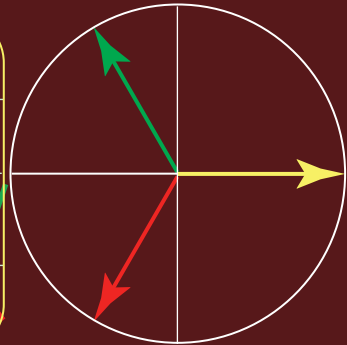
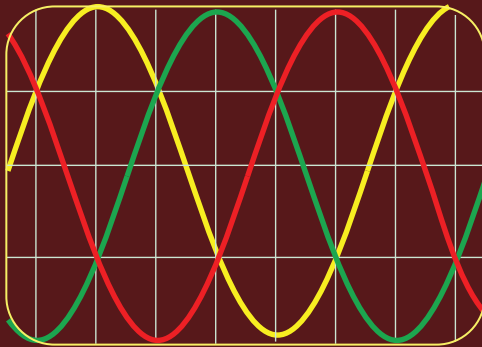
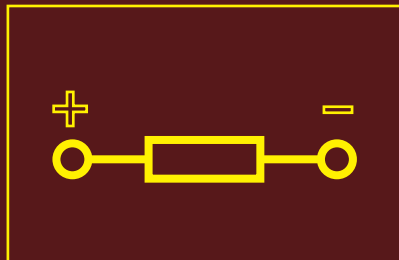


S.Masiokas

Elektro technika



1



Nuolatinės
srovės
grandinės

VADOVĖLIS
AUKŠTOSIOMS
MOKYKLOMS

1.1. Pagrindiniai elektrinės grandinės dėsniai 20

- 1.1.1. Elementarioji elektrinė grandinė / 20
- 1.1.2. Omo dėsnis / 22
- 1.1.3. Kirchhofo dėsniai / 23
- 1.1.4. Energija ir galia; galios balansas / 24

1.2. Elektrinės grandinės darbo režimai ir šaltiniai 26

- 1.2.1. Tuščioji eiga / 26
- 1.2.2. Vardinis (nominalusis) režimas / 26
- 1.2.3. Trumpojo jungimo režimas / 26
- 1.2.4. Suderintasis režimas / 27
- 1.2.5. EVJ ir srovės šaltiniai / 28

1.3. Nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtų elementų grandinės 29

- 1.3.1. Nuosekliai sujungti imtuvai / 30
- 1.3.2. Lygiagrečiai sujungti imtuvai / 31
- 1.3.3. Nuosekliai sujungti šaltiniai / 33
- 1.3.4. Lygiagrečiai sujungti šaltiniai / 33

1.4. Paprastųjų elektrinių grandinių tyrimas 34

- 1.4.1. Mišriai sujungti imtuvai / 34
- 1.4.2. Žvaigžde ir trikampiui sujungti imtuvai / 35

1.5. Srovės ir įtampos reguliavimas 36

- 1.5.1. Srovės reguliavimas reostatu / 36
- 1.5.2. Įtampos reguliavimas potenciometru / 37
- 1.5.3. Įtampos dalytuvas / 38

1.6. Sudėtingųjų elektrinių grandinių tyrimas 38

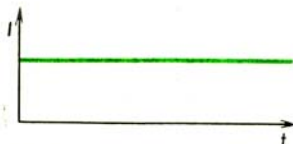
- 1.6.1. Kirchhofo dėsnų metodas / 38
- 1.6.2. Superpozicijos principas ir metodas / 41
- 1.6.3. Mazgų įtampos metodas / 43
- 1.6.4. Ekvivalentinio šaltinio metodas / 44

1.7. Netiesinės elektrinės grandinės 45

- 1.7.1. Netiesiniai elementai / 45
- 1.7.2. Statinė ir diferencialinė varža / 46
- 1.7.3. Charakteristikų sukirtimo metodas / 46
- 1.7.4. Charakteristikų sumavimo metodas / 47

Nuolatinė srovė yra tokia, kuri laikui bėgant nekinta.

Kitai tariant, ji yra pastovi ir teka elektrine grandine viena kryptimi (1.1 pav.). Praktikoje nuolatinė srovė gali šiek tiek svyruoti, bet šiame skyriuje bus kalbama tik apie pastovios nuolatinės srovės grandines.



1.1 pav.

Elektrotechnikos raidos pradžioje buvo geriau teoriškai iširtos nuolatinės srovės grandinių savybės, kurios pirmiausia ir buvo pritaikytos praktiškai. Šiuo metu plačiau naudojama kintamoji sinusinė srovė, bet yra nemaža sričių, kur tinka tik nuolatinė srovė, pavyzdžiui, elektrochemija, elektronika – elektroninės ir radijo aparatūros maitinimo grandinės. Kai kada nuolatinę srovę tikslingiau naudoti techniniu bei ekonominiu požiūriu. Pavyzdžiui, suvirinant nuolatinė srove, gaunama geresnė siūlė; naudojant nuolatinės srovės variklį, galima tolygiau ir tiksliau reguliuoti įrengimų judėjimo greitį. Daugeliui elektronikos įtaisų, įvairiems autonominiams įrenginiams (pvz., automobiliams) reikalingi cheminiai nuolatinės srovės šaltiniai – elementai ir akumulatoriai.

Antra vertus, nuolatinės ir kintamosios srovės grandinės tiriamos panašiais metodais. Nuolatinės srovės grandinių tyrimas yra paprastesnis ir akivaizdesnis. Kaip tik dėl to nuolatinės srovės grandinių tyrimo metodus galima laikyti visos elektrotechnikos elementoriumi.

1.1

Pagrindiniai elektrinės grandinės dėsniai

1.1.1. Elementarioji elektrinė grandinė. Elektros srovė gali tekėti tik uždara grandine. Srovė – tai laidininku per laiko vienetą pernešamas elektros kiekis:

$$I = Q/t; \quad (1.1)$$

čia Q – visas per laiką t perneštas elektros kiekis.

Srovės matavimo vienetas yra amperas (A).

Laidininko savybė priešintis tekančiai srovei yra vadinama jo elektrine varža; jos vertė apskaičiuojama šitaip:

$$R = \rho l/S; \quad (1.2)$$

čia ρ – medžiagos specifinė elektrinė varža $\Omega \cdot m$, l – laidininko ilgis m , S – laidininko skerspjūvio plotas m^2 .

Elektrinės varžos matavimo vienetas yra omas (Ω).

Laidininko specifinė elektrinė varža priklauso nuo medžiagos ir temperatūros. Kai temperatūra kitokia nei 20°C , daugumos metalų specifinę elektrinę varžą galima apskaičiuoti šitaip:

$$\rho = \rho_{20} (1 + \alpha \vartheta); \quad (1.3)$$

čia ρ_{20} – specifinė elektrinė varža $\Omega \cdot \text{m}$, kai temperatūra lygi 20°C ,

α – temperatūrinis specifinės elektrinės varžos koeficientas $^{\circ}\text{C}^{-1}$,

ϑ – virštemperatūrė, t. y. tikrosios ir bazinės temperatūros (čia 20°C) skirtumas $^{\circ}\text{C}$.

Atvirkštinis elektrinei varžai dydis yra elektrinis laidumas*

$$G = 1/R, \quad (1.4)$$

kurio matavimo vienetas yra simenšas (S). Atvirkštinis specifinei varžai dydis yra specifinis laidumas (S/m):

$$\gamma = 1/\rho. \quad (1.5)$$

Įrašę jo išraišką į (1.2) lygtį, turime laidininko varžą:

$$R = l/\gamma S. \quad (1.6)$$

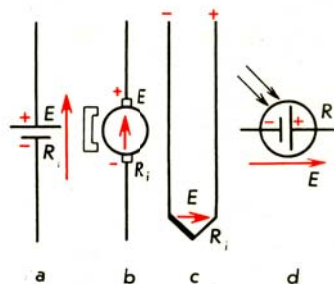
Srovę varo elektros energijos šaltinis, kurio energija paverčiama krūvininkų judėjimo energija. Šaltinis apibūdinamas **elektrovaros jėga** (EVJ), kuri žymima E ir kurios matavimo vienetas yra voltas (V). Sutarta teigiama EVJ kryptimi laikyti jos kryptį iš „minuso“ į „plusą“ (1.2 pav.). Realūs šaltiniai jais tekančiai srovei sudaro varžą, kuri vadinama šaltinio **vidine varža**. Ją žymėsime R_i .

Imtuvuose (1.3 pav.) **elektros energija paverčiama kitomis energijos rūšimis**. Pavyzdžiui, elektros krosnyje ji virsta šiluma, kaitinamojoje lempe – šviesa ir šiluma. **Yra imtuvų, kuriuose veikia priešinga srovei vidinė EVJ**. Tai įkraunami akumuliatoriai ir varikliai. Akumuliatoriuose kaupiama cheminė energija, o varikliuose elektros energija virsta mechanine ir šilumine.

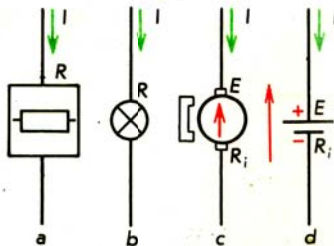
Elementariąją elektrinę grandinę sudaro elektros energijos šaltinis, imtuvas ir juos jungiantys laidai**. Grafiškai ji vaizduojama schema, kurią sudaro sutartiniai realiųjų

* Toliau elektrinę varžą dažniausiai vadinsime tiesiog varža, o elektrinį laidumą – laidumu.

** Čia ir toliau knygoje, jei nebus nieko pasakyta apie laidų ir prietaisų varžas, reikia suprasti, kad jie yra idealūs: laidų $R_A = 0$, ampermetro $R_A = 0$, voltmetro $R_V = \infty$.



1.2 pav. Elektros energijos šaltinių sutartiniai grafiniai ženklai: a – akumuliatorius arba cheminis elementas; b – elektromechaninis generatorius; c – termopora; d – fotoelementas



1.3 pav. Imtuvų sutartiniai grafiniai ženklai: a – varžinės elektros krosnies kaitinamasis elementas; b – kaitinamoji lempa; c – elektros variklis; d – įkraunamas akumuliatorius

elementų ženklai, arba paprastesne – atstojamąja schema (1.4 pav.). Schemose pažymėtos sutartinės teigiamos srovės ir EVJ kryptys. **Labai svarbu elektrinius dydžius schemose žymėti laikantis vieningos sutartinių teigiamų krypčių sistemos, kad būtų teisingai matematiškai užrašyta daugelis elektro-technikos dėsnių.**

Atstojamosiose schemose šaltiniai ir imtuvai vaizduojami ženklais, nurodančiais svarbiausias elemente elektrines savybes kiekvienu konkrečiu atveju (1.5 pav.). Rezistoriaus ženklą pažymėtas imtuvas gali reikšti lempą, krosnį ar kitą realų imtuvą, apibūdinamą elektrine varža. Šaltinio, kurio srovė teka prieš jo EVJ, ženklas reiškia įkraunamą akumuliatorių arba elektros variklį. Imtuvą, kurio varža gali būti keičiama, atstojamojoje schemoje įprasta vaizduoti reostato arba keičiamos varžos rezistoriaus ženklu (1.6 pav.). Kad būtų paprasčiau, atstojamąsias schemas dažniausiai vadinsime tiesiog schemomis.

1.1.2. Omo dėsnis. Nuolatinė srovė I , tekanti grandinės dalimi, yra **tiesiog proporcinga** tos grandinės dalies **įtampai U ir atvirkščiai proporcinga jos varžai R** . Šią priklausomybę galima užrašyti šitaip:

$$I = U/R = GU. \quad (1.7)$$

Tekant srovei grandinės dalimi, joje gaunamas elektrinių potencialų skirtumas. Tai **įtampos kritimas** ar tiesiog įtampa, kurią galima užrašyti, remiantis Omo dėsniu, šitaip:

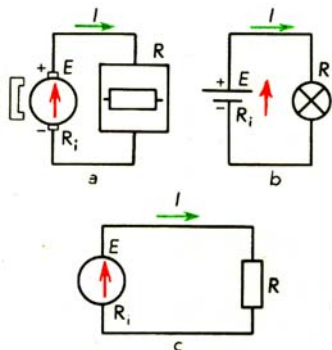
$$U = RI = I/G. \quad (1.8)$$

Kaip ir EVJ, įtampos matavimo vienetas yra voltas (V). Sutarta laikyti **teigiama įtampos kryptį iš aukštesnio potencialo taško į žemesnio potencialo tašką**. Kai imtuvu teka srovė, jos ir įtampos kritimo sutartinės teigiamos kryptys sutampa (1.7 pav.). Pažymėtina, kad (1.7) ir (1.8) priklausomybės tinka tik tokiai grandinės daliai, kurioje nėra elektros energijos šaltinių.

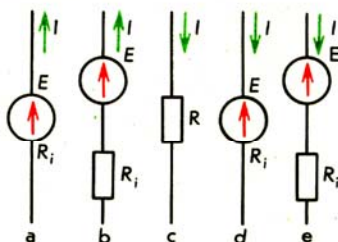
Priklausomybė $U=f(I)$ vadinama **voltamperine charakteristika**. Kai imtuvo $R=\text{const}$, jos grafinis vaizdas yra tiesė (1.8 pav.), o toks imtuvas vadinamas tiesiniu.

1.1 pavyzdys. Grandinės dalyje $a-b$ (1.9 pav.) sužymėtos sutartinės teigiamos srovės ir žinomų įtampų kryptys. Žinome, kad $I=5\text{ A}$, $I_1=3\text{ A}$, $U=12\text{ V}$, $U_1=9\text{ V}$. Taikydami Omo dėsnį, apskaičiuokime grandinės dalies $a-b$ ir imtuvo varžas – R_{ab} ir R_1 .

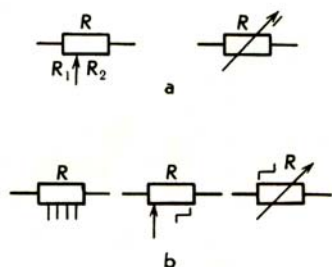
Sprendimas. Taikydami Omo dėsnį, padalijame įtampą iš srovės



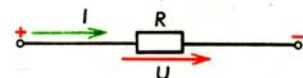
1.4 pav. Elektrinių grandinių schemas: a ir b – su realiųjų elementų sutartiniais grafinais ženklais; c – atstojamoji



1.5 pav. Elementų sutartiniai grafiniai ženklai atstojamosiose schemose: a, b – šaltinių; c, d, e – imtuvų



1.6 pav. Sutartiniai grafiniai ženklai imtuvų, kurių varžą galima keisti: a – sklandžiai; b – šuoliais



1.7 pav. Imtuvo įtampos kritimo sutartinė teigiama kryptis

tos grandinės dalies, kurios varža skaičiuojama: $R_{ab} = U/I = 12/5 = 2,4 \Omega$; imtuvo varža $R_3 = U_3/I_3 = 9/3 = 3,0 \Omega$.

Pritaikę **Omo dėsnį elementariajai grandinei** (1.10 pav.), galime parašyti:

$$I = \frac{E}{R + R_i} \quad (1.9)$$

Iš čia: $E = RI + R_i I$. Įrašę iš (1.8) $RI = U$, gauname: $E = U + R_i I$. Matome, kad elektros energijos šaltinio **EVJ yra lygi sumai imtuvo įtampos ir įtampos kritimo šaltinyje dėl jo vidinės varžos**. Imtuvo įtampa yra ir šaltinio gnybtų įtampa:

$$U = E - R_i I \quad (1.10)$$

Šaltinio įtampos priklausomybė nuo jo srovės $U = f(I)$ vadinama šaltinio **išorine charakteristika** (1.11 pav.). Jei grandine srovė neteka (šaltinis neapkrautas), tai $U = E$. Didinant apkrovą, stiprėja grandinės srovė, taigi didėja įtampos kritimas dėl šaltinio vidinės varžos, o jo gnybtų įtampa mažėja.

1.2 pavyzdys. Tranzistorinis radijo imtuvas prijungtas prie baterijos (žr. 1.10 pav.), kurios $E = 9,3 \text{ V}$. Kai grandine teka $13,6 \text{ mA}$ srovė, baterijos įtampa lygi $9,0 \text{ V}$. Apskaičiuokime baterijos vidinę varžą. Sprendimas. Pagal (1.10) lygtį $R_i = (E - U)/I = (9,3 - 9,0) : (13,6 \cdot 10^{-3}) = 22,0 \Omega$.

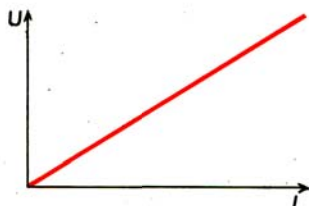
1.1.3. Kirchhofo dėsniai. Prieš formuluodami G. Kirchhofo atrastus elektrotechnikos dėsnius, išsiaiškinsime dar kai kurias elektrinių grandinių sąvokas.

Šaka yra grandinės dalis, kuria teka ta pati srovė. Trijų ar daugiau šakų sujungimo vieta yra vadinama mazgu. Pavyzdžiui, 1.12 pav. parodyta šakota grandinė, kurią sudaro penkios šakos ir trys mazgai – A, B ir C. Nors geometriškai mazgą A sudaro du sujungimai, bet jų potencialas yra vienodas, todėl laikysime, kad viršutinėje grandinės dalyje yra tik vienas mazgas.

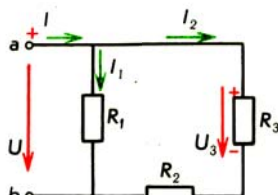
Kontūru vadinama uždara grandinės dalis, kurią apėjus sugrįžtama į tą patį tašką. Pavyzdžiui, kontūras AR_2CBEA , AR_3R_5CBRA ir kiti (žr. 1.12 pav.).

I Kirchhofo dėsnis. Elektrinės grandinės mazgo srovių algebrainė suma lygi nuliui:

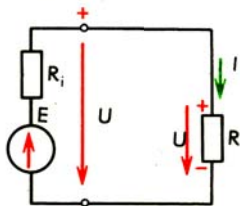
$$\sum I = 0 \quad (1.11)$$



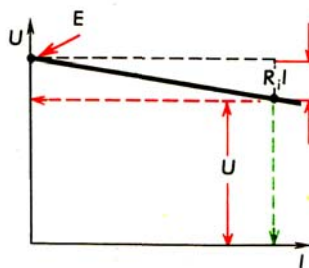
1.8 pav. Tiesinio imtuvo voltamperinė charakteristika



1.9 pav.



1.10 pav. Elementarioji grandinė



1.11 pav. Išorinė charakteristika šaltinio, kurio $E = \text{const}$ ir $R_i = \text{const}$

Teigiamomis laikysime sroves, ištekančias iš mazgo, o neigiamomis – įtekančias į mazgą. Pavyzdžiui, mazgo A (žr. 1.12 pav.): $-I + I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Bendroju atveju ši dėsnį galima taikyti ne tik mazgui, bet ir grandinės daliai (1.13 pav.): $-I_1 - I_2 - I_3 + I_4 = 0$.

II Kirchhofo dėsnis. Elektrinės grandinės kontūro įtampų algebrinė suma yra lygi nuliui:

$$\Sigma U = 0. \quad (1.12)$$

Kai grandinėje yra EVJ šaltinių, patogiau taikyti šiek tiek kitokią jo išraišką:

$$\Sigma RI = \Sigma E. \quad (1.13)$$

Kairiojoje šios lygties pusėje algebriskai sudedamos visų imtuvų įtampos ir įtampų kritimai dėl šaltinių vidinių varžų, o dešiniojoje algebriskai sudedamos šaltinių EVJ. Į (1.12) ir (1.13) lygtis įtampos ir EVJ įrašomos teigiamos, kai laisvai pasirinkta kontūro apėjimo kryptis sutampa su jų sutartinėmis teigiamomis kryptimis. Priešingu atveju šių lygčių nariai rašomi neigiami.

1.14 pav. parodyta grandinės dalis, kurioje yra penkios šakos ir trys kontūrai. Jei apėjimo pradžia pasirinktume mazgą A ir kontūro apėjimo kryptį – pagal laikrodžio rodyklės sukimąsi, tai lygtis pagal II Kirchhofo dėsnį kontūrai $ABCDR_5A$ bus šitokia: $R_1I_1 - R_2I_2 - R_3I_3 + R_5I_5 = -E_1 - E_2$.

1.1.4. Energija ir galia; galios balansas. Pritaikę elementariajai grandinei energijos tvermės dėsnį, galime parašyti jos energijos balanso lygtį:

$$W_s = W + W_d; \quad (1.14)$$

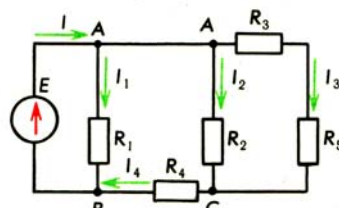
čia W_s – energija, kurią grandinei tiekia šaltinis,

W ir W_d – energija, suvartojama imtuve ir šaltinyje dėl jo vidinės varžos.

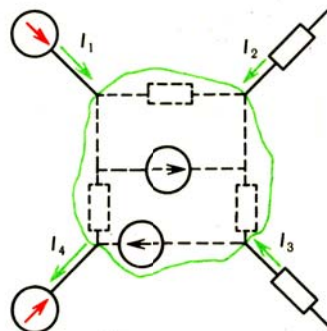
Šaltinis tiekia tuo daugiau energijos, kuo didesnė jo EVJ ir kuo didesnis krūvis Q pernešamas grandine: $W_s = EQ$. Prisiminę (1.1) lygtį, galime parašyti:

$$W_s = EIt. \quad (1.15)$$

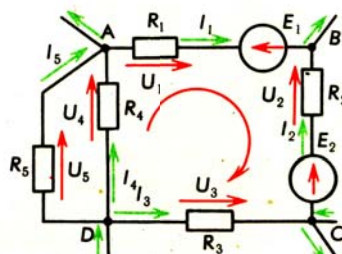
Imtuve suvartojama tuo daugiau energijos, kuo didesnis jame įtampos kritimas U ir kuo didesnis juo pernešamas krūvis Q :



1.12 pav. Šakotos elektrinės grandinės pavyzdys



1.13 pav. Elektrinės grandinės dalis, kuriai parašome lygtį pagal I Kirchhofo dėsnį



1.14 pav. Elektrinės grandinės dalis, turinti šakas AB , BC , CD , DR_4A , DR_5A ir tris kontūrus

$$W = UIt. \quad (1.16)$$

Energija, suvartojama šaltinyje dėl jo vidinės varžos, paprastai vadinama energijos nuostoliais. Ji skaičiuojama šitaip:

$$W_d = R_1 I^2 t. \quad (1.17)$$

Energijos pokytis per laiko vienetą yra galia.

Šaltinio galia:

$$P_s = W_s / t = EI. \quad (1.18)$$

Imtuvo galia:

$$P = W / t = UI. \quad (1.19)$$

Prisiminę Omo dėsnį (žr. (1.8) išraišką), imtuvo galia galime užrašyti ir šitaip:

$$P = RI^2 = U^2 / R; \quad P = GU^2 = I^2 / G. \quad (1.20)$$

Galios matavimo vienetas yra vatas (W), elektros energijos – džaulis (J): $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$. Dar vartojami energijos vienetai vatvalandė (W·h) ar dažniau kilovatvalandė ($1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$).

Padaliję (1.14) lygtį iš laiko, gausime **galios balanso lygtį**:

$$P_s = P + P_d; \quad (1.21)$$

čia P_d – nuostolių dėl šaltinio vidinės varžos galia.

Kai grandinėje šaltinių ir imtuvų yra ne po vieną, jų galia sudedama. Prisiminę (1.18) ir (1.20), galime parašyti tokia galios balanso lygtį:

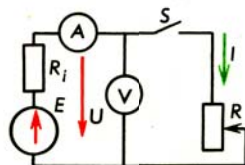
$$\Sigma EI = \Sigma RI^2 + \Sigma R_1 I^2. \quad (1.22)$$

Kairiojoje lygties pusėje yra šaltinių galių algebrinė suma. Jei srovė šaltiniu teka jo EVJ kryptimi, šaltinis grandinei tiekia elektros energiją. Tokio šaltinio galia įrašoma teigiama. Jei srovė teka šaltiniu prieš jo EVJ, šaltinis dirba imtuvo režimu. Toks šaltinis energiją vartoja, jo galia rašoma neigiama. Lygties dešinėsios pusės visi nariai teigiami.

1.2

Elektrinės grandinės darbo režimai ir šaltiniai

Kiekviena elektrinė grandinė dirba tam tikru režimu. Aptarsime būdingesnius režimus, pasirinkę pavyzdžiui elementariają grandinę, kurios šaltinio $E = \text{const}$ ir $R_l = \text{const}$, o imtuvo varža gali kisti (1.15 pav.).



1.15 pav. Elektrinė grandinė, kurios režimą galima keisti, keičiant imtuvo varžą R

1.2.1. Tuščioji eiga. Išjungus jungiklį S , grandinė nutraukiama ($R = \infty$), srovė ja nebeteka: $I = 0$. Iš (1.10) galima apskaičiuoti šaltinio tuščiosios eigos įtampą:

$$U_0 = E - R_l \cdot 0 = E, \quad (1.23)$$

t. y. šaltiniui dirbant tuščiąja eiga, jo įtampa lygi EVJ .

1.2.2. Vardinis (nominalusis) režimas. Tai toks grandinės režimas, kuriam yra apskaičiuoti visi jos elementai. Jį nusakantys elektriniai elementų parametrai yra vadinami vardiniais (nominaliaisiais).

Vardinė srovė yra didžiausia leistina ilgalaikė grandinės srovė. Kai imtuvu teka vardinė srovė I_N , jame gaunamas vardinis įtampos kritimas U_N , imtuvo galia taip pat yra vardinė: $P_N = U_N I_N$. Didesnė už vardinę srovę imtuvui gali būti pavojinga, nes jame išsiskiria šilumos kiekis, didesnis už leistiną. Kai imtuvo srovė, taigi ir galia, mažesnė už vardinę, jis nepakankamai išnaudojamas, jame suvartojama mažiau elektros energijos.

Pavyzdžiui, ant elektros lemputės užrašyta: 220 V, 150 W. Tai reiškia, kad šios lemputės vardinė įtampa $U_N = 220$ V, o vardinė galia $P_N = 150$ W. Prijungus lemputę prie 220 V įtampos, jos galia yra 150 W ir ja teka vardinė srovė $I_N = P_N / U_N = 150 / 220 = 0,682$ A. Prie didesnės įtampos šios lemputės jungti negalima, nes ji greičiau perdegtų. Kai įtampa mažesnė, lemputė šviečia per silpnai.

1.2.3. Trumpojo jungimo režimas. Tai toks grandinės režimas, kai imtuvo varža lygi nuliui: $R = 0$. Pagal (1.9) trumpojo jungimo srovė

$$I_k = \frac{E}{0 + R_l} = \frac{E}{R_l}. \quad (1.24)$$

Tai stipriausia grandinės srovė, nes ją riboja tik šaltinio vidinė varža. Kadangi galingų šaltinių vidinė varža yra maža, tai dažniausiai trumpojo jungimo srovė yra ne-

leistinai stipri ir pavojinga grandinės elementams bei pačiam šaltiniui. Imtuvo ir šaltinio trumpojo jungimo įtampa

$$U_k = RI_k = 0 \cdot I_k = 0. \quad (1.25)$$

Grandinės elementų apsaugai nuo trumpojo jungimo srovės pavojingo poveikio įjungiami saugikliai. Saugiklio lydusis įdėklas yra lengvai besilydančio metalo vielėlė, kuri, neleistina sustiprėjus srovei, įkaista ir išsilydydama nutraukia grandinę.

1.2.4. Suderintasis režimas. Tai toks režimas, kai **prie šaltinio prijungto imtuvo galia yra didžiausia**. Imtuvo, kurio varža R (žr. 1.15 pav.), galią galima apskaičiuoti šitaip:

$$P = RI^2 = R \frac{E^2}{(R + R_t)^2}. \quad (1.26)$$

Kadangi galia priklauso nuo imtuvo varžos, suderintojo režimo sąlygai nusakyti reikia rasti (1.26) funkcijos ekstremumą – P_{\max} . Tuo tikslu ieškome galios pirmosios išvestinės mus dominančio kintamojo R atžvilgiu ir ją prilyginame nuliui:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{(R + R_t)^2 - 2(R + R_t)R}{(R + R_t)^4} E^2 = \frac{R_t - R}{(R + R_t)^3} E^2 = 0.$$

Ši lygybė gali būti patenkinta, jei jos skaitiklis $R_t - R = 0$, todėl **suderintojo režimo sąlyga** yra šitokia:

$$R = R_t. \quad (1.27)$$

Matome, kad imtuvo galia yra didžiausia, kai jo varža lygi šaltinio vidinei varžai.

Šaltinio suvartojama elektros energija vadinama energijos nuostoliais, kurių galia $P_d = R_t I^2$. Imtuvo galia P yra naudinga šaltinio galia. **Šaltinio naudingumo koeficientas**

$$\eta = \frac{P}{P + P_d} = \frac{RI^2}{RI^2 + R_t I^2} = \frac{R}{R + R_t}. \quad (1.28)$$

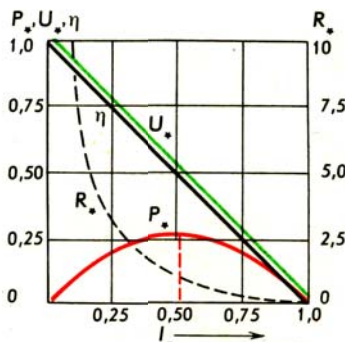
Grandinė veikia suderintuoju režimu, kai $R = R_t$, todėl šaltinio

$$\eta = \frac{R_t}{2R_t} = 0,5. \quad (1.29)$$

Imtuvui atiduodama tiek pat elektros energijos, kiek suvartojama šaltinyje dėl jo vidinės varžos. Dėl tokių didelių nuostolių suderintasis režimas energetikoje netaikomas. Tais atvejais, kai grandinė yra mažos galios ir ekonominiai rodikliai mažiau svarbūs už kitas jos savybes, pavyzdžiui, elektronikoje, suderintasis režimas taikomas siekiant gauti didžiausią šaltinio galią.

Norint sužinoti grandinės rodiklius įvairiais tarpiniais jos darbo režimais – nuo tuščiosios eigos iki trumpojo jungimo, – reikia ją ištirti, keičiant imtuvo varžos R di-

dumą nuo didžiausios (imtuvas atjungtas – $R = \infty$) iki mažiausios ($R=0$) vertės ir paliekant pastovias EVJ ir šaltinio vidinę varžą. Grandinės srovė kinta nuo nulio iki didžiausios – I_k – vertės. Patogu apskaičiuoti ar išmatuoti įvairius grandinės rodiklius santykinės srovės $I_* = I/I_k$ atžvilgiu, kai ji kinta nuo nulio iki vieneto. Gauti rezultatai 1.15 pav. grandinei grafiškai atvaizduoti 1.16 pav. Matome, kad didėjant šaltinio apkrovai nuo tuščiosios eigos režimo (stiprėjant srovei I nuo nulio), kol $I_* \leq 0,5$ imtuvo galia didėja. Kartu sparčiai didėja šaltinio nuostolių galia P_d , todėl naudingumo koeficientas mažėja. Kai $I_* > 0,5$, didėjant apkrovai, imtuvo galia P mažėja; naudingumo koeficientas $\eta < 0,5$, imtuvo galia mažesnė už nuostolių galią. Šaltinio ir imtuvo įtampa $U = EU_*$ mažėja, didėjant apkrovai. Trumpojo jungimo metu, kai $R=0$, o srovė $I = I_k I_* = I_k$, įtampa $U = U_k = EU_* = 0$.



1.16 pav. Elektrinės grandinės naudingumo koeficiento η ir imtuvo santykinės įtamos $U_* = U/E$, santykinės galios $P_* = U_* I_*$ bei santykinės varžos $R_* = R/R_i$ priklausomybė nuo santykinės srovės $I_* = I/I_k$

1.3 pavyzdys. Automobilio 6ST-55 tipo akumulatoriaus $E = 12,1$ V, vidinė varža $R_i = 0,024 \Omega$, vardinė įtampa $U_N = 12,0$ V ir srovė* $I_N = 2,75$ A. Apskaičiuokime būdingųjų režimų srovę, įtampą, galią ir naudingumo koeficientą.

Sprendimas**. 1. Tuščioji eiga – kai visi imtuvai atjungti: $R = \infty$; $I_0 = 0$; $U_0 = E - R_i I_0 = E = 12,1$ V. Naudingumo koeficientas šiuo atveju neturi prasmės, nes imtuvai atjungti. 2. Vardinis režimas: vardinė galia $P_N = U_N I_N = 12,0 \cdot 2,75 = 33,0$ W, t. y. įkrautas akumulatorius gali tiekti elektros energiją imtuvams, kurių bendra galia ne didesnė kaip 33 W. Vardinis naudingumo koeficientas

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_N + R_i I_N^2} = \frac{33,0}{33,0 + 0,024 \cdot 2,75^2} = 0,995.$$

3. Trumpojo jungimo režimas: $R = 0$; $I_k = E/R_i = 12,1/0,024 = 504$ A; $U_k = R_i I_k = 0$; $P_k = U_k I_k = 0$; $\eta_k = 0$. Kaip matome, $I_k = 504$ A $\gg I_N = 2,75$ A, o šaltinio nuostolių galia $P_{dk} = R_i I_k^2 = 0,024 \cdot 504^2 = 6096$ W, todėl šis režimas akumulatoriui pavojingas. 4. Suderintuoju režimu automobilio akumulatorius turėtų veikti starterio įjungimo momentu, kai dar nepradėjusio sukitis starterio galia turi būti didžiausia. Iš (1.27) $R = R_i = 0,024 \Omega$. Starterio paleidimo srovė $I_{st} = E/(R + R_i) = E/(2R_i) = 12,1/(2 \cdot 0,024) = 252$ A, paleidimo įtampa $U_{st} = R_i I_{st} = 0,024 \cdot 252 = 6,05$ V ir galia $P_{st} = P_{max} = R_i I_{st}^2 = 0,024 \times 252^2 = 1524$ W. Iš (1.29) $\eta_{st} = 0,5$.

1.2.5. EVJ ir srovės šaltiniai. Elektros energijos šaltiniai esti dvejų tipų: EVJ ir srovės. Juos panagrinėsime kaip idealiuosius ir realiuosius. Plačiausiai naudojami EVJ šalti-

* Vardinę akumulatoriaus srovę galima apskaičiuoti šitaip. Akumulatoriaus tipo skaičius „55“ nurodo jo vardinę elektros kiekį $Q_N = I_N t_N$ ampervalandėmis (jis dar vadinamas talpa). Laikoma, kad akumulatorius, tiekdamas imtuvams vardinę srovę, visiškai iškraunamas po $t_N = 20$ h. Akumulatoriaus $I_N = Q_N/t_N = 55/20 = 2,75$ A.

** Vaizdumo dėlei reiškiniai, vykstantys akumulatoriaus – starterio grandinėje, šiek tiek supaprastinti, nes neatsižvelgiama į akumulatoriaus polarizacijos EVJ.

niai (1.17 pav.). **Idealiuoju EVJ šaltiniu vadinamas toks EVJ šaltinis, kurio $E = \text{const}$ ir $R_i = 0$. Jo įtampa lygi EVJ ir nuo apkrovos nepriklauso** (žr. 1.17 pav., c, tiesę 1).

Realusis EVJ šaltinis turi vidinę varžą R_i , todėl jame susidaro įtamos kritimas. Jo išorinė charakteristika matematiškai išreiškiama (1.10) tiesės lygtimi: $U = E - R_i I$. Šaltinio įtampa U mažėja, didėjant apkrovai, kai $E = \text{const}$ (žr. 1.17 pav., c, tiesę 2). Praktiškai didelės galios EVJ šaltinių vidinės varžos gana mažos, todėl juos galima laikyti idealiaisiais.

Praktikoje imtuvai dažniausiai jungiami prie **elektros energijos tiekimo tinklo**. Kadangi jo šaltinių galia paprastai yra daug didesnė nei imtuvų galia, **tinklą laikysime idealiuoju EVJ šaltiniu, kurio $E = U = \text{const}$, $R_i = 0$.**

Pasitaiko atveju, kai reikia, kad grandinės srovė išliktų pastovi, kintant imtuvų varžai, pavyzdžiui, elektrinio suvirinimo grandinėje. Šiam tikslui taikomi srovės šaltiniai (1.18 pav.).

Idealiuoju srovės šaltiniu vadinamas šaltinis, kurio srovė lygi nuliui. Toks šaltinis tiekia grandinei pastovią srovę I_k . Keičiant grandinės varžą, $I_k = \text{const}$, bet kinta idealiojo srovės šaltinio įtampa.

Realusis srovės šaltinis turi vidinį laidumą G_i . Įrašę galios išraišką (žr. (1.20)) į šaltinio galios balanso lygtį (1.21), turime: $UI_k = UI + G_i U^2$. Iš čia realiojo srovės šaltinio srovė:

$$I = I_k - G_i U. \quad (1.30)$$

Tai realiojo srovės šaltinio išorinės charakteristikos lygtis. Kadangi $I_k = \text{const}$, jos grafinis vaizdas yra tiesė. Kad būtų galima palyginti EVJ ir srovės šaltinių charakteristikų grafikus, srovės šaltiniams jos nubraižytos kaip $U = f(I)$. Tiriant grandines, EVJ ir srovės šaltiniai gali būti pakeisti vieni kitais, laikantis tam tikrų ekvivalentinio pakeitimo sąlygų.

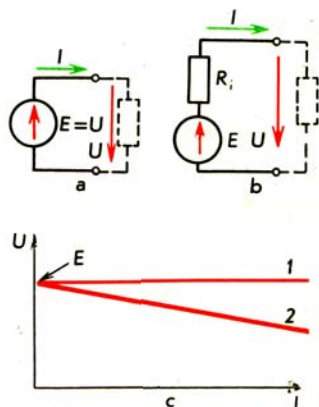
Toliau nagrinėsime praktiškai dažniau sutinkamas grandines, kurioms energiją tiekia elektros tinklas arba EVJ šaltiniai.

1.3

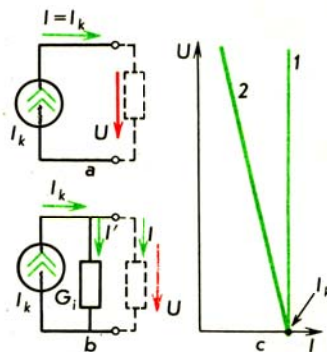
Nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtų elementų grandinės

Nuosekliai sujungtais vadinami tokie grandinės elementai, kuriais teka ta pati srovė (1.19 pav.).

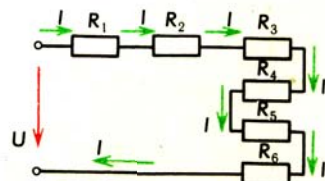
Lygiagrečiai sujungtais vadinami tokie grandinės elemen-



1.17 pav. Idealiuoju (a) ir realioju (b) EVJ šaltinių schemas ir išorinės charakteristikos (c)



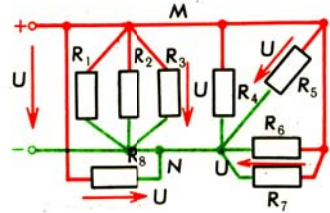
1.18 pav. Idealiuoju (a) ir realioju (b) srovės šaltinių schemas ir išorinės charakteristikos (c)



1.19 pav. Nuosekliai sujungtų imtuvų grandinės pavyzdys

tai, kurių įtampa yra ta pati. Kitaip tariant, jie yra prijungti prie tos pačios mazgų poros (1.20 pav.).

Nuosekliai ar lygiagrečiai galima sujungti ir imtuvus, ir šaltinius. Nuosekliai arba lygiagrečiai sujungtus imtuvus galima pakeisti vienu ekvivalentiniu imtuvu, o šaltinius – vienu ekvivalentiniu šaltiniu.



1.20 pav. Lygiagrečiai sujungtų imtuvų grandinės pavyzdys

1.3.1. Nuosekliai sujungti imtuvai. Nuosekliai sujungtus imtuvus galima pakeisti vienu ekvivalentiniu (1.21 pav.), kurio varža R_e turi būti tokia, kad grandinės srovė po pakeitimo būtų ta pati. Pagal II Kirchhoto dėsnį: $U_1 + U_2 + U_3 - U = 0$. Iš čia: $U = U_1 + U_2 + U_3$. Taikydami Omo dėsnį ekvivalentiniam ir kiekvienam pakeičiamosios grandinės imtuvui, galime užrašyti:

$$R_e I = R_1 I + R_2 I + R_3 I. \quad (1.31)$$

Matome, kad srovė grandinėje nepakis, jei visus imtuvus pakeisime vienu ekvivalentiniu, kurio varža $R_e = R_1 + R_2 + R_3$.

Bendruoju atveju kiekvieną **nuosekliai sujungtų imtuvų grandinę galima pakeisti ekvivalentiniu imtuvu, kurio varža lygi visų imtuvų varžų sumai:**

$$R_e = \Sigma R. \quad (1.32)$$

Jei kiekvieno imtuvo varža R ir jų skaičius n , tai

$$R_e = nR. \quad (1.33)$$

Padauginę (1.31) lygties abi puses iš srovės I , gauname $R_e I^2 = R_1 I^2 + R_2 I^2 + R_3 I^2$. Kairiojoje šios lygybės pusėje yra ekvivalentinio, o dešiniojoje – kiekvieno imtuvo galia: $P_e = P_1 + P_2 + P_3$.

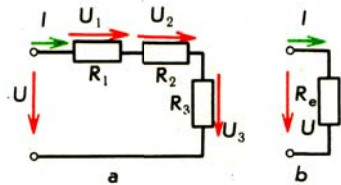
Bendruoju atveju **ekvivalentinio imtuvo galia yra visų imtuvų galių suma:**

$$P_e = \Sigma P. \quad (1.34)$$

ai sujungtų imtuvų grandinės trūkumas yra tas, kad kiekvieno darbo režimas priklauso nuo kitų imtuvų varžos. Jei vieno imtuvo varža keisis, keisis grandinės srovė ir kitų imtuvų įtampos. Vieną imtuvą atjungus ($R = \infty$), grandinė srovė netekės, ir visi kiti imtuvai negaus elektros energijos.

Sujungus imtuvus nuosekliai, tinklo įtampa juose pasiskirsto proporcingai kiekvieno imtuvo varžai (žr. (1.31) išraišką). Dėl to vieni iš jų gali būti nepakankamai išnaudojami, o kiti – perkrauti.

Tarkime, kad nuosekliai sujungėme du imtuvus, kurių vardinės įtampos vienodos, bet vieno vardinė galia yra dvigubai mažesnė negu



1.21 pav. Nuosekliai sujungtų imtuvų grandinės (a) ir ekvivalentinio imtuvo (b) schemas

kito. Jų varžas galima apskaičiuoti (žr. (1.20) išraiškas) šitaip: $R_1 = U_N^2 / P_N$; $R_2 = U_N^2 / (2P_N)$. Matome, kad $R_1 = 2R_2$, todėl, tekant grandine srovei I , imtuvų įtampos: $U_1 = R_1 I = 2R_2 I$; $U_2 = R_2 I$. Taigi pirmojo imtuvo įtampa yra dvigubai didesnė už antrojo.

Imtuvai nuosekliai jungiami tada, kai tinklo įtampa yra didesnė už kiekvieno imtuvo vardinę įtampą ir galima neatsižvelgti į minėtus grandinės trūkumus.

1.4. pavyzdys. Naujametinės eglutės girlianda prijungiamo prie 220 V nuolatinės įtampos tinklo. Apskaičiuokime: 1. Kiek 12 V, 5 W elektros lemputė reikia sujungti nuosekliai. 2. Kaip pasikeis lemputėjų režimai, jei viena iš jų – a) bus 3 W galios; b) perdeg.

Sprendimas. 1. Kadangi visos 5 W lemputės yra vienodos, tai jų varžos yra lygios. Kad kiekvienos įtampa būtų vardinė – U_{Ns} , turi būti lemputėjų skaičius $n = U / U_{Ns} = 220 / 12 = 18,3$. Parinkime girliandai $n_g = 19$ lemputėjų, kad kiekvienos jų tikroji įtampa U'_g būtų ne didesnė už vardinę: $U'_g = U / n_g = 220 / 19 = 11,6$ V.

2a. Pakeičę vieną lemputę mažesnės galios lempute, pakeičiame visos girliandos varžą, srovę, taip pat lemputėjų įtampas. Pasinaudoję (1.20) išraiška, apskaičiuojame lemputėjų varžas: 5 W lemputės varža $R_5 = U_{Ns}^2 / P_{Ns} = 12^2 / 5 = 28,8 \Omega$; 3 W lemputės varža $R_3 = U_{Ns}^2 / P_{Ns} = 12^2 / 3 = 48,0 \Omega$. Girliandos varža: $R'_g = R_5 (n_g - 1) + R_3 = 28,8 (19 - 1) + 48,0 = 566 \Omega$. Srovė $I' = U / R'_g = 220 / 566 = 0,389$ A. Įtampa, tenkanti lemputėms: $U'_5 = R_5 I' = 28,8 \cdot 0,389 = 11,2$ V; $U'_3 = R_3 I' = 48,0 \cdot 0,389 = 18,7$ V.

Kaip matome, visos 5 W lemputės šviečia silpniau nei prieš pakeičiant, nes jų įtampa mažesnė už vardinę, o 3 W lemputės įtampa bus $18,7 / 12 \approx 1,6$ karto didesnė už vardinę. Ši lemputė kurį laiką švies skaisčiausiai, nes jos galia $P'_3 = (U'_3)^2 / R_3 = 18,7^2 / 48 = 7,3$ W. Ši galia yra $7,3 / 3 = 2,4$ karto didesnė už vardinę, todėl lemputė gana greitai perdeg.

2b. Šiai (ar kuriai nors kitai) lemputei perdegus, grandinė nutrūks: $R'_g = \infty$, $I' = 0$, todėl užgesa visa girlianda.

1.3.2. Lygiagrečiai sujungti imtuvai. Lygiagrečiai sujungtų imtuvų grandinę galima pakeisti ekvivalentiniu imtuvu (1.22 pav.), kurio varža R_e turi būti tokia, kad juo tekėtų ta pati srovė I .

Norėdami apskaičiuoti ekvivalentinio imtuvo parametrus, mazgui A taikome I Kirchhofo dėsnį: $-I + I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Iš čia: $I = I_1 + I_2 + I_3$. Taikydami Omo dėsnį (žr. (1.7) išraišką) ekvivalentiniam ir kiekvienam pakeičiamos grandinės imtuvui, galime užrašyti:

$$G_e U = G_1 U + G_2 U + G_3 U. \quad (1.35)$$

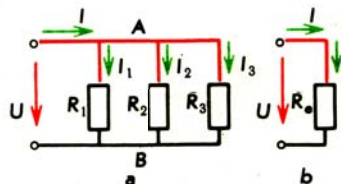
Matome, kad ekvivalentinio imtuvo laidumas $G_e = G_1 + G_2 + G_3$.

Bendruoju atveju lygiagrečiai sujungtų imtuvų ekvivalentinis laidumas lygus jų laidumų sumai:

$$G_e = \Sigma G, \quad (1.36)$$

o varža

$$R_e = 1/G_e. \quad (1.37)$$



1.22 pav. Lygiagrečiai sujungtų imtuvų grandinės (a) ir ekvivalentinio imtuvo (b) schemas

kurioje skaičiuojama srovė I_n ir kurios varža R_n , pakeičiami vienu ekvivalentiniu imtuvu, kurio varža R' :

$$I_n = \frac{R'}{R' + R_n} I. \quad (1.42)$$

1.7 pavyzdys. Trijų lygiagrečiai sujungtų imtuvų (1.22 pav.) grandinės srovė $I = 15$ A. Jų varžos $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 15 \Omega$, $R_3 = 20 \Omega$. Apskaičiuokime pirmojo imtuvo srovę ir galią.

Sprendimas. $R' = R_2 R_3 / (R_2 + R_3) = 15 \cdot 20 / (15 + 20) = 8,57 \Omega$.
 $I_1 = \frac{R'}{R' + R_1} I = \frac{8,57}{8,57 + 10} \cdot 15 = 6,92$ A. $P_1 = R_1 I_1^2 = 10 \cdot 6,92^2 = 479$ W.

1.3.3. Nuosekliai sujungti šaltiniai. Nuosekliai sujungtus šaltinius galima pakeisti vienu ekvivalentiniu (1.23 pav.). Jo parametrai – ekvivalentinė EVJ E_e ir ekvivalentinė vidinė varža R_{1e} – turi būti tokie, kad juo tekėtų ta pati srovė.

1.23 pav., a grandinės srovei išreikšti pasitelksime II Kirchofo dėsnį:

$$RI + R_{11}I + R_{12}I + R_{13}I + R_{14}I = E_4 + E_3 - E_2 + E_1.$$

Iš čia

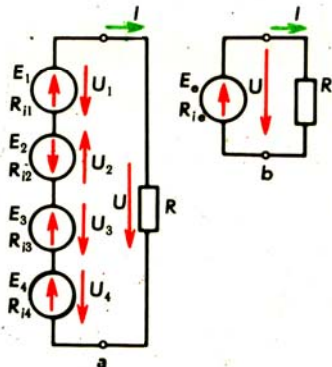
$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3 + E_4}{R + R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}} = \frac{E_e}{R + R_{1e}};$$

$$E_e = E_1 - E_2 + E_3 + E_4; \quad R_{1e} = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}. \quad (1.43)$$

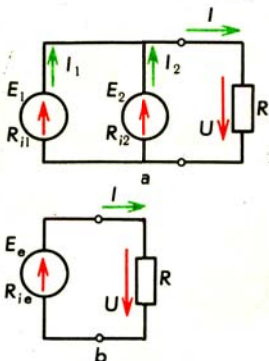
Matome, kad grandinės darbo režimas nepasikeis, jei visus šaltinius pakeisime ekvivalentiniu, kurio **EVJ yra lygi visų EVJ algebrinei sumai, o vidinė varža – visų šaltinių vidinių varžų sumai**. Šaltiniai jungiami nuosekliai, siekiant gauti didesnę EVJ, ir paprastai taip, kad visos EVJ būtų tos pačios krypties, pavyzdžiui, iš atskirų akumuliatorių sudaromos baterijos.

1.8 pavyzdys. Grandinės (1.23 pav., a) šaltinių parametrai tokie: $E_1 = E_2 = E_3 = 12$ V; $E_4 = 36$ V; $R_{11} = R_{12} = R_{13} = 0,3 \Omega$; $R_{14} = 0,2 \Omega$. Imtuvo varža $R = 20 \Omega$. Apskaičiuokime ekvivalentinio šaltinio E_e , vidinę varžą R_{1e} , jo ir kiekvieno šaltinio įtampą: U , U_1 , U_2 , U_3 , U_4 .

Sprendimas. Ekvivalentinio šaltinio $E_e = E_1 - E_2 + E_3 + E_4 = 12 - 12 + 12 + 36 = 48$ V. $R_{1e} = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} = 3 \cdot 0,3 + 0,2 = 1,1 \Omega$. Grandinės srovė $I = E_e / (R + R_{1e}) = 48 / (20 + 1,1) = 2,27$ A. $U = E_e - R_{1e}I = 48,0 - 1,1 \cdot 2,27 = 45,5$ V. $U_1 = U_2 = E_1 - R_{11}I = 12,0 - 0,3 \cdot 2,27 = 11,3$ V. $U_4 = E_4 - R_{14}I = 36,0 - 0,2 \times 2,27 = 35,5$ V. Antrasis šaltinis dirba imtuvo režimu. Pagal II Kirchofo dėsnį: $-U_2 + R_{12}I = -E_2$, todėl $U_2 = E_2 + R_{12}I = 12,0 + 0,3 \times 2,27 = 12,7$ V, t. y. jo įtampa didesnė už EVJ ir yra priešingos krypties nei kitų šaltinių.



1.23 pav. Grandinės su nuosekliai sujungtais EVJ šaltiniais (a) ir su ekvivalentiniu šaltiniu (b) schemos



1.24 pav. Grandinės su lygiagrečiai sujungtais EVJ šaltiniais (a) ir su ekvivalentiniu šaltiniu (b) schemos

1.3.4. Lygiagrečiai sujungti šaltiniai. Lygiagrečiai (1.24 pav.) šaltiniai jungiami tada, kai imtuvams reikia stipresnės srovės, negu ją gali tiekti vienas šaltinis. Paprastai parenkami šaltiniai, kurių EVJ yra lygios: $E_1 = E_2 = E$, kad tuščiosios eigos metu, kai imtuvas atjungtas, šaltinių kontūru srovė netekėtų: $(E - E) / (R_{11} + R_{12}) = 0$. Pageidautina, kad lygiagrečiai sujungti šaltiniai būtų apkrauti proporcingai kiekvieno jų galiai $P = EI$. Kitaip tariant, didesnės galios šaltinis turėtų imtuvui tiekti stipresnę srovę. Šaltinių įtampa U galima apskaičiuoti šitaip: $E - R_{11}I_1 = E - R_{12}I_2$. Matome, kad $I_1/I_2 = R_{12}/R_{11}$.

Iš čia galime suformuluoti tokias lygiagrečiai sujungtų EVJ šaltinių proporcingo apkrovos paskirstymo sąlygas: 1) EVJ turi būti lygios; 2) vidinės varžos turi būti atvirkščiai proporcingos šaltinių galioms. Jei šios sąlygos netenkinamos, šaltiniai apkraunami neproporcingai jų galiai: vienas perkraunamas, o kitas nepakankamai apkraunamas.

Kai lygiagrečiai sujungiami visiškai vienodi šaltiniai, ekvivalentinio šaltinio parametrus galima apskaičiuoti šitaip:

$$E_e = E; R_{1e} = R_i/n; \quad (1.44)$$

čia n – lygiagrečiai sujungtų šaltinių skaičius.

1.4

Paprastųjų elektrinių grandinių tyrimas

Toliau visas elektrines grandines skirstysime į paprasčiausias ir sudėtingasias. **Paprastosiomis laikysime tokias grandines, kuriose yra tik vienas EVJ šaltinis arba keli, bet visi vienoje šakoje.** Paprastąją grandinę galima pakeisti elementariaja, kurioje yra vienas ekvivalentinis šaltinis ir vienas ekvivalentinis imtuvas.

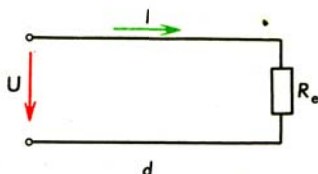
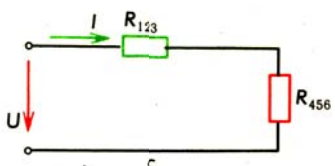
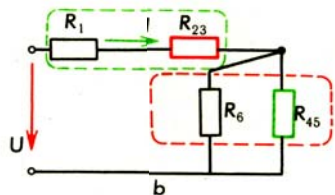
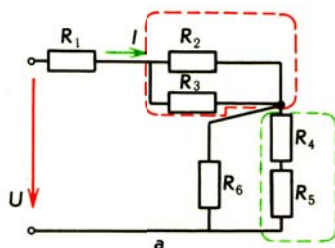
Kai paprastojoje grandinėje yra tik nuosekliai ir lygiagrečiai sujungti imtuvai, ji vadinama mišriai sujungtų imtuvų grandine. Paprastosios grandinės gali būti nešakotos, – jų visi elementai sujungti nuosekliai, ir šakotos, jei yra kitaip (lygiagrečiai, žvaigžde arba trikampiui) sujungtų imtuvų.

Sudėtingosiomis grandinėmis laikysime tokias, kuriose du ar daugiau EVJ šaltinių yra įvairiose šakose. Tokios grandinės tiriamos kitaip nei paprastosios. (Žr. 1.6).

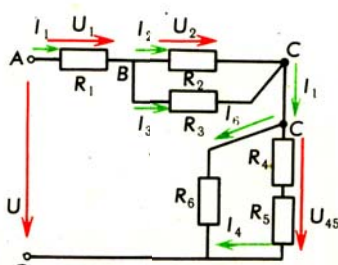
1.4.1. Mišriai sujungti imtuvai. Tokios grandinės tiriamos ekvivalentinio keitimo metodu. Grandinė paprastinama palaipsniui, nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtus imtuvus keičiant ekvivalentiniais, kol lieka tik vienas. Tiriant minėtas grandines, dažnai tenka nustatyti atskirų imtuvų darbo režimus – srovę, įtampą, galią. Tam pasitelkiami Omo ir Kirchhofo dėsniai. Kadangi tiriamosios grandinės gali būti labai įvairios, konkrečiame uždavinyje pasirenkamas reikiamas tyrimo nuoseklumas.

1.9 pavyzdys. Grandinės (1.25 pav., a) imtuvų varžos: $R_1 = R_2 = 4 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $R_4 = 5 \Omega$, $R_5 = 7 \Omega$, $R_6 = 10 \Omega$; įtampa $U = 36$ V. Apskaičiuokime ekvivalentinio imtuvo varžą ir srovę.

Sprendimas. Imtuvai R_2 ir R_3 sujungti lygiagrečiai, o R_4 ir R_5 – nuosekliai, todėl juos galime pakeisti ekvivalentiniais: $R_{23} = R_2 R_3 / (R_2 + R_3) = 4 \cdot 6 / (4 + 6) = 2,4 \Omega$; $R_{45} = R_4 + R_5 = 5 + 7 = 12 \Omega$ (1.25 pav.,



1.25 pav. Mišriai sujungtų imtuvų grandinė (a) ir jos paprastinimas ekvivalentinio keitimo metodu (b, c, d)



1.26 pav.

b). Matome, kad imtuvai R_6 ir R_{45} sujungti lygiagrečiai, o R_1 ir R_{23} – nuosekliai. Ekvivalentinių imtuvų varžos: $R_{456} = R_{45}R_6 / (R_{45} + R_6) = 12 \cdot 10 / (12 + 10) = 5,45 \Omega$; $R_{123} = R_1 + R_{23} = 4 + 2,4 = 6,4 \Omega$ (1.25 pav., c). Pagaliau šiuos paskutinius nuosekliai sujungtus imtuvus keičiame vienu ekvivalentiniu (1.25 pav., d), kurio varža $R_e = R_{123} + R_{456} = 6,4 + 5,45 = 11,9 \Omega$. Jo srovė $I = U/R_e = 36/11,9 = 3,03 \text{ A}$.

1.10. pavyzdys. Žinomi visi tiriamosios grandinės (žr. 1.25 pav., a) 1.9 pavyzdžio sąlygoje duoti ir sprendime apskaičiuoti dydžiai. Apskaičiuokime visų imtuvų sroves.

Sprendimas. Grandinės schemoje (1.26 pav.) pažymėkime visų imtuvų įtampas ir sroves, pastarosios parinkdami imtuvų indeksus. Pirmuoju imtuvu R_1 tekanti srovė jėu apskaičiuota: $I_1 = I = 3,03 \text{ A}$. Likusias sroves patogu skaičiuoti pasitelkus Omo dėsnį ir apskaičiuavus lygiagrečiai sujungtų imtuvų grupių įtampas: $U_2 = U_3 = R_{23}I_1 = 2,4 \cdot 3,03 = 7,27 \text{ V}$; $I_2 = U_2/R_2 = 7,27/4 = 1,82 \text{ A}$; $I_3 = U_3/R_3 = 7,27/6 = 1,21 \text{ A}$; $U_6 = U_{45} = R_{456}I_1 = 5,45 \cdot 3,03 = 16,5 \text{ V}$; $I_4 = U_6/R_{45} = 16,5/12 = 1,38 \text{ A}$; $I_6 = U_6/R_6 = 16,5/10 = 1,65 \text{ A}$. Patikrinkime atsakymus, taikydami I ir II Kirchhofo dėsnius. Laikome, kad atsakymai gali nesutapti 1–2%. Mazgui B: $I_1 = I_2 + I_3 = 1,82 + 1,21 = 3,03 \text{ A}$; mazgui C: $I_1 = I_4 + I_6 = 1,38 + 1,65 = 3,03 \text{ A}$. Kontūriui ABCDA: $-U + U_1 + U_2 + U_3 + U_6 = 0$. Iš čia: $U = R_1I_1 + U_2 + U_3 = 4 \cdot 3,03 + 7,27 + 1,65 = 35,9 \text{ V} \approx 36 \text{ V}$. Kaip matome, apskaičiuotoji įtampa skiriasi nuo tikrosios: $\frac{36 - 35,9}{36} \cdot 100 = 0,28\%$.

Kadangi žinoma srovė I_1 , itekanti į mazgus B ir C, tai srovės lygiagrečiai sujungtuose imtuvuose gali būti apskaičiuotos ir kitaip – taikant (1.42) lygybę:

$$I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1 = \frac{6}{4 + 6} \cdot 3,03 = 1,83 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1 = \frac{4}{4 + 6} \cdot 3,03 = 1,21 \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{R_6}{R_6 + R_{45}} I_1 = \frac{10}{10 + 12} \cdot 3,03 = 1,38 \text{ A};$$

$$I_6 = \frac{R_{45}}{R_6 + R_{45}} I_1 = \frac{12}{10 + 12} \cdot 3,03 = 1,65 \text{ A}.$$

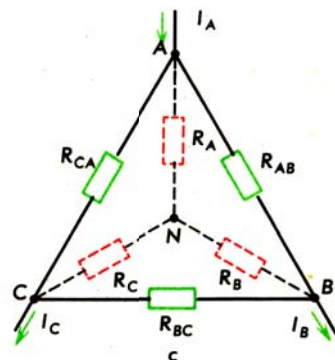
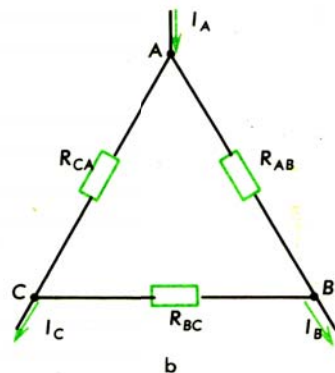
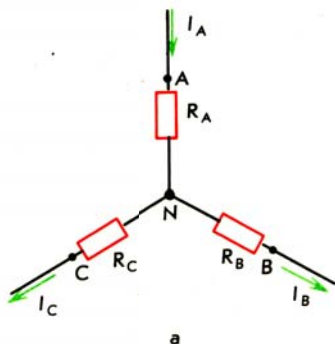
1.4.2. Žvaigžde ir trikapiu sujungti imtuvai. Žvaigžde sujungtais imtuvais vadinsime tokius, kurių vieni galai yra sujungiami į bendrą mazgą, o kiti galai prijungiami prie kitų grandinės imtuvų ar mazgų (1.27 pav., a). Trikampiu sujungtais imtuvais vadinsime tokius, kurių grandinė sudaro uždara kontūrą, o kiekvienos jų poros sujungimo mazgai prijungiami prie trijų kitų grandinės imtuvų ar mazgų (1.27 pav., b).

Žvaigžde ir trikapiu sujungtų imtuvų grandines galima ekvivalentiškai pakeisti viena kita (1.27 pav., c) taip, kad jų taškų (mazgų) A, B ir C potencialai išliktų tokie pat, vadinas ir srovės I_A , I_B ir I_C nepakistų.

Keičiant trikampiu sujungtų imtuvų grandinę ekvivalentine, kurioje imtuvai sujungti žvaigžde: „ Δ “ \Rightarrow „ Υ “,

$$R_A = \frac{R_{AB} R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; \quad R_B = \frac{R_{BC} R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}};$$

$$R_C = \frac{R_{CA} R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}. \quad (1.45)$$



1.27 pav. Žvaigžde (a) ir trikapiu (b) sujungtų imtuvų grandinės; ekvivalentinio keitimo schema (c)

Keičiant žvaigžde sujungtų imtuvų grandinę ekvivalentine, kurioje imtuvai sujungti trikampiu: „Y“ ⇒ „Δ“,

$$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C}; \quad R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A};$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}. \quad (1.46)$$

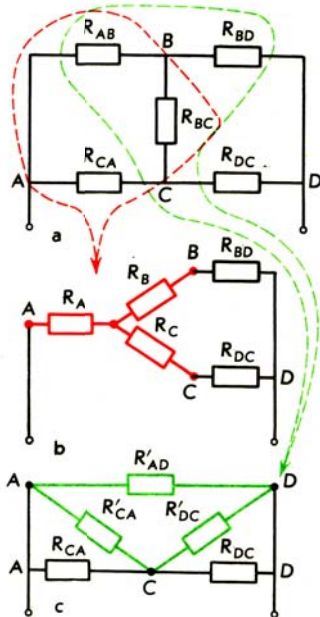
Jei imtuvai vienodi: $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{\Delta}$ arba $R_A = R_B = R_C = R_Y$, tai

$$R_Y = R_{\Delta}/3 \quad \text{arba} \quad R_{\Delta} = 3R_Y. \quad (1.47)$$

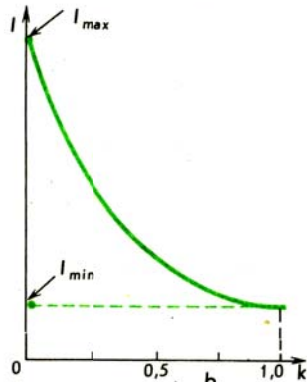
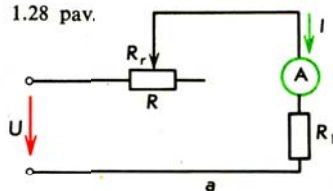
Žvaigžde ar trikampiu sujungtų imtuvų grandinės tiriamos ekvivalentinio keitimo metodu: ekvivalentiškai pakeitus taip sujungtus imtuvus vienus kitais, grandinėje lieka tik mišriai sujungti imtuvai.

Tarkime, kad reikia pakeisti vienu ekvivalentiniu penkis imtuvus, sujungtus pagal vadinamąją tiltelio schemą (1.28 pav., a). Matome, kad šioje grandinėje nėra nei nuosekliai, nei lygiagrečiai sujungtų imtuvų, bet yra imtuvų, sujungtų žvaigžde arba trikampiu. Žvaigžde sujungti R_{AB}, R_{BC}, R_{BD} arba R_{CA}, R_{BC}, R_{DC} imtuvai. Trikampiu sujungti R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} arba R_{BC}, R_{BD}, R_{DC} imtuvai.

Pakeisime tris trikampiu sujungtus (pavyzdžiui, tarp mazgų A, B, C) imtuvus ekvivalentiniais, sujungtais žvaigžde (1.28 pav., b). Matome, kad po pakeitimo turime mišriai sujungtų imtuvų grandinę. Pakeitę tris žvaigžde sujungtus (pavyzdžiui, tarp mazgų A, C, D) imtuvus ekvivalentiniais, sujungtais trikampiu (1.28 pav., c), turime taip pat mišriai sujungtų imtuvų grandinę. Ir viena, ir kitą pakeistąją grandinę galima supaprastinti ir apskaičiuoti ekvivalentinio imtuvo varžą R_{AD} .



1.28 pav.



1.29 pav. Srovės reguliavimo reostato schema (a) ir reguliuojamosios srovės priklausomybė nuo reguliavimo koeficiento (b)

1.5

Srovės ir įtampos reguliavimas

Nuolatinės srovės grandinėse įtampą ir srovę galima keisti naudojant keičiamos varžos rezistorius – reostatus. Su tokiomis elektrinėmis grandinėmis praktikoje dažnai susiduriama. Galima išskirti kelis būdingiausius atvejus.

1.5.1. Srovės reguliavimas reostatu. Reostatas jungiamas nuosekliai su imtuvu R_1 (1.29 pav.). Keičiant reostato slankiklio padėtį, galima keisti varžą R_r nuo nulio iki R . Pažymėję varžų santykį $k = R_r/R$, galime parašyti: $R_r = kR$; čia $k = 0 \div 1$, ir jį vadinsime reguliavimo koeficientu.

Grandinės srovę galime apskaičiuoti pagal Omo dėsnį:

$$I = U/(R_1 + R_r) = U/(R_1 + kR). \quad (1.48)$$

Sudarykime reguliuojamosios srovės kreivę $I = f(k)$ (1.29 pav., b). Didinant reostato reguliuojamą varžą R_r nuo nulio iki R (keičiant k nuo nulio iki vieneto), grandinės srovė mažėja pradžioje sparčiau, o vėliau lėčiau, kol tampa lygi I_{\min} .

1.11 pavyzdys. Grandinė (žr. 1.29 pav., a) prijungta prie 12 V tinklo, imtuvo varža $R_1 = 0,24 \text{ k}\Omega$. Parinkime reostato varžos R , kiti mo ribas taip, kad būtų galima reguliuoti srovę nuo I_{\max} iki $I_{\min} = 0,25I_{\max}$.

Sprendimas. Stipriausia srovė tekės, kai $R_r=0$ (slankiklis kairiojoje kraštinėje padėtyje): $I_{\max}=U/R_1=12/240=0,05$ A. Silpniausia srovė $I_{\min}=0,25I_{\max}=0,25 \cdot 0,05=0,0125=12,5 \cdot 10^{-3}$ A. Didžiausia grandinės varža $R_{\max}=R_1+R=U/I_{\min}=12/(12,5 \cdot 10^{-3})=960 \Omega$. Iš čia viso reostato varža $R=R_{\max}-R_1=960-240=720 \Omega$.

Parentant reostatą būtina žiūrėti, kad juo tekėtų srovė, ne didesnė už vardinę, kuri paprastai esti nurodyta jo duomenų lentelėje. Šiuo atveju dalimi reostato tekės srovė, artima I_{\max} , kai reostato slankiklis bus padėtyje, artimoje kairiajai kraštinei. Todėl reikia parinkti reostatą, kurio vardinė srovė būtų ne mažesnė kaip 50 mA. Priešingu atveju reostate išsiskirs per daug šilumos ir jis gali perkaisti.

1.5.2. Įtampos reguliavimas potenciometru. Reostatas, įjungtas pagal 1.30 pav. pavaizduotą schemą, vadinamas potenciometru. Reostato, kurio visa varža lygi R , kraštiniai gnybtai a ir b prijungiami prie įtampos U šaltinio. Tarp vieno iš jų (pvz., b) ir slankiklio gnybto c gaunama reguliuojama įtampa U_2 . Slankiklis dalija reostatą į dvi dalis, kurių varžos yra R_1 ir R_2 . Kai potenciometras neapkrautas (prie jo išėjimo gnybtų imtuvas neprijungtas), visu reostatu teka tuščiosios eigos srovė, kuri nuo slankiklio padėties nepriklauso:

$$I_0 = U/R = U/(R_1 + R_2). \quad (1.49)$$

Reostato dalyse ac ir cb gaunamos įtampos yra proporcingos tų dalių varžoms:

$$U_{10} = R_1 I_0; \quad U_{20} = R_2 I_0. \quad (1.50)$$

Įrašę tuščiosios eigos srovę I_0 iš (1.49) į (1.50), gauname: $U_{20} = (R_2/R)U$. Potenciometro išėjimo ir įėjimo varžų santykį pavadinkime reguliavimo koeficientu: $k = R_2/R$. Priklausomai nuo slankiklio padėties $k=0 \div 1$. Matome, kad neapkrauto potenciometro išėjimo įtampa yra tiesiog proporcinga jo įėjimo įtampai:

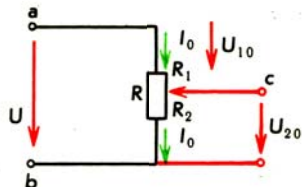
$$U_{20} = (R_2/R)U = kU. \quad (1.51)$$

Prie išėjimo prijungus imtuvą, potenciometras apkraunamas (1.31 pav., a). Gaunama mišriai sujungta potenciometro dalių R_1 , R_2 ir imtuvo R_3 grandinė. Apkrauto potenciometro išėjimo įtampa $U_2 = R_3 I_3$. Ji priklauso ne tik nuo potenciometro varžų R_1 ir R_2 , bet ir nuo imtuvo varžos R_3 .

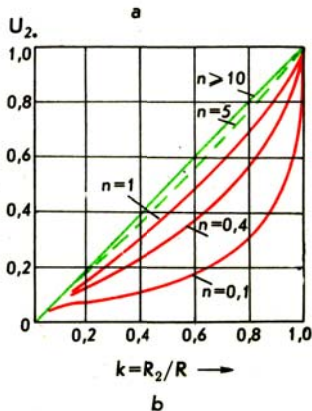
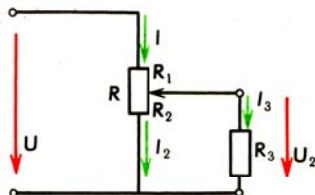
Pažymėkime imtuvo ir visos potenciometro varžos santykį koeficientu $n = R_3/R$, kuris yra atvirkščiai proporcingas potenciometro apkrovai. Galime apskaičiuoti santykinę potenciometro išėjimo įtampą $U_{2*} = U_2/U$ priklausomai nuo koeficientų n ir k . Iš sudarytos reguliavimo charakteristikų šeimos $U_{2*} = f(k)$ (1.31 pav., b) matome, kad išėjimo įtampą apytiksliai galime laikyti tiesiog proporcinga įėjimo įtampai, kai potenciometro apkrova yra palyginti nedidelė ($R_3 \gg R$, $n \gg 1$). Kuo labiau apkrautas potenciometras (mažesnis koeficientas n), tuo labiau netiesiška potenciometro reguliavimo charakteristika. Kai $n \leq 1$ ($R_3 \leq R$), apkrauto potenciometro išėjimo įtampa gali būti pastebimai mažesnė už U_{20} .

1.12 pavyzdys. Neapkrauto potenciometro (žr. 1.30 pav.) įėjimo įtampa $U=220$ V, išėjimo – $U_{20}=60$ V. Visa potenciometro varža $R=800 \Omega$. Apskaičiuokime, kokia įtampa tenka prie potenciometro prijungtam imtuvui, kurio varža $R_3=2$ k Ω (žr. 1.31 pav., a).

Sprendimas. Apkrautą potenciometrą galima laikyti grandine, kurią sudaro trys elementai: R_2 ir R_3 sujungti lygiagrečiai, o su



1.30 pav. Neapkrauto potenciometro schema



1.31 pav. Apkrauto potenciometro schema (a) ir įtampos reguliavimo charakteristikos (b)

jais nuosekliai sujungtas R_1 . Tokios grandinės ekvivalentinio imtuvo varža:

$$R_e = R_1 + R_{23} = (R - R_2) + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Čia yra nežinoma varža R_2 , kurią apskaičiuojame iš (1.52) lygybės neapkrauto potenciometru: $U_{20} = kU = (R_2/R)U$. Iš čia: $R_2 = RU_{20}/U = 800 \cdot 60/220 = 218 \Omega$. Tada $R_e = (800 - 218) + \frac{218 \cdot 2000}{218 + 2000} = 582 + 197 = 779 \Omega$.

Visos grandinės srovė: $I = U/R_e = 220/779 = 0,282 \text{ A}$.

Imtuvo įtampa: $U_2 = U_3 = R_{23}I = 197 \cdot 0,282 = 55,6 \text{ V}$. Kaip matome, apkrauto potenciometro išėjimo įtampa mažesnė negu esant tuščiajam eigai.

1.5.3. Įtampos dalytuvas. Kai įtampos šaltinis yra tik vienas, o imtuvai keli ir jiems reikalingos skirtingos (bet ne didesnės už šaltinio) įtampos, patogų naudotis įtampos dalytuvu. Dalytuvo schema (1.32 pav.) tokia pat kaip ir potenciometro, bet vietoj reostato su slankikliu naudojamas rezistorius su atšakomis arba grupė nuosekliai sujungtų rezistorių. Neapkrauto įtampos dalytuvo dalių įtampos apskaičiuojamos naudojantis Omo dėsnium:

$$U_1 = R_1 I = \frac{R_1}{R} U; \quad U_2 = (R_1 + R_2) I = \frac{R_1 + R_2}{R} U;$$

$$U_3 = (R_1 + R_2 + R_3) I = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R} U;$$

čia $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

Bendruoju atveju neapkrauto įtampos dalytuvo (kaip ir potenciometro) išėjimo įtampa U_{ex} yra proporcinga jo įėjimo įtampai U_{in} :

$$U_{ex} = kU_{in}; \quad (1.52)$$

čia k – išėjimo ir įėjimo varžų santykis.

Apkrauto įtampos dalytuvo išėjimo įtampa skaičiuojama taikant mišriai sujungtų imtuvų grandinių tyrimo metodus.

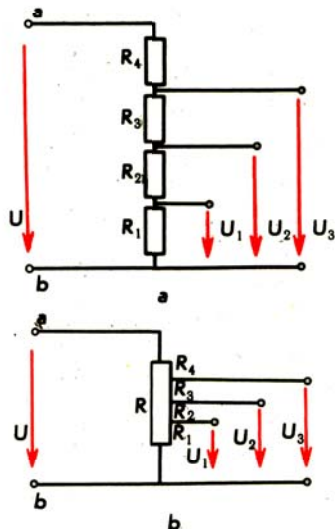
1.6

Sudėtingųjų elektrinių grandinių tyrimas

Sudėtingųjų grandinių neįmanoma paversti elementariomis naudojant ekvivalentinio keitimo metodą, todėl jų tyrimui taikomi kitokie metodai.

1.6.1. Kirchhofo dėsnų metodas. Šis metodas yra universalus. Jį galima taikyti visoms be išimčių grandinėms. Tyrimo tvarka šitokia.

1. Grandinė kiek galima supaprastinama, pakeičiant visų lygiagrečiai sujungtų šakų imtuvus ekvivalentiniais. Taip yra sumažinamas grandinės srovių, taigi ir rašomų lygčių, skaičius. Jei lygčių skaičius nesvarbu (pvz., joms



1.32 pav. Įtampos dalytuvas, kuri sudaro: a – keli nuosekliai sujungti rezistoriai; b – vienas rezistorius su atšakomis.

spręsti galima pasinaudoti jau sudaryta ESM programa), šį veiksmą galima praleisti.

2. Laisvai pasirenkamos visose n šakose nežinomų srovių ar nežinomų EVJ kryptys.

3. Parašomos lygtys, taikant I Kirchhofo dėsnį visiems grandinės mazgams, išskyrus kurį nors vieną. Jeigu grandinėje yra m mazgų, tai prasmingų nepriklausomų lygčių galima turėti $m-1$.

4. Trūkstamas lygčių skaičius $n-(m-1)$ parašomas, taikant II Kirchhofo dėsnį pasirinktiems nepriklausomiems kontūrams. Nepriklausomu vadinamas toks kontūras, kuris turi bent vieną naują šaką, nepriklausiusią nė vienam iš anksčiau pasirinktų kontūrų. Kontūrų apėjimė kryptys parenkamos laisvai.

5. Sprendžiama gautoji n lygčių sistema. Jeigu lygčių yra daug arba uždaviniai kartojasi, naudojama ESM.

6. Sprendimo rezultatai:

a) jei kuri nors srovė ar EVJ gaunama neigiama, tai reiškia, kad ji yra priešingos krypties nei buvo pasirinkta prieš sprendžiant. Šiuo atveju schemoje nubraukiama neteisingai pasirinktosios srovės ar EVJ rodyklė ir pažymima tikroji kryptis;

b) jeigu šakos srovės kryptis sutampa su EVJ kryptimi, tai reiškia, kad tas šaltinis energiją atiduoda. Jeigu EVJ ir srovės kryptys šakoje yra priešingos, – šaltinis energiją vartoja. Praktiškai tai gali reikšti, pavyzdžiui, įkraunamą akumuliatorių, nuolatinės srovės variklį arba kitus imtuvus, turinčius elektrovaros jėgos šaltinį.

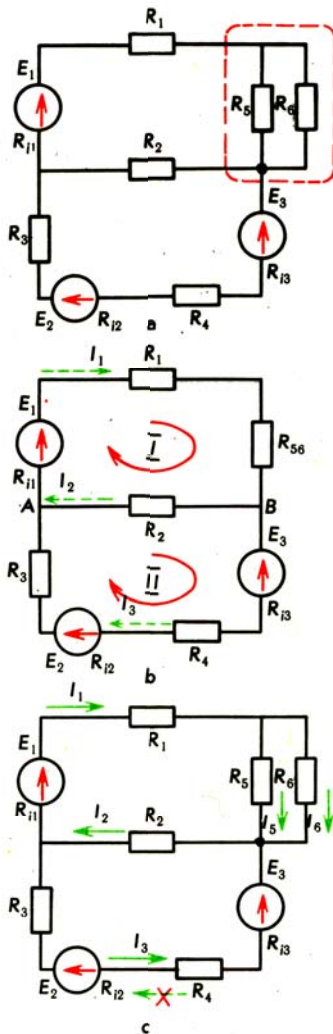
7. Grįžtama prie pradinės grandinės ir apskaičiuojamos srovės tuose imtuvuose, kurie buvo pakeisti ekvivalentiniais sprendimo pradžioje.

8. Sprendimą galima patikrinti galios balansu, kuris yra būtina, nors ir nepakankama sąlyga nustatyti, ar uždavinys teisingai išspręstas. Suskaičiuojama šaltinių ir imtuvų galia – (1.22) lygties abi pusės. Priklausomai nuo skaičiavimo tikslumo bei panaudotos skaičiavimo technikos galimos tam tikros paklaidos, todėl idealaus galios balanso gali ir nebūti.

Leistina paklaida laikysime 1–2%.

1.13 pavyzdys. Žinomi sudėtingosios grandinės (1.33 pav., a) šaltinių bei imtuvų parametrai: $E_1 = 60$ V, $E_2 = 6$ V, $E_3 = 48$ V; $R_{11} = 1$ Ω, $R_{12} = R_{13} = 0,5$ Ω; $R_1 = 30$ Ω, $R_2 = 12$ Ω, $R_3 = 16$ Ω, $R_4 = 14$ Ω, $R_5 = 30$ Ω, $R_6 = 15$ Ω. Apskaičiuokime grandinės šakų sroves Kirchhofo dėsnio metodu ir patikrinkime galios balansą.

Sprendimas. 1. Tiriamojoje grandinėje yra penkios šakos, todėl reikia apskaičiuoti penkias nežinomas sroves. Imtuvai R_5 ir R_6 sujungti lygiagrečiai, todėl juos keičiame ekvivalentiniu: $R_{56} = R_5 R_6 / (R_5 + R_6) = 30 \cdot 15 / (30 + 15) = 10$ Ω. Imtuvai R_3 ir R_4 sujungti nuosekliai,



1.33 pav. Kirchhofo dėsnio metodu tiriamos grandinės schemos: a – pradinė; b – supaprastinta; c – su pažymėtomis tikrosiomis srovių kryptimis

ir juos galima pakeisti ekvivalentiniu R_{3a} , bet šis veiksmas nesumažins grandinės nežinomų srovių skaičiaus, todėl tokio keitimo galima nedaryti.

2. Laisvai pasirinkame ir brūkšninėmis rodyklėmis pasižymime supaprastintos grandinės (1.33 pav., b) trijų nežinomų srovių kryptis. Srovėms apskaičiuoti sudarome trijų lygčių sistemą.

3. Kadangi grandinėje yra du mazgai – A ir B, prasmingą lygtį pagal I Kirchhofo dėsnį galime parašyti tik vieną. Pvz., mazgui B: $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$.

4. 1.33 pav., b grandinėje yra trys kontūrai: AR_1BR_2A , AR_2BR_4A ir AR_1BR_4A . Prasmingas lygtis galime parašyti tik dviems iš jų, nes trečiajame kontūre nėra nė vienos šakos, kuri nebūtų patekusi į pirmuosius du. Pasirenkame pirmuosius du kontūrus ir, apeidami juos laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi, parašome lygtis pagal II Kirchhofo dėsnį.

$$AR_1BR_2A: (R_{11} + R_1 + R_{3a}) I_1 + R_2 I_2 = E_1,$$

$$AR_2BR_4A: -R_2 I_2 + (R_{13} + R_4 + R_{12} + R_3) I_3 = -E_3 + E_2.$$

5. Irašę žinomų dydžių vertes, gauname tokią lygčių sistemą:

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 + I_3 = 0, \\ (1 + 30 + 10) I_1 + 12 I_2 = 60, \\ -12 I_2 + (0,5 + 14 + 0,5 + 16) I_3 = -48 + 6, \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} -I_1 + I_2 + I_3 = 0, \\ 41 I_1 + 12 I_2 + 0 \cdot I_3 = 60, \\ 0 \cdot I_1 - 12 I_2 + 31 I_3 = -42. \end{cases}$$

Sudarome determinantus:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 41 & 12 & 0 \\ 0 & -12 & 31 \end{vmatrix} = -2135; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 60 & 12 & 0 \\ -42 & -12 & 31 \end{vmatrix} = -2076;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 41 & 60 & 0 \\ 0 & -42 & 31 \end{vmatrix} = -3582; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 41 & 12 & 60 \\ 0 & -12 & -42 \end{vmatrix} = 1506.$$

Apskaičiuojame nežinomas sroves: $I_1 = \Delta_1 / \Delta = -2076 / -2135 = 0,972$ A, $I_2 = \Delta_2 / \Delta = -3582 / -2135 = 1,68$ A, $I_3 = \Delta_3 / \Delta = 1506 / -2135 = -0,705$ A.

6. Kadangi I_3 gauta neigiama, tikroji jos kryptis yra priešinga pasirinktajai. 1.33 pav., c, ją nubraukiame ir pažymime tikrąją. Matome, kad šaltiniai E_1 ir E_3 dirba generatorių režimu, tiekdami elektros energiją grandinei. Šaltinis E_2 dirba imtuvo režimu ir elektros energiją vartoja, nes srovės I_3 ir E_2 kryptys yra priešingos.

7. Srovės supaprastintoje grandinės dalyje skaičiuojamos pasitelkus Omo dėsnį:

$$U_s = R_{3a} I_1 = 10 \cdot 0,972 = 9,72 \text{ V}; \quad I_6 = U_s / R_6 = 9,72 / 30 = 0,324 \text{ A};$$

$$I_8 = U_s / R_8 = 9,72 / 15 = 0,648 \text{ A}.$$

8. Patikriname galios balansą. Skaičiuodami šaltinių galią, antrojo šaltinio galią laikome neigiama:

$$\Sigma P_s = E_1 I_1 - E_2 I_3 + E_3 I_3 = E_1 I_1 + (E_1 - E_2) I_3 =$$

$$= 60 \cdot 0,972 + (48 - 6) \cdot 0,705 = 87,93 \text{ W.}$$

Imtuvų galia ir šaltinių nuostolių galia:

$$\Sigma P + \Sigma P_d = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2 + R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 + R_{11} I_{11}^2 +$$

$$+ R_{12} I_{12}^2 + R_{13} I_{13}^2 = (R_1 + R_{11}) I_1^2 + R_2 I_2^2 + (R_3 + R_4 + R_{12} + R_{13}) I_3^2 +$$

$$+ R_5 I_5^2 + R_6 I_6^2 = (30 + 1) 0,972^2 + 12 \cdot 1,68^2 +$$

$$+ (16 + 14 + 0,5 + 0,5) 0,705^2 = 88,02 \text{ W.}$$

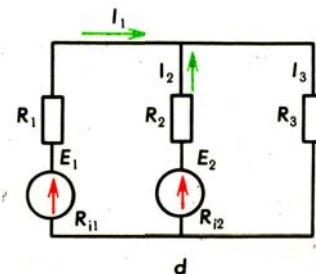
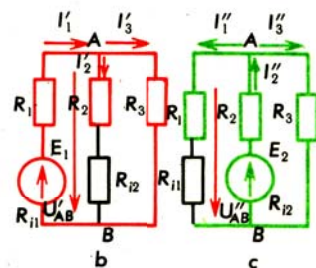
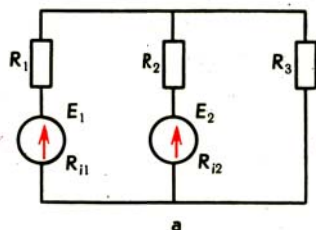
Galios balanso paklaida:

$$\frac{(88,02 - 87,93)}{87,93} \cdot 100 = 0,1 \text{ \%}.$$

1.6.2. Superpozicijos principas ir metodas. Superpozicijos principas galioja įvairioms tiesinėms fizikinėms sistemoms: jei sistemą veikia keli nepriklausomi faktoriai, tai šio poveikio rezultatas yra lygus visų faktorių poveikių rezultatų sumai. Juo naudojamas įvairiose technikos srityse: mechanikoje – kūną veikiančias kelias jėgas galima pakeisti viena atstojamąja, šviesos technikoje – paviršiaus apšvietumas skaičiuojamas sumuojant kiekvieno šviesos šaltinio poveikį, ir panašiai.

Superpozicijos principas galioja ir elektrinėms grandinėms: kiekvienos šakos srovė yra lygi algebrinei sumai dalinių srovių, kurias sukuria kiekvienas grandinės šaltinis toje šakoje. Šiuo principu pagrįstas superpozicijos metodas tiesinėms sudėtingosioms elektrinėms grandinėms tirti. Tyrimo nuoseklumas paprastai yra šitoks:

1. Grandinėje paliekamas vienas šaltinis, o kiti pakeičiami rezistoriais, kurių varžos lygios pašalintųjų šaltinių vidinėms varžoms. Pažymimos visų grandinės srovių, kurias sukuria paliktasis šaltinis, tikrosios kryptys. Tos dalinės srovės apskaičiuojamos.
2. Palikus kitą šaltinį, o vietoj likusių – rezistorius, vėl apskaičiuojamos visų šakų dalinės srovės, kurias sukuria kitas paliktasis šaltinis. Grandinė tiriama tiek kartų, kiek joje yra šaltinių, kol apskaičiuojamos visos dalinės šakų srovės, kurias sukuria kiekvienas šaltinis atskirai.
3. Tikrosios grandinės srovės ir jų kryptys gaunamos, algebriskai sumuojant kiekvieno šaltinio sukurtąsias dalines sroves.



1.34 pav. Superpozicijos metodu tiriamos grandinės schemos: a – pradinė; b ir c – kai palikta tik po vieną šaltinį; d – su pažymėtomis tikrosiomis srovių kryptimis

Superpozicijos metodas labai vaizdus, bet gana ribotas. Juo vartoti tik tuo atveju, kai šaltinių yra nedaug ir pakeistas grandinės (su kiekvienu šaltiniu atskirai) galima tirti ekvivalentinio keitimo metodu. Be to, skaičiuojant gali susidaryti gana didelės paklaidos, jei kurioje nors šakoje šaltiniai sukuria priešingos krypties, bet panašaus stiprumo dalines sroves.

1.14 pavyzdys. Akumulatoriaus (1.34 pav., a) $E_1=12\text{ V}$, $R_{11} = 0,02\ \Omega$. Generatoriaus $E_2=12,5\text{ V}$ ir $R_{12}=0,07\ \Omega$. Laidais, kurių varžos $R_1=0,08\ \Omega$ ir $R_2=0,23\ \Omega$, jie sujungti su imtuvu, kurio varža $R_3=4\ \Omega$. Apskaičiuokime srovės visose šakose. Nustatykite, ar akumulatoriaus įkraunamas, ar iškraunamas.

Sprendimas. 1. Grandinėje (1.34 pav., b) paliekame tik akumuliatorių, o vietoj generatoriaus – rezistorių R_{12} . Šios grandinės dalinių srovių I_1' , I_2' ir I_3' kryptys priklauso tik nuo paliktosios EVJ E_1 krypties. Pirmiausia reikia pažymėti srovę toje šakoje, kurioje yra šaltinis (jos kryptis visada bus tokia kaip EVJ), o vėliau paskirstyti ją į kitas lygiagrečias šakas. Ekvivalentinio keitimo metodu apskaičiuojame visas sroves:

$$R'_s = R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_{12})}{R_2 + R_3 + R_{12}} = 0,08 + \frac{4,0(0,23 + 0,07)}{4,0 + 0,23 + 0,07} = 0,359\ \Omega;$$

$$I_1' = E_1 / (R'_s + R_{11}) = 12 / (0,359 + 0,02) = 31,7\ \text{A};$$

$$U'_{AB} = E_1 - (R_1 + R_{11}) I_1' = 12 - (0,08 + 0,02) \cdot 31,7 = 8,83\ \text{V};$$

$$I_2' = U'_{AB} / (R_2 + R_{12}) = 8,83 / (0,23 + 0,07) = 29,4\ \text{A};$$

$$I_3' = U'_{AB} / R_3 = 8,83 / 4,0 = 2,21\ \text{A}.$$

2. Paliekame grandinėje tik generatorių, o vietoj akumulatoriaus – rezistorių R_{11} (1.34 pav., c). Sužymime dalinių srovių kryptis ir jas apskaičiuojame:

$$R''_s = R_2 + \frac{R_3(R_1 + R_{11})}{R_3 + R_1 + R_{11}} = 0,23 + \frac{4,0(0,08 + 0,02)}{4,0 + 0,08 + 0,02} = 0,328\ \Omega;$$

$$I_2'' = E_2 / (R''_s + R_{12}) = 12,5 / (0,328 + 0,07) = 31,4\ \text{A};$$

$$U''_{AB} = E_2 - (R_2 + R_{12}) I_2'' = 12,5 - (0,23 + 0,07) \cdot 31,4 = 3,07\ \text{V};$$

$$I_1'' = U''_{AB} / (R_1 + R_{11}) = 3,07 / (0,08 + 0,02) = 30,7\ \text{A};$$

$$I_3'' = U''_{AB} / R_3 = 3,07 / 4,0 = 0,767\ \text{A}.$$

3. Tikrąsias šakų sroves apskaičiuojame, algebriskai sudėdami dalines sroves. Jei dalinių srovių kryptys priešingos, tikroji srovės kryptis bus tokia, kokia yra didesnėsios (1.34 pav., d). Todėl didesnės vertės dalinę srovę laikysime teigiama, o mažesnės – neigiamą: $I_1 = I_1' - I_1'' = 31,7 - 30,7 = 1,0\ \text{A}$, $I_2 = I_2' - I_2'' = 31,4 - 29,4 = 2,0\ \text{A}$, $I_3 = I_3' + I_3'' = 2,21 + 0,767 = 2,98\ \text{A}$.

Kaip matome, srovė I_1 teka akumulatoriumi jo EVJ kryptimi, todėl jis kartu su generatoriumi tiekia energiją imtuvui ir išsikrauna.

4. Patikriname galios balansą.

$$\Sigma P_s = E_1 I_1 + E_2 I_2 = 12 \cdot 1,0 + 12,5 \cdot 2,0 = 37,0\ \text{W}.$$

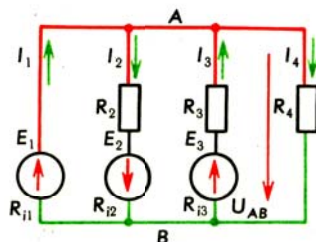
$$\Sigma P + \Sigma P_d = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + R_{11} I_1^2 + R_{12} I_2^2 =$$

$$= (R_1 + R_{11}) I_1^2 + (R_2 + R_{12}) I_2^2 + R_3 I_3^2 =$$

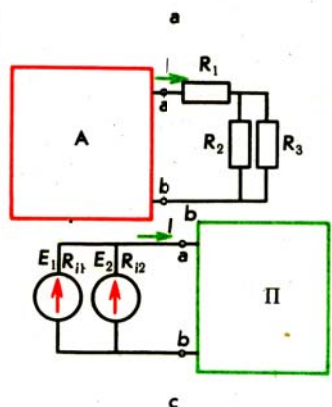
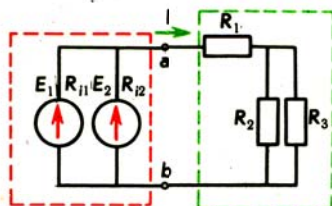
$$= (0,08 + 0,02) \cdot 1,0^2 + (0,23 + 0,07) \cdot 2,0^2 + 4,0 \cdot 2,98^2 = 36,82\ \text{W}.$$

Paklaida:

$$\frac{37,0 - 36,82}{36,82} \cdot 100 \approx 0,5\ \%.$$



1.35 pav. Mazgų įtampos metodu tiriamos grandinės schema



1.36 pav. Visos grandinės schema (a): pakeitus jos dalį aktyvuoju (b) ir pasyviuoju (c) dvipoliu

1.6.3. Mazgų įtampos metodas. Jį labai patogu taikyti, kai tiriama sudėtingoji grandinė iš daugelio šakų, sujungtų dviejuose mazguose. Pradžioje apskaičiuojama įtampa tarp tų dviejų mazgų, po to – srovės atskirose šakose.

Kad galėtume parašyti išraišką tai įtampai apskaičiuoti, pasirinkime grandinę (1.35 pav.), kurią sudaro keturios šakos, lygiagrečiai sujungtos tarp mazgų A ir B . Tarkime, kad mazgo A potencialas teigiamas, o mazgo B – neigiamas, ir pažymėkime pasirinktą teigiamą įtampą U_{AB} kryptį. Tokiu atveju tose šakose, kuriose nėra šaltinių, teigiamos srovių kryptys bus iš A į B (pvz., I_4). Tose šakose, kuriose yra šaltiniai, srovės gali tekėti ir viena, ir kita kryptimi. Tarkime, kad visi šaltiniai energiją atiduoda, todėl pažymėkime srovių kryptis tokias, kokios yra tų šakų EVJ kryptys. Pasirinkdami paeilui kiekvienos šakos kontūrus kartu su paskutiniąja, parašykime lygtis pagal II-ąjį Kirchhofo dėsnį trims kontūrams. Įrašę $R_4 I_4 = U_{AB}$ į tris parašytas lygtis, visas keturias grandinės sroves galime išreikšti šitai:

$$\begin{aligned} I_1 &= (E_1 - U_{AB})/R_{11} = G_1 (E_1 - U_{AB}), \\ I_2 &= (E_2 + U_{AB})/(R_{12} + R_{12}) = G_2 (E_2 + U_{AB}), \\ I_3 &= (E_3 - U_{AB})/(R_3 + R_{13}) = G_3 (E_3 - U_{AB}), \\ I_4 &= U_{AB}/R_4 = G_4 U_{AB}; \end{aligned} \quad (1.53)$$

čia G_1, G_2, G_3, G_4 – kiekvienos šakos laidumas.

(1.53) lygbes būtų galima taikyti srovėms apskaičiuoti, jei būtų žinoma įtampa U_{AB} . Jei ji nežinoma, reikia parašyti lygtį jai apskaičiuoti. Tuo tikslu parašykime lygtį pagal I Kirchhofo dėsnį, pavyzdžiui, mazgui B (žr. 1.35 pav.):

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0.$$

Iš (1.53) įrašę srovių vertes, gauname:

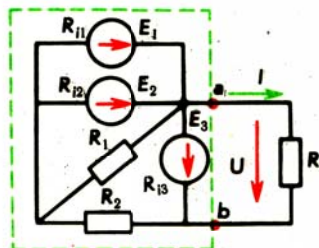
$$U_{AB} = (G_1 E_1 - G_2 E_2 + G_3 E_3) / (G_1 + G_2 + G_3 + G_4).$$

Bendruoju atveju mazgų įtampa skaičiuojama šitai:

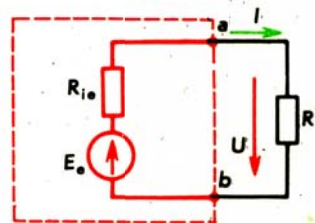
$$U_{AB} = \sum GE / \sum G. \quad (1.54)$$

Įtampa tarp dviejų grandinės mazgų skaičiuojama dalijant šakų laidumų ir EVJ sandaugų algebrinę sumą iš visų šakų laidumų sumos. Skaitiklyje sandauga rašoma neigiama, jei EVJ nukreipta iš mazgo, kurio pasirinktas potencialas aukštesnis, į žemesnio potencialo mazgą. Gautas neigiamas atsakymas rodo, kad tikroji mazgų įtampos kryptis yra priešinga pasirinktajai.

Jei reikia apskaičiuoti grandinės sroves, tai iš (1.54) lygbes apskaičiuotos įtampos vertė su jos ženklu įrašoma į (1.53) išraiškas. Srovės kryptis priešinga pasirinktajai, jei atsakymas neigiamas.



a



b

1.37 pav. Sudėtingosios grandinės schemos: a – pradinė; b – pakeitus dalį grandinės ekvivalentiniu šaltiniu

1.6.4. Ekvivalentinio šaltinio metodas. Jis dar vadinamas ekvivalentinio generatoriaus metodu. Šis metodas taikomas, kai reikia apskaičiuoti sudėtingosios grandinės tik vienos šakos (imtuvo) srovę ar įtampą. Tiriama šaka išskiriama, o visa likusioji grandinės dalis pakeičiama ekvivalentiniu šaltiniu – aktyviuoju dvipoliu.

Dvipoliu vadinama elektrinės grandinės dalis, turinti du išvadus. Kai grandinės dalyje yra šaltinių, ji laikoma aktyviuoju dvipoliu. Kai grandinės dalis sudaryta tik iš imtuvų, ji laikoma pasyviuoju dvipoliu (1.36 pav.). Dvipolio parametrai turi būti tokie, kad prie jo prijungtos likusios grandinės dalies elementų darbo režimai būtų tokie pat kaip iki pakeitimo.

Tarkime, kad reikia apskaičiuoti grandinės (1.37 pav.) imtuvo R srovę. Visa grandinė, išskyrus šaką su imtuvu R , pakeičiama ekvivalentiniu šaltiniu, kurio ekvivalentinė EVJ yra E_e , o ekvivalentinė vidinė varža – R_{ie} . Srovė skaičiuojama pagal Omo dėsnį:

$$I = E_e / (R + R_{ie}). \quad (1.55)$$

Ekvivalentinio šaltinio parametrai apskaičiuojami šitaip.

1. Ekvivalentinio (kaip ir kiekvieno) šaltinio EVJ yra lygi jo tuščiosios eigos įtampa: kai $I=0$, $E_e = U_0$. Ją ir reikia apskaičiuoti, įsivaizduojant, kad nuo aktyviojo dvipolio šaka $a-b$ atjungta.

2. Ekvivalentinio šaltinio vidinė varža yra lygi aktyviojo dvipolio vidinei varžai. Ją galima apskaičiuoti pavertus aktyvųjų dvipolį pasyviuoju, t. y. visus šaltinius pakeitus rezistoriais, kurių varžos lygios šaltinių vidinėms varžoms. Tai yra tiriamosios grandinės varža jos gnybtų $a-b$ atžvilgiu, kai šaka $a-b$ atjungta.

1.15 pavyzdys. Tiltelių sujungtos grandinės (1.38 pav., a) imtuvų varžos: $R_1=10\ \Omega$, $R_2=20\ \Omega$, $R_3=30\ \Omega$, $R_4=40\ \Omega$. Tiltelio įstrižainės įjungti šaltiniai: $E_1=36\ \text{V}$, $E_2=24\ \text{V}$; $R_{11}=R_{12}=0$. Apskaičiuokime imtuvo R srovę.

Sprendimas. Ekvivalentinio šaltinio tuščiosios eigos įtampa U_0 apskaičiuoti atjungiamas imtuvas R . Tokioje grandinėje (1.38 pav., b) srovės I_1' ir I_2' tekės tik dėl šaltinio E_1 , nes E_2 yra nutrauktoje šakoje. Spėtinai pažymime U_0 kryptį iš a į b ir rašome lygtį pagal II Kirchhofo dėsnį viršutiniam kontūriui:

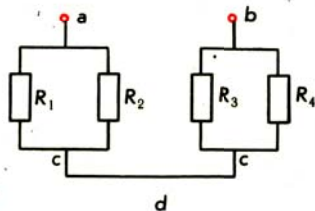
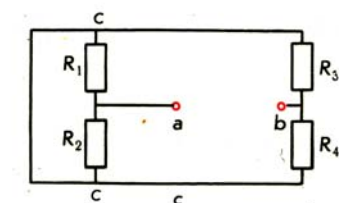
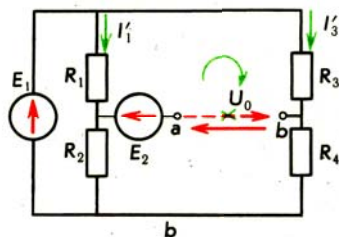
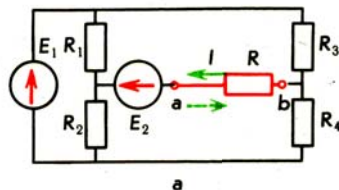
$$-R_1 I_1' + R_3 I_2' - U_0 = E_2.$$

Iš čia

$$U_0 = -E_2 - R_1 I_1' + R_3 I_2'.$$

Kadangi $R_{11}=0$, tai srovės šakose: $I_1' = E_1 / (R_1 + R_2) = 36 / (10 + 20) = 1,2\ \text{A}$; $I_2' = E_1 / (R_3 + R_4) = 36 / (30 + 40) = 0,514\ \text{A}$.

Irašę srovių vertes, gauname: $U_0 = -24 - 10 \cdot 1,2 + 30 \cdot 0,514 = -20,6\ \text{V}$. Gautas neigiamas ženklas rodo, kad tikroji įtampa U_0 ir skaičiuojamosios srovės I kryptis yra iš b į a .



1.38 pav. Ekvivalentinio šaltinio metodu tiriamos grandinės schemos: a – pradinė; b – tuščiosios eigos įtampa skaičiuoti; c ir d – vidinei varžai skaičiuoti

Norėdami apskaičiuoti ekvivalentinio šaltinio vidinę varžą R_{ie} , pakeiskime abu šaltinius laidais, nes $R_{11} = R_{12} = 0$ (1.38 pav., c) ir perbraižykime schemą taip, kad būtų lengviau atpažinti jos elementų sujungimo būdą (1.38 pav., d).

$$R_{ab} = R_{ie} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20} + \frac{30 \cdot 40}{30 + 40} = 23,8 \, \Omega.$$

Imtuvu R tekanti srovė $I = E_e / (R_{ie} + R) = 20,6 / (23,8 + 10) = 0,609 \, \text{A}$. Ji nukreipta iš b į a.

1.7

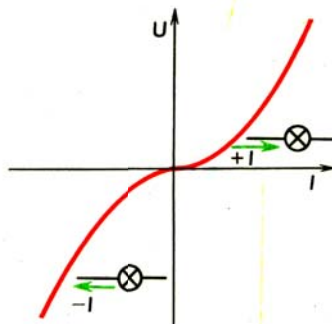
Netiesinės elektrinės grandinės

1.7.1. Netiesiniai elementai. Visi anksčiau išnagrinėti paprastųjų ir sudėtingųjų grandinių tyrimo metodai sėkmingai taikomi tiesinėms grandinėms tirti. Tiesiniams elementams galioja Omo dėsnio (1.7)–(1.9) išraiškos, jų parametrai (R , R_l , E) pastovūs, voltamperinės charakteristikos yra tiesės (žr. 1.8 ir 1.11 pav.).

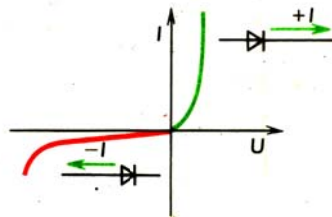
Praktikoje gausu netiesinių imtuvų, kurių varža priklauso nuo srovės ir įtampos ar jų krypties. Jų voltamperinės charakteristikos yra netiesinės. Pavyzdžiui, kaitinamosios lempos varža priklauso nuo volframo siūlelio temperatūros, o ši – nuo lempos tekančios srovės. Kadangi siūlelis įkaista tiek pat, kai lempa teka arba vienos, arba kitos krypties tokio pat stiprumo srovė, tai voltamperinė charakteristika (1.39 pav.) yra simetriška koordinačių pradžios atžvilgiu. Elektronikoje naudojami netiesiniai elementai (pvz., diodai), kurių varža, tekant jais srovei viena ar kita kryptimi, yra skirtinga (1.40 pav.). Netiesinio elemento voltamperinė charakteristika gali turėti tiesinę horizontalią arba vertikalią dalį (1.41 pav.). Tokių elementą galima naudoti įtampai arba srovei stabilizuoti.

Kai kurie netiesiniai elementai apibūdinami visa voltamperinių (ar ampervoltinių) charakteristikų šeima (1.42 pav.). Tai būdinga valdomiesiems elementams, pavyzdžiui, tranzistoriams, kurių ampervoltinės charakteristikos gali būti pakeistos keičiant valdymo elektrodo potencialą. Yra netiesinių elementų, kurių valdymo signalas gali būti ne elektrinis, bet kitoks fizikinis poveikis: temperatūra – termorezistoriams, šviesa – fotorezistoriams, mechaninis įtempimas – tenzometriniais elementams ir pan.

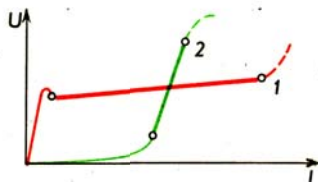
Jei grandinėje yra nors vienas netiesinis elementas, tokia grandinė yra netiesinė. Netiesinių grandinių tyrimas sudėtingesnis nei tiesinių, ir dažnai tenka pasitenkinti mažiau tiksliais grafiniais tyrimo metodais.



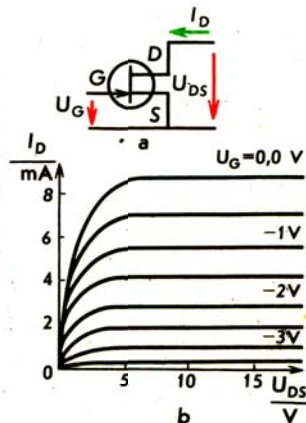
1.39 pav.



1.40 pav.



1.41 pav.



1.42 pav.

1.7.2. Statinė ir diferencialinė varža. Statinė varža yra įtampos ir srovės santykis:

$$R_s = U/I. \quad (1.56)$$

Pavyzdžiui, kai netiesinio imtuvo režimą apibūdina charakteristikos taškas A (1.43 pav.), statinę imtuvo varžą galime apskaičiuoti šitaip: $R_{sA} = U_A/I_A = (m_U \cdot \vec{Oa}) / (m_I \cdot \vec{Ob}) = m_R \cdot \text{tg} \alpha_A$; čia m_U , m_I ir m_R – įtampos, srovės ir varžos mastelis, α_A – kampas tarp tiesės OA ir srovės ašies. **Diferencialinė varža yra įtampos išvestinė srovės atžvilgiu:**

$$R_d = dU/dI. \quad (1.57)$$

Pavyzdžiui, to paties imtuvo (žr. 1.43 pav.) $R_{dA} = m_R \cdot \text{tg} \beta_A$; čia β_A – kampas tarp charakteristikos taško A liestinės ir srovės ašies. Praktiniams tikslams diferencialinę varžą galima apskaičiuoti apytiksliai šitaip: $R_d \approx \Delta U / \Delta I$.

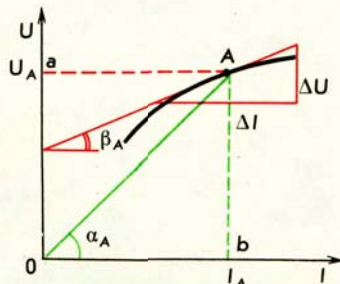
1.7.3. Charakteristikų sukirtimo metodas. Tai grafinis tyrimo metodas, kurį patogu taikyti, kai reikia sužinoti netiesinio imtuvo srovę ir įtampą.

Tarkime, kad prie šaltinio, turinčio EVJ lygią E ir vidinę varžą R_i , prijungtas netiesinis imtuvas, kurio voltamperinė charakteristika $U=f(I)$ žinoma. Reikia sužinoti netiesinės grandinės (1.44 pav., a) srovę I , šaltinio (ir imtuvo) įtampą U bei įtampos kritimą dėl šaltinio vidinės varžos $R_i I$.

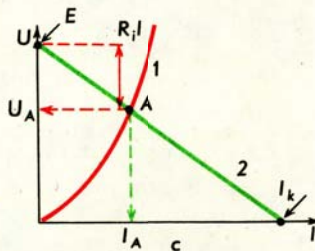
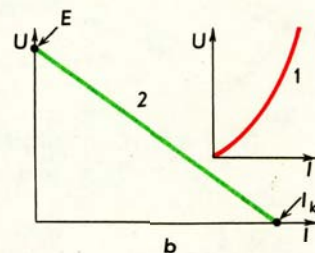
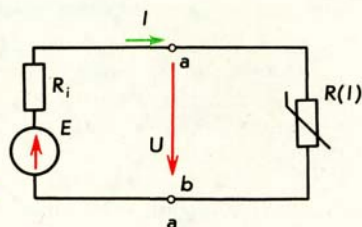
Uždaviniui spręsti parašome dvi lygtis pagal Omo dėsnį: 1) išorinei grandinei (į dešinę nuo gnybtų $a-b$) ir 2) visai grandinei. Jeigu imtuvas būtų tiesinis, pirmoji lygybė būtų tiesės lygtis: $U=RI$. Netiesiniam imtuvui tai netiesinė priklausomybė $U=f(I)$. Pagal Omo dėsnį galime užrašyti šaltinio išorinę charakteristiką: $U=E-R_i I$. Gavome dvių lygčių sistemą:

$$\begin{cases} (1) & U=f(I), \\ (2) & U=E-R_i I. \end{cases} \quad (1.58)$$

Dažniausiai ši lygčių sistema sprendžiama grafiškai, nes realių netiesinių imtuvų voltamperinės charakteristikos paprastai gaunamos eksperimentiškai ir žinomos įvairių kreivių pavidalu. Dėl to šias abi lygtis pavaizduojame grafiškai (1.44 pav., b). Šaltinio išorinė charakteristika (2) yra nuolaidi tiesė, kurią nesunku nubraižyti per du būdinguosius taškus: tuščiosios eigos ($I=0$; $U_0=E$) ir trumpojo jungimo ($U=0$; $I_k=E/R_i$). Šių dviejų charakte-



1.43 pav. Statinės ir diferencialinės varžos išraiškų iliustracija



1.44 pav. Netiesinės grandinės, tiriamos charakteristikų sukirtimo metodu, schema (a); imtuvo (I) ir šaltinio (2) voltamperinės charakteristikos ir grafinis lygčių sistemos sprendimas (c)

ristikų sankirtos A koordinatės (I_A , U_A) ir yra grafiniai (1.58) lygčių sistemos sprendiniai. $R_1 I = E - U$, todėl jo didumą taip pat galima atskaityti brėžinyje.

Praktikoje dažni atvejai, kai nuosekliai su netiesiniu imtuvu sujungtas tiesinis (pavyzdžiui, kai tenka įvertinti suvirinimo grandinės laidų varžą ar pan.). Tiesinio imtuvo varža dirbtinai priskiriama šaltiniui, kurio vidinė varža apskaičiuojama, sudedant jo tikrąją vidinę varžą su tiesinio imtuvo varža.

1. 16 pavyzdys. Prie tinklo, kurio įtampa $U_s = 110$ V, prijungta dujinio išlydžio lempa, sujungta nuosekliai su rezistoriumi $R = 150 \Omega$. Žinoma lempos voltamperinė charakteristika $U_l = f(I)$. Apskaičiuokime lempa tekančią srovę I ir lempos įtampą U_l .

Sprendimas. Pradžioje šios grandinės schemą pakeičiame atstojamąja (1.45 pav., a ir b). Nubraižome lempos $U_l = f(I)$ (1.45 pav., c , 1 kreivė). Šaltinio voltamperinei charakteristikai nubraižyti apskaičiuojame jo tuščiosios eigos ir trumpojo jungimo sroves bei įtampas: 1) $I = 0$, $U_0 = E = 110$ V; 2) $I_k = E/(R_1 + R) = 110/(0 + 150) = 0,73$ A, $U = 0$. Šių taškų koordinatės sujungiame 2 tiese. Lempos voltamperinės charakteristikos sankirtos su šia tiese koordinatės yra lempos darbo režimo parametrai: $I = 0,4$ A, $U_l = 57$ V.

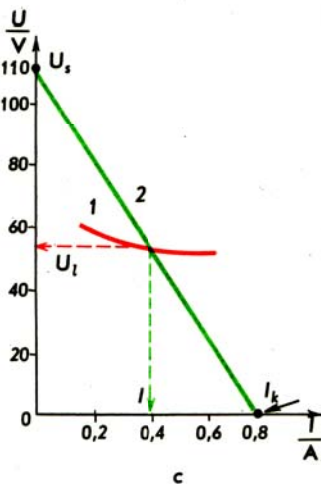
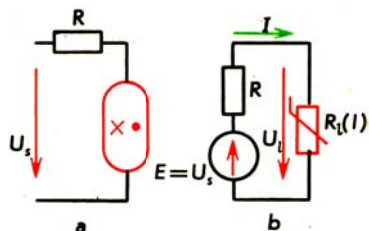
Kai sudėtingojoje grandinėje visi imtuvai tiesiniai, išskyrus vieną, ir reikia sužinoti to netiesinio imtuvo darbo režimą, kartu su charakteristikų sukirtimo metodu patogiu taikyti ekvivalentinio šaltinio metodą. Tuomet visa sudėtingoji grandinė, išskyrus netiesinį imtuvą, pakeičiama ekvivalentiniu šaltiniu (1.46 pav., a), ir apskaičiuojamos jo E_e ir R_{1e} . Naujoji grandinė, kurią sudaro ekvivalentinis šaltinis ir netiesinis imtuvas, toliau tirama charakteristikų sukirtimo metodu (1.46 pav., b).

Tokie uždaviniai dažni, matuojant įvairius neelektrinius dydžius (temperatūrą, slėgį, šviesos srautą ir pan.), kai netiesinis matavimo elementas įjungiamas į tilteliu sujungtą grandinę.

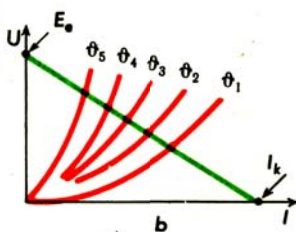
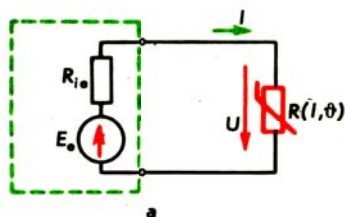
1.7.4 Charakteristikų sumavimo metodas. Savo esme tai grafinis ekvivalentinio keitimo metodas, kai nuosekliai ir lygiagrečiai sujungti netiesiniai imtuvai pakeičiami vienu ekvivalentiniu. Jo voltamperinė charakteristika gaunama grafiškai.

Praktikoje dažnai sutinkamos grandinės, kuriose tiesiniai ir netiesiniai imtuvai sujungti nuosekliai. Tarkime, kad yra žinoma grandinės (1.47 pav., a) tiesinio imtuvo varža R_1 ir netiesinio imtuvo voltamperinė charakteristika $U_2 = f_2(I)$ kreivė (iš eksperimento duomenų, žinytų, katalogų ir pan.). Pakeiskime abu imtuvus ekvivalentiniu netiesiniu imtuvu (1.47 pav., b). Jo voltamperinė charakteristika $U = f(I)$ turi būti tokia, kad jo srovė I ir įtampa U būtų tokios pat kaip tiriamosios grandinės.

Nubraižome abiejų elementų voltamperines charakteristikas (1.47 pav., c). Imtuvo R_1 charakteristika $U_1 = f(I)$ yra tiesė (1), einanti per koordinatinių ašių susikirtimo tašką ir sudaranti su abscisų ašimi



1.45 pav.



1.46 pav.

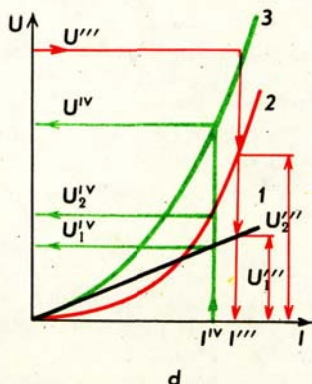
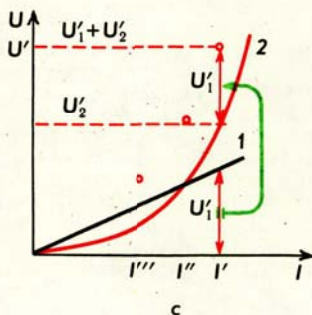
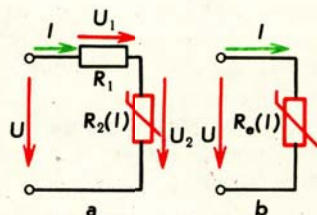
kampą, kurio $\operatorname{tg} \alpha = U_1/I = m_{R_1}$. Pagal II Kirchhofo dėsnį tiriamosios grandinės $U = U_1 + U_2$. Grafiškai sudedame abiejų imtuvų įtampas, pasirinkdami vieną po kitos srovės vertes: pvz., I' : $U' = U_1' + U_2'$; I'' : $U'' = U_1'' + U_2''$ ir t. t. Kuo daugiau srovės verčių parinksime, tuo daugiau gausime naujosios charakteristikos (3) taškų, tuo tiksliau galėsime ją nubraižyti.

Turėdami visas tris kreives, galime spręsti įvairius tokios netiesinės grandinės tyrimo uždavinius. Pavyzdžiui, žinodami įtampas U vertę, galime pasakyti, kokia srovė I ir kiekvieno imtuvo įtampas U_1 ir U_2 vertė. Žinodami grandinę tekančią srovę I , galime pasakyti, kokios yra įtampas U , U_1 , U_2 vertės ir pan.

Kai nuosekliai sujungti keli netiesiniai imtuvai, analogiškai gaunama viena ekvivalentinio netiesinio imtuvo voltamperinė charakteristika.

Lygiagrečiai sujungtą netiesinį ir tiesinį imtuvą galima pakeisti vienu ekvivalentiniu (1.48 pav.). Nubraižome abiejų imtuvų charakteristikas: $U = R_1 I_1$ ir $U = f(I_2)$. Jas sumuojame grafiškai (1.48 pav., c), taikydami I Kirchhofo dėsnį – sudedame abiejų charakteristikų absceses (srovės vertes), esant tai pačiai įtampai. Gautoji suminė kreivė (žr. 1.48 pav., d) yra ekvivalentinio imtuvo voltamperinė charakteristika. Panašiai keli lygiagrečiai sujungti netiesiniai imtuvai pakeičiami vienu ekvivalentiniu.

Kai imtuvai yra sujungti **mšriai**, netiesinė grandinė supaprastinama, palaipsniui keičiant nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtus netiesinius imtuvus jiems ekvivalentiniais (1.49 pav.). Jų voltamperinės charakteristikos sumuojamos tol, kol gaunama viena ekvivalentinio netiesinio imtuvo charakteristika.



Kontroliniai klausimai ir užduotys

1.1. Paašškinkite, kas tai yra:

- elektros srovė, nuolatinė srovė;
- elektrinė varža, elektrinis laidumas;
- vidinė varža; statinė, diferencialinė varža;
- elektros energijos šaltinis, imtuvas;
- tiesinis, netiesinis imtuvas;
- paprasta, sudėtinga elektrinė grandinė;
- grandinės mazgas, šaka, kontūras;
- aktyvusis, pasyvusis dvipolis.

1.2. Kokia grandine gali tekėti elektros srovė?

1.3. Nubraižykite įvairių elektros energijos šaltinių sutartinius ženklus. Greta užrašykite svarbiausius šaltinių elektrinius parametrus.

1.4. Kokie reiškiniai vyksta elektros energijos imtuvuose? Ar gali būti imtuvai, kuriuose veikia EVJ?

1.5. Kokia srovės, įtampas ir EVJ kryptis yra sutartinė? Nubraižykite elementariosios elektrinės grandinės schemą ir joje sužymėkite šių dydžių sutartines kryptis.

1.6. Nubraižykite šaltinio ir imtuvo, kuriame veikia EVJ, sutartinius ženklus. Pažymėkite jų sutartines EVJ ir srovės kryptis. Kaip elektrinėje schemoje atpažinsite šaltinį ir imtuvą pagal jo EVJ ir srovės kryptis?

1.7. Parašykite Omo dėsnį grandinės daliai. Kokiai grandinės daliai (turinčiai EVJ ar ne) galima šitaip rašyti?

1.8. Parašykite Omo dėsnį visai elementariajai grandinei.

1.9. Nubraižykite šakotos grandinės ar jos dalies schemą, sužymėkite sutartines elektrinių dydžių kryptis. Užrašykite lygtis pagal I ir II Kirchhofo dėsnius.

1.10. Parašykite formules šaltinio ir imtuvo energijai ir galiai apskaičiuoti.

1.11. Parašykite galios balanso lygtį: a – elementariajai grandinei;

1.47 pav. Nuosekliai sujungtų netiesinių imtuvų (a) keitimas ekvivalentiniu (b) ir jų voltamperinės charakteristikos (c, d)

b – šakotai grandinei, kurioje yra keletas šaltinių ir įvairių (be EVJ ar su ja) imtuvų.

1.12. Kokių atveju grandinė veikia tuščiąja eiga ir kuo ypatingas šis režimas?

1.13. Kaip suprantate šaltinio ir imtuvo vardinį režimą?

1.14. Kokių atveju grandinė veikia trumpojo jungimo režimu ir kuo jis ypatingas? Kaip apskaičiuoti trumpojo jungimo srovę?

1.15. Užrašykite matematiškai ir nubraižykite idealaus ir realaus EVJ šaltinio išorines charakteristikas. Kuo jos skiriasi ir kokią praktinę reikšmę turi tas skirtumas?

1.16. Kaip suprantate šaltinio apkrovos sąvoką? Kaip priklauso realaus EVJ šaltinio įtampa nuo apkrovos ir kodėl?

1.17. Nubraižykite idealaus elektros energijos tinklo išorinę charakteristiką.

1.18. Kaip atpažinti nuosekliai sujungtus grandinės elementus? Parašykite formulę apskaičiuoti nuosekliai sujungtų imtuvų ekvivalentinei varžai.

1.19. Kaip atpažinti lygiagrečiai sujungtus grandinės elementus? Parašykite formules apskaičiuoti lygiagrečiai sujungtų imtuvų ekvivalentiniam laidumui ir ekvivalentinei varžai.

1.20. Parašykite formules grandinės ekvivalentinio imtuvo galiai apskaičiuoti, kai imtuvai sujungti: a – nuosekliai; b – lygiagrečiai; c – mišriai.

1.21. Nubraižykite elektrinę schemą grandinės, kurioje imtuvo srovė reguliuojama reostatu. Koks srovės reguliavimo diapazonas?

1.22. Nubraižykite potenciometro elektrinę schemą. Užrašykite matematiškai ir pavaizduokite grafiškai neapkrauto potenciometro išėjimo įtampas priklausomybę nuo potenciometro išėjimo varžos. Koks išėjimo įtampas reguliavimo diapazonas?

1.23. Ar priklauso potenciometro išėjimo įtampa nuo jo apkrovos? Kodėl?

1.24. Kokios grandinės tiriamos ekvivalentinio keitimo metodu? Kaip tai daroma? Pailiustruokite pavyzdžiu.

1.25. Kokios grandinės tiriamos Kirchhofo dėsnų metodu? Kaip tai daroma? Pailiustruokite pavyzdžiu.

1.26. Kiek tinkamų lygčių galima parašyti tiriamajai grandinei pagal I Kirchhofo dėsnį ir kiek – pagal II Kirchhofo dėsnį?

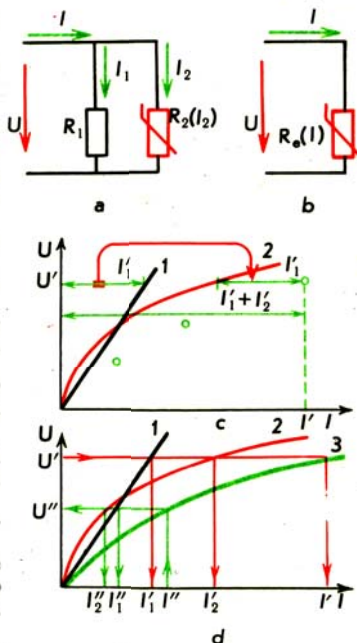
1.27. Kaip aiškinsite rezultatus, jei ištyrę sudėtingą grandinę Kirchhofo dėsnų metodu gavote, kad: a – šakos srovė neigiama; b – šakos EVJ ir srovės kryptys tokios pat; c – šakos EVJ ir srovės kryptys priešingos.

1.28. Kokia superpozicijos principo esmė? Kokioms grandinėms tirti taikomas superpozicijos metodas? Kaip tai daroma? Kokie šio metodo privalumai ir trūkumai? Pailiustruokite pavyzdžiu.

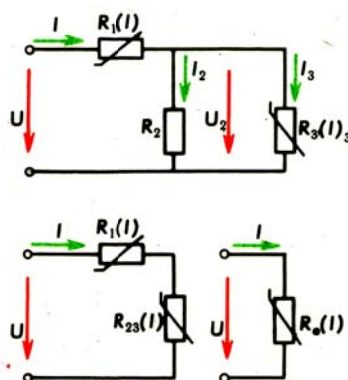
1.29. Kokios grandinės tiriamos ekvivalentinio šaltinio metodu? Kaip tai daroma? Pailiustruokite pavyzdžiu.

1.30. Kokioms grandinėms tirti ir kaip taikomas charakteristikų sukirtimo metodas? Pailiustruokite pavyzdžiu.

1.31. Kokioms grandinėms tirti ir kaip taikomas charakteristikų sumavimo metodas?



1.48 pav. Lygiagrečiai sujungtų netiesinių imtuvų (a) keitimas ekvivalentiniu (b) ir jų voltamperinės charakteristikos (c, d)



1.49 pav. Mišriai sujungtų netiesinių imtuvų grandinė ir jai ekvivalentinis imtuvas