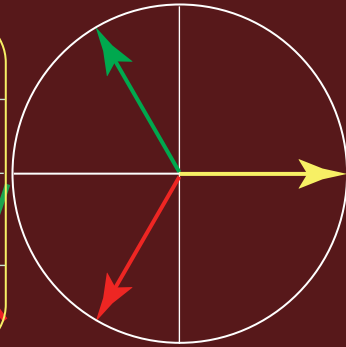
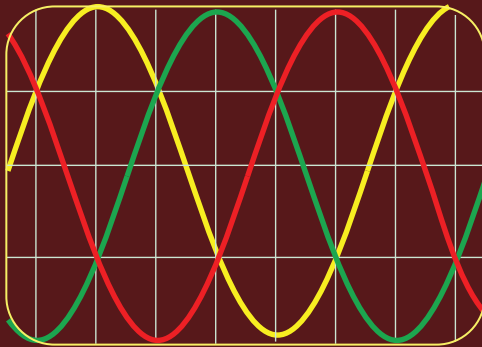


S.Masiokas

Elektro technika



3



VADOVĒLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

Kintamosios
srovės
trifazės
grandinės

3.1. Trifazių grandinių savybės. Šaltiniai ir imtuvai 96

- 3.1.1. Trifazė sistema ir jos privalumai / 96
 - 3.1.2. Trifazės EVJ sistemos gavimas ir vaizdavimas / 96
 - 3.1.3. Generatoriaus apvijos ir imtuvų jungimo būdai / 97
 - 3.1.4. Fazinės bei linijinės įtampos ir srovės / 98
-

3.2. Žvaigžde sujungtų imtuvų grandinės 100

- 3.2.1. Simetrinis imtuvas / 101
 - 3.2.2. Nesimetrinis imtuvas / 102
 - 3.2.3. Neutraliojo laido paskirtis / 103
-

3.3. Trikampiu sujungtų imtuvų grandinės 105

- 3.3.1. Simetrinis imtuvas / 105
 - 3.3.2. Nesimetrinis imtuvas / 106
-

3.4. Trifazių grandinių galia 106

- 3.4.1. Simetrinis imtuvas / 106
 - 3.4.2. Nesimetrinis imtuvas / 108
 - 3.4.3. Galios koeficientas / 109
-

Kontroliniai klausimai ir užduotys 110

3.1

Trifazių grandinių savybės. Šaltiniai ir imtuvai

3.1.1. Trifazė sistema ir jos privalumai. Be vienfazių grandinių, kuriose veikia vienas ar keli atskiri EVJ šaltiniai, gali būti ir daugiafazės. **Daugiafazė grandinė yra tokia, kurios šakose yra keletas vienodo dažnio, bet skirtingų fazių EVJ, sukurtų viename generatoriuje. Kiekviena šaka, kuria teka viena iš daugiafazės grandinės srovių, vadinama faze.** Tai yra antroji elektrotechnikoje dažnai vartojamos sąvokos „fazė“ prasmė. Pirmoji, kaip jau buvo minėta, reiškia sinusinio dydžio argumentą – kampą.

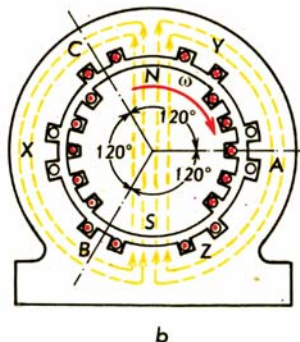
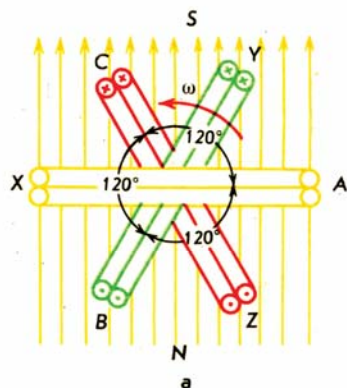
Priklausomai nuo fazių skaičiaus gali būti dvifazės, trifazės, šešiafazės ir kitokios daugiafazės grandinės. Energetikoje ir pramonėje plačiausiai taikoma **simetrinė trifazė EVJ sistema. Tai tokia sistema, kurią sudaro trys sinusinės 50 Hz (arba kitokio) dažnio vienodų amplitudžių EVJ, kurios skiriasi $2\pi/3$ (120°) faze.**

Trifazę grandinę sudaro: 1) trifazis EVJ šaltinis (generatorius); 2) elektros energijos tiekimo linija; 3) imtuvai, kurie gali būti vienfaziai (kaitinamosios lempos, vieno šildymo elemento krosnys, vienfaziai varikliai) ar trifaziai (trijų šildymo elementų krosnys, trifaziai varikliai ir pan.).

Lyginant su vienfazėmis, trifazių elektrinių grandinių **privalumai** yra tokie: **a) trifaziai varikliai ekonomiškėsi ir patikimesni; b) elektros energijos tiekimo linijoms suvartojama mažiau spalvotųjų metalų (vario, aliuminio); c) trifaziai generatoriai ir transformatoriai yra ekonomiškėsi; d) prie trifazio tinklo galima jungti dviejų skirtingų vardinių įtampų imtuvus.**

3.1.2. Trifazės EVJ sistemos gavimas ir vaizdavimas. Vieną sinusinę EVJ gavame, sukdamė laidininkų rėmelį vienalyčiame magnetiniame lauke (žr. 2.1.1). Kai rėmeliai yra išdėstomi vienas kito atžvilgiu tam tikru kampu, juose indukuojamos EVJ, kurios skiriasi faze.

Trifazei EVJ sistemai gauti tris vienodus rėmelius (rites) išdėstome taip, kad jų plokštumos (kartu ir ašys) sudarytų 120° kampus (3.1 pav., a). Rėmelių pradžias pažymime A, B, C, o pabaigas – X, Y, Z. Sukant juos vienalyčiame magnetiniame lauke pastoviu kampiniu greičiu ω , juose indukuojamos sinusinės EVJ, kurių fazė skiriasi 120° . Tarkime, kad rėmelyje A–X indukuotos EVJ pra-



3.1 pav. Trifazių EVJ gavimas: a – sukamuosė rėmeliuose; b – generatoriuje

dinė fazė lygi nuliui. Rėmelyje $B-Y$ indukuotos EVJ pradinė fazė yra $minus\ 120^\circ$, o rėmelyje $C-Z$ – $minus\ 240^\circ$. Kitaip tariant, e_B ir e_C atsilieka nuo e_A 120° ir 240° fazėmis. Indukuotų EVJ kryptys pažymėtos remiantis dešinioios rankos taisykle (žr. 10.1.3).

Praktikoje trifazė EVJ sistema gaunama sinchroniuose generatoriuose (plačiau žr. 12.1.1). Trys apvijos ritės yra sudėtos į statorių ir nejuda, o sukamas rotorius – nuolatinės srovės elektromagnetas (3.1 pav., b).

Simetrines trifazes EVJ galima užrašyti: laiko funkcijomis –

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin (\omega t - 2\pi/3);$$

$$e_C = E_m \sin (\omega t - 4\pi/3); \quad (3.1)$$

kompleksiniais dydžiais –

$$\underline{E}_A = E e^{j0^\circ}; \quad \underline{E}_B = E e^{-j120^\circ}; \quad \underline{E}_C = E e^{-j240^\circ}. \quad (3.2)$$

Jos grafiškai atvaizduotos 3.2 pav.

Svarbiausia simetrinės trifazės EVJ sistemos savybė yra ta, kad kiekvienu laiko momentu EVJ suma lygi nuliui:

$$e_A + e_B + e_C = 0 \quad \text{arba} \quad \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0. \quad (3.3)$$

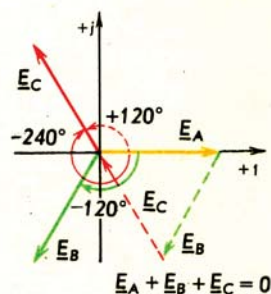
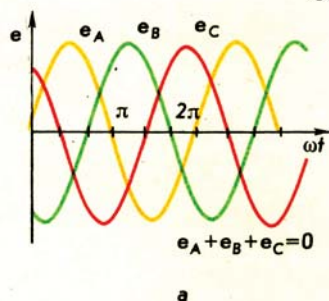
Laikoma, kad sutartinė EVJ kryptis yra iš apvijos pabaigos į pradžią. Generatoriaus apvija elektrinėse schemose vaizduojama kaip trys ritės su EVJ arba kaip trys vienfaziai EVJ šaltiniai (3.3 pav.).

3.1.3. Generatoriaus apvijos ir imtuvų jungimo būdai.

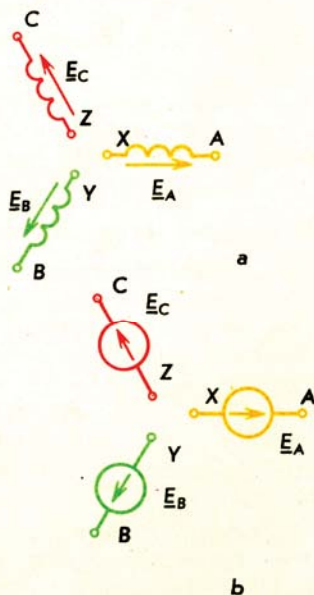
Prijungus prie kiekvienos šaltinio fazės imtuvą, gaunama trifazė šešialaidė grandinė (3.4 pav., a). Tokia grandinė yra analogiška trimis vienfazėms grandinėms, ir jokių esminių privalumų ji neturi.

Sujungus generatoriaus apvijos galus X, Y, Z į vieną mazgą N , kuris vadinamas **neutraliuoju**, trys vienfaziai šaltiniai įgyja bendrą potencialą. Analogiškai sujungus ir imtuvus, šešialaidę grandinę galima pakeisti keturlaide (3.4 pav., b).

Laidai, jungiantys šaltinio fazių pradžias su imtuvais, yra vadinami **linijiniais laidais**. Laidas, jungiantis šaltinio fazių ir imtuvų neutraliuosius mazgus, vadinamas **neutraliuoju laidu**. Taip sujungta šaltinio apvija arba imtuvai vadinami sujungtais žvaigžde su neutraliuoju laidu. Tokio jungimo būdo sutartinis ženklas – \star . Atskiru atveju, kai neutraliuoju laidu srovė neteka, jis nebereikalingas, ir grandinė tampa trilaide (3.4 pav., c). Taip sujungta šal-



3.2 pav. Simetrinių EVJ sinusoidės (a) ir vektorinė diagrama kompleksinėje plokštumoje (b)



3.3 pav. Trifazio generatoriaus apvijos vaizdavimo būdai

tinio apvija arba imtuvai yra vadinami sujungtais žvaigžde be neutraliojo laido. Toks sujungimo būdas žymimas ženklų Υ .

Šešialaidę grandinę galima paversti trilaide ir kitaip (3.5 pav.). Taip sujungta generatoriaus apvija arba imtuvai vadinami sujungtais trikampiū ir žymimi ženklų Δ . Gali būti generatoriaus apvija sujungta Υ , o imtuvai Δ , arba atvirkščiai.

Trikampiū sujungta generatoriaus apvija sudaro uždarą kontūrą $ABCA$. Kai generatorius simetrinis (jo apvijos fazės yra vienodos), šio kontūro suminė EVJ kiekvienu laiko momentu lygi nuliui, nes $\underline{E} = \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C = 0$. Atjungus imtuvus, generatoriaus fazėmis srovė neteka. Praktikoje generatoriaus fazių (vidinė) varža yra labai maža, todėl, esant nors ir nežymiai EVJ asimetrijai, šiuo kontūru teka gana stipri srovė net ir generatoriaus tuščiosios eigos metu. Dėl šios priežasties, taip pat ir dėl to, kad trifazė keturlaidė grandinė yra universalesnė, generatorių apvijos dažniau jungiamos žvaigžde su neutraliuoju laidu nei trikampiū.

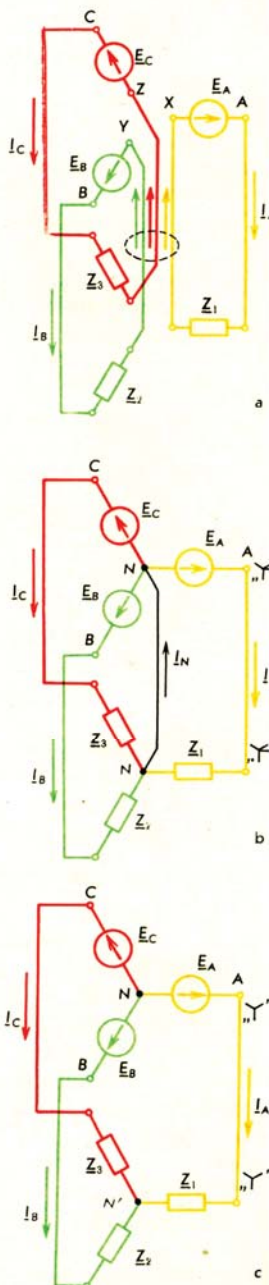
Imtuvai į tą patį tinklą gali būti jungiami žvaigžde su neutraliuoju laidu ar be jo arba trikampiū priklausomai nuo to, kokia yra jų vardinė įtampa. Vienfaziai imtuvai jungiami tarp linijinio laido ir neutraliojo arba tarp dviejų linijinių laidų. Tiriant trifazės grandines, vienu trifaziū imtuvu galima laikyti tris vienfazius imtuvus ar jų grupes, sujungtus taip, kad yra gaunamos trys imtuvų fazės.

Trifaziai imtuvai gali būti simetriniai, kai jų visos trys fazės elektrotechniniu požiūriu yra vienodos, ir nesimetriniai. Pastarieji sutinkami rečiau ir dažniausiai dėl to, kad atskirose fazėse vienfaziai imtuvai yra nevienodi arba skirtingas jų skaičius.

3.1.4. Fazinės bei linijinės įtampos ir srovės. Fazinė įtampa (U_f) vadinama kiekvienos šaltinio arba imtuvo fazės įtampa. Sutarta teigiama šaltinio fazinės įtampos U_f kryptimi laikyti jos kryptį iš fazės pradžios (A, B, C) į pabaigą (X, Y, Z).

Kai generatorius sujungtas žvaigžde, fazinės įtampos yra tarp kiekvienos generatoriaus fazės pradžios ir neutraliojo mazgo arba tarp linijinio laido ir neutraliojo – $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ (3.6 pav., a ir c).

Linijinė (U_l) vadinama įtampa tarp dviejų šaltinio fazių pradžių. Praktiškai linijinės įtampos yra tarp dviejų linijinių laidų. Jų sutartinės teigiamas kryptis nurodo jų indeksai: $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$. Nesunku pastebėti, kad trikampiū sujungto generatoriaus linijinė įtampa yra lygi fazinei (žr.



3.4 pav. Trifazė grandinė: a – šešialaidė; b – keturlaidė ir c – trilaide, kai generatoriaus apvija ir imtuvai sujungti žvaigžde

3.6 pav., b). Sujungus imtuvą trikampiu, kiekviena jo fazė prijungiama prie trifazio tinklo linijinės įtampos (žr. 3.6 pav., d).

Fazine vadinama srovė (I_f), tekanti kiekviena šaltinio arba imtuvo faze. Fazinės srovės sutartinė teigiama kryptis yra tokia pat kaip tos fazės šaltinio EVJ arba imtuvo fazinės įtampos. Kai šaltinio apvija arba imtuvai sujungti žvaigžde, fazinės srovės yra \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C , kai trikampiu – \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA} .

Linijinėmis vadinamos srovės (I_l), tekančios linijiniais laidais – \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C . Jų sutartinės teigiamos kryptys – iš šaltinio į imtuvą. Kai šaltinio apvija arba imtuvai sujungti žvaigžde, šaltinio fazėmis arba imtuvais tekančios fazinės srovės yra lygios linijinėms srovėms.

Neutraliuoju laidu tekančios srovės \underline{I}_N sutartinė teigiama kryptis – iš imtuvo į šaltinio neutralųjį mazgą.

Trifazio tinklo fazinių ir linijinių įtampų sąryšiai gauti pasinaudosime 3.6 pav., a. Nepaisydami generatoriaus vidinės varžos galime parašyti, kad jo fazių įtampos yra lygios EVJ:

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A; \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C. \quad (3.4)$$

Simetrinio generatoriaus $E_A = E_B = E_C$, todėl $U_A = U_B = U_C = U_f$. Iš (3.2) ir (3.4) lygybių:

$$\underline{U}_A = U_f e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_B = U_f e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_C = U_f e^{-j240^\circ}. \quad (3.5)$$

Simetrinio trifazio tinklo fazinių įtampų efektinės vertės yra lygios, bet įtampų fazės skiriasi 120° .

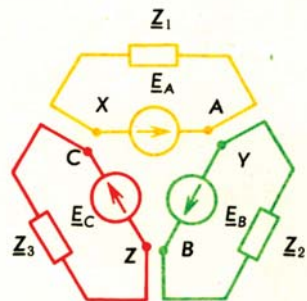
Linijines įtampas galime apskaičiuoti analiziškai arba grafiškai, pritaikę II Kirchhofo dėsnį (žr. 3.6, a pav.):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B, & \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned} \quad (3.6)$$

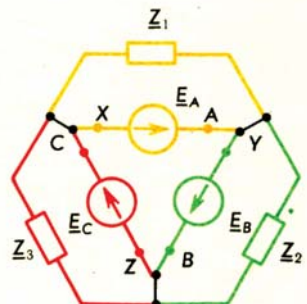
Irašę iš (3.5) lygybių fazinių kompleksinių įtampų vertes bei atlikę veiksmus gauname:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= U_f e^{j0^\circ} - U_f e^{-j120^\circ} = \sqrt{3} U_f e^{j30^\circ}, \\ \underline{U}_{BC} &= U_f e^{-j120^\circ} - U_f e^{-j240^\circ} = \sqrt{3} U_f e^{-j90^\circ}, \\ \underline{U}_{CA} &= U_f e^{-j240^\circ} - U_f e^{j0^\circ} = \sqrt{3} U_f e^{-j210^\circ}. \end{aligned}$$

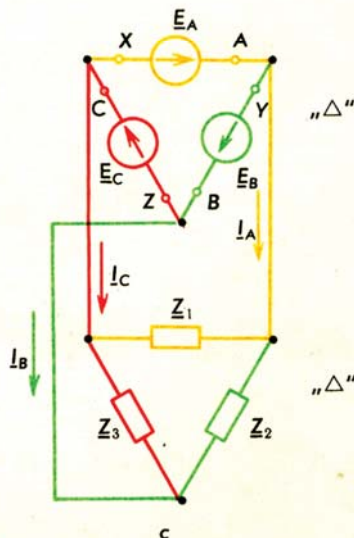
Linijinių įtampų vektorių sudarysime grafiškai (3.7 pav.), vektoriškai atimdami vieną iš kito dviejų fazinių įtampų vektorių (žr. (3.6) lygybes). Tam reikia sujungti fazinių įtampų vektorių viršūnes – taškus A, B, C. Linijinių įtampų vektorių kryptys turi būti tokios, kad būtų teisingos (3.6) vektoriinės lygybės.



a



b



c

3.5 pav. Trifazė grandinė: a – šešių laidų; b ir c – trilaidė, kai generatoriaus apvija ir imtuvai sujungti trikampiu

Kaip matome, linijinių įtampų vektoriai sudaro lygiakraštį trikampį, todėl jų vektorinė suma yra lygi nuliui. Vadinasi, visų trijų linijinių įtampų efektinės vertės yra lygios: $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_l$, ir **linijinės įtampos tarpusavyje skiriasi 120° faze**: \underline{U}_{BC} atilieka nuo \underline{U}_{AB} , o \underline{U}_{CA} – nuo \underline{U}_{BC} .

Grafiškai jas galima vaizduoti trimis lygiais vektoriais, pasuktais prieš laikrodžio rodyklės sukimosi kryptį fazinių įtampų vektorių atžvilgiu 30° kampais: \underline{U}_{AB} pralena \underline{U}_A , \underline{U}_{BC} – \underline{U}_B ir \underline{U}_{CA} – \underline{U}_C .

Ir analiziškai, ir grafiškai gavome, kad

$$U_l = \sqrt{3} U_f. \quad (3.7)$$

Plačiausiai naudojamų žemos įtampos trifazių šaltinių linijinės standartinės vardinės įtampos yra 230, 400 ir 690 V. Prie elektros tinklo prijungus imtuvus, susidaro įtampos kritimas dėl laidų varžos, todėl apkrauto tinklo įtampa yra keletu procentų mažesnė nei šaltinio.

Standartinės vardinės imtuvų įtampos yra atitinkamai 220, 380 ir 660 V. Prie trifazio tinklo imtuvus reikia jungti taip, kad jų įtampa būtų vardinė. Trifazio imtuvo vienai fazei tenka fazinė tinklo įtampa, kai imtuvas prie jo prijungiamas žvaigžde, ir linijinė, kai imtuvas prijungiamas trikampiu (žr. 3.6 pav., c ir d).

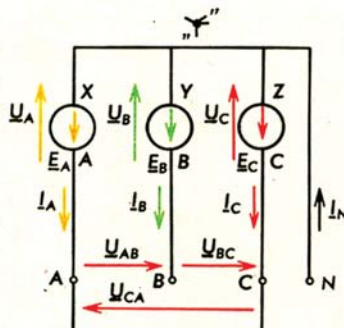
Pas mus Lietuvoje plačiausiai naudojami pramoniniai tinklai, kurių linijinė įtampa yra artima 380 V. Vienfazius imtuvus, pavyzdžiui, kaitinamąsias lempas, kurių vardinė įtampa yra 220 V, prie tokio tinklo reikia jungti tarp linijinio laido ir neutraliojo, kad joms tektų fazinė $380/\sqrt{3} = 220$ V įtampa. Tarp linijinių laidų galima jungti tik tokius vienfazius imtuvus, kurių vardinė įtampa yra 380 V. Trifazį imtuvą prie 380 V tinklo reikia jungti žvaigžde, jei jo vardinė fazinė įtampa yra 220 V, ir trikampiu, jei 380 V.

3.2

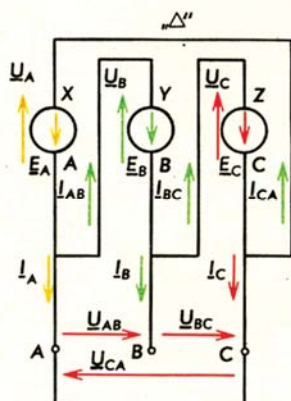
Žvaigžde sujungtų imtuvų grandinės

Trifaziai imtuvai yra jungiami žvaigžde (su neutralioju laidu arba be jo), kai jų fazinė vardinė įtampa yra lygi tinklo fazinei įtampai.

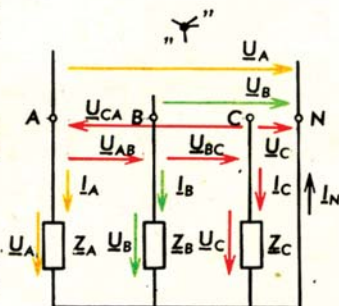
Sujungus imtuvą žvaigžde su neutralioju laidu (žr. 3.6 pav., c), kiekvienai jo fazei tenka tinklo fazinės įtampos \underline{U}_A , \underline{U}_B ir \underline{U}_C . Juo teka fazinės srovės: \underline{I}_A , \underline{I}_B ir \underline{I}_C , kurios tuo pačiu yra ir linijinės.



a



b



c

3.2.1. Simetrinis imtuvas. Jo visos fazės yra vienodos, todėl jų kompleksinės varžos lygios:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}. \quad (3.8)$$

Tarkime, kad imtuvas yra aktyvaus-induktyvaus pobūdžio: $\underline{Z} = Z e^{j\varphi}$. Kompleksines fazines sroves galime apskaičiuoti pagal Omo dėsnį:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}. \quad (3.9)$$

Prisiminę fazinių įtampų (3.5) išraiškas, gauname:

$$\underline{I}_A = U_f e^{j0^\circ} / (Z e^{j\varphi}) = (U_f / Z) e^{-j\varphi},$$

$$\underline{I}_B = U_f e^{-j120^\circ} / (Z e^{j\varphi}) = (U_f / Z) e^{j(-120^\circ - \varphi)},$$

$$\underline{I}_C = U_f e^{-j240^\circ} / (Z e^{j\varphi}) = (U_f / Z) e^{j(-240^\circ - \varphi)}.$$

Gavome, kad visų fazinių srovių moduliai yra lygūs, todėl žvaigžde sujungto simetrinio imtuvo:

$$I_A = I_B = I_C = I_f = I_l = U_f / Z. \quad (3.10)$$

Kiekviena fazinė srovė – $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ – atsilieka faze φ nuo tinklo fazinių įtampų $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ (3.8 pav., a). Kaip matome, $\underline{I}_A, \underline{I}_B$ ir \underline{I}_C kompleksinėje plokštumoje yra trys vienodo ilgio vektoriai, tarp kurių yra 120° kampai.

Pritaikę mažgūi N I Kirchhofo dėsnį neutraliojo laidu srovei apskaičiuoti, iš vektorinės diagramos gauname:

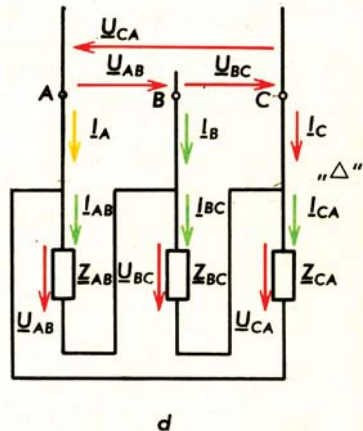
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (3.11)$$

Kitaip tariant, **kiekvieniu laiko momentu fazinių srovių suma yra lygi nuliui, todėl žvaigžde sujungto simetrinio imtuvo neutraliuoju laidu srovė neteka. Simetriniam imtuvui neutralusis laidas nereikalingas, todėl toks imtuvas jungiamas žvaigžde be neutraliojo laidu (3.8 pav., b).**

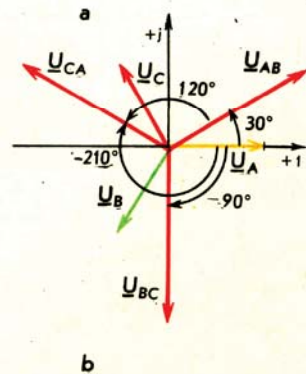
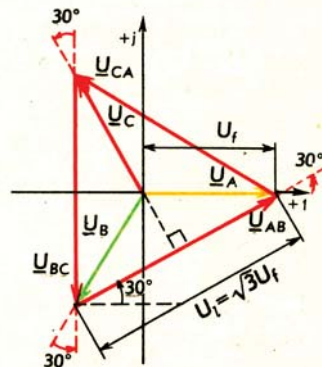
Tokios simetrinės trifazės grandinės privalumas, lyginant su vienfaze, akivaizdus. Į vienfazį tinklą tris šio imtuvo fazes tektų jungti šešiais laidais, kai trifazei grandinei pakanka trijų tokio pat skerspjūvio laidų. Kaip tik dėl to visi **trifaziai imtuvai** (varikliai, kaitinimo krosnys ir kt.) yra **gaminami simetriniai**.

3.1 pavyzdys. Trifazė kaitinimo krosnis sujungta γ ir prijungta prie 380 V trifazio tinklo. Jos fazės varža $R = 6 \Omega$. Apskaičiuokime fazines įtampas bei sroves ir nubraižykime vektorinę diagramą.

Sprendimas. Kiekvienai krosnies fazei tenka fazinė įtampa: $U_f = U_l / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220$ V. Kadangi krosnis yra simetrinis imtuvas, tai $I_A = I_B = I_C = I_f = 220 / 6 = 36,7$ A. Parenkame vektorinės diagramos mastelius: $m_U = 10$ V/mm; $m_I = 2$ A/mm. Kadangi kaitinimo krosnis yra aktyvaus pobūdžio imtuvas, fazinės srovės sutampa faze su įtampomis (3.9 pav.).



3.6 pav. Sutartinės linijinių bei fazinių srovių ir įtampų kryptys



3.7 pav. Trifazio tinklo įtampų vektorinės diagramos

3.2.2. Nesimetrinis imtuvas. Sujungus nesimetrinį imtuvą žvaigžde su neutraliuoju laidu, kiekvienai jo fazei tenka fazinės įtampos \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C .

Tarkime, kad dvi imtuvo fazės yra aktyvaus-induktyvaus, o trečioji aktyvaus-talpinio pobūdžio: $\varphi_A > 0$; $\varphi_B > 0$; $\varphi_C < 0$ (3.10 pav., a). Tokio imtuvo fazių kompleksines varžas galima užrašyti šitaip:

$$\underline{Z}_A = Z_A e^{j\varphi_A}; \underline{Z}_B = Z_B e^{j\varphi_B}; \underline{Z}_C = Z_C e^{j\varphi_C}. \quad (3.12)$$

Fazinės, taip pat ir linijinės, kompleksinės srovės:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{U}_A / \underline{Z}_A = U_f e^{j0^\circ} / (Z_A e^{j\varphi_A}) = (U_f / Z_A) e^{-j\varphi_A}, \\ \underline{I}_B &= \underline{U}_B / \underline{Z}_B = U_f e^{-j120^\circ} / (Z_B e^{j\varphi_B}) = (U_f / Z_B) e^{j(-120^\circ - \varphi_B)}, \\ \underline{I}_C &= \underline{U}_C / \underline{Z}_C = U_f e^{-j240^\circ} / (Z_C e^{j\varphi_C}) = \\ &= (U_f / Z_C) e^{j(-240^\circ - \varphi_C)}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Matome, kad faziųjų srovių efektinės vertės yra atvirkščiai proporcingos imtuvo fazių pilnutinėms varžoms. Srovių fazės priklauso nuo imtuvo varžų pobūdžio: \underline{I}_A ir \underline{I}_B atsilieka faze φ_A ir φ_B nuo įtampų \underline{U}_A ir \underline{U}_B , o \underline{I}_C pralenkia įtampą \underline{U}_C faze φ_C (3.10 pav.).

Neutraliuoju laidu teka srovė

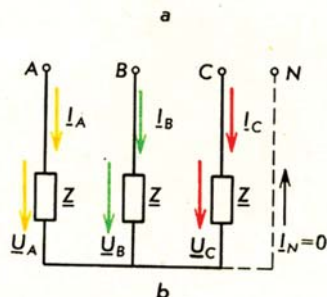
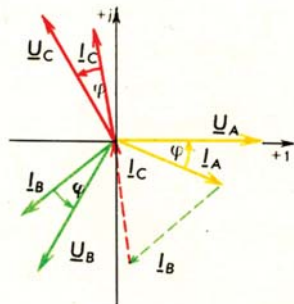
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C, \quad (3.14)$$

kurią galima apskaičiuoti analiziškai arba sudaryti \underline{I}_N vektorių grafiškai (žr. 3.10 pav., b).

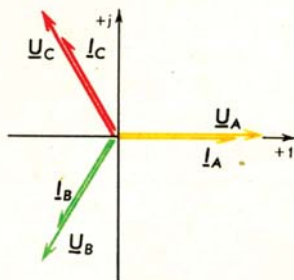
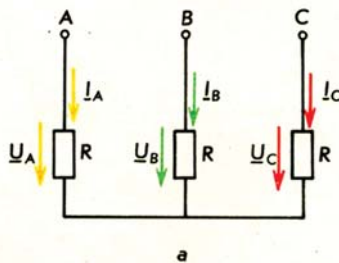
Trifazis nesimetrinis imtuvas susidaro tuo atveju, kai į trifazį tinklą yra jungiami nevienodi vienfaziai imtuvai. Praktiškai visada stengiamasi visų trijų fazių apkrovą suvienodinti ar taip paskirstyti, kad neutraliuoju laidu tekėtų kuo silpnesnė srovė (žr. 3.3 pavyzdį). **Praktiškai neutraliuoju laidu dažniausiai teka srovė, silpnesnė už linijines sroves, todėl neutraliojo laido skerspjūvis parenkamas mažesnis negu keturlaidės grandinės linijinių laidų.**

3.2 pavyzdys. Trys vienfaziai imtuvai sujungti žvaigžde su neutraliuoju laidu (3.11 pav.) ir prijungti prie 380 V trifazio tinklo. Jų varžos: $\underline{Z}_A = 30 + j52 \Omega$; $\underline{Z}_B = R_B = 150 \Omega$; $\underline{Z}_C = 86,6 - j50 \Omega$. Apskaičiuokime grandinės sroves ir nubraižykime vektoriinę diagramą.

Sprendima s. Imtuvo fazėms tenka fazinės įtampos $\underline{U}_A = U_f e^{j0^\circ} = 220 e^{j0^\circ} \text{ V}$; $\underline{U}_B = 220 e^{-j120^\circ} \text{ V}$; $\underline{U}_C = 220 e^{-j240^\circ} \text{ V}$. Imtuvo fazių varžos: $\underline{Z}_A = 30 + j52 = 60 e^{j60^\circ} \Omega$; $\underline{Z}_B = 150 + j0 = 150 e^{j0^\circ} \Omega$; $\underline{Z}_C = 86,6 - j50 = 100 e^{-j30^\circ} \Omega$. Fazinės srovės: $\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A = 220 e^{j0^\circ} / (60 e^{j60^\circ}) = 3,67 e^{-j60^\circ} = 1,84 - j3,18 \text{ (A)}$; $\underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}_B = 220 e^{-j120^\circ} / (150 e^{j0^\circ}) = 1,47 e^{-j120^\circ} = -0,74 - j1,27 \text{ (A)}$; $\underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}_C = 220 e^{-j240^\circ} / (100 e^{-j30^\circ}) = 2,2 e^{-j210^\circ} = -1,905 + j1,1 \text{ (A)}$. Neutraliojo laido sro-



3.8 pav. Žvaigžde sujungto simetrinio imtuvo įtampų ir srovių vektoriinė diagrama (a) ir schema (b)



3.9 pav.

vė: $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$. Irašę fazinių srovių vertes, gauname $\underline{I}_N = -0,8 - j3,35 = 3,4 e^{-j103,60}$ A.

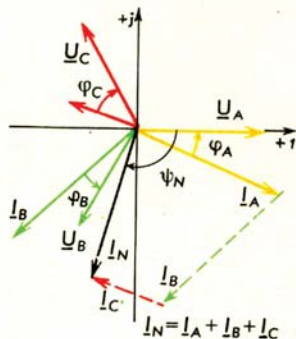
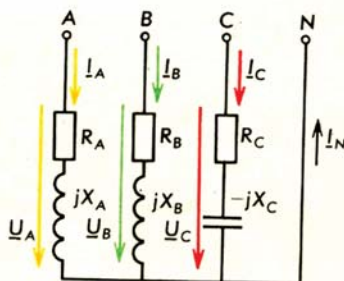
Vektorinei diagramai parenkame mastelius – $m_U = 10$ V/mm, $m_I = 0,1$ A/mm. Nubraižome fazinių įtampų \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C vektorių. Srovės galima braižyti, atidedant jų pradinės fazės ($\psi_A = -60^\circ$; $\psi_B = -120^\circ$; $\psi_C = -210^\circ$) nuo realiosios ašies arba fazių skirtumo kampus kiekvienos įtampos atžvilgiu. \underline{I}_A atsilieka nuo \underline{U}_A fazės $\varphi_A = 60^\circ$, \underline{I}_B sutampa su \underline{U}_B , \underline{I}_C pralenkia įtampą \underline{U}_A fazę $\varphi_C = -30^\circ$. Praktiniams tikslams dažniausiai pakanka apskaičiuoti neutraliojo laido srovės efektingą vertę. Ją labai nesudėtinga rasti iš vektorinės diagramos. Tam reikia išmatuoti \underline{I}_N vektorių ilgį (mm) ir padauginti iš srovės mastelio. Gauname: $I_N \approx 3,4$ A.

3.3 pavyzdys. Žvaigžde su neutraliuoju laidu reikia sujungti tris vienfazius idealius imtuvus. Aktyvūs, kurio varža yra R , sudaro A fazę. Kitas dvi fazes reikia sudaryti iš kondensatoriaus ir ritės, kurių varžos $X_1 = X_2 = R$. Išstirkime, kurioje iš fazių (B ar C) turi būti kondensatorius, o kurioje ritė, kad neutraliojo laido srovė būtų silpnesnė.

Sprendimas. Nubraižome nesimetrinio imtuvo schemą abiem atvejais (3.12 pav., a ir c). Kadangi kiekvienam imtuvui tenka fazinė įtampa, o jų varžų moduliai (pažymėkime juos Z) yra lygūs, tai ir vienu, ir kitu atveju imtuvais tekės srovės, kurių efektingas vertės taip pat lygios: $I_f = I_A = I_B = I_C = U_f/Z$, bet srovių fazės bus kitokios.

Pirmuoju atveju: $\underline{I}_A = \underline{U}_A/R = U_f/(Z e^{j60^\circ})$ (sutampa fazė su \underline{U}_A); $\underline{I}_B = \underline{U}_B/(-jX_1) = (U_f/Z) e^{j(-120^\circ + 90^\circ)} = (U_f/Z) e^{-j30^\circ}$ (pralenkia įtampą \underline{U}_B 90° fazė); $\underline{I}_C = \underline{U}_C/(jX_2) = (U_f/Z) e^{-j330^\circ}$ (atsilieka nuo įtampos \underline{U}_C 90° fazė). Vektorinėje diagramoje (žr. 3.12 pav., b) nubraižome tris vienodo ilgio fazinių įtampų vektorių. Visos fazinės srovės yra taip pat pasirinkto vienodo ilgio vektoriai, bet kiekviena nubraižyta atsižvelgiant į jos fazės kiekvienos fazinės įtampos atžvilgiu. $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ ir yra visų srovių vektorinė suma. Jos modulis gaunamas iš diagramos: $I_N \approx 2,73 I_f$.

Antruoju atveju (sukeitus imtuvus X_1 ir X_2): A fazės srovė yra ta pati; $\underline{I}_B = \underline{U}_B/(jX_2) = (U_f/Z) e^{j(-120^\circ - 90^\circ)} = (U_f/Z) e^{-j210^\circ}$ (atsilieka 90° fazė nuo \underline{U}_B); $\underline{I}_C = \underline{U}_C/(-jX_1) = (U_f/Z) e^{j(-240^\circ + 90^\circ)} = (U_f/Z) e^{-j150^\circ}$ (pralenkia 90° fazė įtampą \underline{U}_C). Vektorinėje diagramoje (3.12 pav., d) fazinės srovės turi būti vienodo ilgio tokio pat kaip pirmuoju atveju ilgio vektoriai, bet \underline{I}_B ir \underline{I}_C yra kitokių fazių. Neutraliojo laido srovė $\underline{I}'_N = \underline{I}'_A + \underline{I}'_B + \underline{I}'_C$. Grafiškai gauname, kad jos modulis $I'_N \approx 0,73 I_f$. Matome, kad antruoju atveju fazinių srovių efektingas vertės yra tokios pat, o neutraliojo laido srovės – sumažėja $2,73/0,73 = 3,74$ karto.



3.10 pav. Nesimetrinio imtuvo schema (a) ir vektorinė diagrama (b)

3.2.3. Neutraliojo laido paskirtis. Neutralusis laidas jungia šaltinio ir imtuvo neutraliuosius mazgus. Kai imtuvas yra simetrinis, neutralusis laidas nereikalingas: juo srovė neteka, neutraliųjų mazgų potencialai yra lygūs.

Kai imtuvas yra nesimetrinis ir neutraliuoju laidu teka srovė, imtuvo neutraliojo mazgo potencialas tampa (jei nepaisome neutraliojo laido varžos) lygus šaltinio neutraliojo mazgo potencialui. Taigi neutraliojo laido dėka kiekvienos imtuvo fazės įtampa lygi tinklo fazinei įtampai.

Nutraukus nesimetrinio imtuvo neutralųjį laidą, tarp imtuvo ir šaltinio neutraliųjų mazgų atsiranda įtampa \underline{U}_N , kurios sutartinė teigiama kryptis yra tokia pat kaip neutraliojo laido srovės, t. y. iš imtuvo į šaltinį (3.13 pav.).

Nepaisydami generatoriaus vidinių varžų (žr. (3.4) lygtis) ir pritaikę magzinės įtampos metodą (žr. 1.6.3), ją galime užrašyti šitaip:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_A \underline{U}_A + \underline{Y}_B \underline{U}_B + \underline{Y}_C \underline{U}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (3.15)$$

čia $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – imtuvo fazių kompleksiniai laidumai, $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ – generatoriaus (tinklo) kompleksinės fazinės įtampos.

Pritaikę II Kirchhofo dėsnį kontūrams $AN'NA, BN'NB$ ir $CN'NC$ (žr. 3.13 pav.), imtuvo fazines įtampas galime užrašyti šitaip:

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \quad \underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_N. \quad (3.16)$$

Patogu $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B$ ir \underline{U}'_C gauti grafiškai. Apskaičiuavus iš (3.15) lygybės kompleksinę \underline{U}_N , jos vektorius nubraižomas vektorinėje diagramoje kartu su tinklo įtampomis $\underline{U}_A, \underline{U}_B$ ir \underline{U}_C . Taškas N yra generatoriaus neutraliojo mazgo potencialo atvaizdas, o N' – imtuvo. Sujungę tašką N' su taškais A, B ir C , kurie yra linijinių laidų potencialų atvaizdai, gauname imtuvo fazinių įtampų $\underline{U}'_A, \underline{U}'_B$ ir \underline{U}'_C vektorius.

Atsijungus neutraliajam laidui, kiekvienai nesimetrinio imtuvo fazei tenka kitokia įtampa, nors tinklo fazinės įtampos išlieka simetriškos. Imtuvo fazinės įtampos gali būti didesnės ar mažesnės už tinklo, taigi ir už vardines imtuvo įtampas. Tokie reiškiniai vyksta keturlaidėje grandinėje, kai dėl oksidacijos ar kitų priežasčių pablogėja neutraliojo laido prijungimo kontaktai arba jis atjungiamas.

Toks režimas imtuvui netinkamas, todėl **nesimetriniam imtuvui neutraliojo laido atjungti negalima**. Kad keturlaidės grandinės neutralusis laidas nebūtų atjungtas, **jame nemontuojami nei jungikliai, nei saugikliai**.

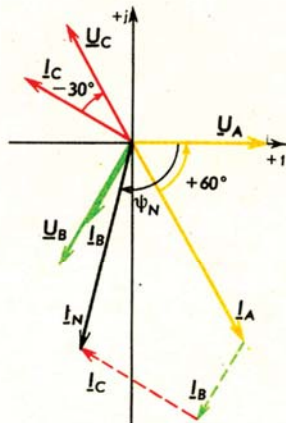
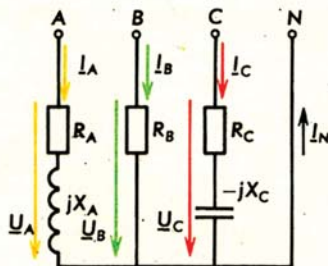
3.4 pavyzdys. Į trijų butų gyvenamąjį namą įvesta keturlaidė trifazė 380 V elektros energijos tiekimo linija. Viename bute įjungtos dvi kaitinamosios lempos po 100 W ir 1000 W laidynė, o kituose dviejuose – tik po dvi 100 W lempos. Visų imtuvų vardinė įtampa 220 V. Apskaičiuokime, kaip pasikeis imtuvų režimas, jei atsijungs įvado neutralusis laidas.

Sprendimas. Visi imtuvai yra aktyvaus pobūdžio (3.14 pav.). Tarkime, kad pirmasis butas prijungtas prie tinklo A fazės. Jo imtuvų galia $P_A = 200 + 1000 = 1200$ W, varža $R_A = U_N^2/P_A = 220^2/1200 = 40,3 \Omega$ ir kompleksinis laidumas $\underline{Y}_A = 1/R_A = 1/40,3 = 2,48 \cdot 10^{-2}$ S. Kitų fazių: $P_B = P_C = 200$ W; $R_B = R_C = 220^2/200 = 242 \Omega$; $\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = 1/R_B = 1/242 = 0,413 \cdot 10^{-2}$ S. Kad būtų patogiau skaičiuoti, tinklo fazines kompleksines įtampas užrašome ir rodikline, ir algebrine forma: $\underline{U}_A = 220$ V, $\underline{U}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190$ (V), $\underline{U}_C = 220e^{j240^\circ} = -110 + j190$ (V).

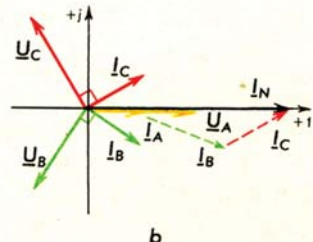
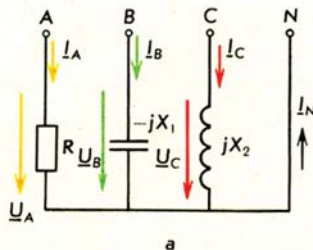
Į (3.15) lygybę įrašę kompleksinių tinklo įtampų bei kompleksinių laidumų vertes ir apskaičiavę gauname $\underline{U}_N = 137 + j0 = 137$ V. Kiekvienos imtuvų fazės įtampas: $\underline{U}'_A = \underline{U}_A - \underline{U}_N = 220 - 137 = 83$ V; $\underline{U}'_B = \underline{U}_B - \underline{U}_N = -110 - j190 - 137 = -247 - j190 = 312e^{-j157,6^\circ}$ V; $\underline{U}'_C = \underline{U}_C - \underline{U}_N = -110 + j190 - 137 = -247 + j190 = 312e^{-j122,4^\circ}$ V.

Matome, kad A fazės imtuvų įtampa $220/83 = 2,65$ karto mažesnė už vardinę, o B ir C fazių – $312/220 = 1,42$ karto didesnė. Toks režimas yra avarinis ir imtuvui neleistinas.

Nesunku įsitikinti, kad tuo atveju, kai visų fazių imtuvai yra aktyvaus pobūdžio (3.15 pav.), keičiant vienos fazės varžą (pvz., R_A), imtu-



3.11 pav.



vo neutraliojo mazgo potencialas vektorinėje diagramoje slenka tos fazės įtampos vektoriaus tiese (\underline{U}_A). Kai $R_A=R_B=R_C$, $U_N=0$, imtuvų neutraliojo taško N' potencialas yra vektorinės diagramos centre. Mažinant R_A (kai $R_B=R_C=\text{const}$), atsiranda \underline{U}_N , taškas N' slenka dešinėn: U'_A mažėja, $U'_B=U'_C$ – didėja. Kai $R_A=0$, $U'_A=0$, $U'_B=U'_C=U_l$. Didinant R_A , taškas N' slenka kairėn: U'_A didėja, $U'_B=U'_C$ – mažėja. Atjungus A fazės imtuvus, $R_A=\infty$: $U'_A=(\sqrt{3}/2)U_l=1,5U_f$; $U'_B=U'_C=U_l/2 \approx 0,87U_f$.

3.3

Trikampių sujungtų imtuvų grandinės

Trifaziai imtuvai jungiami trikampiu (žr. 3.6 pav., *d*), kai jų kiekvienos fazės vardinė įtampa yra lygi tinklo linijinei įtampai.

Kiekviena imtuvo fazė jungiama tarp dviejų linijinių laidų, todėl imtuvo fazinės įtampos yra lygios tinklo linijinėms – \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} . Imtuvo fazėmis teka fazinės srovės \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} , \underline{I}_{CA} , o linijiniais laidais – linijinės \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C .

Kaip žinome, tinklo linijinių įtampų efektinės vertės yra lygios, bet šios įtampos skiriasi 120° faze. Pasirinkę įtampas \underline{U}_{AB} pradinę fazę lygią nuliui, jas galime užrašyti šitaip:

$$\underline{U}_{AB} = U_l e^{j0^\circ}; \quad \underline{U}_{BC} = U_l e^{-j120^\circ}; \quad \underline{U}_{CA} = U_l e^{-j240^\circ}. \quad (3.17)$$

Fazinės srovės apskaičiuojamos, taikant kiekvienai fazei Omo dėsnį:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB}; \quad \underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} / \underline{Z}_{BC}; \quad \underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} / \underline{Z}_{CA}. \quad (3.18)$$

Linijines sroves galima apskaičiuoti, taikant grandinės mazgams A , B , ir C Kirchhofo dėsnį:

$$\begin{aligned} A: \underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \\ B: \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \\ C: \underline{I}_C &= \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

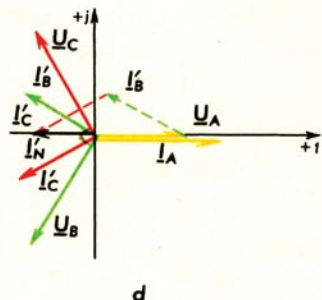
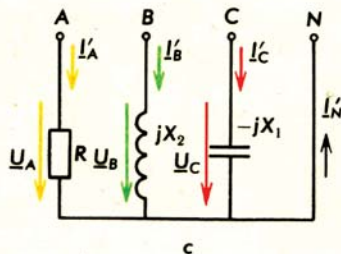
Susumavę kairiąsias ir dešiniąsias (3.19) lygybių puses, gausime:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (3.20)$$

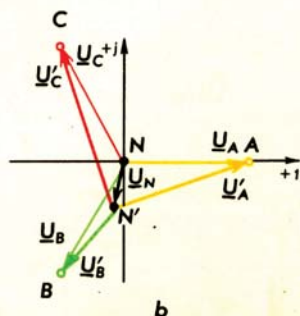
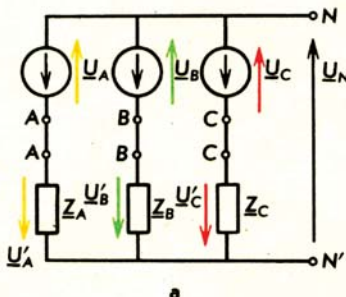
Iš šaltinio į trikampį sujungtą imtuvą teka trys linijinės srovės, kurių momentinių verčių suma kiekvienu laiko momentu yra lygi nuliui.

3.3.1. Simetrinis imtuvas. Jo visos fazės vienodos, todėl ir jų kompleksinės varžos yra lygios:

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z}. \quad (3.21)$$



3.12 pav.



3.13 pav.

Tarkime, kad imtuvas yra aktyvaus-induktyvaus pobūdžio (3.16 pav., a), – $\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$. Iš (3.18) lygybių fazinės srovės:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{AB} &= \underline{U}_{AB} / \underline{Z} = U_1 e^{j0} / (Z e^{j\varphi}) = (U_1 / Z) e^{-j\varphi}, \\ \underline{I}_{BC} &= \underline{U}_{BC} / \underline{Z} = U_1 e^{-j120^\circ} / (Z e^{j\varphi}) = (U_1 / Z) e^{j(-120^\circ - \varphi)}, \\ \underline{I}_{CA} &= \underline{U}_{CA} / \underline{Z} = U_1 e^{-j240^\circ} / (Z e^{j\varphi}) = \\ &= (U_1 / Z) e^{j(-240^\circ - \varphi)}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Trikampiu sujungto simetrinio imtuvo fazinių srovių efektinės vertės yra lygios:

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_f = U_1 / Z, \quad (3.23)$$

o kiekvienos fazinės srovės fazė linijinių įtampų \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} atžvilgiu priklauso nuo imtuvo pobūdžio (3.16 pav., b).

Linijinės srovės galima apskaičiuoti iš (3.19) lygybių analiziškai, bet paprasčiau ir vaizdžiau jų vektorius sudaryti **grafškai**. Sujungę visų fazinių srovių vektorių viršūnes, atliekame grafinius veiksmus su vektoriais, kurie analiziškai užrašyti (3.19) lygybėse, ir gauname linijinių srovių trikampį. Kiekvienos linijinės srovės vektorius kryptis turi būti tokia, kad mazgams A , B ir C būtų teisingos (3.19) lygybės. Nesunku įsitikinti, kad visų simetrinio imtuvo linijinių srovių efektinės vertės yra lygios $I_A = I_B = I_C = I_l$. Iš vektorinės diagramos:

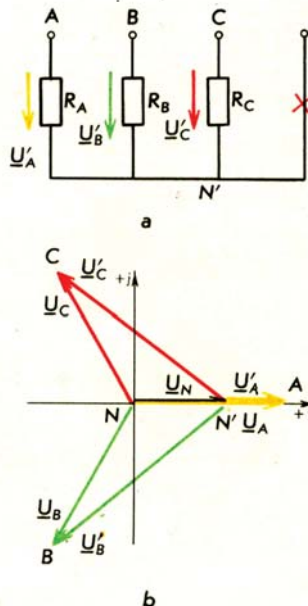
$$I_l = \sqrt{3} I_f. \quad (3.24)$$

Matome, kad linijinių srovių vektorių ilgiai yra lygūs, o jų vektorinė suma lygi nuliui. Tai reiškia, kad simetrinio imtuvo linijinės srovės yra lygios, ir skiriasi 120° fazėmis. Linijinės srovės atsilieka 30° faze nuo fazinių srovių: \underline{I}_A nuo \underline{I}_{AB} , \underline{I}_B nuo \underline{I}_{BC} , \underline{I}_C nuo \underline{I}_{CA} (žr. 3.16 pav., b).

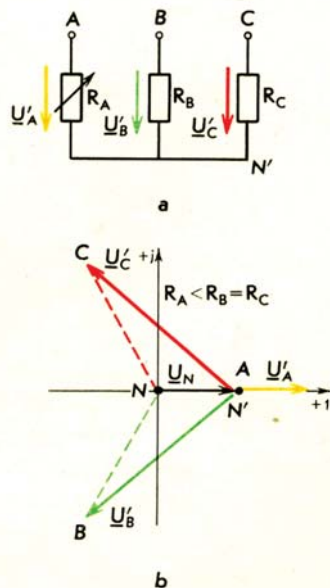
3.5 pavyzdys. Prie 220 V trifazio tinklo prijungtas variklis, kurio kiekvienos fazės vardinė įtampa 220 V, kompleksinė varža $\underline{Z} = 8 + j6 (\Omega)$. Apskaičiuokime variklio fazines ir linijines sroves.

Sprendimas. Kadangi tinklo $U_1 = 220$ V, variklį prie tinklo reikia prijungti, sujungtą Δ (3.17 pav.). $\underline{Z} = 8 + j6 = 10 e^{j36,87^\circ} \Omega$. Iš (3.23): $I_f = U_1 / Z = 220 / 10 = 2,2$ A. Iš (3.24): $I_l = \sqrt{3} I_f = \sqrt{3} \cdot 2,2 = 3,8$ A. Fazinės srovės atsilieka nuo linijinių įtampų $36,87^\circ$ faze, o linijines sroves galima gauti, atlikus (3.19) lygčių veiksmus grafiškai, arba tiesiog nubraižyti atsiliekančias nuo fazinių 30° kampais. Vektorinės diagramos masteliai: $m_U = 10$ V/mm, $m_I = 0,2$ A/mm.

3.3.2. Nesimetrinis imtuvas. Tarkime, kad imtuvo fazinių kompleksinės varžos yra šitokios (3.18 pav.): $\underline{Z}_{AB} =$



3.14 pav.



$= Z_{AB} e^{j\varphi_{AB}}$, $Z_{BC} = Z_{BC} e^{j\varphi_{BC}}$, $Z_{CA} = Z_{CA} e^{j\varphi_{CA}}$ ir $\varphi_{AB} > 0$, o $\varphi_{BC} < 0$ bei $\varphi_{CA} < 0$.

Iš (3.17) ir (3.18) lygybių fazinės srovės:

$$\underline{I}_{AB} = \underline{U}_1 e^{j0} / (Z_{AB} e^{j\varphi_{AB}}) = (U_1 / Z_{AB}) e^{-j\varphi_{AB}},$$

$$\underline{I}_{BC} = U_1 e^{-j120^\circ} / (Z_{BC} e^{j\varphi_{BC}}) = (U_1 / Z_{BC}) e^{j(-120^\circ - \varphi_{BC})},$$

$$\underline{I}_{CA} = U_1 e^{-j240^\circ} / (Z_{CA} e^{j\varphi_{CA}}) = (U_1 / Z_{CA}) e^{j(-240^\circ - \varphi_{CA})}.$$

Kaip matome, kiekviena imtuvo faze teka įvairaus stiprumo fazinė srovė. Jos yra tokių fazių: \underline{I}_{AB} atsilieka nuo \underline{U}_{AB} fazę φ_{AB} ; \underline{I}_{BC} ir \underline{I}_{CA} pralenkia įtampas \underline{U}_{BC} ir \underline{U}_{CA} fazėmis φ_{BC} ir φ_{CA} (žr. 3.18 pav., b).

Sujungę srovių \underline{I}_{AB} , \underline{I}_{BC} ir \underline{I}_{CA} vektorių viršūnes, gauname linijinių srovių \underline{I}_A , \underline{I}_B ir \underline{I}_C vektorius. Matome, kad jų efektinės vertės ir fazės priklauso nuo imtuvo parametų, bet jų momentinių verčių suma kiekvienu laiko momentu lygi nuliui.

Nesimetrinis imtuvas dažniausiai gaunamas tuo atveju, kai įvairūs vienfaziai imtuvai ar jų grupės yra jungiami tarp linijinių laidų. Projektuojant tinklus, stengiamasi imtuvus paskirstyti taip, kad fazių apkrovos būtų kuo vienodesnės. Tuomet visų linijinių srovių efektinės vertės mažai skiriasi, ir linijinių laidų skerspjūvis galima parinkti vienodus.

3.6 pavyzdys. Nesimetrinio imtuvo (3.19 pav.) varžos tokios: $X_L = R_1 = R_2 = 80 \Omega$. Trifazio tinklo įtampa 380 V. Apskaičiuokime: a) fazines ir linijines sroves; b) kiek kartų pasikeis imtuvo fazinių srovių vertės, atsijungus linijiniam A laidui.

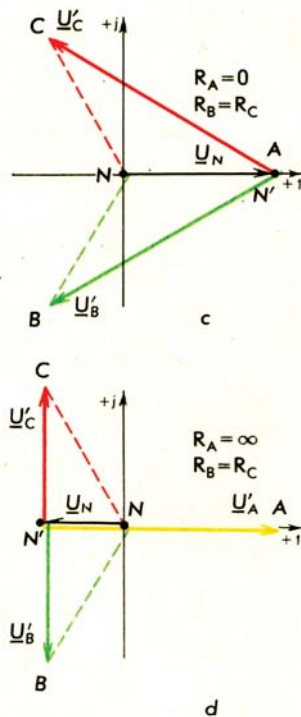
Sprendimas. Imtuvo kompleksinės varžos: $Z_{AB} = 80 e^{j90^\circ} \Omega$; $Z_{BC} = 80 \Omega$; $Z_{CA} = 80 \Omega$. Taikant Omo dėsnį, fazinės srovės: $\underline{I}_{AB} = \underline{U}_{AB} / Z_{AB} = 380 e^{j0^\circ} / (80 e^{j90^\circ}) = 4,75 e^{-j90^\circ} \text{ A}$; $\underline{I}_{BC} = \underline{U}_{BC} / Z_{BC} = 380 e^{-j120^\circ} / 80 = 4,75 e^{-j120^\circ} \text{ A}$; $\underline{I}_{CA} = \underline{U}_{CA} / Z_{CA} = 380 e^{-j240^\circ} / 80 = 4,75 e^{-j240^\circ} \text{ A}$. Linijines sroves gauname pritaikę I Kirchhofo dėsnį (žr. (3.19)) ir grafiškai atlikę veiksmus. Vektorinės diagramos masteliai: $m_U = 20 \text{ V/mm}$; $m_I = 0,2 \text{ A/mm}$. Išmatavę linijinių srovių vektorių ilgį ir padauginę iš mastelio, gauname: $I_A = 9,12 \text{ A}$, $I_B = 1,88 \text{ A}$, $I_C = 8,38 \text{ A}$.

Atsijungus linijiniam laidui C, $I'_{AB} = I_{AB} = U_1 / X_L = 380 / 80 = 4,75 \text{ A}$; $I'_{BC} = I'_{CA} = U_1 / (R_1 + R_2) = 380 / (80 + 80) = 2,38 \text{ A}$. Matome, kad AB fazėje srovė nepakitė, o BC ir CA fazėse – sumažėjo du kartus.

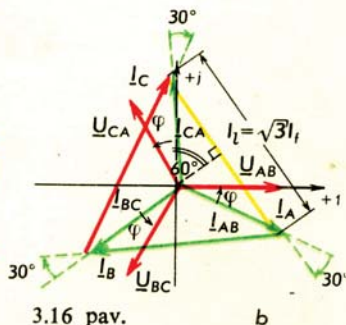
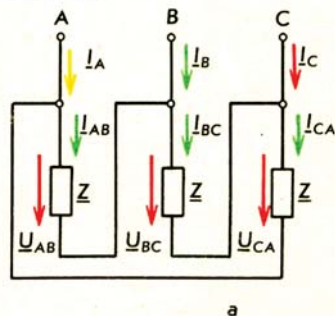
3.4

Trifazių grandinių galia

3.4.1. Simetrinis imtuvas. Nepriklausomai nuo imtuvo sujungimo būdo (Υ ar Δ) kompleksinė imtuvo galia:



3.15 pav.



3.16 pav.

$$\underline{S} = 3\underline{S}_f = 3P_f + j3Q_f; \quad (3.25)$$

čia S_f , P_f ir Q_f – vienos imtuvo fazės pilnutinė, aktyvioji ir reaktyvioji galia.

Irašę fazinius dydžius, gauname

$$\underline{S} = 3U_f I_f \cos \varphi_f + j3U_f I_f \sin \varphi_f; \quad (3.26)$$

čia U_f , I_f , φ_f – imtuvo fazinė įtampa, srovė ir fazių skirtumas tarp jų.

Iš (3.26) galime parašyti:

$$P = 3U_f I_f \cos \varphi_f; \quad Q = 3U_f I_f \sin \varphi_f; \quad S = 3U_f I_f. \quad (3.27)$$

Kai imtuvas sujungtas žvaigžde, $U_f = U_l / \sqrt{3}$; $I_f = I_l$.

Kai imtuvas sujungtas trikampi, $U_f = U_l$, $I_f = I_l / \sqrt{3}$. Įrašę į (3.26) lygybę U_f ir I_f vertes, vienam ir kitam atvejui gauname, kad **kompleksinė imtuvo galia**:

$$\underline{S} = \sqrt{3} U_l I_l \cos \varphi_f + j\sqrt{3} U_l I_l \sin \varphi_f. \quad (3.28)$$

Kadangi energetikoje paprastai nurodomos linijinės įtamos ir srovės, jų indeksai „l“ dažnai nerašomi. Apie tai, kad į \underline{S} išraišką turi būti įrašomi linijiniai dydžiai, galima spręsti iš koeficiento $\sqrt{3}$:

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi; \quad S = \sqrt{3} UI; \quad (3.29)$$

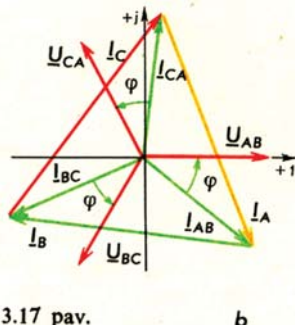
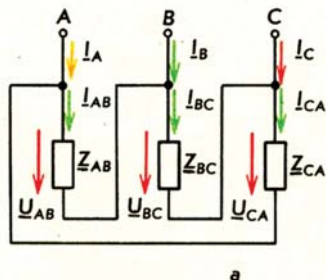
čia φ – imtuvo fazės įtamos ir srovės fazių skirtumas.

3.7 pavyzdys. Trifazė kaitinimo krosnis sujungta trikampi ir prijungta prie trifazio tinklo. Išstikime, kiek kartų pasikeis jos galia, jei prie to paties tinklo ją prijungsime žvaigžde.

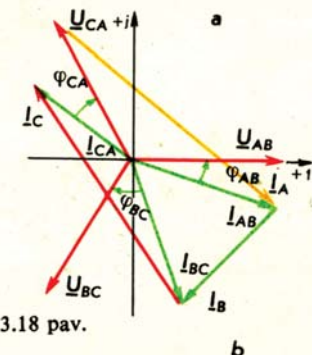
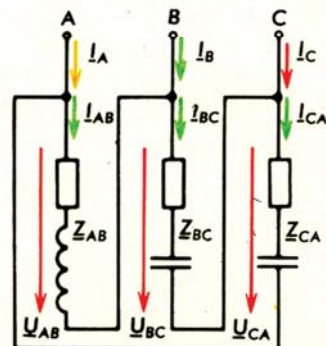
Sprendimas. Krosnis yra aktyvusis imtuvas: $Z=R$, $\cos \varphi=1$, $S=P$. Pagal (3.27) apskaičiuojame krosnies galią: a) sujungtos trikampi – $P_\Delta = 3U_l (U_l/R) = 3U_l^2/R$; b) sujungtos žvaigžde – $P_Y = 3U_f (U_f/R) = 3U_f^2/R = 3U_l^2/3R$. Galių santykis: $P_Y/P_\Delta = (U_f/U_l)^2 = 1/3$. Kaip

Tokio imtuvo galia apskaičiuojama sudedant visų trijų fazių kompleksines galias:

$$\begin{aligned} \underline{S}_\gamma &= \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C = (P_A + P_B + P_C) + \\ &+ j(Q_A + Q_B + Q_C) = P_\gamma + jQ_\gamma \end{aligned}$$



3.17 pav.



3.18 pav.

$$Q_A = U_f I_A \sin \varphi_A, \quad Q_B = U_f I_B \sin \varphi_B, \quad Q_C = U_f I_C \sin \varphi_C,$$

kai imtuvas yra sujungtas Υ ;

$$P_{AB} = U_i I_{AB} \cos \varphi_{AB}, \quad P_{BC} = U_i I_{BC} \cos \varphi_{BC},$$

$$P_{CA} = U_i I_{CA} \cos \varphi_{CA}; \quad Q_{AB} = U_i I_{AB} \sin \varphi_{AB},$$

$$Q_{BC} = U_i I_{BC} \sin \varphi_{BC}, \quad Q_{CA} = U_i I_{CA} \sin \varphi_{CA},$$

kai imtuvas yra sujungtas Δ .

Aktyviosios galios sudedamos aritmetiškai, o reaktyviosios – algebriskai.

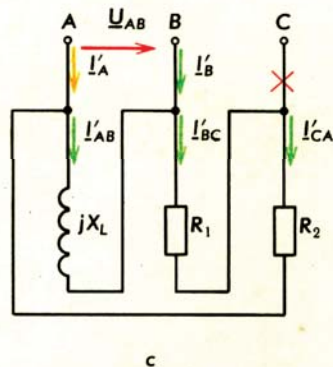
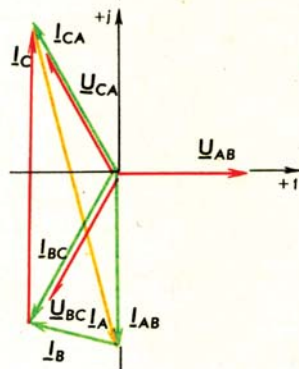
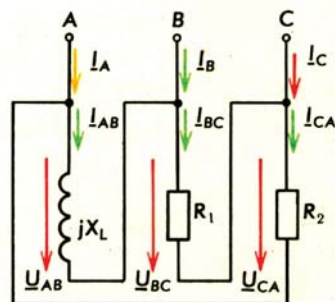
3.4.3. Galios koeficientas. Jis turi didelę ekonominę reikšmę eksploatuojant ne tik vienfazius (žr. 2.6.3), bet ir trifazius elektros tinklus. Kai galios koeficientas ($\cos \varphi$) nepakankamai didelis, tenka didinti linijinių laidų skerspjūvį, šaltinių galią.

Trifazės grandinės elementai – asinchroniniai varikliai, indukcinės kaitinimo krosnys, liuminescencinio apšvietimo įtaisai, taip pat transformatoriai bei oro linijos – yra aktyvaus ($\varphi=0$), ar aktyvaus-induktyvaus pobūdžio imtuvai ($\varphi>0$). Sinchroniniai varikliai, veikiantys specialiu režimu (žr. 12.5.1), kondensatorių baterijos, kabelinės linijos yra aktyvaus-talpinio ar tik talpinio pobūdžio imtuvai, nes jų srovė pralenkia fazę įtampą ($\varphi<0$).

Paprastai trifazių **asinchroninių variklių reaktyvioji galia sudaro 60–70 %**, elektros energijos tiekimo sistemos transformatorių – 15–25 %, oro linijų, indukcinė krosnių, reaktorių, liuminescencinių lempų apšvietimo įrenginių visų kartu – 5–10 % visos reaktyviosios galios.

Kadangi didžiausia yra asinchroninių variklių reaktyvioji galia, o jų pačių $\cos \varphi=0,1-0,90$ (priklausomai nuo jų apkrovos), **grandinės galios koeficientui pagerinti būtina tobulinti technologinį procesą. Reikia, kad asinchroniniai varikliai tuo trumpesnę laiką dirbtų tuščiai ar mažiau apkrauti, o, jei įmanoma, netgi pakeisti mažai apkrautus (iki $0,45 P_N$) mažesnės galios varikliais.**

Dažniausiai šios priemonės yra nepakankamos, ir reaktyviajai energijai kompensuoti yra naudojami sinchroniniai varikliai (kompensatoriai) ir kondensatorių baterijos. Kompensacinių įrenginių parametrus reikia pagrįsti techniniais ekonominiais skaičiavimais. Paprastai palyginti nedidelės kompensuojamosios galios įrenginiais – iki 10 Mvar ($U=10$ kV) – neracionalu naudoti sinchroninius kompensatorius. Jiems naudojamos kondensatorių baterijos, kurių vieno elemento reaktyvioji galia yra 4–10 kvar. Kondensatorių baterijos gali būti individua-



3.19 pav. Trikampio sujungto nesimetrinio imtuvo schema (a) ir vektorinė diagrama (b); c – schema, atsijungus linijiniam C laidui

lios (kiekvienam imtuvui), grupinės (imtuvų grupei) ir centralizuotos. Pastarosios yra įrengiamos įmonės cechų transformatorinėse pastotėse ir yra efektyviausios.

Kontroliniai klausimai ir užduotys

3.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- daugiafazė grandinė, trifazė grandinė ir jos fazė;
- trifazė simetrinė EVJ sistema;
- trifazė šešialaidė, keturlaidė, trilaidė grandinė;
- neutralusis mazgas;
- linijinis laidas, neutralusis laidas;
- fazinė, linijinė įtampa;
- fazinė, linijinė srovė;
- trifazis simetrinis, trifazis nesimetrinis imtuvas.

3.2. Kokie trifazių grandinių privalumai palyginti su vienfazėmis?

3.3. Kaip gaunama trifazė simetrinė EVJ sistema? Nubraižykite brėžinį ir sužymėkite indukuotų EVJ kryptis laidininkuose. Kaip tas kryptis nustatėte ir kaip sudaromas 120° fazių skirtumas tarp EVJ?

3.4. Užrašykite trifazės simetrinės EVJ sinusinėms laiko funkcijomis ir kompleksiniais dydžiais. Pavaizduokite jas grafiškai sinusoidėmis ir vektoriais kompleksinėje plokštumoje.

3.5. Kaip vaizduojama trifazio generatoriaus apvija elektrinėje schemoje? Kokia yra sutartinė teigiama EVJ kryptis?

3.6. Pavaizduokite trifazę šešialaidę grandinę, sužymėkite joje sutartines EVJ ir srovių kryptis. Ar turi tokia grandinė privalumų lyginant ją su trimis vienfazėmis grandinėmis? Kodėl?

3.7. Pavaizduokite trifazę keturlaidę grandinę, sužymėkite joje sutartines EVJ ir srovių kryptis. Ar turi tokia grandinė privalumų lyginant ją su trimis vienfazėmis grandinėmis? Kodėl?

3.8. Pavaizduokite trifazę trilaidę grandinę, sužymėkite joje sutartines EVJ ir srovių kryptis, kai elementai sujungti šitaip: *a* – ir šaltinio apvija, ir imtuvas – žvaigžde; *b* – šaltinio apvija - žvaigžde, o imtuvas – trikampiui; *c* – šaltinio apvija – trikampiui, o imtuvas – žvaigžde; *d* – ir šaltinio apvija, ir imtuvas – trikampiui.

3.9. Pavaizduokite trifazio generatoriaus apvijų schemą. Sužymėkite joje sutartines EVJ, fazinių ir linijinių įtampų kryptis, kai apvija sujungta: *a* – žvaigžde su neutraliuoju laidu; *b* – trikampiui.

3.10. Pavaizduokite trifazio imtuvo schemą. Sužymėkite joje sutartines fazinių bei linijinių įtampų, fazinių bei linijinių srovių ir neutraliojo laido (jei jis yra) srovę, kai imtuvas sujungtas: *a* – žvaigžde su neutraliuoju laidu; *b* – trikampiui.

3.11. Užrašykite simetrinio trifazio tinklo kompleksines fazines įtampas rodikline forma ir pavaizduokite jas vektorinėje diagramoje.

3.12. Pavaizduokite keturlaidės trifazės grandinės schemą, sužymėkite joje sutartines fazinių ir linijinių įtampų kryptis. Parašykite lygtis pagal II Kirchhofo dėsnį kompleksinėms linijinėms įtampoms apskaičiuoti ir išspręskite tas lygtis grafiškai.

3.13. Kuri iš simetrinio trifazio tinklo įtampų – fazinė ar linijinė – didesnė ir kiek kartų? Įrodykite.

3.14. Kokios standartinės vardinės trifazių šaltinių įtamos? Tai fazinė ar linijinė įtampa?

3.15. Kokios standartinės vardinės imtuvų įtamos? Ar jos tokios pat kaip šaltinių? Kodėl?

3.16. Žinoma, kad tinklas trifazis ir jo įtampa 220 V. Kokia šio tinklo fazinė ir linijinė įtampa?

3.17. Kokia plačiausiai Lietuvoje naudojamų pramoninių trifazių tinklų fazinė ir linijinė įtampa?

3.18. Koks trifazis imtuvas vadinamas simetriniu? Užrašykite tokio imtuvo visų fazių kompleksines varžas.

3.19. Nubraižykite schemas, kaip prie trifazio tinklo turi būti jungiami šie imtuvai: a – vienfazis, kurio vardinė įtampa lygi linijinei tinklo įtampai; b – vienfazis, kurio vardinė įtampa lygi tinklo fazinei įtampai; c – simetrisinis trifazis, kurio vardinė įtampa lygi tinklo fazinei įtampai; d – simetrisinis trifazis, kurio vardinė įtampa lygi tinklo linijinei įtampai; e – nesimetrisinis trifazis, kurio vardinė įtampa lygi fazinei tinklo įtampai; f – nesimetrisinis trifazis, kurio vardinė įtampa lygi tinklo linijinei įtampai.

3.20. Ar reikalingas neutralusis laidas simetriniam imtuvui? Kodėl? Aiškinami nubraižykite trifazio simetrinio aktyvaus-talpinio pobūdžio imtuvo schemą ir vektorinę diagramą.

3.21. Trifazio tinklo įtampa 380 V. Prie jo prijungtas žvaigždė sujungtas imtuvas, kurio kiekvienos fazės $Z = 220e^{j45^\circ}$. Nubraižykite schemą, sužymėkite joje ir apskaičiuokite fazines bei linijines kompleksines sroves. Nubraižykite vektorinę diagramą.

3.22. Koks imtuvas vadinamas nesimetriniu? Simetrisinis ar nesimetrisinis imtuvas, kurio fazių varžos yra aktyvaus (A), induktyvaus (B) ir talpinio (C) pobūdžio, jei $R_A = X_B = X_C$?

3.23. Nubraižykite minėto (žr. 3.22 klausimą) imtuvo schemą, kai jis sujungtas žvaigždė su neutraliuoju laidu. Apskaičiuokite fazines bei linijines kompleksines sroves ir nubraižykite vektorinę diagramą, kai trifazio tinklo įtampa lygi 220 V ir $R_A = X_B = X_C = 100 \Omega$. Analiziškai ir grafiškai nustatykite neutraliojo laido srovę.

3.24. Nubraižykite žvaigždė su neutraliuoju laidu sujungto imtuvo schemą ir vektorinę diagramą, kai imtuvo fazių varžos šitokio pobūdžio: a – aktyvaus (A), talpinio (B), induktyvaus (C); b – induktyvaus (A), aktyvaus (B), talpinio (C); c – talpinio (A), induktyvaus (B), aktyvaus (C).

3.25. Ar galima atjungti nesimetrinio imtuvo neutralųjį laidą? Kodėl? Ar pasikeis imtuvo fazinės įtampos atjungus? Aiškinami remkitės formulėmis ir vektorine diagrama.

3.26. Užrašykite rodikline forma kiekvienai trikampiui sujungto imtuvo fazei tenkančias kompleksines įtampas. Kokį tinklo įtampos modulį rašysite – U_f ar U_i ?

3.27. Parašykite Omo dėsnį trikampiui sujungto simetrinio imtuvo fazinėms kompleksinėms srovėms apskaičiuoti ir lygtis pagal I Kirchhofo dėsnį linijinėms kompleksinėms srovėms nustatyti. Kuri iš srovių didesnė (linijinė ar fazinė) ir kiek kartų?

3.28. Simetrisinis trifazis imtuvas, kurio fazės pilnutinė varža $Z = 200 \Omega$, sujungtas trikampiui ir prijungtas prie 380 V trifazio tinklo. Apskaičiuokite imtuvo fazinę ir linijinę srovę (modulius). (Ats.: 1,9 A; 3,29 A.)

3.29. Nubraižykite trikampiui sujungto simetrinio imtuvo schemas, sužymėkite jose įtampas ir sroves bei nubraižykite vektorines diagramas, kai fazės varža šitokio pobūdžio: a – aktyvaus; b – induktyvaus; c – talpinio.

3.30. Nubraižykite trikampiui sujungto nesimetrinio imtuvo schemą, sužymėkite jose įtampas bei sroves ir nubraižykite vektorinę diagramą, kai fazės yra šitokio pobūdžio: a – aktyvaus (AB), talpinio (BC), induktyvaus (CA); b – aktyvaus (AB), induktyvaus (BC), talpinio (CA); c – talpinio (AB), talpinio (BC), aktyvaus (CA).

3.31. Apskaičiuokite žvaigždė su neutraliuoju laidu sujungto imtuvo aktyviąją, reaktyviąją ir pilnutinę galią, jei tinklo įtampa 380 V, fazinės srovės $I_A = I_B = 2 \text{ A}$, $I_C = 3 \text{ A}$ ir imtuvo fazės yra aktyvaus (A), induktyvaus (B) bei talpinio pobūdžio (C). (Ats.: 440 W, 220 var, 492 V · A.)

3.32. Apskaičiuokite trikampiui sujungto imtuvo aktyviąją, reaktyviąją ir pilnutinę galią, jei trifazio tinklo įtampa 220 V, fazinės srovės $I_{AB} = 2 \text{ A}$, $I_{BC} = 3 \text{ A}$, $I_{CA} = 4 \text{ A}$ ir imtuvo fazės yra induktyvaus (AB ir BC) bei talpinio (CA) pobūdžio. (Ats.: 0 W, 220 var, 220 V · A.)