė

Antra vertus, tinklams elektros energiją tiekia transformatoriai, kurių galia yra ribota. Įmonėse gali būti vienas kitas labai galingas variklis, kurio galia artima transformatoriaus galiai. Paleidžiant tokį variklį, transformatoriaus antrinė apvija teka srovė, kelis kartus stipresnė už vardinę. Dėl to transformatoriaus antrinė, tuo pačiu ir variklio statoriaus įtampa gali sumažėti iki 60–70% vardinės vertės. Dėl to sumažėja paleidimo momentas, ir paleidimas gali užsitęsti. Jei variklio paleidimo momentas nėra didelis, pavyzdžiui,  $M_k = (1,0 - 1,2)M_N$ , o paleidimo metu apkrova yra vardinė, variklis gali netgi visai nepradėti sukis.

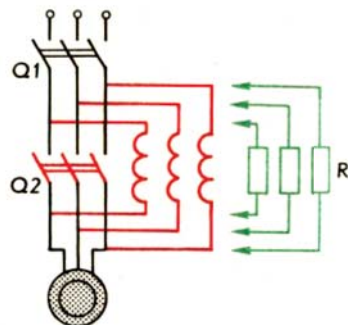
Kai prie to paties tinklo yra prijungta ir daugiau imtuvų, toks įtampos sumažėjimas gali sutrikdyti jų normalų darbą. Pavyzdžiui, kaitinimo lempų šviesos srautas labai priklauso nuo įtampos, ir dėl tinklo įtampos sumažėjimo paleidžiant variklius jos pastebimai prigęsta. Kad nebūtų tokios neigiamos paleidimo įtakos kitiems imtuvams, reikia, kad transformatorių galios atsarga būtų pakankama, o jautrūs įtampos svyravimams imtuvai būtų jungiami prie atskiro tinklo. Jei šių sąlygų įvykdyti negalima, reikia vietoj variklio su trumpai sujungtu rotoriumi parinkti variklį su faziniu rotoriumi. Pastarojo paleidimo srovę galima reguliuoti.

Reikia pastebėti, kad šiuolaikiniai tinklai paprastai yra pakankamai galingi, todėl beveik visada galima tiesiogiai paleisti asinchroninius variklius su trumpai sujungtu rotoriumi, kurių galia siekia net tūkstančius kilovatų.

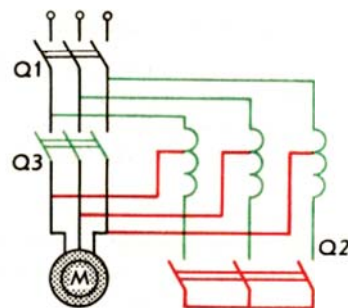
**11.6.2. Statoriaus apvijos įtampos mažinimas. Variklių su trumpai sujungtu rotoriumi paleidimo srovę galima susilpninti, mažinant variklio statoriaus apvijos įtampą. Kadangi variklio sukimo momentas  $M \sim U_1^2$ , tai jo paleidimo momentas tokiu atveju labai sumažėja. Dėl to ši priemonė taikoma tik galingiems, dažniausiai aukštos įtampos varikliams, kurie paleidžiami visai neapkrauti arba nelabai apkrauti.**

Pateiksime kelis būdingesnius pavyzdžius (11.27 pav.). Paleidžiant variklį su induktyvumo ritėmis (arba rezistoriais) statoriaus grandinėje, kirtiklis Q1 turi būti sujungtas, o Q2 – atjungtas. Srovė teka ritėmis, todėl jose gaunamas įtampos kritimas. Statoriaus apvijai tenka mažesnė įtampa, ir ja teka silpnesnė srovė. Varikliui įsisukus, sujungiamas kirtiklis Q2, kuriuo ritės trumpai sujungiamos, todėl, kai variklis dirba, jomis srovė neteka.

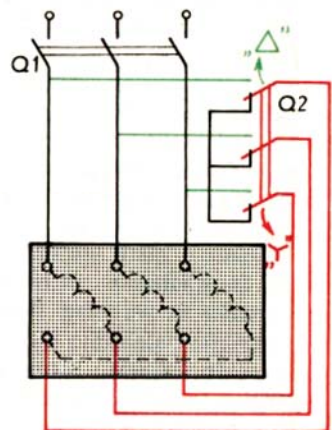
Variklio paleidimui galima panaudoti specialų autotransformatorių. Paleidimo metu sujungiami kirtikliai Q1 ir Q2. Variklio statoriaus apvijai tenka sumažinta įtampa – dalis tinklo įtampos. Varikliui šiek tiek įsisukus, Q2 atjungiamas. Statoriaus apvija įjungiamą į tinklą nuosekliai su autotransformatoriaus pirminės apvijos dalimis, kurios tampa induktyviosiomis ritėmis statoriaus grandinėje. Varikliui įsisukus iki tam tikro greičio, kirtiklis Q3 sujungiamas. Statoriaus apvija prijungiama prie visos tinklo įtampos, o autotransformatoriaus apvijomis srovė nebeteka.



a



b



c

11.27 pav. Variklio paleidimo schemos: a – su induktyvumo ritėmis arba rezistoriais, b – su autotransformatoriumi, c – perjungiant statoriaus apviją iš  $\Upsilon$  į  $\Delta$

Ir induktyvumo ritės, ir autotransformatoriai veikia tik palyginti trumpą laiką, o jiems įrengti reikalingos papildomos išlaidos.

Kai variklio statoriaus apvijai darbu priė jungiama  $\Delta$ , jos įtampa galima sumažinti, paleidimui sujungus ją  $\gamma$ . Tokiu atveju vienai variklio fazei įtampa sumažinama  $U_1/U_f = \sqrt{3}$  karto. Variklio paleidimo momentas sumažėja  $(\sqrt{3})^2 = 3$  kartus, paleidimo srovė variklio apvijose susilpnėja  $I_{f\Delta}/I_{f\gamma} = (\sqrt{3} U_f/Z_f)/(U_f/Z_f) = \sqrt{3}$  karto. Linijinė tinklo srovė  $- I_{\Delta}/I_{\gamma} = \sqrt{3} (\sqrt{3} U_f/Z_f)/(U_f/Z_f) = 3$  kartus. Šis būdas taikomas tik žemos įtampos varikliams paleisti ir palyginti retai, nes paleidimo metu tenka nutraukti variklio statoriaus grandinę, gaunami viršįtampiai dėl pereinamųjų procesų statoriaus apvijoje.

**11.6.3. Pagerintų paleidimo savybių varikliai.** Kaip matėme (žr. 11.23 pav.), asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos pobūdis priklauso nuo rotoriaus grandinės aktyviosios varžos. Kad variklis normaliai veiktų, ji turi būti kuo mažesnė. Tuomet variklio mechaninė charakteristika yra kieta, slidimas mažas, todėl ir galios nuostoliai rotorijuje mažesni (žr. (11.34) ir (11.35)), variklis ekonomiškesnis. Antra vertus, tam, kad būtų didesnis variklio paleidimo momentas, reikia, kad jo rotoriaus varža būtų didesnė.

Pagerintų paleidimo savybių varikliai yra ypatingi tuo, kad jų trumpai sujungto rotoriaus aktyvioji varža paleidimo metu yra didesnė, o varikliui įsisukant savaime sumažėja. Vienas iš tokių yra variklis su **giliais rotoriaus grioveliais**. Jo rotoriaus apvijos laidininkai yra pailgo skerspjūvio ir sukloti giliose (jų gylis keletą kartų didesnis už plotį) grioveliuose (11.28 pav., a ir b). Tokio laidininko varžos pasikeitimą, varikliui įsisukant, galima paaiškinti **pviršiaus efektu**.

Tarkime, kad apvijos laidininką padalijome į keturis vienodo ilgio ir skerspjūvio laidininkus  $A, B, C, D$  (11.28 pav., c). Jų aktyviosios varžos  $R = \rho l/S$  yra vienodos:  $R_A = R_B = R_C = R_D$ . Sukamasis magnetinis laukas indukuoja juose vienodas EVJ.

Tekant laidininkais srovei, apie kiekvieną iš jų susikuria magnetinis sklaidos laukas, kurio linijos gaubia kiekvieną laidininką. Kadangi rotoriaus šerdis yra feromagnetinė, magnetinio lauko linijos išsidėsto taip, kad magnetinės grandinės varža būtų mažiausia. Dėl to  $A$  laidininką gaubia didžiausias magnetinio lauko linijų skaičius, ir magnetinis srautas  $\Psi_A$  yra didžiausias:  $\Psi_A > \Psi_B > \Psi_C > \Psi_D$ . Prisiminę, kad induktyvumas  $L = \Psi/i$  (žr. (2.17)), matome, kad arčiau centro esančio  $A$  laidininko induktyvioji varža  $X_A = 2\pi f_2 L_A$  yra didžiausia:  $X_A > X_B > X_C > X_D$ . Tuo pačiu ir pilnutinė laidininko  $A$  varža didžiausia:  $Z_A > Z_B > Z_C > Z_D$ . Iš Omo dėsnio žinome, kad srovė yra atvirkščiai proporcinga varžai. Tai reiškia, kad  $A$  laidininku teka silpniausia srovė. Kitaip tariant, srovės tankis arčiau rotoriaus centro esančiose apvijos strypo dalyse yra mažesnis negu išorinėse:  $J_A < J_B < J_C < J_D$ .

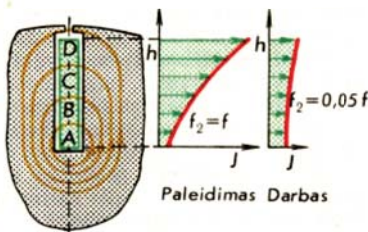
Toks srovės „išstūmimas“ į strypo išorinį kraštą yra lygiavertis strypo skerspjūvio sumažinimui, nes ne visas jo skerspjūvio plotas išnaudojamas. Dėl to padidėja rotoriaus apvijos aktyvioji varža.



a

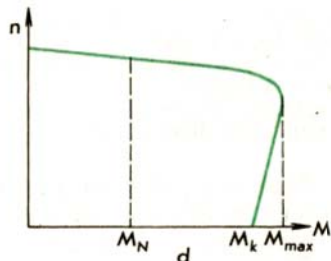


b



Paleidimas Darbas

c



11.28 pav. Variklio su giliais rotoriaus grioveliais rotoriaus bendras vaizdas (a), griovelių ir laidininkų skerspjūvio formos (b), rotoriaus laidininko magnetinis sklaidos srautas ir srovės tankio pasiskirstymas (c), mechaninė charakteristika (d)

**Paviršiaus efektas pasireiškia tuo stipriau, kuo yra didesnis rotoriaus srovės dažnis  $f_2$** , o jis nevienodas variklio paleidimo ir darbo metu. **Variklį paleidžiant**,  $f_2 = f$  ir yra didžiausias, todėl **paviršiaus efektas yra stipriausias**, ir rotoriaus apvijų aktyvioji varža  $R_{2k}$  – didžiausia. Dėl to gaunamas didelis paleidimo momentas  $M_k$ .

Varikliui įsisukant,  $s \rightarrow 0$ ,  $f_2 \rightarrow 0$ . Varikliui **normaliai veikiant**  $f_2$  yra labai mažas (1,0–3,5 Hz), todėl galima laikyti, kad induktyvioji varža  $X_2 \approx 0$ . **Paviršiaus efektas nepasireiškia**, ir rotoriaus apvijų varža yra lygi mažiausiai aktyviajai varžai –  $R_2$ . Ji yra nedidelė, todėl variklio natūralioji mechaninė charakteristika stabilaus darbo srityje yra kieta (11.28 pav., d).

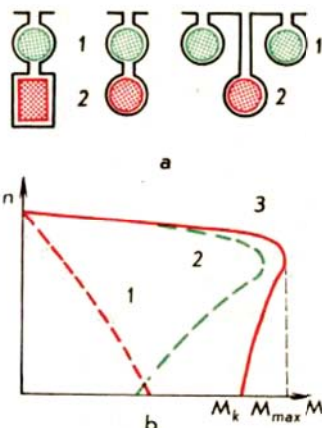
Panašūs reiškiniai vyksta rotorijuje, kuriame yra **dvi** trumpai sujungtos narvelio tipo apvijos (11.29 pav.). Jas sąlygiškai pavadinsime paleidimo (1) ir darbo (2). Paleidimo apviją gaminama iš žalvario ar bronzos, o darbo apviją yra varinė, todėl paleidimo apvijos aktyvioji varža paprastai esti 2–4 kartus didesnė nei darbo.

**Variklį paleidžiant** darbo apvijų laidininkus gaubia didesnis magnetinis sklaidos srautas, todėl jos induktyvioji varža padidėja tiek, kad darbo apviją, lyginant su paleidimo apviją, teka silpna srovė. Sukimo momentą sudaro magnetinio lauko ir paleidimo apviją tekančios srovės sąveika. Tuo būdu paleidimo metu rotoriaus apvijų varža yra didesnė ir atitinkamai didesnis paleidimo momentas. **Darbo metu**, kai  $f_2 \approx 0$ , paleidimo apviją teka kelis kartus silpnesnė srovė nei darbo apviją, todėl paleidimo apviją didelės įtakos neturi. Galime laikyti, kad rotoriaus apvijų varža yra artima darbo apvijų varžai, t. y. mažesnė.

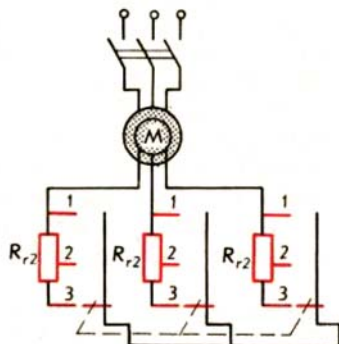
Variklio mechaninę charakteristiką sudarysime, nagrinėdami atskirų apvijų veikimą. Jei variklis turėtų tik paleidimo apviją, jo mechaninė charakteristika būtų 1 kreivė; jei tik darbo apviją – 2 kreivė. Kadangi abi apvijos sukuria sukimo momentus, tikrasis variklio sukimo momentas yra lygus jų sumai. Variklio mechaninė charakteristika yra 3 kreivė. Matome, kad paleidimo apvijų įtaka variklio charakteristikai jo stabilaus darbo srityje yra labai maža. Paleidimo metu (kol  $n < n_c$ ) variklio sukimo momentas didesnis ir galima daugiau perkrauti variklį, nes didesnis  $M_{max}$ .

Pagerintų paleidimo savybių varikliai ne tik turi didesnius paleidimo momentus. Kadangi paleidimo metu rotoriaus varža padidėja, rotoriaus ir statoriaus apvijų srovės nėra pernelyg stiprios. Matome, kad šie varikliai turi iš karto dvi geras savybes: padidintą paleidimo momentą ir susilpnintą paleidimo srovę. (Paprastai  $M_k/M_N = 1,8-2,2$ , o  $I_k/I_N = 4-6$ .) Kadangi tokie rotoriaus sandaros pakeitimai nėra labai sudėtingi (ypač tai liečia gilius griovelius), dauguma didesnės nei 0,5 kW galios variklių yra pagerintų paleidimo savybių.

**11.6.4. Variklis su faziniu rotoriumi. Tokių variklių paleidimo momentas padidinamas, o paleidimo srovė susilpninama, įjungiant į rotoriaus grandinę šuoliais reguliuojamos varžos reostatą** (11.30 pav.). Kaip žinome, didinant (iki tam



11.29 pav. Rotoriaus paleidimo (1) ir darbo (2) apvijų laidininkai (a) ir variklio mechaninės charakteristikos (b), esant: tik paleidimo apvijai (1), tik darbo apvijai (2), ir tikroji (3)



11.30 pav. Variklio su faziniu rotoriumi paleidimo schema (a), mechaninės charakteristikos (1, 2, 3) ir paleidimo srovės kitimas (1', 2', 3') (b)

tikros vertės) rotoriaus grandinės aktyviają varžą (žr. 11.4.4), pasikeičia variklio mechaninė charakteristika:  $M_{\max}$  lieka toks pat, o  $M_k$  didėja.

Tarkime, kad pradiniu paleidimo laikotarpiu rotoriaus grandinės aktyvioji varža didžiausia (reostato 3 padėtis). Variklio  $n=f(M)$  yra 3 kreivė. Laikotarpiu  $t_0-t_1$  variklis palaipsniui išsisuka; jo momentas ir sūkių dažnis kinta taip kaip rodo 3 kreivė. Varikliui šiek tiek išsisukus, jo momentas sumažėja iki  $M_{\min}$ . Laiko momentu  $t_1$  perkeltame šuoliu reostato slankiklį į 2 padėtį. Variklio mechaninė charakteristika dabar yra jau 2 kreivė. Variklio sūkių dažnis staiga pakisti negali, o sukimo momentas pakinta staigiai. Toliau  $n$  ir  $M$  kinta taip, kaip rodo 2 kreivė, kol, momentui sumažėjus iki  $M_{\min}$  (laiko momentas  $t_2$ ), rotoriaus reostato slankiklis šuoliu perjungiamas į 1 padėtį. Reostato varža  $R_{r,2}=0$ , variklio  $n=f(M)$  yra natūralioji – 1 kreivė.

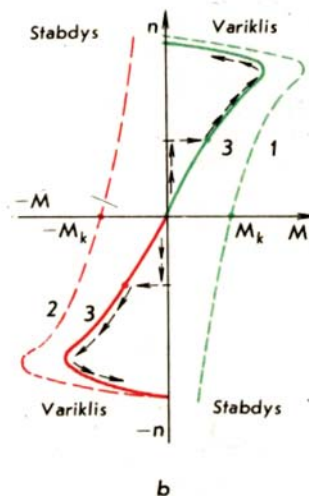
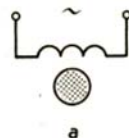
Kadangi paleidimo metu yra susilpninama rotoriaus apvijų srovė, susilpnėja ir statoriaus apvijų srovė (žr. 11.30 pav., b, kreives 3', 2', 1'). Rotoriaus grandinės varžai keisti dažniausiai yra naudojama automatinio valdymo aparatūra (žr. 13.8.5).

## 11.7

### Vienfaziai asinchroniniai varikliai

Tai asinchroniniai varikliai, kurių statoriaus apvija jungiama prie vienfazio tinklo, o rotorius yra trumpai sujungtas. Jie ypač plačiai taikomi buityje ir automatikoje. Dažniausiai jų galia esti iki kelių šimtų vatų. Energetiniai vienfazių variklių rodikliai yra blogesni nei trifazių: tų pačių matmenų ir masės vienfazis variklis paprastai turi 50–60% trifazio variklio vardinės galios.

**11.7.1. Variklis su vienfaze apvija.** Tokio variklio statoriuje yra tik viena ritė (11.31 pav.). Prijungus ją prie vienfazio tinklo, sukuriamas erdvėje nejudantis, bet pulsuojantis magnetinis laukas. Kaip žinome (žr. 11.1.3), tokį magnetinį lauką galima pakeisti dviem vienodos magnetinės indukcijos besisukančiais tuo pačiu greičiu, bet priešingomis kryptimis, magnetiniais laukais. Nubraižysime variklio mechanines charakteristikas: pirmąją, kurią jis turėtų, jei būtų tik viena kryptimi besisukantis magnetinis laukas (pavadinkime jį tiesioginiu), ir antrąją, kurią variklis turėtų, jei būtų tik priešinga kryptimi besisukantis (atvirkštinis) magnetinis laukas. Prateisime jas kiek toliau, negu braižyme anksčiau, parodydami  $n=f(M)$ , kai variklis dirba priešinio jungimo stabdymo režimu (žr. 11.20 pav., b).



11.31 pav. Asinchroninio variklio su vienfaze statoriaus apvija schema (a) ir mechaninės charakteristikos sudarymas (b)

Tikroji variklio mechaninė charakteristika gaunama sudedant mechaninius momentus, kuriuos turėtų rotorius dėl kiekvieno magnetinio lauko poveikio, esant tam tikram sukūčių dažniui. Matome, kad gautoji 3 kreivė yra panaši į asinchroninio variklio mechaninę charakteristiką, bet ji eina per koordinatinių ašių susikirtimo tašką. Tai reiškia, kad kai  $n=0$ , variklio paleidimo momentas  $M_k=0$ . Įjungtas į tinklą variklis negali pradėti sukis, nes abu laukai sudaro du lygius, bet priešingų kryptų sukimo momentus.

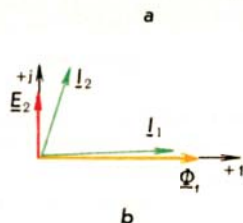
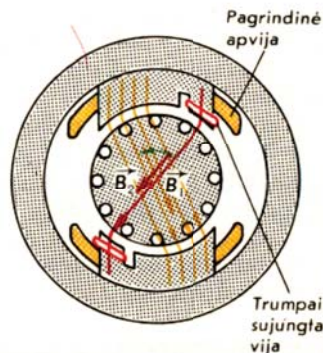
Tarkime, kad įsukome variklio rotorį kuria nors kryptimi. Mechaninių momentų simetrija suyra. Ta kryptimi variklio sukimo momentas padidėja ir, jei jis yra didesnis už pasipriešinimo momentą, rotoriaus sukūčių dažnis didėja. Darbo taškas patenka į charakteristikos stabilaus darbo sritį; variklis normaliai dirba. Variklį atjungus, jis nustoja sukis ir, kad galėtume jį paleisti, rotorį reikia vėl įsukti. Variklis vienodai paleidžiamas tiesioginio ar atvirkštinio magnetinio lauko kryptimi.

Suprantama, kad toks variklio paleidimo būdas nėra patogus. Geriau padaryti šiek tiek sudėtingesnės sandaros vienfazį variklį, kurio paleidimo momentas  $M_k > 0$ . Toks yra ekranuotų polių variklis, kurio statoriaus apvija uždėta ant polių (11.32 pav.). Dalis poliaus yra įskelta, ir ant tos dalies uždėta trumpai sujungta vija – laidininko žiedas. Pagrindinių polių magnetinis srautas  $\Phi_1$  yra kintamasis. Jo dalis veria trumpai sujungtą viją ir joje indukuoja EVJ  $e_2$ , kuri pralenkia  $90^\circ$  faze ją kuriantį magnetinį srautą. Kadangi trumpai sujungtos vijos varža yra maža, ja teka gana stipri srovė  $i_2$ . Turime dvi išskirtas erdvėje rites (pagrindinę apviją ir trumpai sujungtą), kuriose srovės skiriasi beveik  $90^\circ$  faze. Gaunamas sukamasis magnetinis laukas. Kadangi rikių ašys nestatmenos ir jų MVJ nevienodos, magnetinio lauko indukcija dažniausiai nėra pastovi, tačiau variklis sukuria, nors ir nedidelį, bet praktiškai dažnai pakankamą paleidimo momentą  $M_k = (0,2 - 0,5)M_N$ .

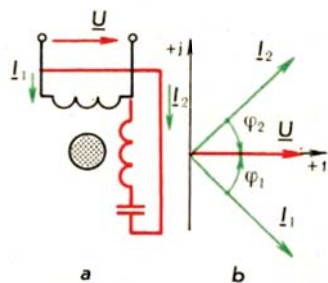
Ekranuotų polių variklių naudingumo koeficientas tik  $0,25 - 0,4$ . Paprastai jų galia – nuo vato dalių iki  $20 - 30$  W.

**11.7.2. Variklis su dvifaze apvija.** Tai asinchroninis variklis, kurio statoriuje yra dvi ritės, išdėstytos statmenai viena kitai (11.33 pav.). Kaip žinome (žr. 11.1.2), tokio variklio statoriuje gaunamas sukamasis magnetinis laukas, jei jo ritėmis teka srovės, besiskiriančios  $90^\circ$  faze. Ši fazių skirtumą galime gauti, prijungę vieną ritę prie tinklo nuosekliai su kondensatoriumi.

Praktiškai antrąją statoriaus apvijos ritę, rotoriumi įsukus, būtų galima atjungti, nes, suteikus paleidimo momentą, variklis gali sukis. Jei antroji ritė yra skiriama tik palei-



11.32 pav. Vienfazis ekranuotų polių variklio sandara (a) ir vektorinė diagrama (b)

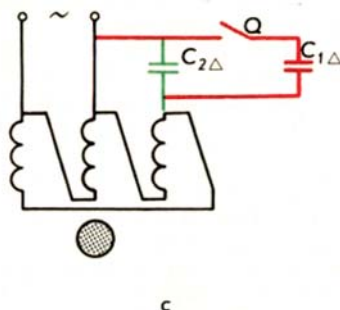
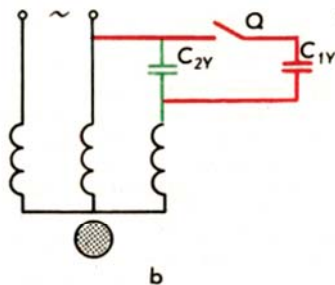
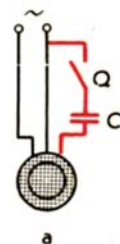


11.33 pav. Vienfazis variklio su dvifaze statoriaus apvija schema (a) ir srovių vektorinė diagrama (b)

dimui, ji vadinama paleidimo apvija ir apskaičiuojama trumpalaikiam darbui. Paleidimui reikalingas kondensatorius, kurio reaktyvioji galia yra lygi variklio pilnutinei galiai. Kondensatoriai paprastai naudojami tais atvejais, kai reikalingas didelis paleidimo momentas.

Vietoj kondensatoriaus nuosekliai paleidimo apvijai gali būti jungiamas rezistorius. Tuomet variklio paleidimo apvija pagaminama taip, kad jos induktyvioji varža būtų labai maža. Tuo siekiama gauti kuo didesnę fazių skirtumą tarp apvijos ričių srovių, bet jis negali būti lygus  $90^\circ$ .

Gali būti, kad abi variklio statoriaus ritės yra apskaičiuotos ilgalaikiam darbui ir nė vienos atjungti nereikia, kai variklis dirba. Viena ritė nuosekliai sujunginama su kondensatoriumi, todėl tokie varikliai vadinami **kondensatoriniais**. Jų ekonominiai rodikliai geresni, negu vienfazių variklių su paleidimo apvija, ir panašūs į trifazių variklių.



**11.7.3. Trifazis variklis vienfaziam tinkle.** Trifazį variklį galima prijungti prie vienfazio tinklo, panaudojus vieną jo statoriaus apvijos fazę kaip paleidimo apviją (11.34 pav., a). Variklį paleidus, fazę su paleidimo kondensatoriumi ar rezistoriumi galima atjungti. Variklio vardinė galia sudaro tik 40–50% vardinės trifazio variklio, prijungto prie trifazio tinklo, galios.

Kai reikia turėti didesnę sukimo momentą, naudingumo ir galios koeficientą, kondensatorius paliekamas įjungtas ir varikliui dirbant. Kadangi variklio paleidimui reikalingas didesnės talpos kondensatorius, o darbui – mažesnės, paprastai yra prijungiami du (11.34 pav., b ir c): paleidimo metu įjungiami abu kondensatoriai –  $C_1$  ir  $C_2$ , o darbui paliekamas tik  $C_2$ . Kondensatoriaus talpa priklauso nuo variklio statoriaus sujungimo būdo ir gali būti apskaičiuojama mikrofaradais šitaip:

$$C_1 = (2,5 - 3,0) C_2; \quad C_{2\gamma} = 2800 I/U; \quad C_{2\Delta} = 4800 I/U; \quad (11.51)$$

čia  $I$  – fazinė srovė amperais,  $U$  – fazinė įtampa voltais.

11.34 pav. Trifazio variklio jungimo prie vienfazio tinklo schemas: a –  $\gamma$  arba  $\Delta$  su vienu atjungiamu kondensatoriumi, b –  $\gamma$  ir c –  $\Delta$  su paleidimo ir darbo kondensatoriais

## Kontroliniai klausimai ir užduotys

11.1. Paaiškinkite, kas tai yra:

- trifazė statoriaus apvija;
- statorius, rotorius;
- trumpai sujungtas rotorius;
- fazinis rotorius;
- rotorius su giliais grioveliais;
- trifazis, dvifazis, vienfazis variklis;
- sukamasis magnetinis laukas;
- pulsuojantis magnetinis laukas;
- sinchroninis greitis;
- slydimas, kritinis slydimas, vardinis slydimas.

11.2. Kaip sudaroma trifazio asinchroninio variklio statoriaus apvija? Kaip ji jungiama į tinklą?



11.3. Kaip gaunamas trifazis sukamasis magnetinis laukas statoriaus apvijoje, sudarytoje iš trijų ričių? Kiek jis turi polių porų? Kokia jo indukcija? Koks sūkių dažnis?

11.4. Kaip trifazėje statoriaus apvijoje gaunamas dviejų polių porų sukamasis magnetinis laukas? Kiek statoriaus apvija turi turėti ričių? Kaip jas reikia sujungti?

11.5. Kokia kryptimi sukasi trifazės apvijos magnetinis laukas? Kaip pakeisti jo sukimosi kryptį? Pateikite pavyzdžius.

11.6. Parašykite formulę sinchroniniam sūkių dažniui apskaičiuoti. Koks sūkių dažnis, kai  $f=50$  Hz ir  $p=1; 2; 3; 4$ ?

11.7. Kaip sudaroma dvifazė statoriaus apvija? Prie kokio tinklo ir kaip ji jungiama? Kaip joje sudaromas sukamasis magnetinis laukas? Kaip pakeisti jo sukimosi kryptį? Pateikite pavyzdžius.

11.8. Parašykite formulę dvifazio magnetinio lauko sinchroniniam sūkių dažniui apskaičiuoti. Kokia kryptimi jis sukasi?

11.9. Kaip sudaromas pulsuojantis magnetinis laukas vienfazėje apvijoje? Kokiais dviem sukamaisiais laukais galima jį pakeisti?

11.10. Nubraižykite schemą asinchroninio variklio veikimo principui aiškinti. Aiškindami nuosekliai atsakykite į šiuos klausimus:  $a$  – kodėl indukuojama EVJ rotoriaus apvijos laidininkuose;  $b$  – kokios krypties ta indukuota EVJ ir kodėl;  $c$  – kodėl gali tekėti srovė rotoriaus apvija;  $d$  – kokios krypties ta srovė ir kodėl;  $e$  – kodėl rotoriaus laidininkus veikia elektromagnetinė jėga ir kokios ji krypties?

11.11. Koks turi būti rotoriaus laidininkų greitis magnetinio lauko atžvilgiu, kad rotorių veiktų sukimo jėgos? Jei įsuktume rotorių iki sinchroninio greičio:  $a$  – kokia EVJ būtų indukuojama apvijos laidininkuose;  $b$  – kokia jėga veiktų rotorių? Kodėl?

11.12. Kaip apskaičiuojamas slydimas? Kokia jo fizinė prasmė? Kam lygus slydimas, kai rotorius:  $a$  – nejuda;  $b$  – sukasi vardinio greičiu;  $c$  – sukasi sinchroniniu greičiu?

11.13. Koks vardinis slydimas variklio, kurio dviejų polių porų statoriaus apvija prijungta prie pramoninio dažnio tinklo ir kurio vardinis sūkių dažnis lygus 1420 r/min?

11.14. Koks sinchroninis sūkių dažnis vienos polių poros magnetinio lauko, jei statoriaus apvija prijungta prie pramoninio dažnio tinklo ir variklio vardinis sūkių dažnis 2940 r/min?

11.15. Kiek polių porų turi magnetinis laukas variklio, kuris prijungtas prie pramoninio dažnio tinklo ir kurio vardinis sūkių dažnis 960 r/min?

11.16. Kokie procesai vyksta asinchroninėje mašinoje, kai  $n > n_0$ ? Koks tai režimas? Kodėl? Aiškindami laikykitės 11.10 klausime nurodyto nuoseklumo.

11.17. Kokie procesai vyksta asinchroninėje mašinoje, kai  $s > 1$ ? Koks tai režimas? Kodėl? Aiškindami laikykitės 11.10 klausime nurodyto nuoseklumo.

11.18. Kaip išdėstomi trifazio asinchroninio variklio statoriaus apvijos išvadai? Kaip reikia juos sujungti, norint variklį prijungti prie tinklo:  $a$  – žvaigžde;  $b$  – trikampių?

11.19. Kaip sudarytas asinchroninio variklio rotorius:  $a$  – trumpai sujungtas;  $b$  – fazinis? Kokius privalumus ir trūkumus turi variklis su vienokiu ir kitokiu rotoriumi?

11.20. Kas sudaro asinchroninio variklio magnetinę grandinę? Kaip nuo jos oro tarpo priklauso mašinos techniniai ir ekonominiai parametrai? Kodėl?

11.21. Kuo panašūs ir kuo skirtingi elektromagnetiniai reiškiniai, vykstantys asinchroniniame variklyje ir transformatoriuje? Kodėl?

11.22. Parašykite formules apvijos (vienos fazės) EVJ apskaičiuoti:  $a$  – transformatoriaus pirminės ir antrinės;  $b$  – asinchroninio variklio statoriaus ir rotoriaus. Paaškindite jas.

11.23. Parašykite rotoriaus apvijos EVJ dažnio formulę. Apskaičiuokite  $f_2$  esant slydimui  $s=1$ ;  $s_N$ ; 0 ir  $f_1=50$  Hz.

11.24. Parašykite rotoriaus apvijos EVJ formulę. Kaip kinta  $E_2$  kintant slydimui  $s=1$ ;  $s_N$ ; 0?

11.25. Kaip susidaro asinchroninio variklio sklaidos magnetiniai srautai? Kokią statoriaus ir rotoriaus apvijų varžą jie sudaro ir kaip?

11.26. Parašykite statoriaus ir rotoriaus apvijų sklaidos induktyviosios varžos išraiškas. Kaip kinta  $X_2$  kintant slydimui  $s=1$ ;  $s_N$ ; 0?

11.27. Parašykite srovės išraišką pagal Omo dėsnį rotoriaus apvijų grandinei. Nubraižykite tos srovės apskritiminę diagramą. Paaškindite kaip kinta rotoriaus apvijos varža ir jos pobūdis varikliui įsisukant?

11.28. Kodėl didelė asinchroninio variklio paleidimo srovė? Parašykite statoriaus ir rotoriaus apvijų srovių lygtį. Nubraižykite srovių vektorinę diagramą. Kokiai sąlygai esant ir kodėl galima laikyti, kad variklio magnetinis srautas pastovus?

11.29. Kokie yra asinchroninių variklių energijos nuostoliai ir nuo ko jie priklauso? Ar priklauso jie nuo slydimo? Parašykite variklio naudingosios galios formulę.

11.30. Nuo ko priklauso variklio sukimo momentas? Pasiremami srovės  $I_2$  apskritimine vektorine diagrama nubraižykite  $M=f(s)$  ir paaškindite.

11.31. Nubraižykite asinchroninio variklio natūraliąją mechaninę charakteristiką. Pažymėkite būdinguosius jos taškus ir paaškindite.

11.32. Kaip susireguliuoja asinchroninis variklis kintant jo apkrovai stabilaus darbo mechaninės charakteristikos srityje? Kas vyksta, kai darbo taškas patenka į nestabilaus darbo mechaninės charakteristikos sritį?

11.33. Kaip priklauso variklio sukimo momentas nuo statoriaus apvijos įtampos? Kaip į tai reikia atsižvelgti praktiškai?

11.34. Kaip priklauso variklio su faziniu rotoriumi mechaninė charakteristika nuo varžos rotoriaus grandinėje? Nubraižykite mechanines charakteristikas esant įvairaus didumo rotoriaus apvijos varžai ir paaškindite.

11.35. Kokie svarbiausi asinchroninio variklio paso duomenys? Apskaičiuokite vardinį sukimo momentą, jei žinoma, kad vardinė variklio galia 7,5 kW, vardinis sūkių dažnis 1440 r/min. Kaip reikia jungti tokį variklį į standartinį pramoninį tinklą Lietuvoje, jei pase įrašyta:  $\Delta/\gamma$ , 220/380 V?

11.36. Kokius asinchroninius variklius galima paleisti jungiant tiesiog į tinklą? Kokios priemonės naudojamos asinchroninių variklių statoriaus apvijos įtampai mažinti? Koks visų tokių schemų trūkumas?

11.37. Kokie reiškiniai vyksta pagerintų paleidimo savybių varikliuose paleidimo ir darbo metu? Kodėl jie turi didelę įtaką rotoriaus apvijos srovei paleidimo metu ir nepakeičia darbo srovės?

11.38. Kodėl vienos apvijos vienfazis variklis prijungtas prie tinklo pats sukis nepradedą, o suteikus pradinį momentą – sukasi? Sudarykite mechanines charakteristikas ir paaškindite.

11.39. Kaip sudarytas ekranuotų polių variklis? Kokia trumpai sujungtos vijos paskirtis? Koks jo veikimo principas?

11.40. Kaip veiks trifazis asinchroninis variklis, jei išsilydė vienos fazės saugiklis:  $a$  – darbo metu;  $b$  – paleidžiant? Kodėl?

11.41. Kaip galima prijungti trifazį asinchroninį variklį prie vienfazio tinklo? Kodėl jis sukasi? Kiek jį galima apkrauti?