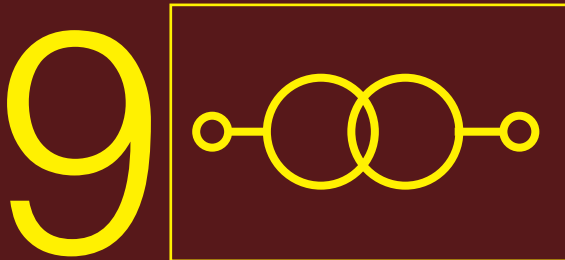
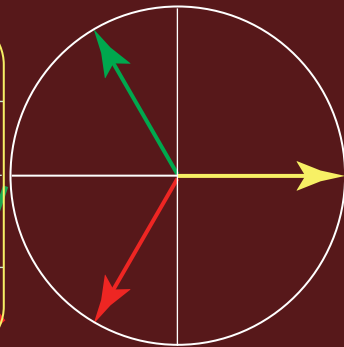
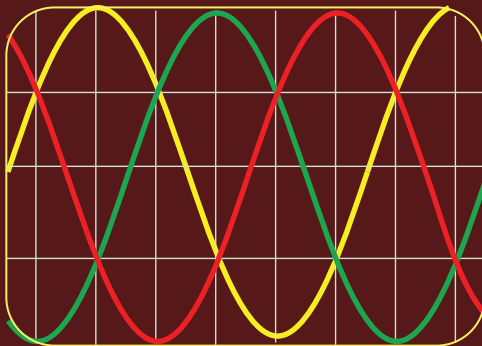


S.Masiokas

# Elektro technika



Transformatoriai

VADOVĖLIS  
AUKŠTOSIOMS  
MOKYKLOMS

---

## 9.1. Transformatoriaus veikimo principas ir elektromagnetiniai reiškiniai 258

- 9.1.1. Transformatoriaus paskirtis ir veikimo principas / 258
- 9.1.2. Apvijų elektrovaros jėgos; tuščioji eiga / 260
- 9.1.3. Magnetovaros jėgos / 261
- 9.1.4. Apkrauto transformatoriaus vektorinė diagrama / 263

---

## 9.2. Transformatoriaus ribinių režimų bandymai ir atstojamosios schemos 264

- 9.2.1. Tuščiosios eigos bandymas / 264
- 9.2.2. Trumpojo jungimo bandymas / 265
- 9.2.3. Redukuotasis transformatorius / 266
- 9.2.4. Atstojamosios schemos / 267
- 9.2.5. Redukuotojo transformatoriaus vektorinė diagrama / 268

---

## 9.3. Svarbiausieji transformatoriaus parametrai ir charakteristikos 268

- 9.3.1. Paso duomenys / 268
- 9.3.2. Išorinė charakteristika / 269
- 9.3.3. Naudingumo koeficientas / 271
- 9.3.4. Avarinio trumpojo jungimo srovės / 272

---

## 9.4. Trifaziai transformatoriai ir autotransformatoriai 273

- 9.4.1. Trifazis transformatorius / 273
- 9.4.2. Autotransformatorius / 275
- 9.4.3. Daugelio apvijų transformatorius / 277

---

## 9.5. Specialieji transformatoriai 277

- 9.5.1. Suvirinimo transformatoriai / 277
- 9.5.2. Matavimo transformatoriai / 278

---

## 9.6. Transformatorių sandaros ypatumai 280

- 9.6.1. Trifaziai transformatoriai / 280
- 9.6.2. Vienfaziai transformatoriai / 282

---

## Kontroliniai klausimai ir užduotys 283

Transformatorius yra **statisis elektromagnetinis įtaisas**, skirtas kintamosios srovės elektros energijos parametrams keisti nekeičiant jos dažnio. Transformatoriaus veikimas yra pagrįstas jo dviejų ar daugiau apvijų abipusės indukcijos reiškiniu.

Didžiausią transformatorių grupę sudaro jėgos transformatoriai, kurie perduoda šaltinio elektros energiją imtuvams, pakeisdami kintamosios įtampos didumą. Pramonėje ir energetikoje dažniau naudojami galingi jėgos transformatoriai – šimtų ar tūkstančių kilovoltamperų galios. Įvairiose technikos srityse (automatikoje, radioelektronikoje), medicinoje ar buityje naudojamų jėgos transformatorių galia gali būti ir nedidelė – tik keli voltamperai.

## 9.1

### Transformatoriaus veikimo principas ir elektromagnetiniai reiškiniai

**9.1.1. Transformatoriaus paskirtis ir veikimo principas.** Energetinėse sistemose naudojami galingi trifaziai jėgos transformatoriai (9.1 pav.). Kadangi tokių transformatorių nuostolių galia yra palyginti nedidelė (1–2%), **apytiksliai galime laikyti, kad transformatoriaus pilnutinė galia:**

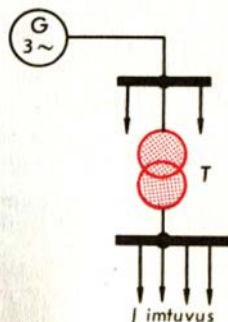
$$S = \sqrt{3} U_2 I_2 \approx \sqrt{3} U_1 I_1; \quad (9.1)$$

čia  $U_2$  ir  $I_2$  – transformatoriaus išėjimo (antrinė) įtampa ir srovė;

$U_1$  ir  $I_1$  – įėjimo (pirminė) įtampa ir srovė.

Iš čia:  $U_2/U_1 \approx I_1/I_2$ . Kaip matome, **padidinus įtampą ( $U_2 > U_1$ ), galima perduoti tą pačią galią, kai linija teka silpnesnė srovė ( $I_2 < I_1$ ).** Dėl to **sumažėja linijos nuostolių galia** (žr. (2.65)). Linijai galima naudoti mažesnio skerspjūvio laidus ir sutaupyti spalvotojo metalo (vario arba aliuminio).

Praktiškai energetinėse sistemose yra įtampos aukštinimo ir žeminimo transformatorių. Pavyzdžiui (9.2 pav.), Elektrėnų šiluminėje elektrinėje pagaminta 20 kV įtampos elektros energija patenka į įtampos aukštinimo transformatorius. Jais paaukštinta iki 330 kV įtampos elektros energija perduodama trilaidėmis oro linijomis į įvairius respublikos rajonus, kur kiti transformatoriai įtampą pažemina iki 110 ar 35 kV. Šios įtampos elektros energija perduodama į pramoninio rajono ar miesto teritoriją. Kad



9.1 pav. Trifaziai generatorius, transformatorius ir elektros energijos perdavimo linija

būtų tinkama imtuvams, įtampa pažeminama iš pradžių iki 10 kV (didelėse gamyklose būna tokios įtampos variklių), o po to dar kartą – iki 0,4\* kV, kuriai skirta didžiausia dalis pramoninių ir žemės ūkio imtuvų, taip pat visi buitiniai, medicininiai ir kiti mažesnės galios imtuvai.

Kaip matome, net perduodant elektros energiją palyginti netolimu atstumu (mūsų respublikoje), tenka panaudoti 4–5 įtampos transformavimo pakopas. Šiuolaikinėse didžiosiose energetinėse sistemose tokių pakopų gali būti daugiau, todėl pilnutinė visų transformatorių galia esti 7–8 kartus didesnė nei generatorių elektrinėse. Ir nors transformatoriuose prarandama dalis elektros energijos, juos būtina naudoti ir techniniu, ir ekonominiu požiūriu.

Pramonėje ar įvairiose technikos srityse jėgos transformatoriai dažniausiai reikalingi tais atvejais, kai imtuvo vardinė įtampa skiriasi nuo tinklo įtampos.

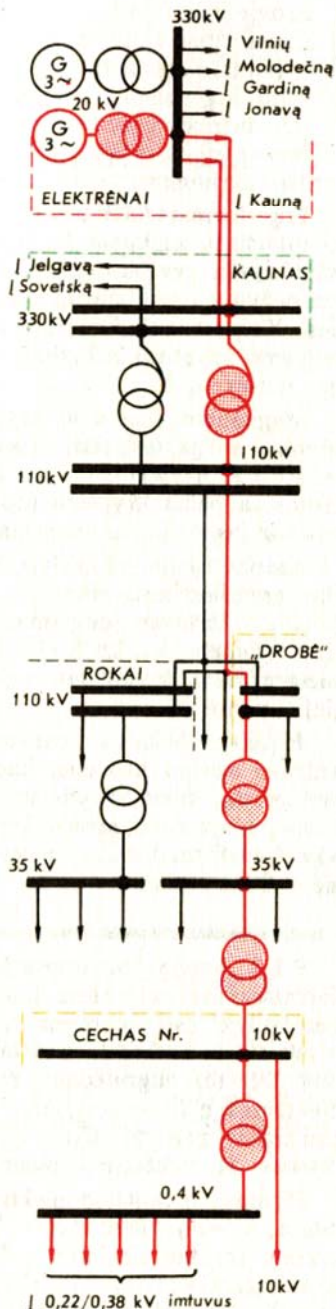
Be minėtų jėgos transformatorių, dar išskirsime kitą atskirą transformatorių grupę, kurią pavadinsime **specialiaisiais**. Tai įvairūs specifiniams imtuvams maitinti skirti transformatoriai (pavyzdžiui, lygintuvų, elektrinio suvirinimo transformatorių), matavimo transformatoriai, fazių skaičiaus dauginimo, impulsiniai transformatoriai, perduodantys imtuvams elektros energiją impulsais ir kiti.

Įvairiuose jėgos bei specialiuosiuose transformatoriuose vyksta panašūs elektromagnetiniai reiškiniai, nors specialieji transformatoriai šiek tiek skiriasi nuo plačiausiai naudojamų jėgos transformatorių. Tolesniam nagrinėjimui pasirinksiame vienfazį dviejų apvijų įtampos žemimo jėgos transformatorių.

Paprastiausio vienfazio transformatoriaus sandara pavaizduota 9.3 pav., a. Tai **uždaras magnetolaidis, ant kurio užmautos dvi apvijos**. Apvijos **elektriškai nesusietos**. Jas veria bendras magnetinis srautas  $\Phi$ , todėl jų ryšys yra magnetinis. Transformatoriaus apvija, kuriai tiekiamas elektros energija, yra vadinama **pirmine**. Apvija, kuri tiekia pakeistą elektros energiją imtuvui, yra vadinama **antrine**. Visus transformatoriaus įėjimo (pirminius) dydžius žymėsime indeksu „1“, o išėjimo (antrinius) – indeksu „2“.

Transformatoriaus veikimo principas pagrįstas jo apvijų abipusės indukcijos reiškiniumi. Prijungus transformatoriaus pirminę apviją (jos vijų skaičius  $N_1$ ) prie kintamosios įtampos  $u_1(t)$ , apvija teka kintamoji srovė  $i_1(t)$ . Atsiradusi pirminė MVJ  $N_1 i_1$  sukuria magneto-

\* Tai yra linijinė trifazio transformatoriaus vardinė įtampa, kuri šiek tiek didesnė, negu reikalinga imtuvams. Praktiškai, įvertindami įtampos kritimą tinkluose, galime laikyti, kad trifazio tinklo  $U_1 = 380$  V, o  $U_2 = 220$  V.



9.2 pav. Energetinės sistemos fragmentas

laidyje kintamąjį magnetinį srautą  $\Phi(t)$ . Jis veria abi transformatoriaus apvijas ir indukuoja jose EVJ  $e_1(t)$  ir  $e_2(t)$ . (Čia paaiškinta elektrinių ir magnetinių dydžių ryšio loginė seka trumpiau užrašyta 9.3 pav., b.)

Jei antrinė grandinė atvira, transformatorius veikia tuščiosios eigos režimu. Sujungus jungiklį  $Q$ , transformatorius apkraunamas. Jo antrinė apvija ir imtuvu teka srovė.

Transformatoriaus elektrinių dydžių ir magnetinio srauto sutartinės teigiamos kryptys parodytos 9.3 pav., a. Pirminė apvija yra imtuvas, todėl teigiama  $i_1$  srovės kryptis yra pažymėta priklausomai nuo laisvai pasirinktos  $u_1$  krypties. Kaip ir anksčiau (žr. 2.3.2), savindukcijos EVJ  $e_1$  teigiama kryptimi laikysime tokią, kuri yra priešinga negu srovės  $i_1$ .

Magnetinio srauto  $\Phi$  kryptis pažymėta, taikant jam ir pirmine apvija tekančiai srovei  $i_1$  dešiniojo sraigto taisyklę. EVJ  $e_2$  kryptis tokia pat kaip  $e_1$ , nes abi apvijos suvyniotos ta pačia kryptimi (apvijų pradžios pažymėtos taškais) ir jas veria tas pats magnetinis srautas  $\Phi$ .

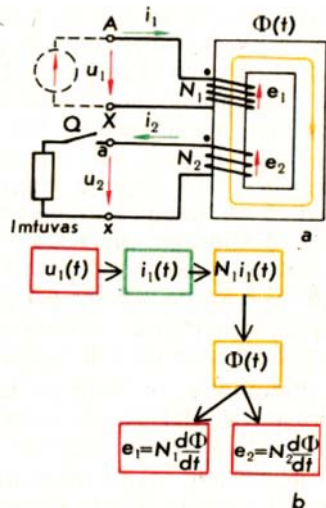
Antrinė apvija yra šaltinis, kurio EVJ yra  $e_2$ . Dėl to antrinė grandinė teka srovė  $i_2$ , kurios kryptis yra tokia pat, kaip  $e_2$ . Imtuvas jungiamas prie transformatoriaus antrinės įtampos  $u_2$ , kurios sutartinė teigiama kryptis pažymėta pagal  $i_2$  kryptį imtuve (iš sutartinio „pliuso“ į sutartinį „minusą“).

Pritaikę dešiniojo sraigto taisyklę transformatoriaus antrinei apvijai matome, kad antrinė srovė kuria magnetinį srautą, kurio kryptis yra priešinga pirminės srovės kuriamo magnetinio srauto kryptiai. Vadinasi, pirminė apvija transformatoriaus magnetolaidį įmagnetina, o antrinė – išmagnetina.

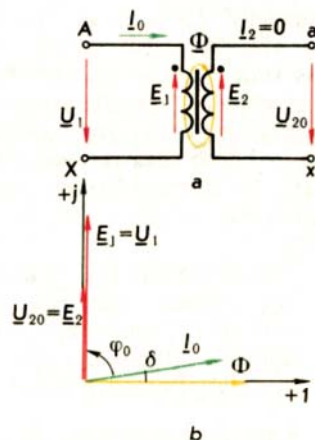
**9.1.2. Apvijų elektrovaros jėgos; tuščioji eiga.** Nors transformatoriaus magnetinė grandinė yra netiesinė, o magnetolaidyje esti energijos nuostolių, jėgos transformatoriaus srovių kreivių formos labai nedaug skiriasi nuo sinusinių. Dėl to, nagrinėdami transformatoriuose vykstančius elektromagnetinius reiškinius, elektrinius dydžius bei magnetinį srautą galėsime užrašyti kompleksiniais dydžiais ir braižysime jų vektorines diagramas.

Pirminę ir antrinę elektrovaros jėgas galime užrašyti šitaip:  $e_1 = N_1 d\Phi/dt$  ir  $e_2 = N_2 d\Phi/dt$ . Laikydami, kad magnetinis srautas sinusinis –  $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ , ir atlikę veiksmus, gausime:  $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \pi/2)$ ;  $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \pi/2)$ . Jas galime užrašyti kompleksiniais dydžiais:

$$\underline{E}_1 = E_1 e^{j\pi/2}; \quad \underline{E}_2 = E_2 e^{j\pi/2}. \quad (9.2)$$



9.3 pav. Vienfazis transformatorius (a) ir jo elektromagnetinių dydžių ryšio loginė seka tuščiosios eigos metu (b)



9.4 pav. Neapkrauto transformatoriaus atstojamoji schema (a) ir vektorinė diagrama (b)

Efektinės vertės (žr. (5.30)):

$$E_1 = 4,44f N_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44f N_2 \Phi_m. \quad (9.3)$$

Transformatoriaus transformacijos koeficientas yra jo didesniosios EVJ santykis su mažesniąja. Pavyzdžiui, žeminimo transformatoriaus  $E_1 > E_2$ ; jo transformacijos koeficientas

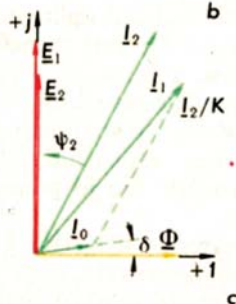
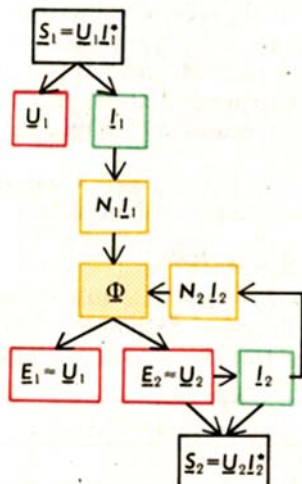
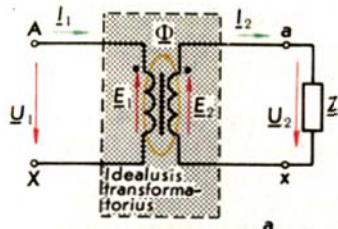
$$K = E_1/E_2 = N_1/N_2. \quad (9.4)$$

Pažymėsime visų elektrinių dydžių sutartines kryptis neapkrauto transformatoriaus atstojamojoje schemoje (9.4 pav.). Kai transformatorius neapkrautas, jo antrinė grandinė atvira,  $I_2 = 0$  ir  $\underline{U}_{20} = \underline{E}_2$ . Pirminė apvija teka tuščiosios eigos srovė  $I_0$ , kuri esti daug silpnesnė už pirminę vardinę srovę. Paprastai  $I_0$  tesudaro kelis procentus  $I_{1N}$  vertės. Dėl to įtampos kritimas pirminės apvijos aktyviojoje varžoje yra mažas, ir jo galime nepaisyti. Taip pat galime nepaisyti ir pirminės apvijos sklaidos magnetinio srauto.

Neapkrautas transformatorius skiriasi nuo idealios ritės su magnetolaidžiu tik tuo, kad jis turi antrinę apviją, kurioje yra EVJ  $e_2$ . Kaip ir EVJ  $e_1$ , EVJ  $e_2$  pralenkia  $\pi/2$  fazę ją indukavusį magnetinį srautą  $\Phi$ . Neapkrauto transformatoriaus vektorinė diagrama yra tokia pat kaip idealios ritės (žr. 5.4.3), bet joje yra nubraižytas dar  $\underline{E}_2$  vektorius. Jis gali būti trumpesnis ( $N_2 < N_1$ ) arba ilgesnis ( $N_2 > N_1$ ) už  $\underline{E}_1$  vektorių. Pirminė tuščiosios eigos srovė  $I_0$  pralenkia magnetinį srautą fazę  $\delta$  (magnetinių nuostolių kampas).

**9.1.3. Magnetovaros jėgos.** Sujungus jungiklį  $Q$ , prie antrinės transformatoriaus apvijos yra prijungiamas imtuvas  $\underline{Z}$ , kuriuo teka srovė  $\underline{I}_2$  (9.5 pav.). Antrinėje transformatoriaus apvijoje atsiranda MVJ  $N_2 \underline{I}_2$ , kuri yra tokios krypties, kad jos sukurtas magnetinis srautas priešintis pirminės MVJ  $N_1 \underline{I}_1$  kuriamo magnetinio srauto kitimui (Lenco principas). Suminį apkrauto transformatoriaus magnetinį srautą  $\underline{\Phi}$  kuria abi magnetovaros jėgos kartu. Paprastumo dėlei, nagrinėdami magnetovaros jėgas, transformatorių laikysime idealiuoju: nepaisysime apvijų aktyviųjų varžų ir sklaidos srautų.

Užrašysime Omo dėsnį apkrauto transformatoriaus magnetinei grandinei:



9.5 pav. Idealojo apkrauto transformatoriaus atstojamoji schema (a); elektromagnetinių dydžių ryšio loginė schema (b) ir vektorinė diagrama (c)

$$\Phi = (N_1 I_1 - N_2 I_2) / R_m; \quad (9.5)$$

čia  $R_m$  – transformatoriaus magnetolaidžio magnetinė varža.

Žinome (žr. 5.4.1), kad tokios magnetinės grandinės magnetinio srauto amplitudė  $\Phi_m$  yra proporcinga tinklo įtampos amplitudei  $U_m$  (tinklo dažnis  $f$  ir apvijų vijų skaičiai  $N_1$  ir  $N_2$  nekeičiami). Išskyrus ypatingus atvejus, **transformatoriai visada jungiami prie įtampos  $U_{1m} = \text{const}$ , todėl jų  $\Phi_m = \text{const}$  ir nuo apkrovos nepriklauso.** Dėl to neapkrauto ir apkrauto transformatoriaus magnetinis srautas toks pat. Magnetolaidžio magnetinė varža, kuri priklauso nuo jo geometrinių parametrų ir įmagnetinimo (žr. (5.10)), esant pastoviam magnetiniam srautui, taip pat yra pastovi.

Tai reiškia, kad **Omo dėsnį neapkrauto transformatoriaus magnetinei grandinei galime užrašyti šitaip:**

$$\Phi = N_1 I_0 / R_m; \quad (9.6)$$

čia  $I_0$  – pirminė tuščiosios eigos srovė.

Sulyginę dešiniąsias (9.5) ir (9.6) lygčių puses, gauname transformatoriaus **magnetovaros jėgų lygtį:**

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_1 I_0. \quad (9.7)$$

**Pirminė MVJ transformatorių įmagnetina, o antrinė išmagnetina.** Labiau apkrovus transformatorių, stiprėja antrinė srovė  $I_2$ , kuri transformatorių išmagnetina. Kai  $U_1 = \text{const}$ , suminė MVJ išlieka tokia pat, nes didėja pirminė transformatoriaus srovė  $I_1$ . Tuo būdu **apkrautas transformatorius yra susireguliuojanti sistema.** Kuo labiau apkrausime transformatorių, tuo juo tekės stipresnė pirminė srovė ir tuo jo pilnutinė galia  $S = U_2 I_2 \approx U_1 I_1$  bus didesnė.

**Vektorinę diagramą** (9.5 pav., c) nubraižysime pasirinkę magnetinio srauto  $\Phi$  vektorių pagrindiniu. Kaip ir anksčiau (žr. 9.4 pav., b), braižysime  $\underline{I}_0$ ,  $\underline{E}_1$  ir  $\underline{E}_2$  vektorius. Antrosios srovės  $\underline{I}_2$  fazė priklauso nuo apkrovos pobūdžio. Tarkime, kad apkrova yra dažniau praktikoje pasitaikantčio aktyvaus-induktyvaus pobūdžio ir srovė  $\underline{I}_2$  atsilieka faze  $\psi_2$  nuo EVJ  $\underline{E}_2$ .

Apkrauto transformatoriaus pirminės grandinės srovė  $\underline{I}_1$  išreiškiama iš (9.7) lygybės, padalijus jos abi puses iš  $N_1$ :

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (N_2/N_1) \underline{I}_2 = \underline{I}_0 + \underline{I}_2/K; \quad (9.8)$$

čia  $K$  – transformacijos koeficientas.

Pirminės srovės vektorius  $\underline{I}_1$  sudaromas grafiškai atlikus (9.8) lygties veiksmus. Kai transformatorius labiau apkraunamas, antrinė srovė  $I_2$  stiprėja. Iš vektorinės diagramos matome, kad stiprėja ir pirminė transformatoriaus srovė  $I_1$ .

Praktiškai galingų transformatorių tuščiosios eigos srovė yra nedidelė (vektorinėje diagramoje jos vektorius nubrėžtas ilgesnis), todėl dažniausiai jos galima nepaisyti. Tuo būdu iš (9.7) lygties galime parašyti:  $N_1 I_1 - N_2 I_2 \approx 0$ . Iš čia:

$$I_1/I_2 \approx N_2/N_1 = 1/K. \quad (9.9)$$

#### 9.1.4. Apkrauto transformatoriaus vektorinė diagrama.

Realiaame transformatoriuje dėl pirminės ir antrinės apvijų aktyviųjų varžų  $R_1$  ir  $R_2$  atsiranda įtampų kritimai transformatoriaus apvijos  $R_1 \underline{I}_1$  ir  $R_2 \underline{I}_2$ . Dėl apie apvijas susidariusių magnetinių sklaidos srautų  $\Phi_{d1}$  ir  $\Phi_{d2}$  abiejose apvijos indukuojamos EVJ, kurias galime pakeisti įtampų kritimais apvijos dėl sklaidos induktyviųjų varžų:  $jX_{d1} \underline{I}_1$  ir  $jX_{d2} \underline{I}_2$  (žr. 5.5).

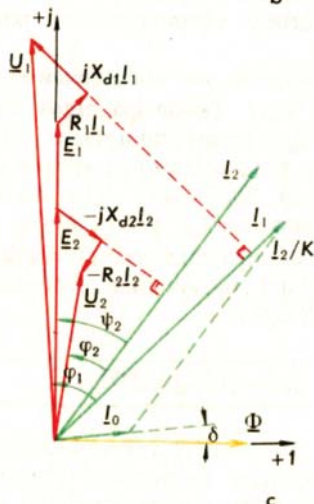
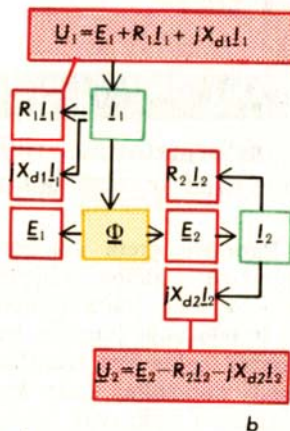
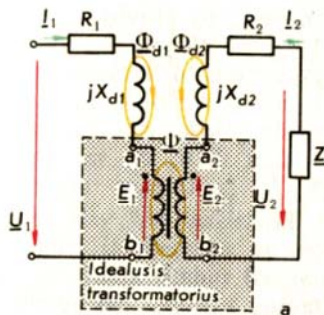
Realiojo transformatoriaus atstojamojoje schemoje (9.6 pav., a) pavaizduoti nuosekliai sujungti aktyvieji ir induktyvieji elementai, kurių varžos yra  $R_1, X_{d1}, R_2, X_{d2}$ . **Pritaikę II Kirchhofo dėsnį pirminei ir antrinei grandinei**, transformatoriaus pirminę ir antrinę įtampą galime užrašyti šitaip:

$$\begin{aligned} (1) \quad \underline{U}_1 &= \underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_{d1} \underline{I}_1, \\ (2) \quad \underline{U}_2 &= \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_{d2} \underline{I}_2. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Šios abi lygtys vadinamos transformatoriaus **įtampų lygtimis**. Fizinė prasme jos yra kiek skirtingos. Pirminė transformatoriaus apvija veikia kaip imtuvas, turintis priešingą srovei EVJ. Šios EVJ ir įtampų kritimų dėl pirminės apvijų vidinių varžų suma yra lygi tinklo įtampai. Antrinė apvija veikia kaip šaltinis, todėl jos įtampa yra lygi antrinės EVJ ir įtampų kritimų dėl antrinės apvijų vidinių varžų skirtumui.

Apkrauto transformatoriaus vektorinę diagramą sudarysime braižydami jo srovių vektorinę diagramą ir grafiškai vaizduodami (9.10) kompleksines lygtis. Laikysime, kad transformatorius apkrautas aktyvaus-induktyvaus pobūdžio imtuvu:  $\underline{Z} = Z e^{j\varphi}$  ( $\varphi = \varphi_2 > 0$ ).

Realiam apkrautam transformatoriui galime taikyti parašytą MVJ (9.7) lygtį ir nubraižyti tokią pat (žr. 9.5 ir



9.6 pav. Realiojo apkrauto transformatoriaus atstojamoji schema (a), elektromagnetinių dydžių ryšio loginė seka (b) ir vektorinė diagrama (c)



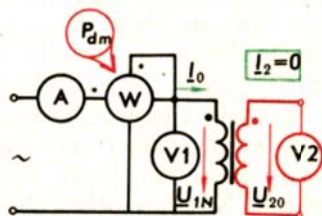
9.6 pav., b) srovių vektorinę diagramą. Įtampos kritimas  $R_1 I_1$  dėl aktyviosios pirminės apvijų varžos braižomas lygiagrečiai, o įtampos kritimas  $jX_{d1} I_1$  dėl sklaidos induktyviosios varžos – statmenai (pralenkia fazę  $\pi/2$  srove) srovės  $I_1$  vektoriui. Antrinės įtampos vektorius gaunamas, atimant iš  $E_2$  du vektorius:  $R_2 I_2$  (lygiagretus srovei) ir  $jX_{d2} I_2$  (statmenas srovei).

Praktiškai net vardine apkrova apkrauto transformatoriaus magnetiniai sklaidos srautai (išskyrus specialius atvejus) sudaro apie 5 % viso suminio magnetinio srauto. Įtampų kritimai dėl apvijų aktyviųjų varžų taip pat yra gana nedideli.

## 9.2

### Transformatoriaus ribinių režimų bandymai ir atstojamosios schemos

Paprastai greta svarbiausių vardinių transformatoriaus parametrų – galios, pirminių ir antrinių įtampų bei srovių – jo pase įrašomi laboratorijoje atliktų tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo bandymų rezultatai. Iš jų galime spręsti: kokie yra transformatoriaus magnetiniai ir elektriniai nuostoliai, kaip kinta jo antrinė įtampa daugiau ar mažiau apkrovus, kokios yra jo apvijų varžos ir kiti svarbūs eksploataciniai parametrai.



9.7 pav. Transformatoriaus tuščiosios eigos bandymo schema

**9.2.1. Tuščiosios eigos bandymas.** Jis atliekamas, prijungus transformatoriaus pirminę apviją prie vardinės įtampos  $U_{1N}$ , o antrinės apvijos grandinę paliekant atvirą (9.7 pav.). Tuščiosios eigos metu  $U_1 = U_{1N}$ ,  $I_0$  yra silpna, lyginant su  $I_{1N}$  verte,  $I_2 = 0$ ,  $U_{20} = E_2$ .

Transformatoriaus santykinė tuščiosios eigos srovė paprastai išreiškiama procentais pirminės vardinės srovės atžvilgiu:

$$I_{0*} = (I_0 / I_{1N}) \cdot 100. \quad (9.11)$$

Kadangi transformatoriaus magnetinis srautas yra proporcingas jo pirminei įtampai ( $\Phi \sim U_1$ ), tai tuščiosios eigos metu jis yra vardinis. Iš (9.6) lygybės matome, kad tuščiosios eigos srovė tiesiog proporcinga transformatoriaus magnetolaidžio magnetinei varžai. Kuo geresnės magnetinės magnetolaidžio savybės ir kuo mažesni oro tarpai jo lakštų sandūrose (oro tarpai blogina magnetinės gran-

dinės savybes, bet technologiškai jie dažniausiai neišvenjami), **tu silpnėsnė transformatoriaus tuščiosios eigos srovė.**

Paprastai santykinė tuščiosios eigos srovė  $I_{0*} \leq 2,5\%$ , kai transformatoriaus galia didesnė kaip 100 kV·A. Mažesnės galios jėgos transformatorių  $I_{0*} \approx (5-11)\%$ .

Antrasis svarbus transformatoriaus parametras yra **tuščiosios eigos aktyvioji galia**  $P_0$ . Kadangi antrinė grandinė atjungta, transformatorius neperduoda energijos imtuvui:  $S_2=0$ ,  $P_2=0$ , todėl galia  $P_0$  yra **jo nuostolių galia**. Transformatoriaus magnetinių ir elektrinių nuostolių galia (žr. 5.4.4):

$$P_d = P_{dm} + P_{de}. \quad (9.12)$$

Kadangi tuščiosios eigos metu  $U_1 = U_{1N}$ , magnetinis srautas bei indukcija yra vardiniai, ir magnetinių nuostolių galia taip pat vardinė. Elektrinių (apvijų) nuostolių galia (taikant Džaulio-Lenco dėsnį):

$$P_{de} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (9.13)$$

Tuščiosios eigos metu jų galima nepaisyti, nes  $I_0 \ll I_{1N}$ , o  $I_2=0$ . Dėl to transformatoriaus **aktyvioji galia, kurią tuščiosios eigos bandymo metu rodo vatmetras, yra beveik lygi transformatoriaus magnetinių nuostolių vardinė galia**:  $P_0 \approx P_{dmN}$ .

**Iš tuščiosios eigos bandymo rezultatų galima apskaičiuoti transformatoriaus tuščiosios eigos atstojamąsias varžas:**

$$Z_0 = U_{1N}/I_0; \quad R_0 = P_0/I_0^2; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (9.14)$$

Didelės galios (daugiau nei 100 kV·A) transformatoriams  $X_0 \gg R_0$ , todėl  $X_0 \approx Z_0$ .

Tuščiosios eigos metu išmatavus transformatoriaus įtampas, galima nustatyti **transformacijos koeficientą**:

$$K = E_1/E_2 \approx U_1/U_{20}, \quad (9.15)$$

nes tuomet galima nepaisyti įtampos kritimų apvijose ( $I_0$  – maža,  $I_2=0$ ) ir laikyti, kad įtampos yra lygios EVJ:

$$U_1 \approx E_1; \quad U_{20} = E_2.$$

**9.2.2. Trumpojo jungimo bandymas.** Jis atliekamas **sujungiant antrinę transformatoriaus apviją trumpai** (arba prie jos prijungiant mažos varžos ampermetrą) (9.8 pav.). **Pirminė apvija prijungiama prie tokios sumažintos įtampos, kad apvijomis tekėtų vardinės srovės. Trumpojo jungimo**

**bandyimo metu:**  $U_1 = U_k$  ir yra nedidelė, lyginant su vardinė  $U_{1N}$ ;  $I_1 = I_{1N}$ ;  $I_2 = I_{2N}$ ;  $U_2 = 0$ .

Santykiinė trumpojo jungimo įtampa paprastai išreiškiama procentais pirminės vardinės įtampos atžvilgiu:

$$U_{k*} = (U_k / U_{1N}) \cdot 100. \quad (9.16)$$

Paprastai  $U_{k*} = (3-10) \%$ . Ji apibūdina transformatoriaus apvijų varžas ir sklaidos srautus. Kuo didesnės apvijų aktyviosios ir sklaidos induktyviosios varžos (pastarosios proporcingos sklaidos srautams), tuo didesnė transformatoriaus santykiinė trumpojo jungimo įtampa. Galingų transformatorių ( $S_N > 6300 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ) sklaidos srautai didesni, nes jų apvijų talpinamos toliau viena nuo kitos, kad būtų geresnė izoliacija tarp jų, ir apvijų tūris yra didesnis. Dėl to didesnė ir tokių transformatorių  $U_{k*} = (5-10) \%$ . Žemos įtampos ir mažesnės galios transformatorių  $U_{k*} = (3-5) \%$ .

Trumpojo jungimo bandymo metu  $S_2 = 0$ ,  $P_2 = 0$ , todėl galia  $P_k$  yra transformatoriaus nuostolių galia. Transformatoriaus pirminė įtampa maža, nedidelis ir magnetinis srautas, nes  $\Phi \sim U_1$ . Kadangi magnetiniai nuostoliai  $P_{dm} \sim \Phi^2$  (žr. 5.4.4), tai trumpojo jungimo bandymo metu jų galime nepaisyti. Kai apvijų srovės yra vardinės, elektrinių nuostolių galia yra vardinė (žr. (9.12)). Dėl to galime laikyti, kad vatmetras trumpojo jungimo bandymo metu rodo vardinę transformatoriaus elektrinių nuostolių galią:  $P_k \approx P_{deN}$ .

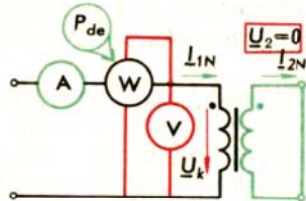
Iš trumpojo jungimo bandymo duomenų apskaičiuojamos transformatoriaus atstojamosios varžos, kurios vadinamos trumpojo jungimo varžomis:

$$Z_k = U_k / I_{1N}; R_k = P_k / I_{1N}^2; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \quad (9.17)$$

taip pat trumpojo jungimo fazių skirtumas tarp pirminės įtampos ir srovės:

$$\varphi_k = \arccos(P_k / (U_k I_{1N})). \quad (9.18)$$

Didelės galios transformatorių  $X_k > R_k$  (pvz., kai  $S_N = 63000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,  $\cos \varphi_k \approx 0,05$ ), o mažos galios –  $X_k < R_k$ .



9.8 pav. Transformatoriaus trumpojo jungimo bandymo schema

**9.2.3. Redukuotasis transformatorius.** Praktiniams skaičiavimams anksčiau braižytos transformatoriaus schemos (žr. 9.1–9.8 pav.) yra nepatogios tuo, kad tarp pirminės ir antrinės jo apvijų yra tik magnetinis ryšys.

Magnetinį ryšį galima pakeisti elektriniu (žr. 5.5.1), bet tuomet 9.6 pav.,  $b$  grandinei tektų elektriškai sujungti taškus  $a_1$  su  $a_2$  ir  $b_1$  su  $b_2$ . Tai įmanoma tik tuo atveju, kai sujungiamų taškų poten-

cialiai yra vienodi, t. y. kai pirminė ir antrinė transformatoriaus EVJ yra lygios ir jų fazės vienodos. Taip gali būti, kai tiriamojo transformatoriaus antrinė apvija pakeičiama redukuotąja, kuri egzistuoja tik teoriškai. Tokį transformatorių nagrinėti paprasčiau.

**Redukuotasis transformatorius yra toks, kurio antrinė apvija pakeičiama, laikant, kad  $N_1 = N_2$ , bet kurio galia ir nuostoliai yra tokie pat kaip tiriamojo.** Paprastai visi jo antrinės apvijos elektriniai dydžiai žymimi brūkšneliais:  $E'_2$ ,  $U'_2$ ,  $I'_2$ ,  $Z'_2$  ir t. t.

Redukuotojo transformatoriaus EVJ ir įtampa:

$$E'_2 = E_1 = KE_2; \quad U'_2 = KU_2. \quad (9.19)$$

Kadangi  $S_2 = S'_2 = U_2 I_2 = U'_2 I'_2$ , gauname šitokią redukuotą antrinę srovę:

$$I'_2 = I_2 / K. \quad (9.20)$$

Antrinėms apvijoms turi tikti šios lygtys:

$$R_2 I_2^2 = R'_2 I_2'^2; \quad X_{d2} I_2^2 = X'_{d2} I_2'^2; \quad Z_2 I_2^2 = Z'_2 I_2'^2;$$

čia  $R_2$ ,  $X_{d2}$ ,  $Z_2$  – tiriamojo ir  $R'_2$ ,  $X'_{d2}$ ,  $Z'_2$  – redukuotojo transformatoriaus antrinės apvijos varžos.

Atsižvelgę į (9.20) lygybę, gauname:

$$R'_2 = K^2 R_2; \quad X'_{d2} = K^2 X_{d2}; \quad Z'_2 = K^2 Z_2. \quad (9.21)$$

Redukuodami transformatorių, pakeitėme imtuvo, prijungto prie antrinės apvijos, srovę ir įtampą. Dėl to tenka redukuoti jo pilnutinę varžą:

$$Z' = U'_2 / I'_2 = KU_2 / (I_2 / K) = K^2 U_2 / I_2 = K^2 Z. \quad (9.22)$$

Imtuvo aktyvioji ir reaktyvioji galia neturi pakisti:

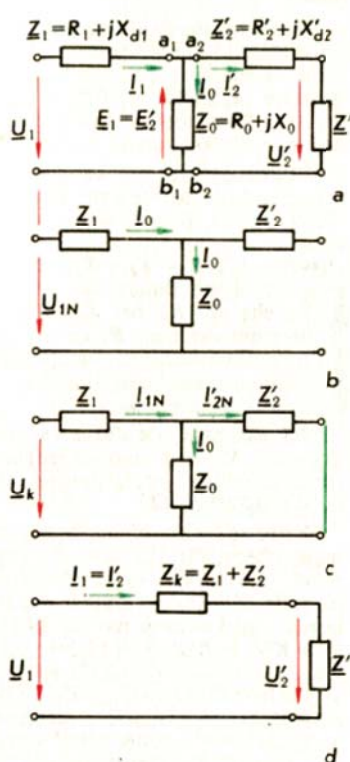
$$R I_2^2 = R' I_2'^2; \quad X I_2^2 = X' I_2'^2.$$

Iš čia:

$$R' = K^2 R; \quad X' = K^2 X. \quad (9.23)$$

**9.2.4. Atstojamosios schemas.** Pakeitę antrinę transformatoriaus apviją redukuota ir sujungę 9.6 pav., b pavaizduotų vienodų potencialų taškus, galime nubraižyti transformatoriaus „T“ atstojamąją schemą (9.9 pav., a). Joje  $Z_0 = R_0 + jX_0$  pažymėti atstojamieji elementai (žr. 5.5.1), kurių varžomis įvertinami transformatoriaus magnetiniai nuostoliai ir abiejų apvijų induktyvumas bei abipusis induktyvumas.

Pritaikę I ir II Kirchhofo dėsnius transformatoriaus „T“ atstojamosios schemas grandinei, galime užrašyti visus tris anksčiau parašytas realaus transformatoriaus srovių ir įtampų lygtis (žr. (9.8) ir (9.10)).



9.9 pav. Redukuotojo transformatoriaus atstojamosios schemas: „T“ tipo, kai transformatorius apkrautas (a); kai veikia tuščiosios eigos (b) ir trumpojo jungimo (c) režimu; supaprastinta atstojamoji schema (d)

**Transformatoriaus atstojamosios grandinės parametrus** labai patogiu apskaičiuoti iš jo tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo bandymų duomenų. Tuščiosios eigos metu antrinė grandinė atvira (9.9 pav., b). Kadangi praktiškai  $R_1 \ll R_0$ , o  $X_{d1} \ll X_0$ , galime laikyti, kad  $R_0$  ir  $X_0$  yra transformatoriaus tuščiosios eigos aktyvioji ir reaktyvioji varža. Jos apskaičiuojamos iš tuščiosios eigos bandymo duomenų.

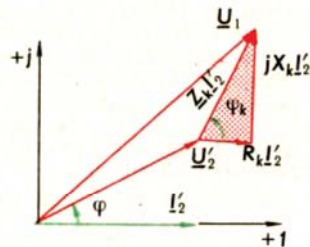
Trumpojo jungimo bandymo metu (9.9 pav., c) tais elementais teka palyginti nedidelė srovė ( $I_0 \ll I_{1N}$ ), kadangi  $R_0 \gg R'_1$  ir  $X_0 \gg X'_{d1}$ . Dėl to galima  $R_0$  ir  $X_0$  nepaisyti ir laikyti, kad trumpojo jungimo varžos:

$R_k = R_1 + R'_1$ ;  $X_k = X_{d1} + X'_{d1}$ . Jos apskaičiuojamos iš trumpojo jungimo bandymo duomenų.

Pakeitę  $R_1$ ,  $R'_1$  bei  $X_{d1}$ ,  $X'_{d1}$  varžas transformatoriaus trumpojo jungimo varžoms  $R_k$  bei  $X_k$  ir nepaisydami tuščiosios eigos srovės  $I_0$ , galime sudaryti supaprastintą redukuotojo transformatoriaus atstojamąją schemą (9.9 pav., d), kuria patogiu naudotis praktiniams skaičiavimams.

**9.1 pavyzdys.** Vienfazio transformatoriaus įtampas:  $U_{1N} = 3460$  V,  $U_{20} = 230$  V. Jo trumpojo jungimo varžos  $R_k = 0,138 \Omega$ ,  $X_k = 1,34 \Omega$ . Apskaičiuokime, kokią įtampą gaus imtuvas, kurio kompleksinė varža  $Z = 0,12 \angle 30,87^\circ \Omega$ .

**Sprendimas.** Nubraižome transformatoriaus ir imtuvo atstojamąją schemą (žr. 9.9 pav., d). Pagal Omo dėsnį  $U'_2 = Z' I'_2$ ; grandinės srovė  $I'_2 = U_{1N} / (Z_k + Z')$ . Redukuotojo imtuvo kompleksinės varžos modulis  $Z' = K^2 Z$ , o argumentas lieka tas pats. Transformacijos koeficientas apskaičiuojamas iš (9.15):  $K = U_{1N} / U_{20} = 3460 / 230 = 15,04$ ;  $Z' = K^2 Z = K^2 Z e^{j\varphi} = 15,04^2 \cdot 0,12 \cdot e^{j30,87^\circ} = 27,14 e^{j30,87^\circ} = (27,14 + j16,28) \Omega$ .  $Z_k + Z' = 0,138 + j1,34 + 27,14 + j16,28 = 27,28 + j17,62 = 28,07 e^{j30,88^\circ} \Omega$ .  $I'_2 = U_{1N} / (Z_k + Z') = 3460 / (28,07 e^{j30,88^\circ}) = 123,3 e^{-j30,88^\circ}$  A. Redukuotojo transformatoriaus įtampa:  $U'_2 = Z' I'_2 = 27,14 e^{j30,87^\circ} \times 123,3 e^{-j30,88^\circ} = 3346 e^{-j0,01^\circ}$  V. Tikroji transformatoriaus antrinė įtampa:  $U_2 = U'_2 / K = 3346 / 15,04 = 222,5$  V.



9.10 pav. Redukuotojo transformatoriaus supaprastinta vektorinė diagrama

**9.2.5. Redukuotojo transformatoriaus vektorinė diagrama.** Paprasčiausia yra vektorinė diagrama, braižoma 9.9 pav., d atstojamajai grandinei. Laikykime, kad transformatoriaus apkrova – redukuotasis imtuvas  $Z' = Z' e^{j\varphi}$  ( $\varphi > 0$ ), kuriuo teka srovė  $I'_2$  ir kuriam tenka įtampa  $U'_2$ . Laikydami, kad šios nuosekliai sujungtos grandinės srovės pradinė fazė lygi nuliui:  $I'_2 = I'_2 e^{j0}$ , nubraižome įtampas  $U'_2$ , pralenciančios fazę  $\varphi$  srovę, vektorių (9.10 pav.).

Pirminės įtampas vektorius gaunamas, taikant II Kirčhofo dėsnį:  $U_1 = U'_2 + Z_k I'_2 = U'_2 + R_k I'_2 + jX_k I'_2$ .

Ši vektorinė diagrama labai vaizdi, todėl dažnai braižoma, tiriant transformatoriaus antrinės įtampas priklausomybę nuo apkrovos:  $U_2 = f(I_2)$ .

## 9.3

### Svarbiausieji transformatoriaus parametrai ir charakteristikos

**9.3.1. Paso duomenys.** Svarbiausieji pramonės gaminių transformatorių duomenys yra pateikiami kataloguose. Antra vertus, gaminant energetinėms sistemoms

galingus transformatorius, neišvengiama tam tikros technologinės jų parametrų sklaidos. Dėl to transformatoriams atliekami laboratoriniai bandymai ir į jų pasus dar surašomi ir atliktų bandymų rezultatai.

Transformatorių svarbiausieji parametrai yra tokie: pilnutinė galia  $S_N$  ( $V \cdot A$  ar  $kV \cdot A$ ); pirminė ir antrinė vardinės srovės  $I_{1N}$  ir  $I_{2N}$  ( $A$  ar  $kA$ ); pirminė vardinė įtampa  $U_{1N}$  ir antrinė tuščiosios eigos įtampa, kuri tuo pačiu yra ir antrinė vardinė įtampa,  $U_{20} = U_{2N}$  ( $V$  ar  $kV$ ); trumpojo jungimo ir tuščiosios eigos galia –  $P_k$  ir  $P_0$  ( $W$ ); santykinė tuščiosios eigos srovė  $I_{0*}$  (%); santykinė trumpojo jungimo įtampa  $U_{k*}$  (%); tinklo įtampos dažnis  $f$  ( $Hz$ ).

Šių duomenių pakanka, kad būtų galima apskaičiuoti transformatoriaus atstojamosios grandinės elementų parametrus, transformacijos koeficientą, išorinę charakteristiką  $U_2 = f(I_2)$ , naudingumo koeficientą ir jo priklausomybę nuo apkrovos didumo bei pobūdžio, avarinio trumpojo jungimo srovės.

**9.3.2. Išorinė charakteristika.** Tai viena iš svarbiausių eksploatacinių transformatoriaus charakteristikų. Iš esmės tai yra **antrinės apvijos voltamperinė charakteristika**:  $U_2 = f(I_2)$ , kai  $U_1 = U_{1N} = \text{const}$ . Nors daugumos galingų transformatorių antrinė įtampa mažai priklauso nuo apkrovos, bet yra tokių imtuvų, kurie labai jautrūs įtampos pokyčiams. Pavyzdžiui, kai tinklo įtampa 1% skiriasi nuo vardinės, kaitinamosios lempos šviesos srautas pakinta 3,5%, o darbo trukmė net 13%, lyginant su jų vardinėmis vertėmis. Daugumai kitų pramoninių imtuvų leistinasis įtampos sumažėjimas yra 5%, kai kuriems – 10%, lyginant su jų vardine įtampa.

Transformatoriaus išorinę charakteristiką galima gauti eksperimentiškai arba apskaičiuoti iš paso duomenų. Įtampa dažniausiai išreiškiama santykiniais dydžiais (arba procentais) vardinės įtampos atžvilgiu:  $U_2/U_{2N}$ , o apkrova – apkrovos koeficientu:

$$\beta = S/S_N = I_2/I_{2N} = I_1/I_{1N}; \quad (9.24)$$

čia  $S$ ,  $I_2$ ,  $I_1$  – tikrosios ir  $S_N$ ,  $I_{2N}$ ,  $I_{1N}$  – vardinės transformatoriaus pilnutinė galia ir srovės.

Kadangi praktiškai apkrova dažniausiai yra aktyvaus ar aktyvaus-induktyvaus pobūdžio (apšvietimo lempos, kaitinimo krosnys, varikliai), daugumos galingų transformatorių, juos labiau apkrovus, antrinė įtampa šiek tiek sumažėja. Kai apkrova yra aktyvaus-talpinio pobūdžio, transforma-

toriaus antrinė įtampa gali didėti, ji labiau apkrovus (9.11 pav.).

Įtampos pokytis **įvertinamas santykiniu dydžiu** (ar procentais) vardinės (tuščiosios eigos) įtampos atžvilgiu:

$$\Delta U_* = (U_{2N} - U_2) / U_{2N}. \quad (9.25)$$

Paprastai galingų jėgos transformatorių išorinė charakteristika yra kieta: kai  $\beta = 1$ , antrinė įtampa tik 5–8% mažesnė už tuščiosios eigos įtampą (čia  $\beta = P_2 / P_{2N}$ ).

Išorinei transformatoriaus charakteristikai sudaryti patogu pasinaudoti jo supaprastinta atstojamąja schema ir vektorine diagrama (žr. 9.9 pav., c ir 9.10 pav.), kurios padidintas fragmentas pavaizduotas 9.12 pav.

Padauginę (9.25) lygybės skaitiklį ir vardiklį iš transformacijos koeficiento  $K = U_{1N} / U_{2N}$  ir prisiminę (9.19) lygybę, gauname:

$$\Delta U_* = (U_{1N} - U'_2) / U_{1N}. \quad (9.26)$$

Iš vektorinės diagramos (žr. 9.12 pav.) įtampų skirtumą apytiksliai galime užrašyti šitaip:

$$U_{1N} - U'_2 \approx R_k I'_2 \cos \varphi + X_k I'_2 \sin \varphi.$$

Padauginę šį įtampų skirtumą iš santykio  $I_{1N} / I_{1N}$  ir prisiminę, kad  $I_1 / I_{1N} = \beta$ , o redukuotojo transformatoriaus  $I'_2 = I_1$ , gauname:

$$\begin{aligned} U_{1N} - U'_2 &= \beta (R_k I_{1N} \cos \varphi + X_k I_{1N} \sin \varphi) = \\ &= \beta (U_{k_a} \cos \varphi + U_{k_r} \sin \varphi); \end{aligned} \quad (9.27)$$

čia  $U_{k_a}$  ir  $U_{k_r}$  – aktyvioji ir reaktyvioji trumpojo jungimo įtampos dedamosios.

Jas galima užrašyti šitaip:

$$U_{k_a} = U_k \cos \varphi_k; \quad U_{k_r} = U_k \sin \varphi_k; \quad (9.28)$$

čia  $\varphi_k$  – fazių skirtumas tarp įtampos ir srovės trumpojo jungimo bandymo metu; jį galima apskaičiuoti iš (9.18) lygybės.

Irašę (9.27) ir (9.28) išraiškas į (9.26), gauname visas įtampas, išreikštas santykiniais dydžiais:

$$\Delta U_* = \beta U_{k*} (\cos \varphi_k \cos \varphi + \sin \varphi_k \sin \varphi).$$

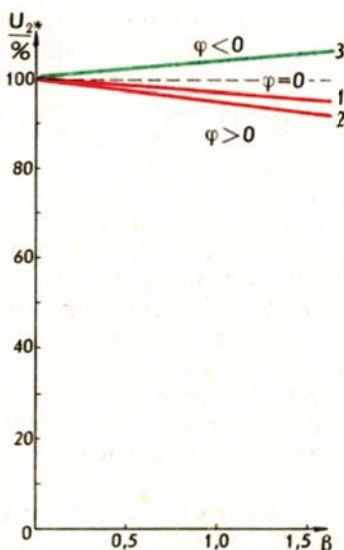
### Santykinis antrinės įtampos pokytis

$$\Delta U_* = \beta U_{k*} \cos (\varphi - \varphi_k). \quad (9.29)$$

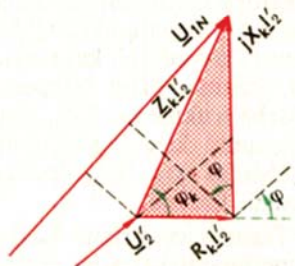
**Transformatoriaus antrinė įtampa** (žr. (9.25) ir (9.29) lygybes):  $U_2 = U_{2N} (1 - \Delta U_*)$  arba

$$U_2 = U_{2N} [1 - \beta U_{k*} \cos (\varphi - \varphi_k)]. \quad (9.30)$$

Kai santykinė trumpojo jungimo įtampa išreiškiama procentais,



9.11 pav. Galingo transformatoriaus išorinės charakteristikos pavyzdžiai, kai apkrova aktyvaus (1), aktyvaus-induktyvaus (2) ir aktyvaus-talpinio (3) pobūdžio



9.12 pav. Redukuotojo transformatoriaus supaprastintos vektorinės diagramos fragmentas

$$U_2 = U_{2N} [1 - (U_{k*}/100) \beta \cos(\varphi - \varphi_k)]. \quad (9.31)$$

Kaip matome,  $U_2 < U_{2N}$ , kai  $|\varphi - \varphi_k| < 90^\circ$ , nes  $\cos(\varphi - \varphi_k) > 0$ . Gali būti  $U_2 > U_{2N}$ , kai  $|\varphi - \varphi_k| > 90^\circ$ , nes  $\cos(\varphi - \varphi_k) < 0$ . Taip esti, kai aktyvaus-talpinio pobūdžio imtuvu apkrautas galingas transformatorius (žr. 9.11 pav.), nes tokių transformatorių trumpojo jungimo kampas  $\varphi_k$  yra artimas  $90^\circ$ . Kai  $\varphi - \varphi_k = 90^\circ$ ,  $U_2 = U_{2N} = \text{const}$ .

**9.3.3. Naudingumo koeficientas.** Jis yra lygus aktyviosios galios, kurią transformatorius perduoda imtuvui, ir imamos iš tinklo aktyviosios galios santykiui:

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_{dm} + P_{de}); \quad (9.32)$$

čia  $P_{dm}$  ir  $P_{de}$  – transformatoriaus magnetinių ir elektrinių nuostolių galia, kurių vardinės vertės  $P_0$  ir  $P_k$  išmatuojamos trumpojo jungimo ir tuščiosios eigos bandymų metu.

**Vardinis naudingumo koeficientas:**

$$\eta_N = P_{2N}/(P_{2N} + P_0 + P_k). \quad (9.33)$$

Galingų transformatorių  $\eta_N \approx 0,98 - 0,99$ , t. y. gana didelis.

Kaip matome iš (9.32), transformatoriaus **naudingumo koeficientas priklauso nuo jo apkrovos. Galia  $P_2$ , perduodama imtuvui,**

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi = \beta S_N \cos \varphi; \quad (9.34)$$

čia  $S_N = U_{2N} I_{2N}$  – vardinė pilnutinė transformatoriaus galia.

Normaliai veikiančio transformatoriaus  $U_1 = U_{1N}$ , todėl jo **magnetinių nuostolių galia  $P_{dm} = P_0 = \text{const}$**  ir nuo apkrovos nepriklauso.

**Elektrinių nuostolių galia:**

$$P_{de} = R_k I_1^2 = R_k I_1^2 (I_{1N}/I_{1N})^2 = \beta^2 R_k I_{1N}^2;$$

čia  $R_k I_{1N}^2 = P_k$  – vardinė nuostolių galia, kuri išmatuojama trumpojo jungimo bandymo metu. Vadinasi,

$$P_{de} = \beta^2 P_k. \quad (9.35)$$

Irašę gautas  $P_{dm}$  ir  $P_{de}$  į (9.32), gauname

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \varphi}{\beta S_N \cos \varphi + \beta^2 P_k + P_0}. \quad (9.36)$$

Transformatoriaus **naudingumo koeficientas didžiausias, kai  $P_k = P_0$ , t. y. elektriniai nuostoliai lygūs magnetiniams**



**nuostoliams. Keičiantis transformatoriaus apkrovai gana plačiose ribose ( $\beta=0,2-1,5$ ), naudingumo koeficientas išlieka gana didelis (9.13 pav.).**

Naudingumo koeficientas yra labai svarbi energetinė transformatoriaus charakteristika. Energetinėse sistemose dažnai būna net kelios įtampos transformavimo – aukštinimo ir žeminimo – pakopos. Bendras naudingumo koeficientas lygus visų pakopų transformatorių naudingumo koeficientų sandaugai.

Pavyzdžiui, jei nuo šaltinio iki imtuvo elektros energija pereina septynis transformatorius, kurių kiekvieno  $\eta=0,99$ , tai bendras  $\eta_t=0,99^7=0,932$ ; jei būtų kiekvieno transformatoriaus  $\eta=0,98$ , tai būtų  $\eta_t=0,98^7=0,868$ . Kaip matome, pagerinus visų septynių transformatorių naudingumo koeficientą 1%, bendri nuostoliai sumažėja apie 7%. Paprastai nuostoliai transformatoriuose sudaro apie 5–6% visos elektrinės gaminamos elektros energijos.

**9.3.4. Avarinio trumpojo jungimo srovės. Trumpasis jungimas, kuris įvyksta netikėtai trumpai sujungus veikiančio transformatoriaus antrinę apviją, yra avarinis režimas. Srovės, kurios teka apvijomis jo metu, galima apskaičiuoti pagal Omo dėsnį (žr. 9.9 pav., d):  $I_{1k}=U_{1N}/Z_k$ . Įrašę trumpojo jungimo varžos  $Z_k$  reikšmę iš (9.17) ir pakeitę trumpojo jungimo įtampą  $U_k$  iš (9.16) santykinę jos vertę  $U_{k*}$ , gau-**

$$I_{1k}=100I_{1N}/U_{k*} \quad (9.37)$$

Prisiminę, kad transformatoriaus srovė atvirkščiai proporcinga apvijos vijų skaičiui (žr. (9.9) lygybę), antrinės apvijos srovę trumpojo jungimo metu galime užrašyti šitaip:

$$I_{2k}=(N_1/N_2)I_{1k}=(I_{2N}/I_{1N})I_{1k}.$$

Įrašę pirminės trumpojo jungimo srovės  $I_{1k}$  reikšmę iš (9.37), gauname:

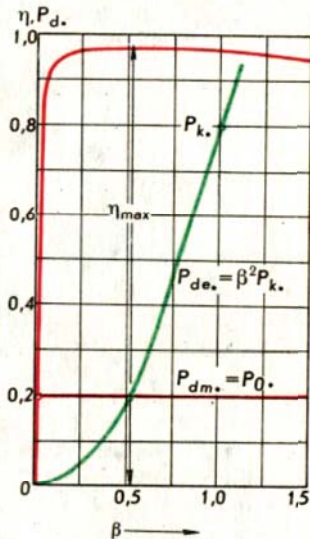
$$I_{2k}=100I_{2N}/U_{k*} \quad (9.38)$$

Kadangi  $U_{k*}=(3-10)\%$ , tai trumpojo jungimo metu transformatoriaus apvijomis teka srovės, kurios apie 10–30 kartų didesnės už vardinės. Apvijose išskiriamas šilumos kiekis yra proporcingas srovių kvadratais, todėl transformatorius gali perkaisti, jei jo neatjungs apsauga.

Antra vertus, įvykus trumpajam jungimui, transformatoriaus grandinėje atsiranda pereinamojo proceso srovės, kurių momentinės vertės gali būti net 1,8 karto didesnės už apskaičiuotas pagal (9.38) formulę nusistovėjusias didžiausias sroves (žr. 4.4.1).

Dėl srovių, tekančių transformatoriaus apvijomis, atsiranda apvijų veikiančios mechaninės jėgos, kurios gali būti tokios didelės, kad gali apviją deformuoti ar net suardyti.

Dėl šių priežasčių trumpasis jungimas transformatoriui yra pavojingas, todėl įrengiama speciali greitaveikė apsauga kuri per labai trumpą laiką (trumpiau nei per pusę periodo) transformatorių turi atjungti.



9.13 pav. Transformatoriaus naudingumo koeficiento ir nuostolių galios priklausomybė nuo apkrovos koeficiento ( $S_N=57 \text{ kV} \cdot \text{A}$ )

## Trifaziai transformatoriai ir autotransformatoriai

**9.4.1. Trifazis transformatorius.** Praktiškai visos energetinės sistemos ir dauguma pramoninių imtuvų yra trifaziai, todėl plačiausiai naudojami trifaziai transformatoriai.

Tarkime, kad turime tris vienodus vienfazius transformatorius, iš kurių norime sudaryti vieną trifazį (9.14 pav.). Kol vienfazių transformatorių magnetinės grandinės yra atskiros, jų visuma yra analogiška šešialaidei trifazei elektrinei grandinei (žr. 3.1). Konstruktyviai sujungtų trijų vienfazių transformatorių magnetinės grandinės analogas yra keturlaidė trifazė elektrinė grandinė.

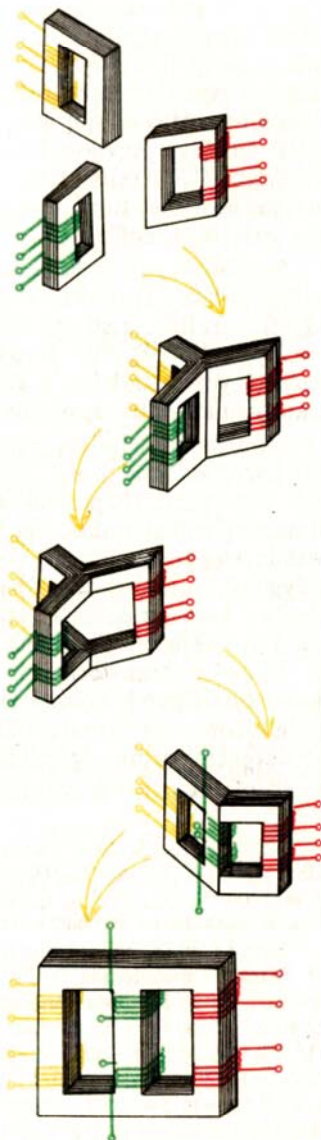
Prijungus tokio vieno trifazio transformatoriaus pirminę apviją prie tinklo, sukuriame trys vienodo didumo magnetiniai srautai  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  ir  $\Phi_C$ , kurių fazės skiriasi  $120^\circ$  kampais. Kaip žinome iš I Kirchhofo dėsnio magnetinei grandinei, magnetolaidžio bendrosios dalies magnetinis srautas  $\Phi = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$ . Bendrajame (viduriniajame) magnetolaidžio strype magnetinis srautas  $\Phi = 0$ , ir ta magnetinės grandinės dalis (kaip ir neutralusis laidas simetriniam imtuvui) yra nereikalinga. Atsisakius vidurinėsios dalies, galima naudoti magnetolaidį, kurio visų trijų fazių strypai yra vienoje plokštumoje. Ant kiekvieno strypo yra po vieną pirminės ir antrinės apvijos fazę. Trifaziam transformatoriui būdinga tai, kad jame yra trifazis magnetolaidis.

Kaip matome, trifazis transformatorius, lyginant su trimis vienfaziais, yra ekonomiškesnis: jo magnetinei grandinei reikia mažiau plieno, mažesnė jo masė ir matmenys.

Antra vertus, tam tikrų privalumų turi ir trys vienfaziai transformatoriai, kurie, prijungti prie trifazės sistemos, sudaro vadinamąjį grupinį transformatorių. Paprastai jie gaminami labai didelės galios ir naudojami tada, kai: a) sunku pervežti vieną labai galingą trifazį transformatorių; b) reikia turėti pigesnę rezervinį šaltinį (užtenka vieno rezervinio vienfazio transformatoriaus).

Trifazio transformatoriaus apvijų pradžios yra žymimos lotynų abėcėlės pirmosiomis raidėmis: pirminės –  $A, B, C$ ; antrinės –  $a, b, c$ . Apvijų pabaigos – paskutiniosiomis: pirminės –  $X, Y, Z$ ; antrinės –  $x, y, z$ . Paprastai visos apvijos yra vinyjamos viena kryptimi, ir gamykloje apvijų pradžios ir galai yra suženklunami taip, kad kiekvienos fazės pirminė ir antrinė EVJ sutampa faze:  $E_A$  su  $E_a$ ;  $E_B$  su  $E_b$ ;  $E_C$  su  $E_c$ . Sutarta laikyti teigiama EVJ kryptį iš apvijos galo į pradžią: iš  $X$  į  $A$ , iš  $Y$  į  $B$  ir t. t.

Kaip ir visus trifazius imtuvus bei trifazius šaltinius,



9.14 pav. Trifazio transformatoriaus sandaros raida

transformatoriaus pirminę ir antrinę apviją galima sujungti žvaigžde ( $\gamma$ ), žvaigžde su neutraliuoju laidu ( $\gamma$ ) arba trikampiu ( $\Delta$ ). Dažniausiai transformatorių apvijų jungiamos  $\gamma/\gamma$ ,  $\gamma/\gamma$  ir  $\gamma/\Delta$ . Kai norime sujungti transformatoriaus apviją  $\gamma$  ar  $\gamma$ , jos fazių galai  $X, Y, Z$  arba  $x, y, z$  sujungiami į vieną mazgą (9.15 pav., a). Negalima sukeisti kurios nors fazės galo su pradžia. Jei, pavyzdžiui, jungdami pirminę apviją sukeistume galą  $X$  su pradžia  $A$  vietomis, toje apvijos ritėje tekėtų priešingos fazės srovė ir būtų suminis transformatoriaus srautas  $\Phi = -\Phi_A + \Phi_B + \Phi_C \neq 0$ . Magnetolaidžio strypų magnetiniai srautai būtų nevienodi, todėl antrinėje apvijoje būtų indukuojamos trys nevienodo didumo EVJ. Nesimetrinių EVJ sistema būtų gauta ir tuo atveju, jei sukeistume vietomis antrinės apvijos vienos fazės galą su pradžia.

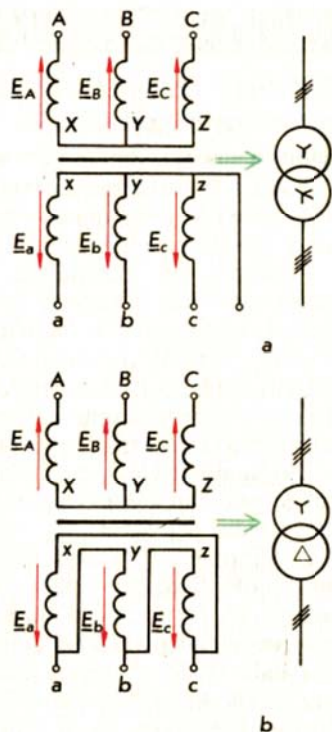
Jungiant apviją trikampiu (žr. 9.15 pav., b), taip pat negalima sukeisti apvijos nė vienos fazės galo su pradžia. Pavyzdžiui, sukeitus  $a$  su  $x$ , kontūre  $abca$  atsirastų EVJ  $\underline{E} = -\underline{E}_a + \underline{E}_b + \underline{E}_c \neq 0$ . Kadangi transformatoriaus apvijų varžos yra nedidelės, o ši EVJ  $E = 2E_f$ , kontūru tekėtų transformatoriaus apvijoms pavojinga stipri srovė.

Trifazio transformatoriaus veikimo principas yra toks pat kaip vienfazio, todėl jo tyrimui taikomi tie patys principai ir metodai. Paprastai jo pirminė apviją jungiama į simetrinę trifazį tinklą. Jei jo apkrova yra simetrinė (o ją visada stengiamasi paskirstyti visoms fazėms kaip galima tolygiau), pakanka tirti vieną transformatoriaus fazę kaip vienfazį transformatorių: sudaryti jos atstojamąją schemą, braižyti vektorinę diagramą ir panašiai.

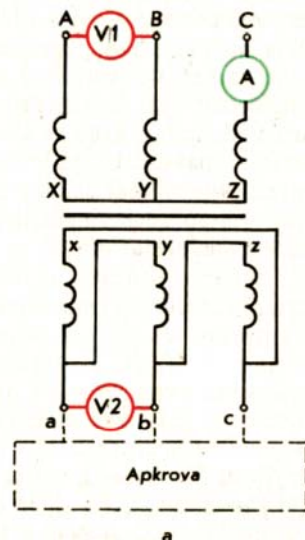
Trifaziam transformatoriui atliekami laboratoriniai tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo bandymai, ir jo pase surašomi visi minėti svarbiausieji parametrai. Iš paso duomenų galima apskaičiuoti visus kitus transformatoriaus apibūdinančius parametrus ir charakteristikas (žr. 9.3).

**9.2 pavyzdys.** Trifazio transformatoriaus paso duomenys yra tokie:  $S_N = 1000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,  $U_{1N}/U_{2N} = 10,0/0,4 \text{ kV}$ ,  $\gamma/\Delta$ ,  $P_0 = 3000 \text{ W}$ ,  $P_k = 11200 \text{ W}$ ,  $U_{k*} = 5,5\%$ ,  $I_{0*} = 1,5\%$ . Išnagrinėkime šio transformatoriaus parametrus ir charakteristikas.

Sprendimas. Nubraižome transformatoriaus schemą (9.16 pav., a). Paprastai nurodomos vardinės linijinių transformatoriaus įtampų ir srovių vertės. Linijinės vardinės įtamos: pirminė –  $U_{1N} = 10000 \text{ V}$ , antrinė –  $U_{2N} = 400 \text{ V}$ . Fazinės įtamos: pirminė ( $\gamma$ ) –  $U_{1f} = U_{1N}/\sqrt{3} = 10000/\sqrt{3} = 5774 \text{ V}$ , antrinė ( $\Delta$ ) –  $U_{2f} = U_{2N} = 400 \text{ V}$ . Vienos fazės galia  $S_f = S_N/3 = 1000/3 = 333,3 \text{ kV} \cdot \text{A}$ . Vienos fazės nuostolių galia:  $P_{0f} = P_0/3 = 3000/3 = 1000 \text{ W}$ ,  $P_{kf} = P_k/3 = 11200/3 = 3733 \text{ W}$ . Pirminė fazinė srovė yra linijinė vardinė srovė  $I_{1f} = I_{1N} = S_f/U_{1f} = 333,3 \cdot 10^3/5774 = 19,2 \text{ A}$ . Trumpojo jungimo įtampa  $U_k = U_{1f} U_{k*}/100 = 5774 \cdot 5,5/100 = 317,5 \text{ V}$ . Tuščiosios eigos srovė  $I_0 = I_{1N} I_{0*}/100 = 19,2 \cdot 1,5/100 = 0,29 \text{ A}$ .



9.15 pav. Trifazio transformatoriaus apvijų jungimo schemų pavyzdžiai: a –  $\gamma/\gamma$ ; b –  $\gamma/\Delta$



Trumpojo jungimo varžos:  $Z_k = U_k/I_{1f} = 317,5/19,2 = 16,5 \Omega$ ,  
 $R_k = P_{kf}/I_{1f}^2 = 3733/19,2^2 = 10,1 \Omega$ ,  $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{16,5^2 - 10,1^2} =$   
 $= 13,0 \Omega$ ,  $\varphi_k = \arctg(X_k/R_k) = \arctg(13/10,1) = 52,2^\circ$ .

Transformatoriaus naudingumo koeficiento išraišką gauname, įrašę į (9.36) lygtį atitinkamus skaičius:

$$\eta = \frac{\beta \cdot 1000 \cos \varphi}{\beta \cdot 1000 \cos \varphi + \beta^2 \cdot 11,2 + 3,0}$$

Keičiant  $\beta = 0-1,5$ , t. y. transformatoriaus apkrovą nuo tuščiosios eigos iki  $1,5S_N$ , įvairioms apkrovos galios koeficiento  $\cos \varphi$  vertėms sudaromos kreivių šeimos  $\eta = f(\beta, \varphi)$  (žr. 9.16 pav., b).

Išorinės charakteristikos sudaromos, įrašius duomenis į (9.31) lygtį:

$$U_2 = 400 [1 - (5,5/100) \cdot \beta \cdot \cos(\varphi - 52,2^\circ)].$$

Priklausomai nuo apkrovos koeficiento  $\beta$  ir nuo galios koeficiento  $\cos \varphi$ , gaunamos charakteristikų šeimos  $U_2 = f(\beta, \varphi)$  (žr. 9.16 pav., c). Yra trys būdingi išorinės charakteristikos atvejai.

1.  $\cos(\varphi - 52,2^\circ) > 0$ : įtampa  $U_2$  mažėja, kai transformatorius labiau apkraunamas. Taip gali būti, kai: a) apkrova yra aktyvaus-induktyvaus ar aktyvaus pobūdžio ( $\varphi \geq 0$ ) arba b) apkrova yra aktyvaus-talpinio pobūdžio ( $\varphi < 0$ , bet  $|\varphi| < 37,8^\circ$ ).

2.  $\cos(\varphi - 52,2^\circ) = 0$ : įtampa  $U_2$  nuo apkrovos didumo nepriklauso. Apkrova yra aktyvaus-talpinio pobūdžio ir  $\varphi = -37,8^\circ$ .

3.  $\cos(\varphi - 52,2^\circ) < 0$ : įtampa  $U_2$  didėja, labiau apkraunant transformatorių. Apkrova yra aktyvaus-talpinio pobūdžio ir  $|\varphi| > 37,8^\circ$ .

**9.4.2. Autotransformatorius.** Tai toks transformatorius, kurio pirminė ir antrinė apvijos yra elektriškai sujungtos ir turi bendrų vijų (9.17 pav.). Kai autotransformatorius yra žeminimo, jo antrinė apvija yra dalis pirminės apvijos. Kai aukštinimo, – pirminė yra dalis antrinės.

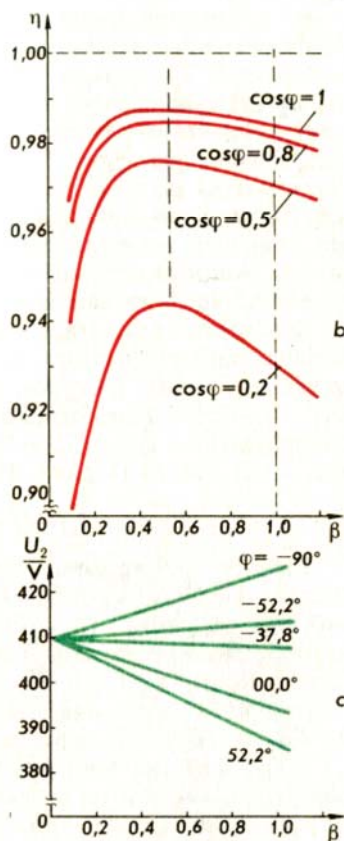
Autotransformatoriaus transformacijos koeficientas apskaičiuojamas taip pat, kaip ir kitų transformatorių. Pavyzdžiui, žeminimo (žr. (9.3)) :  $K = E_1/E_2 = N_1/N_2$ .

Autotransformatoriuje energija iš pirminės apvijos į antrinę perduodama ne tikai magnetiniu lauku, bet ir apvijų elektriniu ryšiu. Autotransformatoriaus veikimo principas yra toks pat kaip ir vienfazio transformatoriaus, bet tarp jų yra ir skirtumų.

Palyginkime autotransformatorių (pavyzdžiui, žeminimo) su tos pačios galios ir transformacijos koeficiento vienfaziu transformatoriumi. Abiejų apvijos turi vijų skaičių  $N_1$  ir  $N_2$ , jomis teka srovės  $I_1$  ir  $I_2$ . Šios srovės yra beveik tos pačios fazės. Pirminė srovė magnetolaidį įmagnetina, o antrinė – išmagnetina. Dalis autotransformatoriaus vijų yra bendra ir pirminei, ir antrinei apvijai. Žinome, kad  $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ . Kai autotransformatorius yra žeminimo,  $I_2 > I_1$ . Bendrosios dalies srovė  $I$  yra lygi šių srovių skirtumui:

$$I = I_2 - I_1 = K I_1 - I_1 = (K - 1) I_1 = (1 - 1/K) I_2. \quad (9.39)$$

Kaip matome, antrine autotransformatoriaus apvija teka



9.16 pav. 9.2 pavyzdžio transformatoriaus schema (a), apskaičiuotas  $\eta$  (b) ir išorinės charakteristikos (c) priklausomai nuo apkrovos pobūdžio

srovė  $I_1$ , kuri tuo mažesnė už vienfazio transformatoriaus antrinę srovę  $I_2$ , kuo transformacijos koeficientas  $K$  artimesnis vienetui. Tai reiškia, kad autotransformatoriaus antrinei apvijai reikia mažesnio skerspjūvio apvijinio laido. Pirminė autotransformatoriaus srovė teka ta jo dalimi, kurios vijų skaičius yra lygus  $N_1 - N_2$ . Matome, kad autotransformatoriaus pirminei apvijai reikia mažiau vijų, taigi ir mažiau apvijinio laido. Kadangi mažesnis apvijų tūris, galima sumažinti magnetolaidžio matmenis ir dar sutaupyti plieno. Autotransformatoriaus apvijose gaunami mažesni nuostoliai, todėl jo naudingumo koeficientas yra didesnis.

Bendruoju atveju transformatoriaus ir autotransformatoriaus masė proporcinga jų pilnutinei elektromagnetinei galiai, t. y. galiai energijos, perduodamos magnetiniu ryšiu:  $G \sim S_{em}^{0,75}$ . Transformatorius visą energiją perduoda tik magnetiniu ryšiu:  $S'_{em} = S_T = U_2 I_2$ . Autotransformatorius – tik dalį (9.18 pav.). Pavyzdžiui, žeminimo:

$$S'_{em} = S_{AT} = U_2 (I_2 - I_1) = (1 - 1/K) S_T. \quad (9.40)$$

Tarkime, kad autotransformatorius įtampą pakeičia du kartus:  $K=2$ . Apskaičiavę iš (9.40) gausime, kad  $S_{AT} = 0,5 S_T$ ;  $(G_{AT}/G_T) \sim (S_{AT}/S_T)^{0,75} = 0,5^{0,75} = 0,59$ , t. y. tokio autotransformatoriaus masė  $\sim 40\%$  mažesnė nei transformatoriaus.

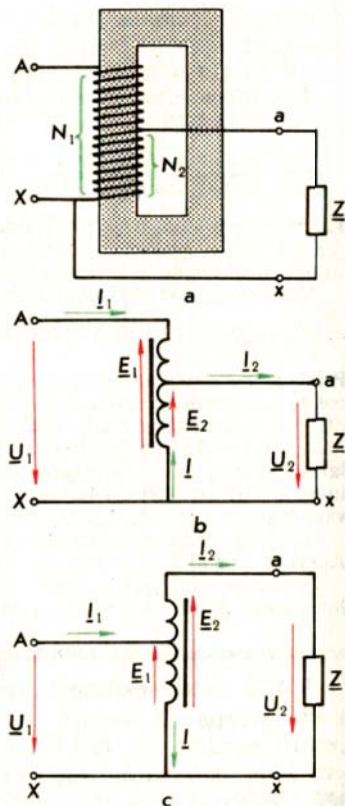
Ekonomiškesniais laikomi autotransformatoriai, kurių  $2 > K > 1$ . Kai  $K > 3$ , geriau naudoti transformatorius.

Autotransformatoriai turi ir trūkumų: didesnės jų trumpojo jungimo srovės; ne visada pageidautinas elektrinis ryšys tarp pirminės ir antrinės apvijos.

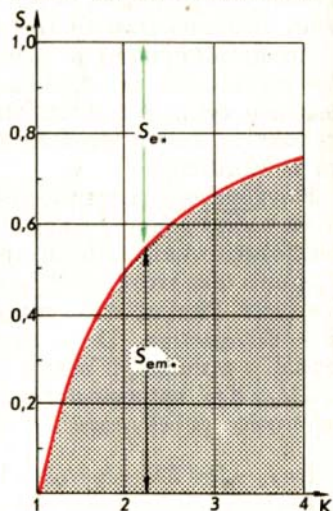
Trifaziai autotransformatoriai (9.19 pav.) naudojami energetinėse sistemose ir pramonėje. Pavyzdžiui, Lietuvos energetinėje sistemoje yra galingi (125–200 MV·A) autotransformatoriai, kurie 330 kV įtampą pažemina iki 110 kV. Jų masė ir tūris apie 25% mažesni negu analogiškų transformatorių. Įmonėse autotransformatoriai naudojami galingsiems asinchroniniams ar sinchroniniams varikliams paleisti, kai kuriuose technologiniuose įrenginiuose.

Vienfaziai mažos galios autotransformatoriai labai plačiai naudojami elektroniniuose, radijo, automatikos, ryšių įrenginiuose.

Laboratorijoje naudojami reguliuojamos įtamos autotransformatoriai, kurių antrinės apvijos vijų skaičius gali būti keičiamas (9.20 pav.). Sukant rankenėlę, slankiklis juda neizoliuotu apvijos paviršiumi, ir antrinė įtampa gali būti keičiama nuo nulio iki įtamos, šiek tiek didesnės už  $U_1$ . Pavyzdžiui, kai  $U_1 = 220$  V,  $U_2 = 0 - 250$  V. Laboratorinio autotransformatoriaus apvijai turi būti suvyniota visa iš vienodo skerspjūvio laido.



9.17 pav. Žeminimo (a, b) ir aukštinimo (c) autotransformatorius



9.18 pav.

**Dirbant su autotransformatoriumi, reikia nepamiršti, kad pirminė ir antrinė apvijos turi elektrinį ryšį. Tai reiškia, kad, esant netgi nedidelei antrinei įtampai, prie antrinės grandinės prisiliesti gali būti pavojinga (9.21 pav.).**

**9.4.3. Daugelio apvijų transformatorius.** Jis naudojamas tais atvejais, kai reikia turėti keletą skirtingų įtampų. Energetikoje dažniausiai sutinkami trijų apvijų transformatoriai, kurie turi vieną pirminę ir dvi antrines apvijas (9.22 pav.). Pavyzdžiui, Lietuvos energetinėje sistemoje yra 110/35/10 kV žeminimo transformatoriai.

Tokių transformatorių magnetovaros jėgų lygtis (vienai fazei), kai energija perduodama iš vienos pirminės į dvi antrines apvijas:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_3 I_3 = N_1 I_0; \quad (9.41)$$

čia  $N_1 I_1$  ir  $N_1 I_0$  – pirminės apvijos MVJ darbo ir tuščiosios eigos metu;  $N_2 I_2$  ir  $N_3 I_3$  – antrinių apvijų MVJ.

Didžiausias antrinių MVJ išmagnetinantis poveikis yra tada, kai antrinės srovės  $I_2$  ir  $I_3$  yra vardinės ir faze sutampa.

Trijų apvijų žeminimo transformatoriui gali būti apskaičiuojami du transformacijos koeficientai:

$$K_{12} = E_1/E_2 = N_1/N_2; \quad K_{13} = E_1/E_3 = N_1/N_3. \quad (9.42)$$

Pastaruoju laiku naudojami trijų apvijų transformatoriai, kurių pirminė ir viena antrinė apvija (abi aukštesniosios įtamos apvijos) turi elektrinį (autotransformatoriaus) ryšį, o trečioji su jomis susieta magnetiniu ryšiu. **Daugelio apvijų transformatorių mažesnė masė ir matmenys**, lyginant su tos pačios galios dviejų apvijų transformatoriais.

## 9.5

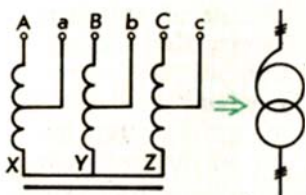
### Specialieji transformatoriai

**9.5.1. Suvirinimo transformatoriai.** Iš visų elektrinio suvirinimo būdų plačiausiai naudojami kontaktinis ir lankinis.

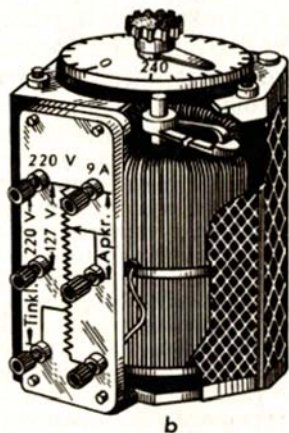
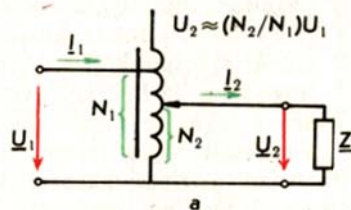
**Kontaktinio suvirinimo transformatoriai dažniausiai veikia impulsiniu režimu.** Jie ypatingi tuo, kad jų antrinė įtampa nedidelė (5–15 V), o antrinė srovė siekia šimtus amperų.

Svarbiausias reikalavimas, keliamas rankinio lankinio vienposčio suvirinimo transformatoriams, – jų išorinė charakteristika turi būti suderinta su apkrovos – elektros lanko – žemėjančia statine voltamperine charakteristika (9.23 pav.). Elektros lankui būdinga tai, kad jo uždegimo įtampa yra didesnė, negu degimo. Be to, elektros lanko diferencinė varža (žr. 1.7.2) yra neigiama: srovei didėjant, jo įtampa mažėja.

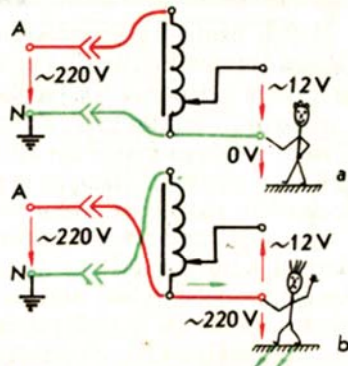
Transformatoriaus antrinė įtampa turi būti didesnė už lanko uždegimo įtampa, kuri esti apie 50–60 V, bet ne



9.19 pav. Trifazio autotransformatoriaus schema ir sutartinis ženklas



9.20 pav. Laboratorinis reguliuojamos įtamos autotransformatorius: a – schema; b – bendras vaizdas



9.21 pav.

didesnė už standartų leidžiamą 80 V tuščiosios eigos įtampą. Kad užsidegtų lankas, antrinė grandinė elektrodu trumpai sujungiama ir darbo metu tokie trumpieji sujungimai yra dažni. Transformatoriaus trumpojo jungimo srovės neturi būti daugiau kaip 1,2–2 kartus didesnės už vardines sroves.

Suvirinimo transformatoriaus išorinė charakteristika turi būti minkšta. Tokiu atveju jo trumpojo jungimo srovė yra nedaug stipresnė už vardinę srovę, o, suvirinimo metu pakeitus lanko ilgį, darbo srovė pakinta palyginti nedaug (9.24 pav.). Lankas, kurio ilgis  $l_2$ , stabiliai dega, tekant srovei  $I_2$  (charakteristikų sankirta – taškas B). Sumažinus jo ilgį iki  $l_1$ , teka suvirinimo srovė  $I_1$  (taškas C). Kai srovė labai sumažėja (taškas A), lankas užgęsta.

Paprastai pageidautina turėti galimybę keisti transformatoriaus išorinės charakteristikos statumą, kad suvirinimo srovė būtų galima reguliuoti. Tokios suvirinimo šaltinių išorinės charakteristikos gaunamos dvejopai: 1) nuosekliai su žeminimo transformatoriumi įjungiamas droselis su reguliuojamu oro tarpu; 2) transformatoriaus konstrukcijoje numatoma galimybė susilpninti jo magnetinį srautą (didinant magnetinę varžą ar sklaidos srautą) suvirinimo metu.

Kai naudojamas atskiras droselis (9.25 pav., a), jo induktyvioji varža reguliuojama, keičiant magnetinės grandinės varžą (žr. 5.5.2). Kai teka stipri suvirinimo srovė, viso šaltinio antrinė įtampa sumažėja dėl didelių įtampos kritimų transformatoriaus apvijoje ir droselyje.

Droselis gali būti sumontuotas taip, kad jo ir transformatoriaus magnetinė grandinė būtų bendra, o srautas būtų priešinis transformatoriaus magnetiniam srautui (9.25 pav., b). Suvirinimo, kai droseliu teka stipri srovė, transformatoriaus magnetinis srautas sumažėja.

Abiem atvejais suvirinimo šaltinio išorinė charakteristika keičiama, reguliuojant droselio oro tarpą (9.26 pav.).

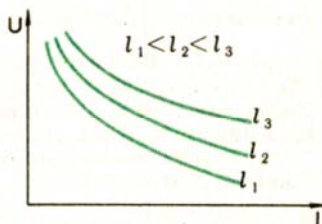
Transformatoriaus magnetinei sklaidai padidinti galima keisti jo apvijų padėtį (pavyzdžiui, jas atitolinant vieną nuo kitos arba įvedant vadinamąjį magnetinį šuntą, kuriuo užsidaro dalis pagrindinio transformatoriaus magnetinio srauto).

**9.5.2. Matavimo transformatoriai.** Energetinėse sistemose, kur įtampa aukštesnė nei 1000 V ir teka stiprios srovės, matavimo prietaisai yra jungiami per įtampos ar srovės matavimo transformatorius. Jų paskirtis yra dvejopa: praplečiamos prietaisų matavimo ribos, ir nereikia tiesiogiai jungti prietaisų į aukštos įtampos grandines, kas yra nesaugu personalui ir pavojinga prietaisams.

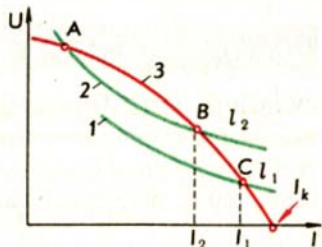
Įtampos matavimo transformatorius (9.27 pav.) įtampą žemina. Jo pirminė apvija jungiama prie matuojamosios įtampos. Lygiagrečiai antrinei apvijai yra jungiami voltmetras, vatmetro ir elektros energijos skaitiklio įtampos rietės. Kadangi minėtų elementų varžos yra didelės, ir jų skaičius ribojamas, įtampos matavimo transformatorius veikia



9.22 pav. Trifazio trijų apvijų transformatoriaus sutartinis ženklas



9.23 pav. Elektros lanko voltamperinės charakteristikos, kai jo ilgis  $l_1 < l_2 < l_3$



9.24 pav. Elektros lanko voltamperinės charakteristikos (1, 2), kai jo ilgis  $l_1 < l_2$  ir suvirinimo transformatoriaus išorinė charakteristika (3)

beveik tuščiaja eiga. Tuščiosios eigos metu  $U_1 \approx E_1$ , o  $E_2 = U_2$ , todėl transformacijos koeficientas  $K_U = N_1/N_2 \approx U_1/U_2$ , arba

$$U_1 = K_U U_2; \quad (9.43)$$

čia  $K_U$  – įtampos transformacijos koeficientas.

Matuojamąją įtampą  $U_1$  reikia apskaičiuoti arba naudoti matavimo prietaisus, kurių skalės sugraduotos, įvertinus įtampos transformacijos koeficientą. Įtampos transformatoriai daugiausia yra gaminami 100 V antrinės vardinės įtampos.

Srovės matavimo transformatorius (9.28 pav.) turi pirminę apviją, kurios vijų skaičius yra nedidelis (kartais 1–2), ir didelio vijų skaičiaus (100–200) antrinę. Jo pirminė apvija jungiama į grandinę taip, kad ja tekėtų matuojamoji srovė. Prie antrinės prijungiami nuosekliai sujungti ampermetras, vatmetro ir elektros energijos skaitiklio srovės ritės. Prie antrinės apvijos prijungtų prietaisų varža yra maža, todėl galima laikyti, kad srovės transformatorius veikia trumpojo jungimo režimu. Kadangi transformatoriaus trumpojo jungimo įtampa labai maža, tai mažas ir magnetinis srautas. Jį sukuria maža suminė MVJ:  $N_1 I_1 - N_2 I_2 \approx 0$ . Kadangi šios abi MVJ yra beveik tos pačios fazės, jų lygtį galime apytiksliai užrašyti nekompleksine forma:  $N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$ . Iš jos gauname pirminės apvijos srovę:  $I_1 = (N_2/N_1) I_2$  arba

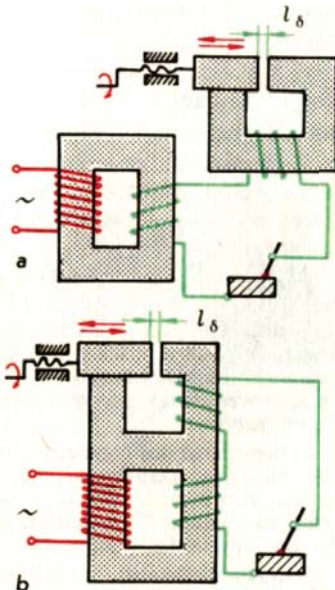
$$I_1 = K_T I_2; \quad (9.44)$$

čia  $K_T = N_2/N_1$  – srovės transformacijos koeficientas.

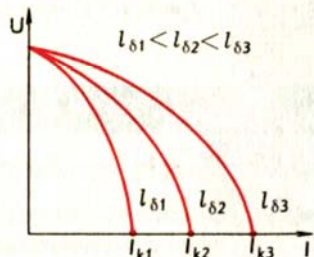
Srovės transformatoriai yra gaminami 5 A (kartais 1 A) antrinės vardinės srovės. Patogu, kai matavimo prietaisų skalės sugraduotos matuojamosios pirminės srovės vertėmis.

Srovėms nuo 20 iki 1000 A žemos įtampos tinkluose matuoti naudojamos vadinamosios srovės matavimo replės (9.29 pav.). Pirminė apvija matavimo metu tampa laidininkas, kuriuo teka matuojamoji srovė. Replių magnetolaidis yra sudarytas iš dviejų spyruoklėmis suspaudžiamų dalių, kurių sandūra kruopščiai nušlifluota, kad oro tarpas būtų kuo mažesnis. Tokiomis replėmis apėmus laidininką, ampermetras rodo tuo laidininku tekančią srovę. Prietaisas įmontuotas replėse, ir jo skalė sugraduota, įvertinus srovės transformacijos koeficientą.

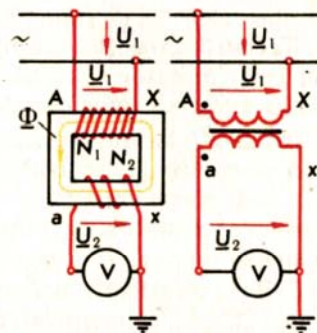
Darbo metu negalima atjungti srovės transformatoriaus antrinės apvijos, nes nutraukiama antrinė srovė ir ji nebeišmagnetina šerdies. Dėl to transformatoriaus magnetinis srautas labai sustiprėja. Sustiprėjus srautui, labai padidėja magnetiniai nuostoliai ( $P_{dm} \sim \Phi^2$ ). Magnetolaidis gali neleistinai įkaisti (tai kenkia apvijų izoliacijai). Be to, srovės transfor-



9.25 pav. Suvirinimo šaltinių su atskiru (a) ir įmontuotu (b) droseliu schemas



9.26 pav. Suvirinimo šaltinio su droseliu išorinės charakteristikos



9.27 pav. Įtampos matavimo transformatoriaus schemas



matoriaus  $N_2 \gg N_1$ , todėl antrinėje apvijoje indukuojama didelė EVJ (nuo kelių šimtų iki 1500 V), kuri gali būti pavojinga personalui, taip pat gali pramušti transformatorių apvijų izoliaciją. Dėl to, kai reikia sujungti prietaisus, **antrinė apvija sujungiama specialiais trumpikliais.**

Kad personalas galėtų saugiai dirbti, įtampos ir srovės matavimo transformatorių antrinė apvija, taip pat metalinės korpusų dalys turi būti įžemintos.

Įtampos ir srovės matavimo transformatorių pirminių ir antrinių dydžių ryšiai (9.43) ir (9.44) buvo užrašyti, laikant kad transformatoriai yra idealūs ir veikia idealios tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo režimais. Tokiu atveju, teisingai sujungus matavimo grandines, įtampos matavimo transformatoriaus įtampos  $U_1$  ir  $U_2$  turi būti tos pačios fazės, o srovės matavimo transformatoriaus srovės  $I_1$  ir  $I_2$  taip pat turi sūpti faze.

Iš tiesų parašytos lygybės yra tik apytikslės ir gaunamas šioks toks fazių skirtumas tarp transformatoriaus pirminių ir antrinių dydžių. Ant matavimo transformatorių, kaip ir visų kitų matavimo prietaisų, užrašoma tikslumo klasė (leistina matuojamojo dydžio modulio paklaida) bei leistina fazių skirtumo paklaida.

Kai vieno prietaiso (pvz., vatmetro ar elektros energijos skaitiklio) abi ritės jungiamos prie srovės ir įtampos matavimo transformatorių (9.30 pav.), jo rodmuo priklauso nuo abiejų transformacijos koeficientų. Pavyzdžiui,

$$U_1 = K_U U_2; I_1 = K_I I_2; P_1 = K_U K_I P_2; W_1 = K_U K_I W_2.$$

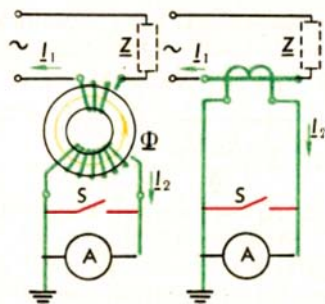
## 9.6

### Transformatorių sandaros ypatumai

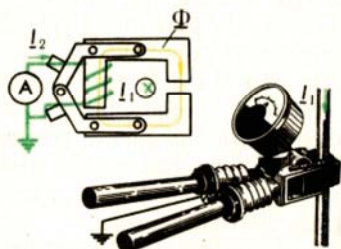
**9.6.1. Trifaziai transformatoriai.** Pramonės įmonėse ir energetinėse sistemose naudojamų trifazių mažos ir vidutinės galios transformatorių (iki 6300 kV·A) gamybai suvartojama apie 45% visų aktyviųjų metalų (elektrotechninio plieno ir vario). Juose išsiskiria apie 50% visų nuostalių. Tačiau šių transformatorių galia tesudaro tik apie 30% visų transformatorių galios. Energetikoje naudojami labai galingi trifaziai transformatoriai – iki šimtų MV·A.

Trifazių transformatorių **magnetolaidžiai surenkami iš elektrotechninio plieno lakštų.** Sūkurinėms srovėms mažinti (žr. 5.4.4) pliene yra apie 3–4% silicio priemaišų, o lakštų viena pusė apdorojama taip, kad būtų sudarytas izoliacinis sluoksnis.

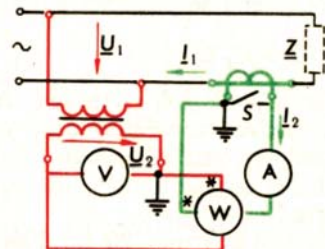
Trifazių transformatorių magnetolaidis dažniausiai būna strypinis: kiekvienos fazės pirminė ir antrinė apvija (viena virš kitos) talpinama ant trijų šerdžių (9.31 pav.). Kad apvijų užimtų mažesnę tūrį, paprastai strypo skerspjūvis da-



9.28 pav. Srovės matavimo transformatoriaus schemas



9.29 pav. Srovės matavimo replės ir jų magnetinė grandinė



9.30 pav. Keleto prietaisų jungimo prie matavimo transformatorių schema

romas daugiakampio formos. Didelės galios transformatoriams tarp magnetolaidžio plokštelių paliekami aušinimo kanalai. Lakštų sandūrų oro tarpai mažinami, specialiai perstumiant jungo lakštus strypo lakštų atžvilgiu.

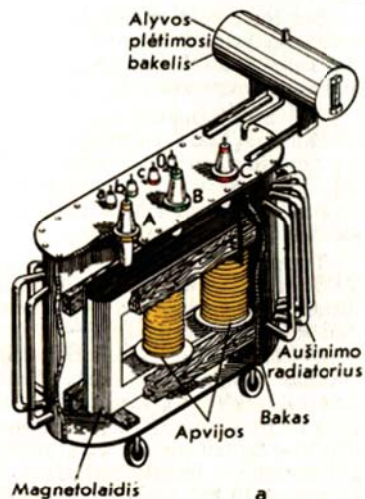
Apvijos paprastai esti cilindrinės. Joms naudojami **izoliuoti vario ar aliuminio laidai** skritulio ar stačiakampio (kai skerspjūvis didesnis nei  $8-10 \text{ mm}^2$ ) formos skerspjūvio (žr. 9.31 pav., d). Dažniausiai prie pat strypo per visą jo ilgį išdėstoma žemesniosios įtampos apvija, nes ją lengviau izoliuoti nuo strypo. Ant jos taip pat per visą strypo ilgį talpinama aukštesniosios įtampos apvija, kurioje gedimai dažniau pasitaiko, todėl ją lengviau remontuoti, kai ji išorėje. Kadangi abi apvijos yra arti viena kitos, gaunamas mažesnis sklaidos magnetinis srautas. Abi apvijos vyniojamos ta pačia kryptimi, o jų pradžios ir galai išvedami per izoliatorius. Nuo šerdies ir tarpusavyje apvijos rūpestingai izoliuojamos. Jei reikia, tarp apvijų daromi aušinimo kanalai.

Kad būtų galima šiek tiek ( $\pm 5\%$ ) reguliuoti įtampą, kai kurių transformatorių apvijos yra gaminamos su atšakomis. Jos specialiais įtaisais gali būti perjungiamos neatjungus apkrovos, kas labai patogu eksploatuojant.

Veikiančiame transformatoriuje susidaro energijos nuostoliai, magnetolaidis ir apvijos šyla. Apytiksliai laikoma, kad transformatoriaus tūris ir nuostolių vardinė galia yra tiesiog proporcingi. Antra vertus, aušinimo sąlygos yra tuo geresnės, kuo didesnis aušinamas plotas. Kuo didesnė transformatoriaus galia, tuo didesni jo nuostoliai, o paviršiaus ploto ir tūrio santykis tuo mažesnis (plotas yra proporcingas linijinių matmenų kvadratui, o tūris – kubui). Dėl to didelės galios transformatorių aušinimo sąlygos yra blogesnės.

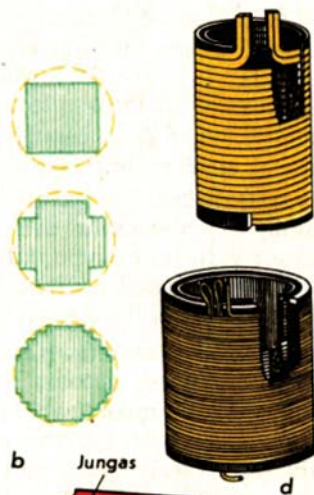
Transformatoriai gali būti aušinami oru arba alyva. Oru aušinami visi nedidelės galios (iki  $20 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ) ir nedidelės įtampos ( $6-10 \text{ kV}$ ) transformatoriai. Dauguma galingesnių trifazio transformatorių yra talpinama į baką su transformatorine mineraline alyva. Bako paviršius padidinamas briaunomis arba aplink visą baką išdėstomi siauri vamzdeliai – radiatoriai. Alyva cirkuliuoja bako, konvekcijos būdu aušindama apvijas ir vamzdeliuose šilumą atiduodama aplinkai. Be to, alyva yra geresnis izoliatorius nei oras, todėl alyviniuose transformatoriuose apvijos gali būti arčiau magnetolaidžio. Labai galingų transformatorių ( $S_N \geq 90 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ) alyvos cirkuliacija yra priverstinė, o radiatoriai apipučiami oru.

Alyvinių transformatorių eksploatacija sudėtinga, alyva yra degi, jos garų ir oro mišinys – sproguos. Dėl to gaisrui ar sprogimui pavojingose patalpose, cechuose, gyvenamose patalpose ar įstaigose reikia naudoti oru aušinamus transformatorius. Tokie gaminami iki  $2500 \text{ kV} \cdot \text{A}$  galios ir  $15 \text{ kV}$  įtampos.



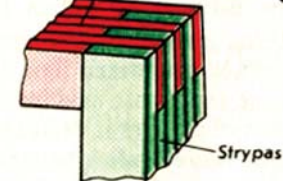
Magnetolaidis

a



b

d



c

9.31 pav. Trifazio transformatoriaus: sandara (a), kai dalis apvijų nuimta, magnetolaidžio strypo skerspjūvis (b), lakštų surinkimo schema (c), pirminė ir antrinė cilindrinės koaksialiosios apvijos (d)

Eksploatuojant svarbu žinoti, kokį laiką ir kiek galima perkrauti transformatorių (9.32 pav.). Nors perkrovus apvijose gaunami didesni elektriniai nuostoliai (proporcingi  $\beta^2$ ), bet dėl didelės transformatoriaus masės jo temperatūra kyla iš lėto.

Kai transformatoriaus galia yra labai didelė (šimtai MV·A), plokštumoje esančių strypų magnetolaidis netenka savo privalumų, nes transformatoriaus konstrukcija, aušinimo ir transportavimo sąlygos tampa labai sudėtingos. Tokiu atveju naudojami grupiniai transformatoriai, kuriuos sudaro trys atskiruose bakuose alyva aušinami vienfaziai transformatoriai.

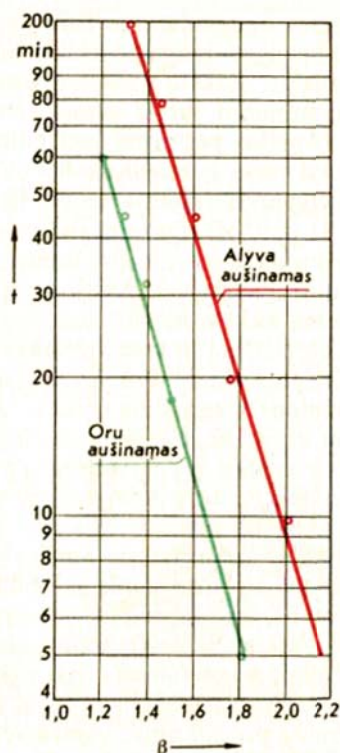
Transformatorių tipai žymimi rusiško alfabeto raidėmis ir skaičiais. Raidės nusako fazių skaičių ir aušinimo būdą: *A* – autotransformatorius, *O* – vienfazis, *T* – trifazis, *M* – aušinamas alyva, *H* – su įtampos reguliatoriumi, *И* – aušinamas alyva ir apiučiamas oru, *МИ* – priverstinė alyvos cirkuliacija, *C* – aušinamas oru, *СИ* – aušinamas ir apiučiamas oru. Skaičiai: trupmenos skaitiklis – vardinė galia (kV·A), vardiklis – aukštesniosios įtampos apvijos įtampa (kV); paskutinis skaičius yra konstravimo metai. Pavyzdžiui, *ТМН-630/10-73*: trifazis alyva aušinamas transformatorius su įtampos reguliatoriumi, transformatoriaus galia – 630 kV·A, aukštesnioji įtampa – 10 kV, sukonstruotas 1973 m.

**9.6.2. Vienfaziai transformatoriai. Jų magnetolaidis renkamas iš plieno lakštų, kurių konfiguracija gali būti labai įvairi „П“ (pi) ar „E“ formos su jungu, dvigubos „П“ ir dvigubos „E“ ar kitokių formų (9.33 pav.). Surenkant magnetolaidį, ypač daug dėmesio kreipiamas į tai, kad būtų kuo mažesni sandūrų oro tarpai.**

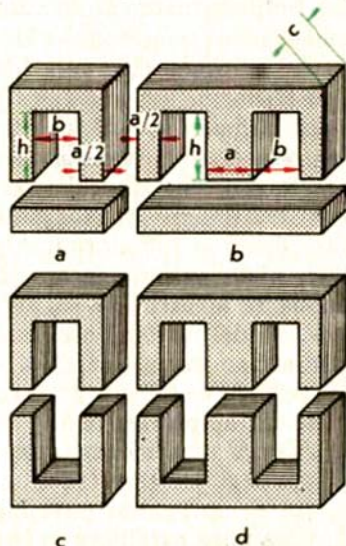
Vienfazių transformatorių apvijos gali būti užmautos ant šoninių strypų atskirai arba viena ant kitos. Apvijos gali būti ant vidurinio strypo, kur jos geriau apsaugotos mechanškai, bet blogiau aušinamos (9.34 pav.).

Mažos galios vienfaziai transformatoriai labai plačiai naudojami elektroninės, radijo, medicinos aparatos maitinimo blokuose, automatikos įrenginiuose, taip pat tais atvejais, kai įtampa turi būti pažeminta darbo saugos sumetimais. Kadangi apkrova paprastai yra aktyvioji, šių transformatorių vardinė galia gali būti nurodyta vatais (paprastai esti ne didesnė už ketetą šimtų vatų).

Mažos galios transformatoriams būdinga tai, kad jų magnetinės grandinės ilgis palyginti mažas. Dėl to lakštų išilginėse sandūrose susidarę oro tarpai labai padidina magnetinę varžą. Nors ir taikomos įvairios priemonės jiems sumažinti, mažos galios transformatorių tuščiosios eigos srovės gali sudaryti net 50% pirminės vardinės srovės. Tuščiosios eigos srovė susilpninama, surenkant magnetolaidį iš žiedinių lakštų arba susukant iš elektrotechninio plieno juostos (9.35 pav.). Kadangi tokio transformatoriaus apvijoms suvynioti reikia specialių staklių, dažniausiai magnetolaidis yra perpjaunamas ir, užmovus apviją, vėl suspaudžiamas, prieš tai nušlifavus sandūros paviršių.



9.32 pav. Transformatoriaus leistinoji perkrovimo trukmė priklauso nuo apkrovos koeficiento  $\beta$



9.33 pav. Vienfazių transformatorių magnetolaidžio formos

Kadangi apvijos užima nedidelį tūrį, o atstumai tarp jų yra maži, mažos galios transformatoriai turi labai silpnus sklaidos srautus. Jų trumpojo jungimo varžos  $R_k \gg X_k$ , todėl induktyviosios galima nepaisyti:  $Z_k \approx R_k$ .

Labai dažnai naudojami daugelio apvijų mažos galios transformatoriai su keliomis antrinėmis apvijomis. Jiems būdinga tai, kad vienos antrinės apvijos apkrovimas turi įtakos kitos antrinės apvijos įtampai. Kai antrinės grandinės gali turėti elektrinį ryšį, naudojama viena antrinė apvija su skirtingo vijų skaičiaus atšakomis skirtingoms antrinėms įtampoms gauti (9.36 pav.).

## Kontroliniai klausimai ir užduotys

9.1. Paaiškinkite, kas tai yra:

- energetinė sistema;
- jėgos, specialūs transformatoriai;
- žeminimo, aukštinimo transformatoriai;
- idealus, realus transformatorius;
- redukuotasis transformatorius;
- autotransformatorius.

9.2. Dėl ko jėgos transformatoriai naudojami energetikoje ir pramonėje?

9.3. Nubraižykite vienfazio transformatoriaus sandarą. Aiškinami veikimo principą, sužymėkite sutartines elektrinių dydžių ir magnetinio srauto kryptis. Kaip perduodama energija iš pirminės į antrinę apviją?

9.4. Užrašykite transformatoriaus magnetinį srautą ir pirminę bei antrinę EVJ:  $a$  – sinusinėmis funkcijomis;  $b$  – kompleksiniais dydžiais. Kaip apskaičiuoti EVJ efektines vertes?

9.5. Parašykite transformatoriaus magnetovaros jėgų lygtį, paaiškinkite jos fizinę prasmę ir pavaizduokite ją grafiškai. Kodėl galima laikyti, kad magnetinis srautas pastovus?

9.6. Parašykite transformatoriaus pirminei ir antrinei grandinei lygtis pagal II Kirchhofo dėsnį. Paaiškinkite jų fizinę prasmę.

9.7. Nubraižykite realaus transformatoriaus vektorinę diagramą. Ar didelis fazių skirtumas tarp pirminės ir antrinės įtamos? Kodėl jis atsiranda?

9.8. Kaip atliekami transformatoriaus tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo bandymai? Kokie parametrai nustatomi jų metu?

9.9. Kokie svarbiausieji transformatoriaus pasodo duomenys? Paaiškinkite, kokias transformatoriaus savybes jie nurodo?

9.10. Kokia funkcija yra transformatoriaus išorinė charakteristika? Pavaizduokite ją grafiškai ir paaiškinkite.

9.11. Ar priklauso transformatoriaus naudingumo koeficientas nuo apkrovos? Kaip ir kodėl?

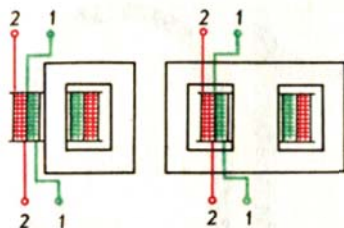
9.12. Kokia trifazis transformatoriaus sandara? Kodėl jis ekonomiškesnis už vienfazį? Kaip jungiamos jo apvijos?

9.13. Kokia autotransformatoriaus, laboratorinio autotransformatoriaus sandara? Koks veikimo principas? Kokie privalumai ir trūkumai?

9.14. Kuo ypatingi suvirinimo transformatoriai? Kokia jų išorinė charakteristika? Kodėl?

9.15. Kaip jungiami ir kokių režimų veikia srovės ir įtamos matavimo transformatoriai? Ką nurodo jų tikslumo klasė?

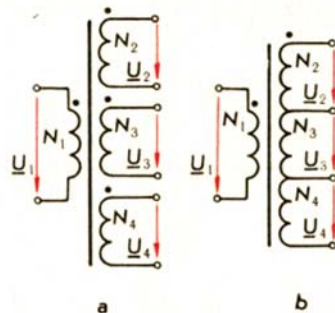
9.16. Kas daroma transformatoriaus apvijų aušinimui gerinti? Ar galima transformatorių perkrauti?



9.34 pav. Vienfazio transformatoriaus sandara:  $a$  – strypinio ir  $b$  – gaubtinio; 1 – žemesniosios įtamos apvija, 2 – aukštesniosios įtamos apvija



9.35 pav. Mažos galios transformatoriaus vyniotas magnetolaidis:  $a$  – ištisinis,  $b$  – perpjautas,  $c$  – sudarytas iš dviejų perpjautų



9.36 pav. Mažos galios daugelio apvijų (a) ir su antrinės apvijos atšakomis (b) transformatoriaus schemas