

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Lionginas Liudvinavičius, Leonas Povilas Lingaitis

LOKOMOTYVŲ ELEKTROS PAVARŲ PRATYBŲ DARBAI

Mokomoji knyga



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2012

Lionginas Liudvinavičius, Leonas Povilas Lingaitis. Lokomotyvų elektros pavarų pratybų darbai: mokomoji knyga. 2012. 83 p.
[3,63 aut. l. 2012 04 23]

Mokomojoje knygoje nagrinėjamos šilumvežių, elektrovežių, elektrinių traukinių, metro, tramvajų, troleibusų, hibridinių riedmenų, didelės galios automobilių, laivų elektros pavarų sandara, automatinio valdymo būdai ir techninės priemonės. Pateikiamos naujos kartos lokomotyvų elektros pavaros, kuriose taikomos kompiuterinio valdymo ir diagnostikos sistemos, statiniuose keitikliuose naudojami naujausi elektronikos elementai – IGBT tranzistoriai. Leidinyje ypatingas dėmesys skiriamas automatizuotų sistemų elementams – jutikliams, naujos kartos puslaidininkiams, keitikliams ir kt. Atskirame skyriuje pateikiami lokomotyvų elektros pavarų elementų, kontaktinio tinklo parametrų skaičiavimo uždaviniai.

Mokomoji knyga skirta VGTU transporto inžinerijos fakulteto studentams. Ja galės naudotis ir kitų universitetų bei kolegijų studentai, specialistai, tobulinantys žinias transporto inžinerijos srityje. Ji bus naudinga geležinkelių transporto riedmenų eksploatacijos ir remonto specialistams.

Pastabas ir siūlymus prašome siųsti adresu: Geležinkelių transporto katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, J. Basanavičiaus g. 28, LT-03227 Vilnius arba elektroniniu paštu *liong@vgtu.lt*.

Leidinį rekomendavo VGTU Transporto inžinerijos fakulteto studijų komitetas

Recenzantai: doc. dr. Dainius Udris, VGTU Automatikos katedra
doc. dr. Gediminas Vaičiūnas, VGTU Geležinkelių
transporto katedra

VGTU leidyklos TECHNIKA 1309-S mokomosios
metodinės literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

Redaktorė *Rita Malikėnienė*
Maketavo *Audronė Gurklienė*

Išleido UAB „Ciklonas“
Vilniaus Gedimino technikos universiteto užsakymu

ISBN 978-609-457-182-4
doi:10.3846/1309-S

© Lionginas Liudvinavičius, 2012
© Leonas Povilas Lingaitis, 2012
© VGTU leidykla TECHNIKA, 2012

TURINYS

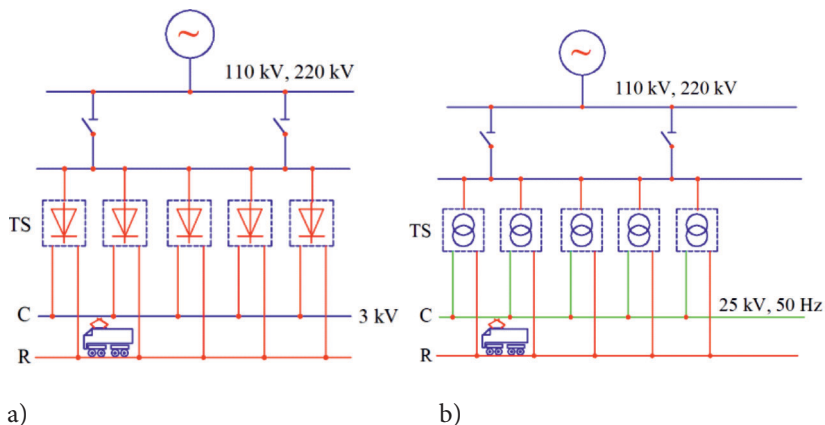
Įvadas	4
1. Geležinkelių elektrifikacijos ir elektrinės traukos sistemos	5
2. Lokomotyvų elektrinė galios pavarą.....	8
3. Bendrosios žinios apie elektros mašinas	13
3.1. Nuolatinės srovės traukos elektros mašinos sandara ir veikimo principas	14
3.2. Nuolatinės srovės traukos varikliai ir generatoriai.....	15
3.3. Nuolatinės srovės traukos generatorių žadinimo sistemos.....	19
4. Trifazė lokomotyvų sistema	23
4.1. Sinchroninės mašinos sandara ir veikimo principas	23
4.2. Trifaziai sinchroniniai traukos generatoriai ir jų charakteristikos	30
4.3. Traukos generatorių žadinimo srauto valdymo būdai.....	33
4.4. AC/AC srovės sistemos šilumvežių dažninės elektros pavaros	34
4.5. Trifaziai asinchroniniai traukos varikliai	38
4.6. Asinchroninio traukos variklio darbo režimai	39
4.7. Asinchroninio traukos variklio greičio reguliavimo būdai.....	42
4.8. Traukos keitiklių sandaros schemos	44
5. Lokomotyvų elektros pavarų pratybų uždaviniai	48
5.1. Nuolatinės ir kintamosios srovės grandinės	48
5.2. Lokomotyvų elektros pavarų grandinės elementų skaičiavimai	62
Literatūra	79

IVADAS

Lokomotyvų elektros pavaros – tai sudėtingos sistemos, kuriose naudojamos visos šiuo metu žinomos elektros mašinos, puslaidininkiniai keitikliai, įvairūs elektros aparatai. Perduodant dyzelinio variklio galią į aširačius, panaudojus elektros pavarą, galima sukurti traukos charakteristiką, kuri visiškai atitinka teorinius traukos riedmenų reikalavimus. Sprendžiant šiuos elektros pavaros uždavinius, tenka dirbtinai keisti natūraliąsias nuolatinės ir kintamosios srovės traukos generatorių, traukos variklių, papildomų elektros mašinų, puslaidininkinių keitiklių charakteristikas. Tai yra formuoti dirbtines, atitinkamo pobūdžio charakteristikas. Tai pasiekama vadovaujantis elektros mašinų, puslaidininkinių keitiklių, automatinio valdymo teorijos pagrindais sukurtais veikiančiomis sistemomis. *Tai pati sudėtingiausia šiuolaikinio lokomotyvo dalis.* Visa tai iš dalies apsunkina dalyko *Riedmenų elektros įrenginiai* kurso išmokimą, tačiau kartu jis tampa patrauklus ir informatyvus.

1. GELEŽINKELIŲ ELEKTRIFIKACIJOS IR ELEKTRINĖS TRAUKOS SISTEMOS

Elektrinės traukos riedmenys – elektrovežiai, elektriniai traukiniai (angl. *EMU – electric multiple units*) energiją gauna nuo stacionarių elektros stočių. Elektros energija elektros stotyse (atominėse hidroelektrinėse, hidroakumuliacinėse elektrinėse, šiluminėse elektrinėse, vėjo jėgainėse ir kt.) yra trifazės kintamosios srovės 50 Hz dažnio, kurių įtampa – 6–21 kV. Pagrindinė pagamintos elektros energijos dalis per 35, 110, 220, 330, 500, 750 kV ir didesnės įtampos transformatorius rajoniniais tinklais perduodama dideliais atstumais nuo elektros energijos gavybos vietos iki vartotojo. Arti elektros energijos vartotojo įtampa pažeminama iki 220, 110 ar 35 kV. Nuolatinės ir kintamosios srovės elektrinės traukos įrenginiai maitinami nuo energetinių sistemų, kurių 110, 220 kV trifazė 50 Hz įtampa nuolatinės srovės (DC) traukos pastotėse (angl. *DC traction substations*) pažeminama iki 3,3 kV, kintamosios srovės (AC) traukos pastotėse (angl. *AC traction substations*) – iki 27,5 kV. Geležinkelių elektrifikacijos sistema sudaryta iš trijų pagrindinių dalių (žr. 1.2 pav.): I – energetinės sistemos dalis; II – traukos elektros įrenginių dalis; III dalis – elektrinės traukos riedmenys. Į geležinkelių elektrifikacijos sistemą įeina: I – energetinės sistemos dalis (šiluminės elektrinės, hidroelektrinės, atominės elektrinės, rajoninės transformatorinės pastotės, elektros energijos perdavimo oro linijos ir kt.); II – traukos elektros įrenginių dalis, susidedanti iš transformatorinių traukos pastočių ir elektrinės traukos tinklo; III – elektrinės traukos riedmenys. Elektrinės traukos tinklą sudaro kontaktinis ir traukos bėgių tinklas, maitinimo ir grįžtamosios srovės linijos. Struktūrinės nuolatinės ir kintamosios srovės elektrinės traukos įrenginių maitinimo schemas pateiktos 1.1 pav.

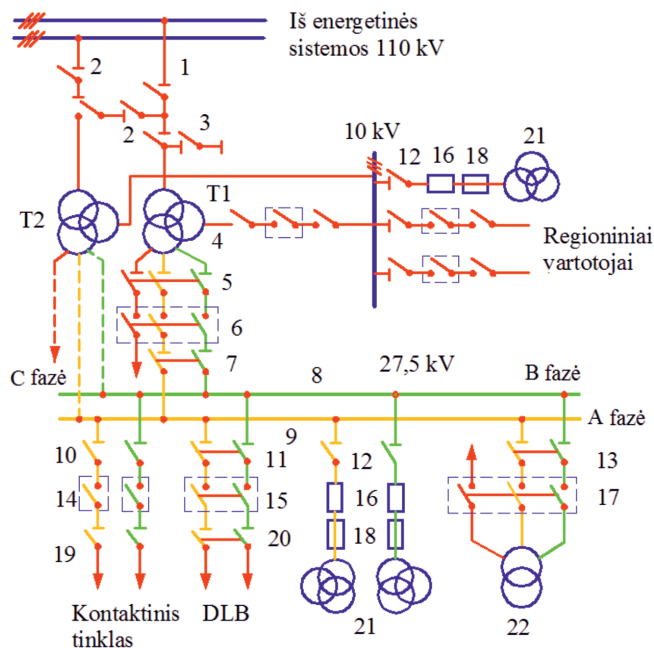


1.1 pav. Struktūrinės nuolatinės (a) ir kintamosios (b) srovės elektrinės traukos įrenginių maitinimo schemas: TS – traukos transformatorinė pastotė; C – kontaktinio tinklo maitinimo linija; R – traukos bėgių tinklas

Kintamosios srovės kontaktinio tinklo 110/27,5/10 kV traukos pastotės vienalinijinė schema pateikta 1.2 paveiksle.

Kontroliniai klausimai

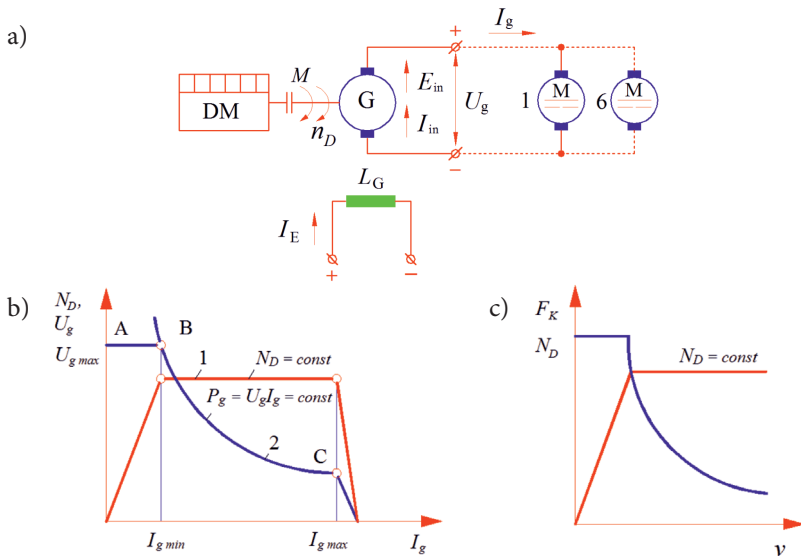
1. Iš kokių pagrindinių dalių sudaryta geležinkelių elektrifikacijos sistema?
2. Dėl kokių priežasčių kontaktinis tinklas išdėstomas zigzagu kelio ašies atžvilgiu?
3. Išvardykite pagrindinius nuolatinės srovės traukos pastotės įrenginius.
4. Kokia bėgių tinklo paskirtis?
5. Kokie yra kontaktinio tinklo konstrukciniai ypatumai ir kompensavimo būdai?
6. Kaip skirstomos kontaktinio tinklo pakabos?
7. Kokie pagrindiniai elektrifikuotų geležinkelių privalumai?



1.2 pav. Kintamosios srovės kontaktinio tinklo 110/27,5/10 kV traukos pastotės vienalinijinė schema: 1, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 19, 20 – skyrikliai; 2 – skirtuvas; 3 – trumpiklis; 4 – traukos transformatoriai T1, T2; 6, 14, 15, 17 – jungtuvai; 8, 9 – kontaktinio tinklo maitinimo linijos; 16 – rezistorius; 18 – tirkpasis saugiklis; 21 – įtampos transformatorius; 22 – savųjų reikmių transformatorius

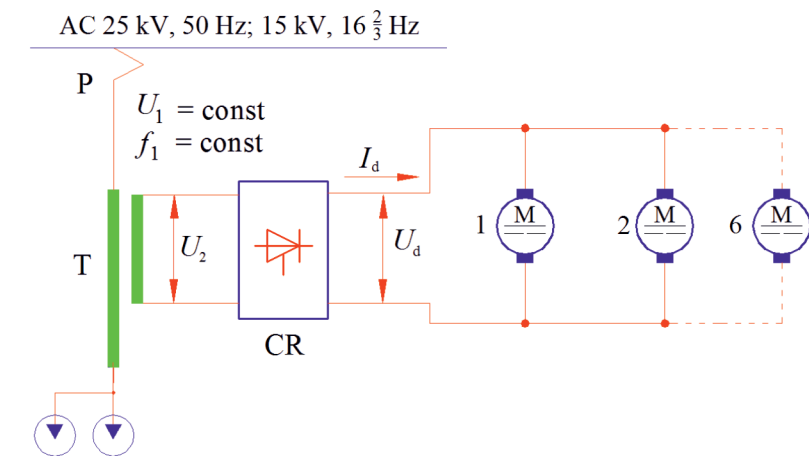
2. LOKOMOTYVŲ ELEKTRINĖ GALIOS PAVARA

Autonominės traukos lokomotyvuose (šilumvežiuose, dyzeliniuose traukiniuose, motrisėse), vidaus degimo variklio cilindruose degant degalams, paprastai dyzeliniams, cheminė degalų degimo energija paverčiama alkūninio veleno mechaniniu darbu. Toliau vidaus degimo variklio energija per galios pavarą (mechaninę, hidraulinę, elektrinę) perduodama aširačiams, kur paverčiama lokomotyvo traukos jėga. Lokomotyvo traukos jėga F_k privalo kisti atvirkščiai proporcingai judėjimo greičiui v . Tokia charakteristika vadinama hiperboline, ji leidžia lokomotyvą visame greičio diapazone valdyti optimaliai, t. y. dyzelinio variklio galią išnaudoti visiškai. Autonominės traukos lokomotyvo elektros pavaros su nuolatinės srovės nepriklausomojo žadinimo traukos generatoriumi sandaros struktūrinė schema (a), traukos generatoriaus išorinė (b) ir traukos (c) charakteristikos pateiktos 2.1 pav.



2.1 pav. Autonominės traukos lokomotyvo su elektros pavarą struktūrinė schema (a), traukos generatoriaus išorinė (b) ir traukos (c) charakteristikos

Elektros pvara sukuria šilumvežio traukos charakteristiką, artimą „idealiai“. Tam tikslui pasiekti automatinio valdymo sistemomis keičiamas natūraliųjų nuolatinės ar kintamosios srovės generatorių išorinių charakteristikų pobūdis. Kad traukos generatoriaus galia visame autonominės traukos lokomotyvo su elektros pvara greičių diapazone būtų pastovi $P_g = I_g U_g = \text{const}$ ir dyzelinio variklio galia $N_D = \text{const}$ būtų pastovi, traukos generatoriaus įtampa turi kisti atvirkščiai proporcingai srovei I_g , t. y. hiperbolės dėsnium. Lokomotyvų, kurių traukos varikliai yra nuolatinės srovės ir maitinami nuo nuolatinės įtampos šaltinio, elektros pavaros vadinamos nuolatinės ir nuolatinės srovės sistemos ir tarptautinėje techninėje literatūroje žymimos DC/DC. Pasaulio geležinkelius pradėjus elektrifikuoti kintamąja srove, kurių kontaktinio tinklo įtampa gerokai aukštesnė – 15 kV, 16, 2/3 Hz, 25 kV, 50 Hz, atsirado galimybė sukurti galingesnius, greitesnius elektrinės



2.2 pav. Supaprastinta kintamosios ir nuolatinės (AC/DC) srovės sistemos elektrovežio, elektrinio traukinio elektros pavaros sandaros schema:

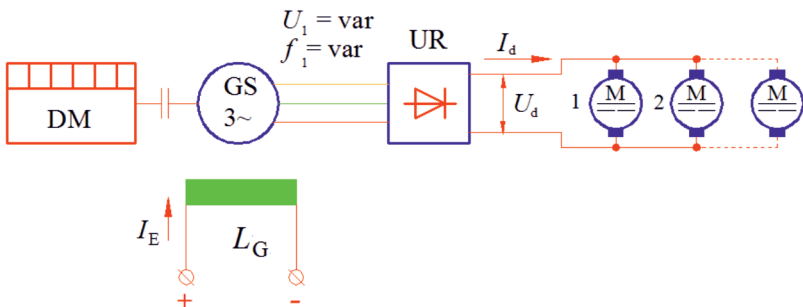
T – traukos transformatorius; CR – valdomasis vienfazis lygintuvas;

M – nuolatinės srovės traukos varikliai

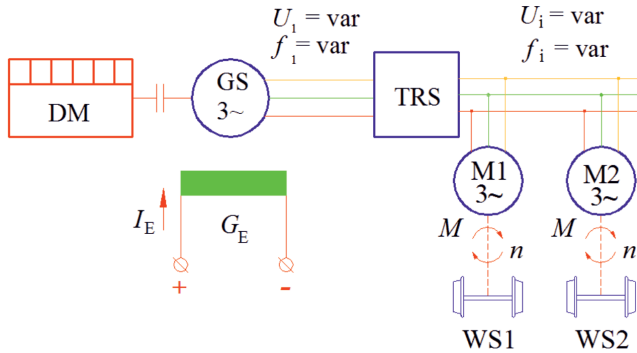
traukos riedmenis, padidinti eismo intensyvumą. Supaprastinta elektrovežio, elektrinio traukinio kintamosios ir nuolatinės AC/DC srovės sistemos elektros pavaros sandaros schema pateikta 2.2 pav.

Lokomotyvų, kurių nuolatinės srovės traukos varikliai maitinami išlyginta kintamosios srovės šaltinio įtampa, elektros pavaros vadina-
mos kintamosios ir nuolatinės srovės sistemos ir tarptautinėje tech-
ninėje literatūroje sutrumpintai žymimos AC/DC. Į AC/DC srovės
sistemos lokomotyvų elektros pavaros sandarą įeina lygintuvai, kurie
gali būti nevaldomieji ir valdomieji (pastarieji naudojami elektrinės
traukos riedmenyse). Supaprastinta AC/DC srovės sistemos šilumve-
žio elektros pavaros sandaros schema pateikta 2.3 pav.

Supaprastinta AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros
sandaros schema pateikta 2.4 pav. Elektros pavarą sudaro sinchroninis
traukos generatorius, tiesioginio ryšio dažnio keitiklis, asinchroniniai
traukos varikliai. Šilumvežio traukos variklių greitis reguliuojamas kei-
čiant sinchroninio traukos generatoriaus įtampos vertę U_1 ir dažnį f_1 .

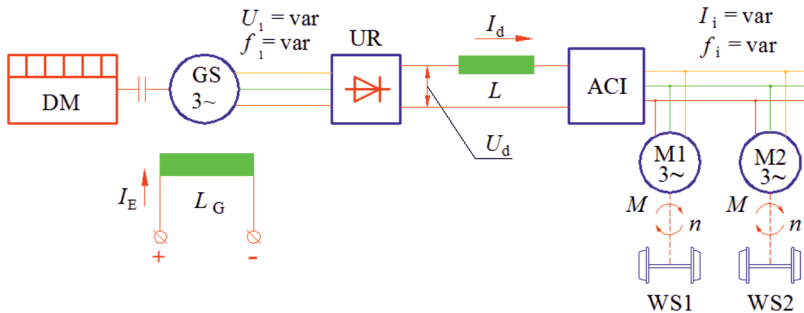


2.3 pav. Supaprastinta AC/DC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros sandaros schema: DM – dyzelinis variklis; GS – sinchroninis traukos generatorius; L_G – traukos generatoriaus žadinimo apvija; I_E – traukos generatoriaus žadinimo srovė; UR – nevaldomasis trifazis tiltelinis lygintuvas; U_d – išlyginta įtampa; I_d – išlyginta srovė; M – nuolatinės srovės traukos varikliai

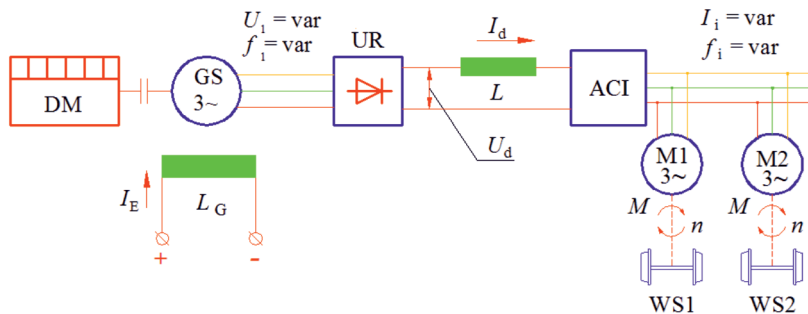


2.4 pav. Supaprastinta AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros sandaros schema: TRS – tiesioginio ryšio dažnio keitiklis; M – asinchroniniai traukos varikliai

Lokomotyvų elektros pavaros su asinchroniniais traukos varikliais struktūrinė schema naudojant autonominius įtampos inverterius pateikta 2.5 pav.



2.5 pav. AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros sandaros schema: DM – dyzelinis variklis; G – sinchroninis traukos generatorius; L_G – traukos generatoriaus žadinimo apvija; UR – nevaldomasis lygintuvas; AVI – autonominis įtampos inverteris; M1, M2 – asinchroniniai trumpai jungto rotoriaus traukos varikliai; WS1, WS2 – aširačiai



2.6 pav. Supaprastinta šilumvežio AC/AC elektros pavaros sandaros schema:

DM – dyzelinis variklis; GS – sinchroninis traukos generatorius;
 L_G – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo apvija; L_E – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo srovė; UR – nevaldomasis lygintuvas;
 ACI – autonominis srovės inverteris; L – didelio induktyvumo droselis (srovės šaltinis); M1, M2 – asinchroniniai trumpai jungto rotoriaus traukos varikliai; WS1, WS2 – aširačiai

Supaprastinta kintamosios ir kintamosios (AC/AC) srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros su autonominiu srovės inverteriu schema pateikta 2.6 pav. Šilumvežio asinchroninių traukos variklių greitis ir momentas reguliuojami keičiant asinchroninio traukos variklio statoriaus srovės ir dažnio vertes.

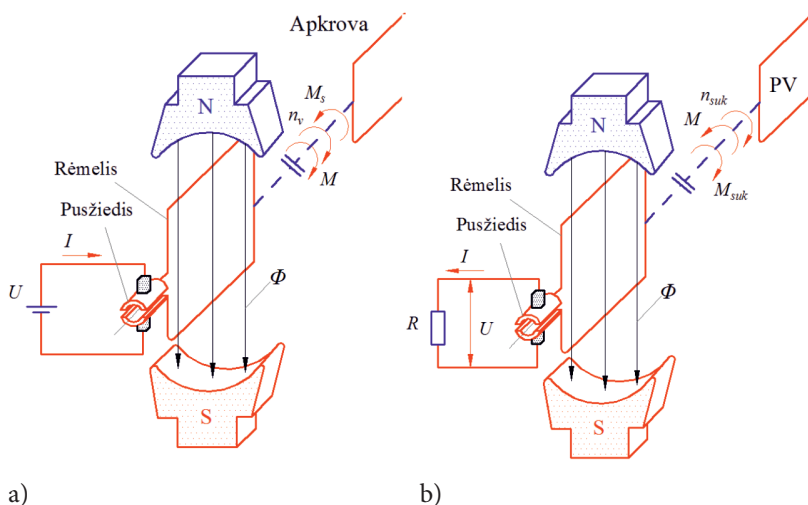
3. BENDROSIOS ŽINIOS APIE ELEKTROS MAŠINAS

Elektros mašinų paskirtis ir ypatumai. Elektros mašina vadinamas elektrodinaminis įrenginys, kuriame mechaninė energija yra paverčiama elektrine arba elektrine-mechanine energija. Pirmuoju atveju mašina veikia *generatoriaus* režimu, antruoju – *variklio*. Generatorių paprastai suka garo, vandens, dujų turbinos, vidaus degimo arba kitojie varikliai. Didelė dalis (daugiau nei 50 %) visose elektrinėse pagamintos elektros energijos yra vėl paverčiama mechanine varikliuose, kurie varo įvairiausias mašinas (pvz., geležinkelių transporto srityje – lokomotyvus ir kt.). Visoms elektros mašinoms būdinga tai, kad kiekviena iš jų gali dirbti tiek generatoriaus, tiek variklio režimu, nes jose nėra jokių esminių skirtumų tarp elektros generatoriaus ir variklio sandaros. Pagal gaminamą ir vartojamą elektros energiją galima išskirti nuolatinės srovės ir kintamosios srovės elektros mašinas (angl. *DC and AC electric machines*). Savo ruožtu, kintamosios srovės mašinos gali būti trifazės, daugiafazės arba vienfazės. Mechaniniu požiūriu galima išskirti dvi kiekvienos mašinos dalis: nejudamąją dalį – statorių ir judamąją dalį – rotorių. Nuolatinės srovės variklių galima plačiame diapazone ir tiksliai reguliuoti inkaro greitį, keisti mechaninę charakteristiką ir jų paleidimo momentai yra dideli. Nuolatinės srovės traukos varikliai naudojami elektrovežiuose, elektriniuose traukiniuose, metro, tramvajuose, troleibusuose, taip pat šilumvežiuose. Traukos rieđmenims plačiai taikomi nuolatinės srovės generatoriai. Tai – traukos generatoriai, žadinimo generatoriai (generatoriai, skirti kitai elektros mašinai žadinti), papildomi generatoriai, vagonų šildymo generatoriai ir kt. Keleiviniuose vagonuose nuolatinės srovės generatoriai naudojami vagonų elektrinėms grandinėms maitinti ir akumuliatorių baterijoms įkrauti. Nuolatinės srovės mašinos yra brangesnės, jų sandara

sudėtingesnė negu kintamosios srovės mašinų, joms maitinti reikalingas nuolatinės srovės šaltinis. Nuolatinės srovės mašinos yra ne tokios patikimos, jos dažnai genda, todėl jų priežiūra ir remontas yra brangesni nei kintamosios srovės mašinų.

3.1. Nuolatinės srovės traukos elektros mašinos sandara ir veikimo principas

Veikimo principui paaiškinti pasinaudota supaprastintomis nuolatinės srovės mašinų sandaros schemomis, pavaizduotomis 3.1 pav.



3.1 pav. Supaprastintos nuolatinės srovės elektros mašinų principinės sandaros schemas – variklio (a), generatoriaus (b): R – elektros energijos imtuvas;

PV – pirminis energijos šaltinis (elektrinėje – garo turbina, hidroturbina, šilumvežiuose – dyzelinis variklis); U – maitinimo tinklas; Apkrova – (bendru atveju – darbo mašina, traukoje – lokomotyvo aširatis);

n_v – elektros variklio rotoriaus greitis; n_{suk} – pirminio variklio sukimo greitis;

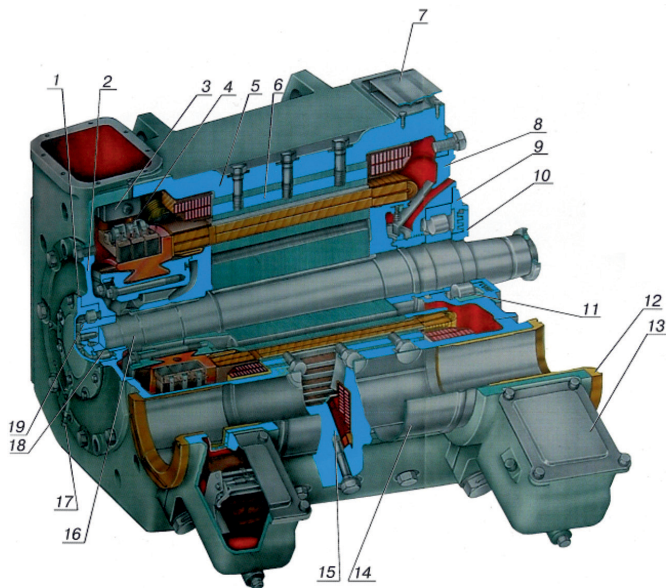
M – elektromagnetinis momentas; M_{suk} – pirminio variklio sukimo momentas; M_s – statinis pasipriešinimo momentas

Paveiksle induktorius, kuriantis žadinimo srautą, vaizduojamas kaip nuolatinio magneto poliai N ir S. Tarp magnetinių polių įdedamas inkaras – feromagnetinės medžiagos cilindras (magnetolaidis), kurio išilginiuose grioveliuose yra izoliuoti laidininkai, sudarantys inkaro apviją. Paprastumo dėlei laikoma, kad inkaro apviją sudaro tik vienas dviejų laidininkų rėmelis. Inkaro apvija yra prijungta prie kolektoriaus. Paprasčiausiu kolektoriumi galima laikyti du pusžiedžius, kurie elektriškai izoliuoti vienas nuo kito. Kartu su inkaru kolektorius sudaro nuolatinės srovės mašinos rotorių. Prie kolektoriaus prispaudžiami kontaktiniai šepečiai.

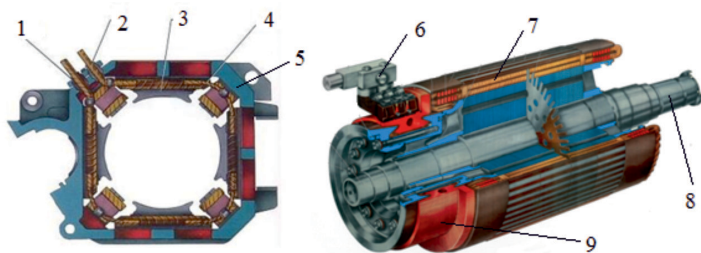
3.2. Nuolatinės srovės traukos varikliai ir generatoriai

Nuolatinės srovės traukos varikliai (angl. *DC traction motors*). Šilumvežio, elektrinio traukinio nuolatinės srovės traukos variklio statoriaus, inkaro ir kiti elementai pateikti 3.2–3.3 paveiksluose. Nuolatinės srovės traukos varikliai naudojami elektrovežių, elektrinių traukinių, metro, tramvajų, troleibusų, didelės galios automobilių, laivų, šilumvežių elektros pavarose.

Mechaniniu požiūriu nuolatinės srovės mašiną galima suskirstyti į dvi dalis: nejudamąją – statorių ir judamąją – rotorių. Svarbiausia nuolatinės srovės mašinos statoriaus dalis yra induktorius, kuris sukuria nuolatinį mašinos žadinimo srautą. Kai mašinos žadinimo srautą sukuria nuolatinio magneto poliai, mašina vadinama magnetinio elektrinio žadinimo. Kai žadinimo srautą sukuria elektromagnetai, mašina yra elektromagnetinio žadinimo. Nuolatinės srovės mašinų nejudamojoje dalyje išdėstomi pagrindiniai ir papildomi poliai, ant kurių uždedama varinio izoliuoto laido žadinimo apvija (angl. *exciting winding*), kuria teka nuolatinė žadinimo srovė. Taip pat tvirtinami šepečiai ir jų



3.2 pav. Nuolatinės srovės traukos variklio ED-118A sandara: 1, 9 – guolio dangteliai; 2 – mažasis guolių dangtelis; 3 – laikiklis; 4 – šepečių laikiklis; 5 – statorius (jungas); 6 – pagrindinis polius; 7 – dangtelis; 8 – guolio dangtelis; 10 – sandarinimo žiedas; 11 – guolis; 12 – slydimo guolių įdėklas; 13 – slydimo guolis; 14 – ašies dangtelis; 15 – papildomi poliai; 16 – inkaras; 17 – guolių tepimo vamzdelis; 18 – guolis; 19 – atraminė įvorė

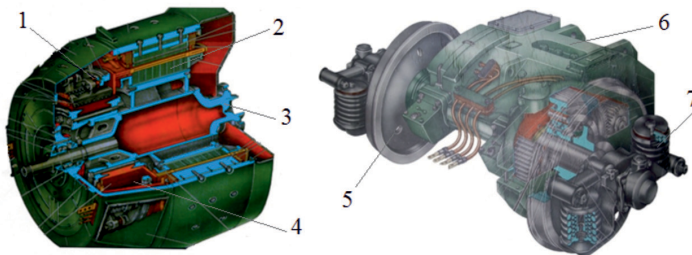


3.3 pav. Nuolatinės srovės traukos variklio magnetinės sistemos ir inkaro sandara: 1 – papildomas polius; 2 – išvadai; 3 – pagrindinis polius; 4 – izoliacinis tarpiklis; 5 – statorius (jungas); 6 – šepečių laikiklis; 7 – rotoriaus apvijos; 8 – velenas; 9 – kolektorius

laikikliai. Jungas yra plieninis cilindras, kuris sudaro elektros mašinos magnetinės grandinės magnetolaidžio dalį. Masyvus nedidelės galios mašinų jungas kartu yra ir korpusas, prie kurio tvirtinamos kitos nejudamosios mašinos dalys. Bendrojo naudojimo elektros mašinos (pramonės) yra cilindro formos ir skiriasi tik tvirtinimo būdu: letenomis arba junge. Nuolatinės srovės traukos variklio magnetinės sistemos ir inkaro sandara pateikta 3.3 pav.

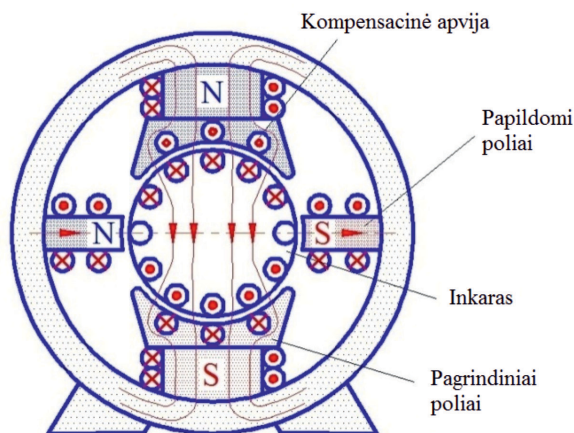
Judamąją dalį – rotorį – sudaro inkaras ir kolektorius. Bendrojo naudojimo elektros mašinos (pramonės) yra cilindro formos ir skiriasi tik tvirtinimo būdu: letenomis arba junge. Traukos elektros mašinos sudarytos iš tų pačių bendrojo naudojimo elektros mašinoms būdingų dalių, tačiau jų konstrukcija pritaikyta specifinėms montavimo ir eksploatacinėms sąlygoms lokomotyvuose, todėl jos priskiriamos prie specifinės paskirties elektros mašinų grupės. Nuolatinės srovės traukos generatoriaus (kairėje) traukos variklio – aširačio bloko (dešinėje) sandara pateikta 3.4 pav.

Nuolatinės srovės traukos generatoriai (angl. *DC traction generators*, vok. *DC Traktionsgeneratoren*). Šilumvežių traukos generatoriai



3.4 pav. Nuolatinės srovės traukos generatoriaus, traukos variklio – aširačio bloko sandara: 1 – šepečių laikiklis; 2 – pagrindinio poliaus ritė; 3 – velenas; 4 – kolektorius; 5 – apvijų laikiklis; 6 – traukos variklio statorius (jungas); 7 – spyruoklinė pakaba

tvirtinami prie dyzelinio variklio, todėl jų konstrukcijoje numatytas tik vienas inkaro veleno atraminis guolis. Šiuolaikinėse elektros mašinos statorius liejamas iš plieno (feromagnetinės medžiagos) ir sudaro mašinos magnetinės sistemos dalį – jungą (angl. *yoke*), prie kurio tvirtinami poliai su apvijomis, taip pat jis laiko šoninius inkaro guolius. Šilumvežių traukos generatorių statorius yra cilindro formos su dviem letenomis dyzeliniam varikliui – generatoriui tvirtinti bendrame rėme. Traukos variklių statoriai – aštuonbriauniai arba cilindro formos. Nuolatinės srovės traukos elektros mašinose montuojami pagrindiniai ir papildomi poliai. Pagrindiniai poliai skirti žadinimo srautui kurti, papildomi poliai mažina šepečių – kolektoriaus mazgo – kibirkščiavimą, pagerina komutacijos sąlygas. Visų šiuolaikinių elektros mašinų su simetrinėmis sistemomis polių skaičius $2p$ (angl. *number of poles*, vok. *Polzahl*) yra lyginis, visi poliai visiškai vienodi ir kampai tarp gretimų polių yra lygūs. Nuolatinės srovės mašinos su papildomais poliais sandaros schema pateikta 3.5 pav.



3.5 pav. Nuolatinės srovės mašinos su papildomais poliais sandaros schema

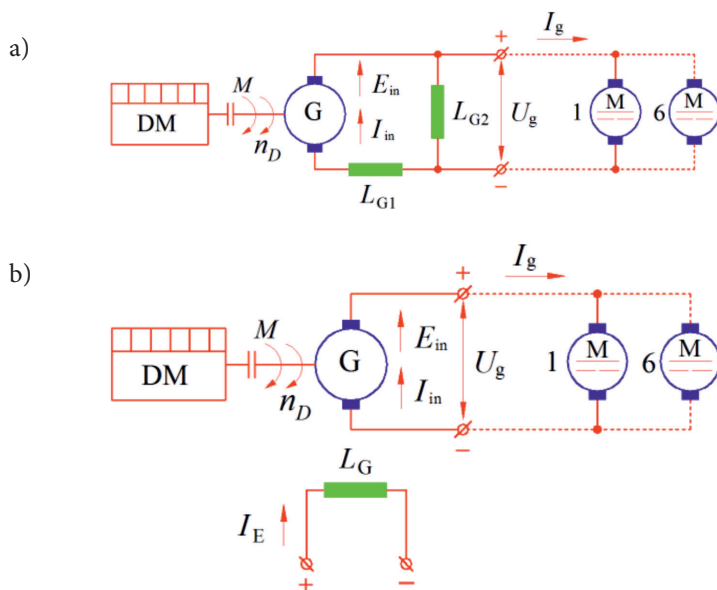
Inkaras (angl. *armature*, vok. *Anker*) – tai elektros mašinos dalis, kurioje indukuojama elektromagnetinė jėga (toliau žymima E_{in}). Nuolatinės srovės elektros mašinos inkarą sudaro šios pagrindinės dalys: magnetolaidis, inkaro apvija, kolektorius ir velenas. Inkaro magnetolaidis yra cilindras su išilginiais grioveliais. Jis surenkamas iš atskirų tarpusavyje izoliuotų dantytų elektrotechninio plieno lakštų. Inkaro magnetolaidžio paketo segmentai štampuojami su grioveliais, kuriuose montuojama inkaro apvija (angl. *armature winding*). Inkaro apvijų skaičius (angl. *number of armature lops*, vok. *Nntenzahl des Ankers*) priklauso nuo projektuojamos mašinos parametrų.

Kolektorius. Traukos elektros mašinų kolektorius gaminamas iš atskirų tarpusavyje izoliuotų elektrotechninio vario segmentų, kurių storis gali siekti 5–8 mm. Kolektoriaus segmentų skaičius (angl. *number of commutator segments*, vok. *Lamelzahl des Kommutators*) traukos elektros mašinose gali siekti keletą šimtų. Nuolatinės srovės elektros mašinose esančių šepečių paskirtis – sujungti kolektorių su išorine grandine.

3.3. Nuolatinės srovės traukos generatorių žadinimo sistemos

Nuolatinės srovės (DC) traukos generatorių išorinių charakteristikų pobūdis priklauso nuo žadinimo apvijos jungimo būdų. Pagal žadinimo apvijos jungimo būdus nuolatinės srovės generatoriai skirstomi į: nepriklausomojo žadinimo generatorius (angl. *separately excited shunt – wound DC generator*), kai žadinimo apvija (angl. *exciting winding*) maitinama nuo atskiros nuolatinės srovės šaltinio (akumuliatoriaus baterijos, mažos galios generatoriaus, vadinamo žadinimo generatoriumi, arba lygintuvo). Tokio generatoriaus žadinimo srovė nepriklauso nuo jo apkrovos. Lygiagrečiojo žadinimo generatorius

(angl. *self – excited shunt – wound DC generator*), kai žadinimo apvija įjungta lygiagrečiai inkaro apvijai ir apkrovai; nuosekliojo žadinimo generatorius (angl. *series – wound DC generator*), kai žadinimo apvija įjungta nuosekliai inkaro apvijai ir apkrovai; mišriojo žadinimo generatorius (angl. *variable compaund DC generator*), kai generatorių sudaro dvi žadinimo apvijos – lygiagrečiojo ir nuosekliojo žadinimo. Pirmoji įjungta lygiagrečiai inkaro apvijai, antroji – nuosekliai inkaro apvijai ir apkrovai. Dvi jo žadinimo apvijos gali būti sujungtos taip, kad magnetiniai srautai būtų tos pačios krypties arba priešingi vienas kitam. Toliau pateiktos (žr. 3.6 pav.) įvairių žadinimo būdų nuolatinės srovės traukos generatorių principinės elektrinės schemos pagal IEC standartus.

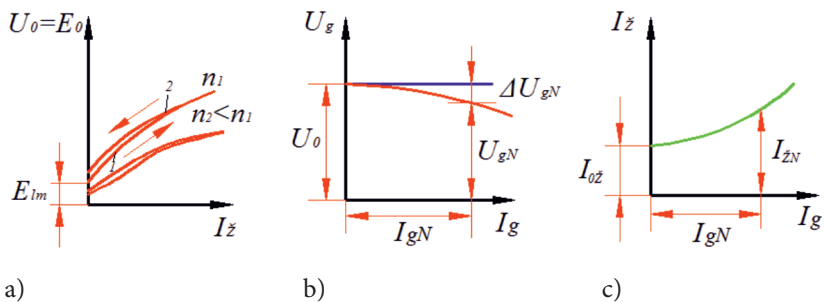


3.6 pav. Nuolatinės srovės traukos generatorių žadinimo schemos:
a – mišriojo žadinimo; b – nepriklausomojo žadinimo; I_{in} – inkaro grandinės srovė; I_E – žadinimo srovė; E_{in} – elektrovara; U_g – generatoriaus gnybtų įtampa; L_G – žadinimo apvija; 1–6 – DC traukos varikliai

Lygiagrečiojo, nuosekliojo, mišriojo žadinimo nuolatinės srovės generatoriai yra savojo žadinimo, nes žadinimo apvijos gauna energiją nuo to paties generatoriaus inkaro apvijos. Visi išvardyti generatoriai skiriasi tik žadinimo apvijų parametrais. Nepriklausomojo ir lygiagrečiojo žadinimo apvijos gaminamos iš mažo skerspjūvio laidininkų ir didesnio vijų skaičiaus, nuoseklaus žadinimo apvijos – iš didelio skerspjūvio laidininkų ir mažesnio vijų skaičiaus. Nuolatinės srovės generatorius charakterizuoja *tuščiosios veikos, išorinė, reguliavimo charakteristikos*.

Išorinė DC generatoriaus charakteristika (žr. 3.7 pav., b). Išorinė generatoriaus charakteristika – tai generatoriaus įtamos U_g priklausomybė nuo apkrovos srovės I_g . Išorinė generatoriaus charakteristika gaunama didinant apkrovos srovę, kai $n = \text{const}$, $I_z = \text{const}$.

Nuolatinės srovės generatoriaus reguliavimo charakteristika (žr. 3.7 pav., c). Reguliavimo charakteristika (angl. *regulating*



3.7 pav. Nuolatinės srovės nepriklausomojo žadinimo generatoriaus charakteristikos: a) tuščiosios veikos; b) išorinė; c) reguliavimo:

U_0 – tuščiosios veikos įtampa; E_0 – tuščiosios veikos elektrovara;
 E_{lm} – liktinio magnetizmo elektrovara; U_{gN} – vardinė generatoriaus įtampa; I_{gN} – vardinė generatoriaus srovė; I_{zN} – vardinė žadinimo srovė;
 I_z – generatoriaus žadinimo srovė; n_1 , n_2 – generatoriaus inkaro greičiai

characteristic, vok. *Regelkennlinie*) – tai žadinimo srovės priklausomybė nuo generatoriaus apkrovos srovės $I_z = f(I_g)$, kai $U_g = \text{const}$ ir $n = \text{const}$. Ši charakteristika parodo, kaip reikia keisti žadinimo srovę norint palaikyti pastovaus dydžio generatoriaus įtampą.

Tuščiosios veikos charakteristika.

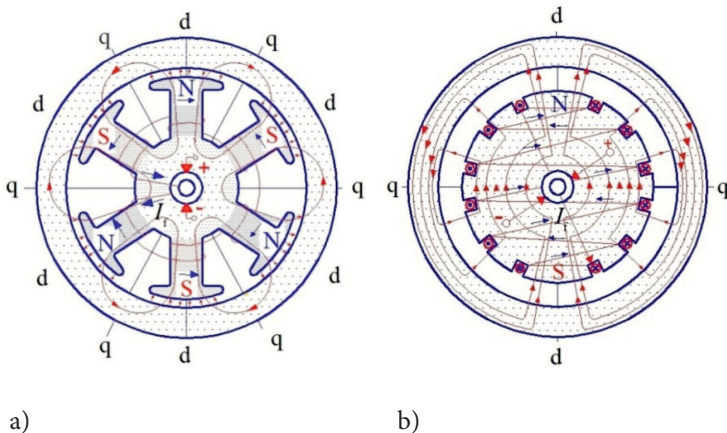
Elektrovaros $E_0 = f(I_z)$ priklausomybė nuo žadinimo srovės I_z (kai $I_{in} = I_a = 0$) vadinama tuščiosios veikos charakteristika (3.7 pav., a). Dėl histerezės reiškinių tuščiosios veikos charakteristikos dvigubos.

4. TRIFAZĖ LOKOMOTYVŲ SISTEMA

4.1. Sinchroninės mašinos sandara ir veikimo principas

Sinchroninės mašinos induktorius paprastai yra nuolatinis elektromagnetas. Dažniausiai induktorius yra rotoriuje, o statoriuje yra trifazė inkaro apvija, kurios ritės išdėstomos kaip ir asinchroninėje mašinoje (Masiokas 1994).

Dažniausiai naudojamos trifazės sinchroninės mašinos, kurių inkaro apvija yra statoriuje, o rotoriuje yra induktorius. Tai elektromagnetas, kurio žadinimo apvija per žiedus ir šepečius prijungiama prie nuolatinės įtampos šaltinio. Induktorius gali būti ryškiapolis arba neryškiapolis. Ryškiapolio induktoriaus – rotorius poliai yra pritvirtinami prie veleno taip, kad susidarytų feromagnetinės medžiagos magnetinė grandinė (4.1 pav.). Jo žadinimo apvija yra sujungiamama tokiu būdu, kad induktoriaus N ir S poliai išsidėstytų pakaitomis. Neryškiapolis induktorius – rotorius yra masyvus plieno cilindras, kurio išilginiuose grioveluose yra žadinimo apvija. Prie sinchroninės mašinos rotorius



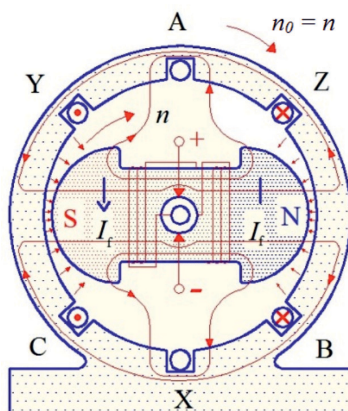
4.1 pav. Ryškiapolės (a) ir neryškiapolės (b) mašinos magnetinės grandinės

veleno pritvirtinami du izoliuoti nuo jo bronziniai kontaktiniai žiedai, sujungti su rotoriaus apvija. Prie jų prispaudžiami angliniai-grafitiniai šepečiai, kurių išvadai yra mašinos gnybtų skydelyje. Sinchroninių mašinų apvijų išvadai žymimi lotyniškais raidėmis ir skaitmenimis šitaip. Inkaro (statoriaus) apvija žymima kaip ir asinchroninių mašinų: ričių pradžios – U1, V1, W1; ričių pabaigos – U2, V2, W2. Žadinimo apvija žymima F1 – F2.

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

Sinchroninės mašinos plačiausiai naudojamos kaip generatoriai. Sinchroniniai varikliai yra naudojami rečiau nei asinchroniniai.

Generatoriaus režimas. Sukant sinchroninės mašinos (4.2 pav.) induktorių pastoviu kampiniu greičiu $\omega = 2\pi n$, kiekvienoje inkaro apvijos ritėje indukuojama kintamoji elektrovara (EV). Ji yra sinusinė,



4.2 pav. Sinchroninės mašinos, veikiančios generatoriaus režimu, sandara

nes indukatoriaus magnetinis laukas sudaromas toks, kad magnetinė indukcija oro tarpe pasiskirstytų sinuso dėsnio. Kadangi visos ritės yra vienodos ir išdėstytos 120° kampais, inkaro apvijoje gaunama simetriinė trifazė EV sistema: visos trys EV yra vienodų amplitudžių, bet skiriasi 120° faze. EV kryptys laidininkuose pažymėtos taikant dešinėsios rankos taisyklę.

Vienoje inkaro apvijos fazėje indukuotos EV efektinė vertė $E = C_E n \Phi$, čia: C_E – pastovus tos pačios mašinos koeficientas; n – indukatoriaus sūkių dažnis; Φ – magnetinis srautas, kertantis apvijos laidininkus. EV dažnį galima apskaičiuoti iš lygties:

$$f = pn, \quad (4.1)$$

čia p – indukatoriaus polių porų skaičius.

Jei generatoriaus induktorius turi vieną polių porą $p = 1$, tai pramoniniam 50 Hz EV dažniui gauti indukatoriaus greitis turi būti $n = 50$ r/s, t. y. 3000 r/min. Generatoriaus inkaro apvija sujungiama Y arba Δ ir prie jos prijungiami trifaziai imtuvai. Apkrauto generatoriaus inkaro apvija teka srovės, kurios sudaro sukamąjį magnetinį lauką. Šio lauko greitis $n_0 = f / p$. Įrašius apvija tekančios srovės dažnį f iš (4.1) lygybės gaunama:

$$n_0 = f / p = n. \quad (4.2)$$

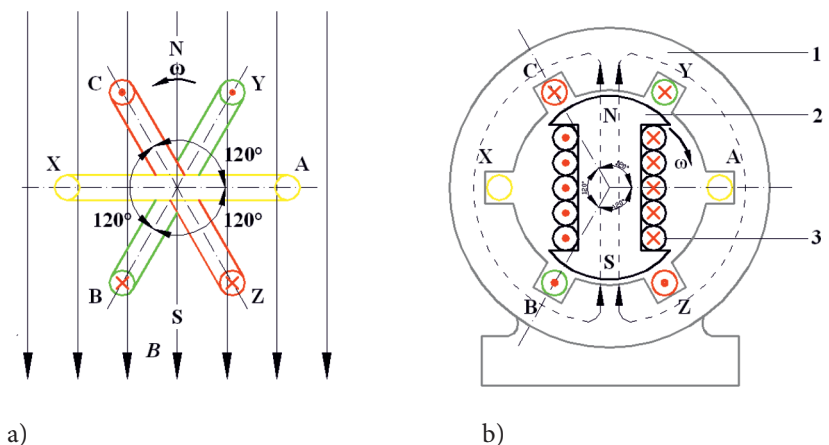
Indukatoriaus ir inkaro magnetiniai laukai sukasi tuo pačiu greičiu – sinchroniškai – ir sudaro bendrą generatoriaus sukamąjį magnetinį lauką. Esant pramoniniam tinklo įtampos dažniui ($f = 50$ Hz), didžiausiu greičiu suksis variklis, kurio inkaro apviją sudaro trys ritės. Tokio variklio magnetinis laukas turi vieną polių porą $p = 1$ ir jo greitis $n = 50$ r/s, t. y. 3000 r/min. Elektros grandinės, kuriose veikia kelios to paties dažnio skirtingų fazių EV, sukuriamos to paties

šaltinio, vadinamos daugiafazėmis grandinėmis. Daugiafazėje grandinėje veikiančios elektrovaros vadinamos EV sistema, o tekančios srovės – srovių sistema. Traukos riedmenyse trifazė sistema sukuriamą: šilumvežiuose panaudojant sinchroninius traukos generatorius, elektrovežiuose, elektriniuose traukiniuose – dirbtinai formuojama iš kintamosios srovės vienfazio kontaktinio tinklo įtampos ar nuolatinės srovės kontaktinio tinklo įtampos – naudojant autonominius įtampos ar srovės inverterius (Liudvinavičius *et al.* 2010).

Trifazės EV sistemos gavimas ir vaizdavimas. Trifazei EV sistemai gauti trys vienodi rėmeliai (ritės) išdėstomi taip, kad jų plokštumos (kartu ir ašys) sudarytų 120° kampus. Rėmelių pradžios pažymimos A, B, C, o pabaigos – X, Y, Z. Sukant juos homogeniniame magnetiniame lauke pastovių kampinių greičių, juose indukuojamos vienodo didumo sinusinės EV, kurių fazės skiriasi 120° . *Praktikoje trifazė EV sistema gaunama sinchroniniuose generatoriuose. Trys apvijos ritės pasuktos viena kitos atžvilgiu pagal cilindro apskritimą 120° kampų ir sumontuotos statoriuje ir nejuda, o sukamas elektromagnetas (induktorius).* Šios ritės atitinka trifazio generatoriaus fazių apvijas. Fazių apvijų pradžios žymimos A(U1), B(V1), C(W1), o pabaigos – X (U2), Y(V2), Z(W2). Jei visos trys ritės yra vienodos, jų sukimosi ašys sutampa ir kampai tarp ašių plokštumų vienodi, t. y. po 120° , generatorius yra simetrinis. Paprasčiausias trifazės srovės generatorius pavaizduotas 4.3 pav.

Sukant rėmelius pastovių kampinių greičių homogeniniame magnetiniame lauke, kurio magnetinio srauto tankis B , ritėse indukuojamos vienodų amplitudžių sinusinės EV e_A , e_B , e_C . Jeigu laiko atskaitymo pradžia sutampa su pirmosios fazės EV e_A periodo pradžia, tai šią EV galima išreikšti:

$$e_A = E_m \sin \omega t . \quad (4.3)$$



4.3 pav. Trifazių EV gavimas:

- a) trijuose stačiakampiuose rėmeliuose; b) generatoriaus apvijoje;
1 – statorius; 2 – nuolatinės srovės elektromagnetas; 3 – žadinimo apvija

Antrosios fazės EV e_B atsilieka nuo EV e_A $1/3$ periodo ir išreiškiamas:

$$e_B = E_m \sin \omega \left(t - \frac{T}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right). \quad (4.4)$$

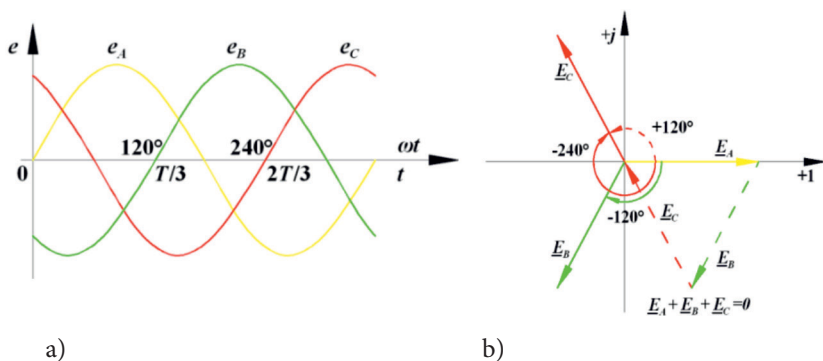
Trečiosios fazės EV e_C , atsiliekanti nuo EV e_B $1/3$ periodo, išreiškiama šia lygtimi:

$$e_C = E_m \sin \omega \left(t - \frac{2T}{3} \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \quad (4.5)$$

Kaip ir bet kurį sinusinį dydį, šias EV galima pavaizduoti vektoriais (žr. 4.4 pav., b). Gaunami trys vienodo ilgio vektoriai, išdėstyti kas 120°. Šių EV grafikai ir vektorinės diagramos parodyti 4.4 pav. Praktikoje trifazė EV sistema gaunama sinchroniniuose generatoriuose. Trys

apvijos ritės yra sudėtos į statorių ir nejuda, sukamas nuolatinės srovės elektromagnetas.

Sinchroniniai traukos generatoriai naudojami šilumvežių AC/DC ir AC/AC srovės sistemos elektros pavarose. AC/DC srovės sistemos šilumvežių elektros pavarose sinchroniniai traukos generatoriai skirti lokomotyvo trifazės srovės sistemai sukurti. Atliekant M62M, 2M62M šilumvežių modernizaciją nuolatinės srovės traukos generatorius, pakeistas trifaziu sinchroniniu traukos generatoriumi, sudarė galimybę padidinti dviejų sekcijų lokomotyvo 2M62M galią iki 3400 kW. Analogišku principu modernizuojami manevriniai ČME-3M, TEM-2 šilumvežiai. Sinchroniniai trifaziai traukos generatoriai naudojami bendrovės „Siemens“ ER 20CF LG šilumvežiuose. Siekiant sukurti trifazę simetrinę EV sistemą, šilumvežiuose naudojami sinchroniniai traukos generatoriai. Sukant sinchroninės mašinos rotorių vidaus degimo varikliu pastoviu greičiu n , kiekvienoje inkaro apvijos ritėje indukuojama kintamoji EV. Elektrovara E_1 yra sinusinė ir kinta dažniu:



4.4 pav. Simetrinio trifazio generatoriaus EV sistema (a) ir jos vektorių diagrama (b)

$$f_1 = \frac{pn}{60}, \quad (4.6)$$

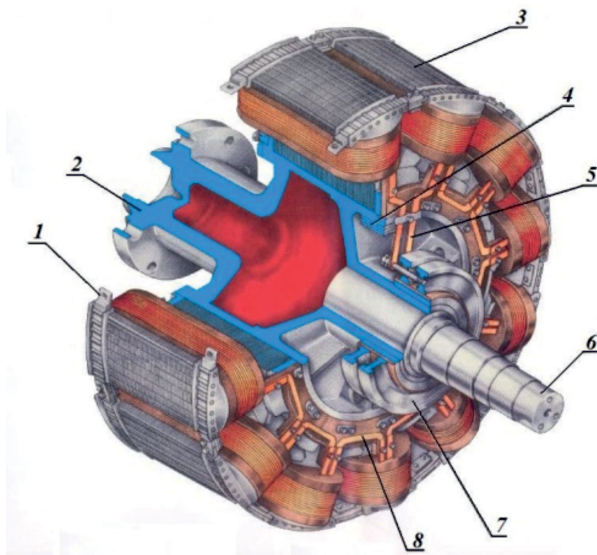
čia p – induktoriaus polių porų skaičius.

Kadangi statoriaus apvijos visos ritės vienodos ir išdėstytos erdvėje 120° kampais, inkaro apvijoje gaunama simetrinė trifazė EV sistema. Visos trys elektrovaros EV yra vienodų amplitudžių, bet skiriasi 120° faze. Generatoriaus inkaro apvija sujungiama žvaigžde arba trikampiui ir prie jos prijungiami trifaziai imtuvai. Apkrauto generatoriaus inkaro apvija teka srovės, kurios sukuria inkaro magnetinį lauką. Induktoriaus ir inkaro magnetiniai laukai sukasi tuo pačiu greičiu – sinchroniškai – ir sudaro bendrą sukamąjį magnetinį lauką, kurio sukimosi greitis per minutę apskaičiuojamas pagal formulę:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (4.7)$$

Iš šių formulių matyti, kad induktoriaus ir inkaro magnetiniai laukai sukasi tuo pačiu greičiu $n = n_1$, t. y. sinchroniškai. Sinchroninio generatoriaus rotorius sukasi ta pačia kryptimi ir tuo pačiu greičiu n_1 kaip ir sukamasis magnetinis laukas, t. y. sinchroniškai. Dėl šios priežasties tokia elektros mašina vadinama *sinchronine*. Trifazio sinchroninio traukos generatoriaus ryškiapolio rotoriaus (induktoriaus) sandara pateikta 4.5 pav.

Sinchroninis traukos generatorius sukuria autonominę simetrinę trifazę EV sistemą lokomotyve. AC/DC, AC/AC šilumvežių elektros pavaroje sinchroninio traukos generatoriaus parametrai valdomi keičiant VDV alkūninio veleno greitį ir induktoriaus žadinimo apvijos srovės vertę. AC/DC šilumvežių sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo srovė reguliuojama keičiant valdomojo lygintuvo tiristorių atidarymo kampą α .

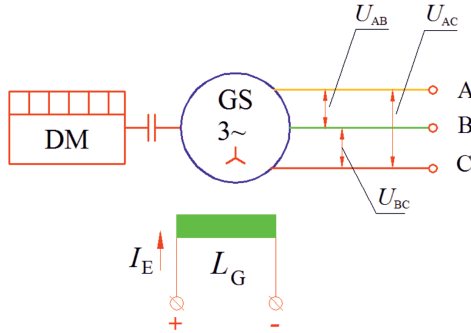


4.5 pav. Trifazio sinchroninio traukos generatoriaus ryškiapolio rotoriaus sandara: 1 – slopinimo apvija; 2 – rotoriaus korpusas; 3 – polius; 4 – balansavimo svareliai; 5 – žadinimo apvijos išvadas; 6 – velenas; 7 – kontaktiniai žiedai; 8 – jungtis

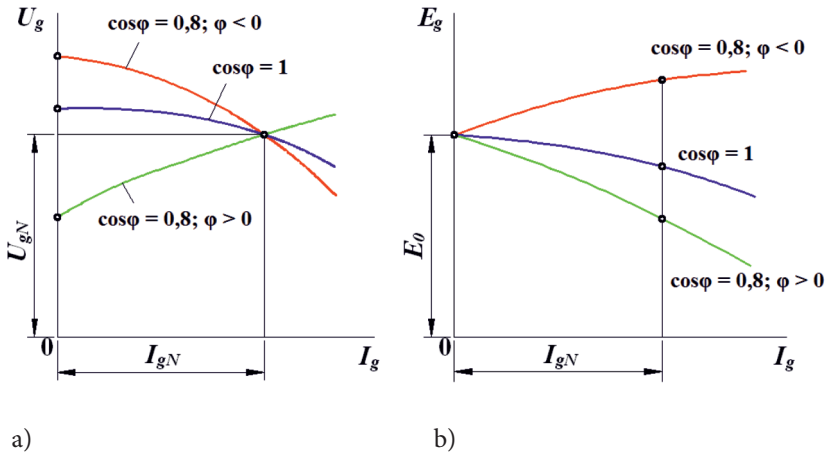
4.2. Trifaziai sinchroniniai traukos generatoriai ir jų charakteristikos

Svarbiausios sinchroninio traukos generatoriaus charakteristikos yra: **išorinė** – įtampos priklausomybė nuo apkrovos srovės, kai žadinimo srovė yra pastovi ir apkrovos galios koeficientas nekinta ($U_g = f(I_g)$, $I_z = \text{const}$, $\cos\varphi = \text{const}$) ir **reguliavimo** – žadinimo srovės priklausomybė nuo apkrovos srovės, kai įtampa palaikoma pastovi ir apkrovos galios koeficientas nekinta ($I_z = f(I_g)$, kai $U_g = \text{const}$ ir apkrovos $\cos\varphi = \text{const}$). 4.7 pav. pavaizduotos natūralios išorinės trifazio sinchroninio traukos generatoriaus

charakteristikos $U_g = f(I_g)$, rodančios generatoriaus įtampas ant jo gnybtų priklausomybę nuo statoriaus srovės I_g , esant galios



4.6 pav. Trifazio sinchroninio traukos generatoriaus struktūrinė schema:
 L_G – žadinimo apvija; I_E – žadinimo srovė

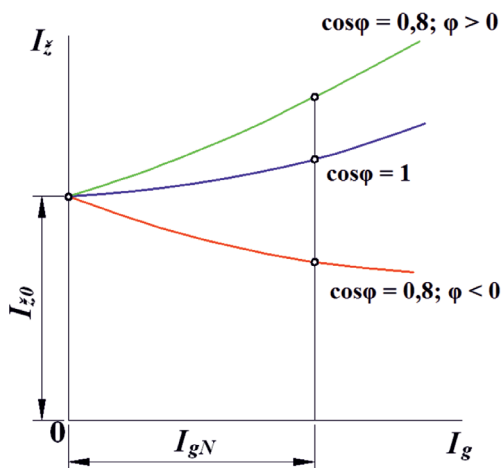


4.7 pav. Trifazio sinchroninio traukos generatoriaus išorinės charakteristikos $U_g = f(I_g)$ ir $E_g = f(I_g)$ vertinant apkrovos pobūdį ir galios koeficiento vertes: a) nuo tuščiosios veikos režimo iki vardinio; b) nuo vardinio iki tuščiosios veikos

koeficientui $\cos\varphi = \text{const}$, rotoriaus apvijos žadinimo srovei $I_z = \text{const}$ ir esant pastoviam rotoriaus greičiui n , o tai atitinka kintamosios srovės dažnį $f_1 = \text{const}$.

Pagrindinė yra natūralioji išorinė charakteristika, gauta esant simetriniam režimui, galios koeficientui $\cos\varphi = 0,8$ ir $\varphi > 0$, kai apkrovos pobūdis aktyvusis-induktyvusis. Norint palaikyti pastovią sinchroninio traukos generatoriaus įtampą kintant apkrovos srovei, kai apkrovos pobūdis ir galios koeficientas nekinta, reikia keisti žadinimo srovę pagal dėsni, nusakomą reguliavimo charakteristikomis, kurių kitimo pobūdis pavaizduotas 4.8 paveiksle.

Reguliavimo charakteristikos leidžia nustatyti sinchroninio traukos generatoriaus įtampos reguliavimo ribas, parinkti žadinimui elektros mašinas, aparatus, nustatyti įtampos valdymo algoritmą. Norint pakeisti šilumvežio sinchroninio traukos generatoriaus natūraliosios

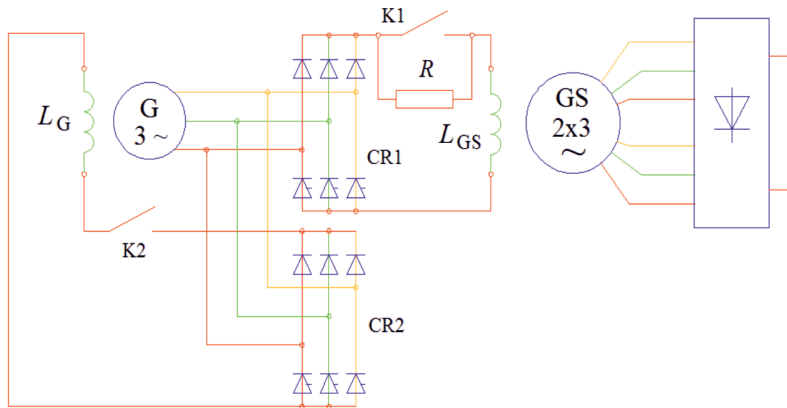


4.8 pav. Trifazio sinchroninio traukos generatoriaus reguliavimo charakteristikos $I_z = f(I_g)$, kai apkrovos pobūdis aktyvusis-induktyvusis ($\varphi > 0$), aktyvusis ($\varphi = 0$) ir aktyvusis-talpinis ($\varphi < 0$) esant skirtingoms imtuvų galios koeficientų vertėms

išorinės charakteristikos $U_g = f(I_g)$ pobūdį, įvertinamas skersinės inkaro reakcijos išmagnetinantis poveikis.

4.3. Traukos generatorių žadinimo srauto valdymo būdai

Šiuolaikinių šilumvežių traukos generatorių (nuolatinės srovės ir sinchroninių) žadinimas daugeliu atvejų yra nepriklausomas, t. y. žadinimas atliekamas iš atskiro nuolatinės įtampos šaltinio. DC/DC srovės sistemos šilumvežių elektros pavarose traukos generatorių žadinimas atliekamas nuo specialios paskirties mažos galios nuolatinės srovės elektros mašinų – žadinimo generatorių. AC/DC srovės sistemos šilumvežių elektros pavarose sinchroniniai traukos generatoriai žadinami nuo vienfazės mažos galios kintamosios srovės generatoriaus per valdomąjį lygintuvą. AC/DC srovės sistemos šilumvežių sinchroninio traukos generatoriaus savojo žadinimo sistema pateikta 4.9 pav.

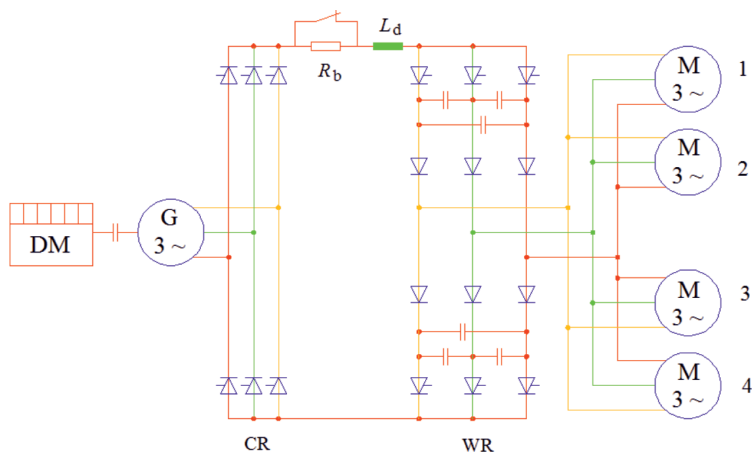


4.9 pav. AC/DC srovės sistemos šilumvežių sinchroninio traukos generatoriaus savojo žadinimo sistema: GS – sinchroninis traukos generatorius; L_{GS} – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo apvija; CR1, CR2 – valdomieji lygintuvai; L_G – generatoriaus G žadinimo apvija; R – rezistorius

4.4. AC/AC srovės sistemos šilumvežių dažninės elektros pavaros

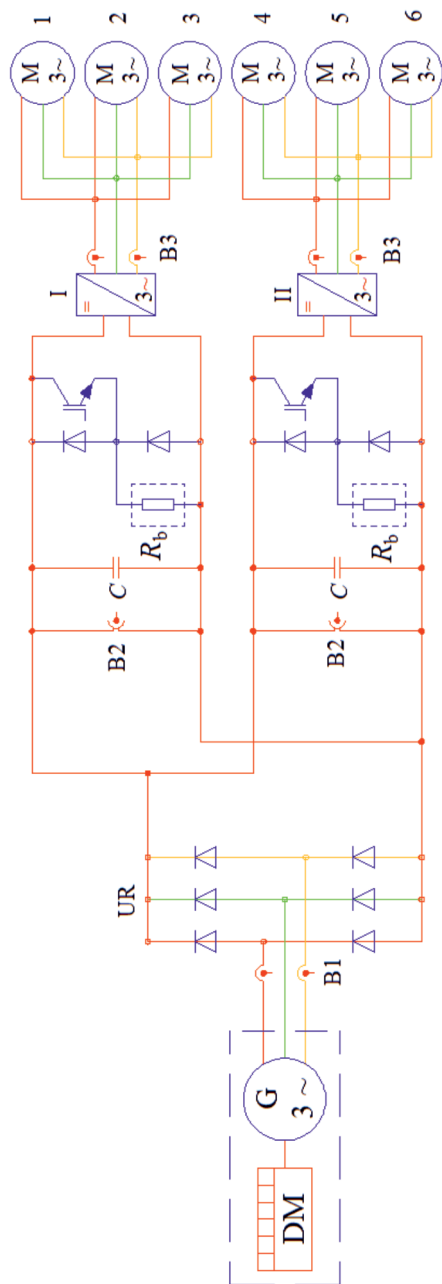
Supaprastinta šilumvežio elektros pavaros principinė schema, kurioje naudojamas autonominis srovės inverteris ASI, pateikta 4.10 pav.

Traukos keitiklis (4.10 pav.) sudarytas iš valdomojo lygintuvo CR ir autonominio srovės inverterio WR. Supaprastinta šilumvežio elektros pavaros funkcinė schema, kurioje naudojamas autonominis įtampos inverteris AII, pateikta 4.11 pav. Čia: DM – dyzelinis variklis; G – trifazis sinchroninis traukos generatorius; UR – nevaldomasis trifazis tiltelinis lygintuvas; I–II – autonominiai inverteriai; R_b – stabdymo rezistorius; C – energijos kaupimo kondensatorius; B1, B3 – fazinių srovių jutikliai; B2 – išlygintos įtampos jutiklis; 1–6 – asinchroniniai traukos varikliai.



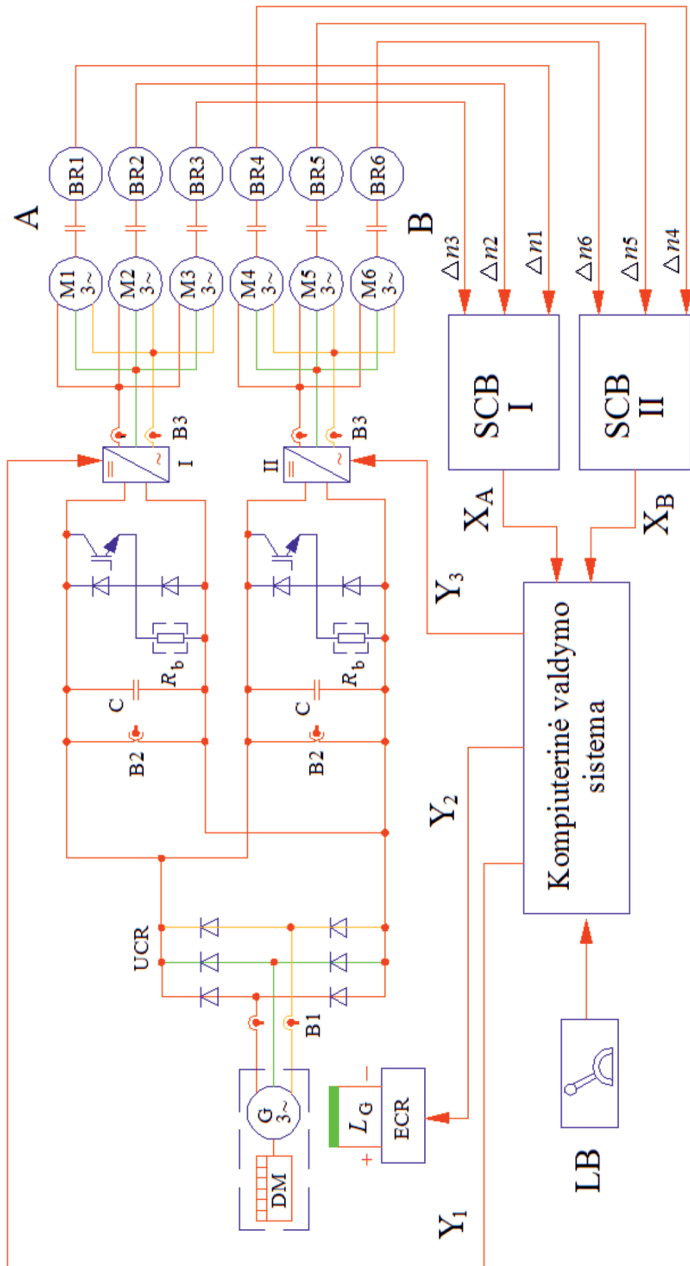
4.10 pav. Supaprastinta šilumvežio elektros pavaros principinė schema:

DM – dyzelinis variklis; G – sinchroninis traukos generatorius;
CR – valdomasis lygintuvas; WR – autonominis srovės inverteris; L_d – reaktyvioji apkrova (reaktorius); R_b – dinaminio stabdymo rezistorius; 1–4 – asinchroniniai trumpai jungto rotoriaus traukos varikliai



4.11 pav. AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros funkcinė schema

Lokomotyvų dažninė elektros pavara paprastai turi dvi pagrindines dalis: asinchroninį traukos variklį ir jį maitinantį dažnio keitiklį. Dažninėse elektros pavarose dėl savo patikimumo, pigumo ir nesudėtingos priežiūros dažniausiai taikomi trifaziai asinchroniniai traukos varikliai su trumpai jungtu rotoriumi. 4.12 pav. pavaizduota AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros kompiuterinė (mikroprocesorinė) valdymo sistema, sudaryta iš: BR1 – BR6 aširačių greičio jutiklių, sumontuotų ašidėžėse arba traukos varikliuose, A vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalų palyginimo mazgo SPMI, B vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalų palyginimo mazgo SPMII. Galimi pavaros parametrų kontrolės ir valdymo variantai: a) aširačių greičių nuokrypos signalai lyginami su leidžiamosios nuokrypos signalais blokuose SCBI bei SCBII ir koreguojami, keičiant to inverterio parametrus, iš kurio maitinami atitinkami trys asinchroniniai traukos varikliai; b) jeigu valdant I ir II inverterio parametrus visų aširačių greičių suvienodinti nepavyksta, apribojama sinchroninio traukos generatoriaus įtampa, sumažinant žadinimo srovę signalu – Y2. AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros kompiuterinė (mikroprocesorinė) dinaminio stabdymo valdymo sistema pateikta 4.12 pav. Čia: LB – stabdymo užduoties valdiklis; SCBI-A – vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalų palyginimo mazgas; SCBII-B – vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalų palyginimo mazgas; Y₂ – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo srovę koreguojantis signalas; Y₁ – valdymo signalas, koreguojantis I inverterio elektrinius parametrus; Y₂ – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo srovę koreguojantis signalas; Y₃ – valdymo signalas, koreguojantis II inverterio elektrinius parametrus; ECR – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo srovės reguliatorius; L_G – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo apvija;

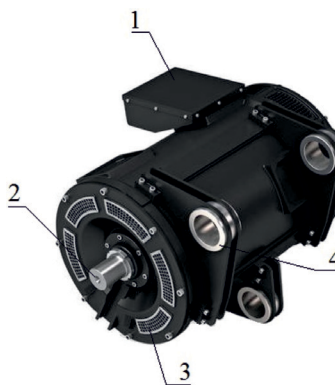


4.12 pav. AC/AC srovės sistemos šilumvežio kompiuterinė dinaminio stabdymo valdymo sistema

$\Delta n_1, \Delta n_2, \Delta n_3, \Delta n_4, \Delta n_5, \Delta n_6$ – traukos variklių greičių nuokrypos signalai; X_A – bendrasis palygintas A vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalas; X_B – bendrasis palygintas B vežimėlio aširačių greičių nuokrypos signalas; B1, B3 – srovių jutikliai; B2 – įtampos jutikliai.

4.5. Trifaziai asinchroniniai traukos varikliai

Atsižvelgiant į šiuolaikinių lokomotyvų elektros pavarų sandarą, tinkamiausi būtų **asinchroniniai varikliai** (angl. *asynchronous motors*, vok. *Drehstrom-asynchron motoren*). Dėl santykinai mažos masės be kolektoriaus ir šepečių asinchroniniai traukos varikliai su trumpai jungtu rotoriumi gali patikimai dirbti greitaigiuose keleiviniuose lokomotyvuose. Asinchroninis variklis su trumpai jungtu rotoriumi turi santykinai mažą paleidimo momentą ir didelę paleidimo srovę. Paleidimo momentui padidinti ir paleidimo srovei sumažinti galima pagaminti „narvelio“ tipo rotorių su didesne aktyviąja varža, bet šiuo atveju varikliui būdingas didesnis slydimas ir didesni rotoriaus grandinės nuostoliai. Bendrovės ABB traukos variklio konstrukcija pateikta 4.13 pav.



4.13 pav. Bendrovės ABB traukos variklio konstrukcija: 1 – gnybtų dėžutė; 2 – velenas; 3 – ventiliacijos angos; 4 – guoliavietės

4.6. Asinchroninio traukos variklio darbo režimai

Kai variklis prijungiamas prie trifazės įtampos, statoriuje indukuojamas sukamasis magnetinis laukas, kuris sukasi sinchroniniu greičiu $n_0 = n_1$. Kadangi pramonės įrenginiuose maitinimo tinklo dažnis, kuris palaikomas valstybinėse energetinėse sistemose, nekinta ir yra 50 arba 60 Hz, tai sinchroninis greitis techninėje literatūroje žymimas n_0 . Vertinant tai, kad šilumvežių traukos generatorių įtampos tinklo dažnis nėra pastovus, tai sinchroninis greitis žymimas n_1 . Vienu svarbiausių asinchroninio traukos variklio ATV parametrų yra *slydimas* s (angl. *slip*), kuris išreiškiamas formule:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (4.9)$$

čia: n_1 – sukamojo magnetinio lauko greitis; n_2 – rotoriaus sukimosi greitis.

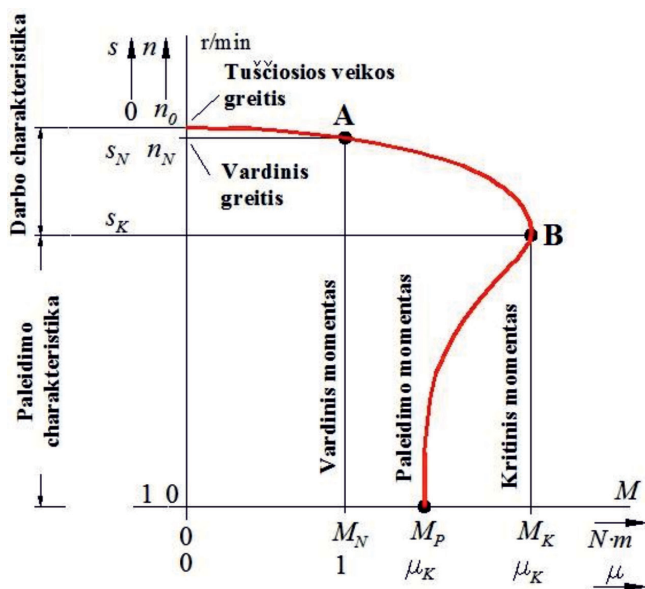
Maitinimo įtampos dažnis (arba statoriaus magnetinio lauko dažnis) f_1 (angl. *mains frequency*) išreiškiamas formule $f_1 = \frac{pn_1}{60}$, o *rotoriaus EV dažnis* (arba rotoriaus magnetinio lauko dažnis) f_2 (angl. *frequency of the rotor voltage*) išreiškiamas formule $f_2 = \frac{pn_2}{60}$ (čia p – polių porų skaičius), tada:

$$s = \frac{f_1 - f_2}{f_1}. \quad (4.10)$$

Skirtumas $f_1 - f_2 = \Delta f$ vadinamas absoliučiuoju rotoriaus slydimo dažniu. Elektrovara, indukuojama besisukančiame rotoriuje, yra to paties dažnio. Absoliutusias rotoriaus slydimo dažnis Δf bus:

$$\Delta f = sf_1. \quad (4.11)$$

Esant vardinei apkrovai, įvairių asinchroninių variklių rotoriaus greitis sudaro 98,0–92,5 % statoriaus sukamojo magnetinio lauko greičio n_1 (nominalus slydimas s_N paprastai siekia 2–7,5 %). *Slydimas lygus 1, esant sustabdytam rotorui, ir kinta nuo 1 iki nulio*. Kuo didesnė apkrova, tuo mažesnis rotoriaus greitis n_2 (angl. rotor speed). Iš asinchroninio variklio mechaninės charakteristikos $n = f(M)$ (angl. speed-torque characteristic; vok. Drehzahl-Drehmomentverhalten) (žr. 4.14 pav.) matyti, kad didėjant apkrovos momentui, asinchroninio variklio rotoriaus greitis mažėja nedaug. Tokio variklio mechaninė charakteristika vadinama kieta. Maksimalų elektromagnetinį momentą variklis pasiekia esant *kritiniam slydimui* s_K (angl. slip at pull-out torque), kuris pagal variklio konstrukciją siekia 10–20 %. Santykis



4.14 pav. AV mechaninė charakteristika: s_K – kritinis slydimas; M_N – **vardinis** (nominalusis) asinchroninio variklio **sukimo momentas** (angl. rated torque); M_P – **paleidimo momentas** (angl. starting torque); M_K – **kritinis momentas** (angl. pull-out torque)

$M_{\max}/M_N$ apibūdina variklio perkrovos dydį. Jis vadinamas *perkrovos koeficientu* (*leidžiamos srovės koeficientu*) λ ir yra vidutiniškai lygus 1,8–2,5. Santykis M_p/M_N vadinamas *paleidimo koeficientu* ir nusako paleidimo savybes. Lokomotyvų elektros pavarose taikomi asinchroniniai varikliai su trumpai jungtu (narveliniu) rotoriumi. AV mechaninė charakteristika (variklio greičio n ir apkrovos momento M tarpusavio priklausomybė) $n = f(M)$ pateikta 4.14 pav. (Masteika 2003).

Dažnai mechaninė charakteristika sudaroma taikant santykinius vienetus. Tada ji virsta slydimo s ir santykinio apkrovos momento μ tarpusavio priklausomybe, tai yra $s = f(\mu)$.

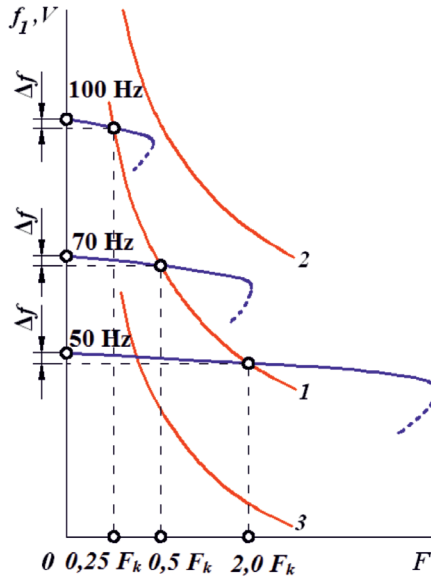
Iš charakteristikos matyti, kad variklis pradeda suktis, kai sukuriamas paleidimo momentas M_p , o momentui didėjant iki maksimaliojo (kritinio) momento M_k , variklio greitis padidėja (slydimas mažėja nuo 1 iki s_k). Ši charakteristikos dalis vadinama paleidimo charakteristika. Toliau variklio momentas pradeda mažėti, tačiau variklio greitis didėja iki nominaliojo (vardinio) greičio n_N (slydimas s_N), esant nominaliajam apkrovos momentui M_N , arba iki tuščiosios veikos greičio n_0 (slydimas $s = 0$), kai nėra apkrovos ($M_s = 0$). Kita charakteristikos dalis (tarp kritinio ir $M_s = 0$ momentų) yra variklio darbo charakteristika. Sinchroninis greitis $n_0 = n_1$ ir išreiškiamas formule $n_0 = 60 f_1 / p$. Esant traukos ir elektrinio stabdymo režimams slydimas nevisiškai apibrėžia asinchroninio variklio darbo režimus: lokomotyvui judant reikia reguliuoti greitį, t. y. keisti dažnį f_1 ir f_2 , kartu keičiant statorių maitinančios įtampos vertę. Todėl asinchroninio traukos variklio darbo režimai gali būti įvairūs esant tam pačiam slydimui s . Žinant, kad variklio maksimalus momentas taip pat priklauso nuo statorių maitinančios įtampos ir dažnio verčių, tai keičiantis lokomotyvo darbo režimams keisis ir traukos variklio elektromagnetinio momento stabilumo atsarga.

4.7. Asinchroninio traukos variklio greičio reguliavimo būdai

Kadangi $n_2 = n_1(1-s) = 60f_1/p(1-s)$, asinchroninio traukos variklio rotorius sukimosi greitį n_2 galima reguliuoti (t. y. gauti dirbtines mechanines charakteristikas) šiais būdais:

- 1) **keičiant maitinimo įtampos dažnį f_1** (dažninis reguliavimas) galima tolygiai reguliuoti sukamojo magnetinio lauko greitį n_1 ;
- 2) **keičiant maitinimo įtampos U_1 vertę**. Šiam dirbtinių mechaninių charakteristikų keitimui būdinga tai, kad variklio pasiekiamas momentas proporcingas maitinimo įtampos kvadratui, o kritinis slydimas s_K nekinta;
- 3) **keičiant statoriaus polių porų skaičių** galima diskretiškai keisti sukamojo magnetinio lauko greitį n_1 ;
- 4) **keičiant slydimą (nenaudojant slydimo energijos)** galima keisti mechaninės charakteristikos pobūdį;
- 5) **keičiant slydimą (panaudojant dalį slydimo energijos)**, t. y. į rotorius grandinę įjungiant papildomą slydimo dažnio elektrovartą E_2 , $f_2 = sf_1$ (kaskadinės asinchroninio variklio greičio reguliavimo schemas);
- 6) **kombinuojant minėtus būdus**, pvz., keičiant polių porų skaičių, derinant su slydimo keitimu tiristoriniais įtampos regulatoriais arba valdomais reaktoriais ir kt. Dirbtinės lėkštelės traukos charakteristikos, gautos taikant asinchroninio traukos variklio greičio dažninį reguliavimo būdą, pateiktos 4.15 pav.

Vienu metu keičiant maitinančios įtampos U_1 vertę ir jos dažnį f_1 pagal pasirinkto asinchroninio traukos variklio sukimosi greičio



4.15 pav. Dirbtinės lokomotyvo traukos charakteristikos, gautos taikant asinchroninio traukos variklio greičio dažninį reguliavimo būdą:

f_1 – maitinančio tinklo dažnis; v – lokomotyvo linijinis greitis;

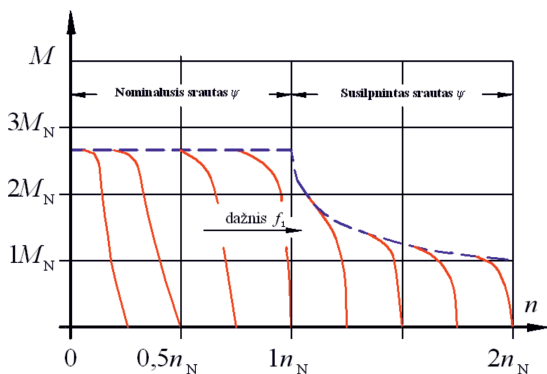
F_k – traukos jėga aširačio liestinėje

reguliavimo dėsnį, galima gauti bet kokio pobūdžio lokomotyvo traukos charakteristikas. Dažninės elektros pavaros kokybę lemia asinchroninio variklio kompleksinio valdymo poveikio dedamųjų – dažnio keitiklio išėjimo įtampos dažnio ir amplitudės – valdymo principai. Šios dedamosios turi įtakos asinchroninio traukos variklio srovei ir srautui, dėl šios priežasties susidaro momentas, lemiantis variklio greitį. Tobuliausia yra vektorinio dažninės elektros pavaros valdymo sistema, leidžianti autonomiškai valdyti asinchroninio traukos variklio srovę bei srautą statiniu ir dinaminiu režimu, taip pat gauti valdymo charakteristikas, artimas nuolatinės srovės elektros pavarų valdymo charakteristikoms. Vektorinio valdymo sistema yra techniškai sudėtingiausia iš visų dažninių elektros pavarų valdymo sistemų, kadangi

valdymo poveikiai formuojami koordinačių x, y sistemoje, besisukančioje sukamojo magnetinio lauko greičiu ω_1 , o pavaros parametrai matuojami ir reguliuojami fiksuotoje, su variklio statoriaus apvija susietoje nejudamoje α, β koordinačių sistemoje. Todėl, be įprastinių reguliatorių, šioje sistemoje reikalingi specialūs moduliai, leidžiantys perskaičiuoti valdymo parametrų reikšmes iš vienos koordinačių sistemos į kitą. Asinchroninio variklio dirbtinės mechaninės charakteristikos, keičiant maitinimo įtampos dažnį, pateiktos 4.16 pav.

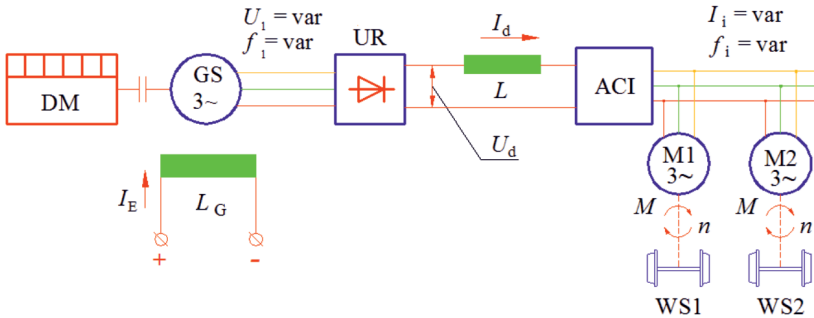
4.8. Traukos keitiklių sandaros schemas

Traukos keitiklių schemas būna dviejų pagrindinių tipų: tiesioginio ryšio arba su tarpine nuolatinės srovės grandimi. Traukos keitiklių su autonominiais srovės inverteriais (ACI) sandaros schema pateikta 4.17 pav. Čia: DM – dyzelinis variklis; GS – sinchroninis traukos generatorius; L_G – sinchroninio traukos generatoriaus žadinimo apvija; UR – nevaldomasis lygintuvas; ACI – autonominis srovės inverteris; L – didelio induktyvumo droselis (srovės šaltinis); M1, M2 – asinchroniniai trumpai jungto rotoriaus traukos varikliai; WS1, WS2 – aširačiai.

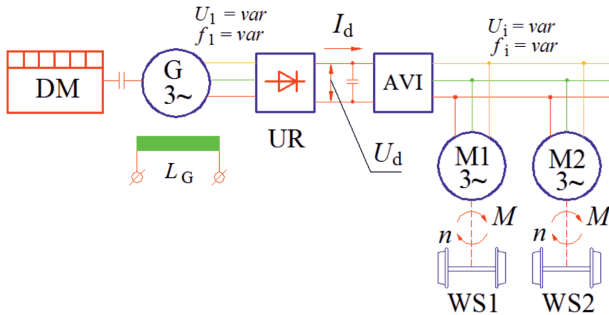


4.16 pav. Asinchroninio variklio dirbtinės mechaninės charakteristikos keičiant maitinimo įtampos dažnį

ASI turi srovės šaltinio savybių, todėl ir jie privalo būti maitinami iš srovės šaltinio. Tokių savybių maitinimo šaltiniui suteikia didelio induktyvumo droselis L , kuris įjungiamas maitinimo šaltinio išėjime nuosekliai su ASI. Tada ATV valdomas keičiant statoriaus srovės I_1 ir dažnio f_1 vertes. Valdomajame tiristoriniame lygintuve keičiama išlygintos įtampos vertė, inverteryje keičiama statoriaus srovės I_1 ir dažnio f_1 vertė. Traukos keitiklių su autonominiais įtampos inverteriais (AII) sandaros schema pateikta 4.18 pav.



4.17 pav. Supaprastinta šilumvežio AC/AC elektros pavaros sandaros schema



4.18 pav. Supaprastinta kintamosios ir kintamosios AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros sandaros schema: DM – dyzelinis variklis; G – sinchroninis traukos generatorius; L_G – traukos generatoriaus žadinimo apvija; UR – nevaldomasis lygintuvas; AVI – autonominis įtampos inverteris;

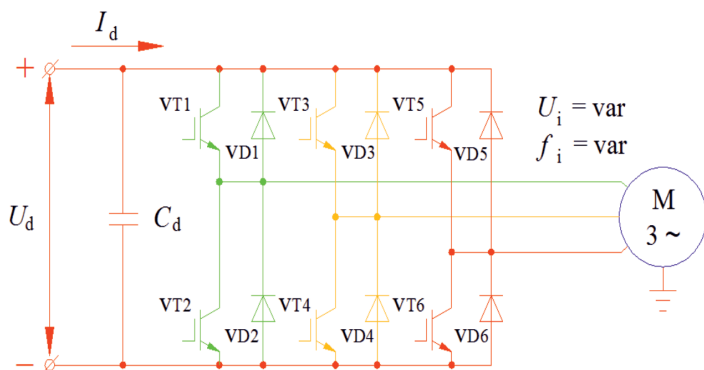
M1, M2 – asinchroniniai trumpai jungto rotoriaus traukos varikliai;

WS1, WS2 – aširačiai

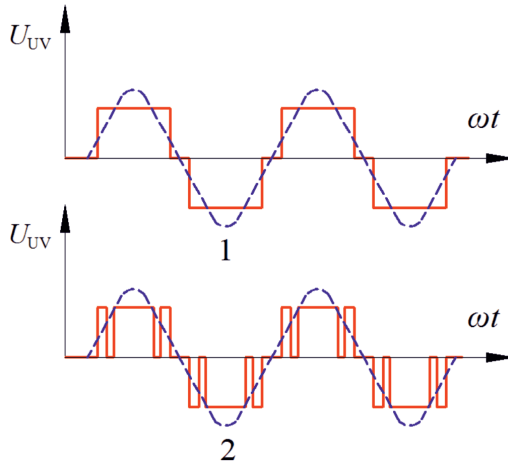
AC/AC srovės sistemos šilumvežio elektros pavaros schemose tarp tinklo (sinchroninio traukos generatoriaus išėjimo gnybtų) ir inverterio yra tarpinė nuolatinės srovės grandis – lygintuvas, kuris savo ruožtu gali būti nevaldomasis arba valdomasis. Autonominės traukos riedmenų tinklo sinchroninio traukos generatoriaus išvesties parametrų sąlyga $U_1 = \text{const}$ ir $f_1 = \text{const}$ galioja tik šilumvežių elektros pavarų sandaroje esantį sinchroninį traukos generatorių sukančią dyzeliniu varikliu fiksuotu greičiu $n_D = \text{const}$ ir esant žadinimo srovei $I_z = \text{const}$. Valdant lokomotyvą, šių parametrų kitimo ribos plačios, t. y. $U_1 = \text{var}$, $f_1 = \text{var}$. Dažnio f_i reguliavimo diapazonas lokomotyvų traukos keitikliuose paprastai būna 0–300 Hz. Ypač svarbu keitiklio išėjimo įtampą kiek galima priartinti prie sinusinės formos, kartu gerokai sumažinti ATV nuostolius, kurie nesinusinės formos atveju dėl harmoninių dėdumų poveikio yra gana dideli.

Trifazio įtampos inverterio schema, naudojant IGBT tranzistorius, pateikta 4.19 pav. Čia: VT1–VT6 – IGBT tranzistoriai; VD1–VD6 – atgalinio tiltelio diodai.

Pagrindinė inverterio funkcija yra transformuoti nuolatinę (DC) įtampą į kintamos amplitudės ir dažnio simetrinę trifazę įtampą.



4.19 pav. Trifazio įtampos inverterio schema naudojant IGBT tranzistorius



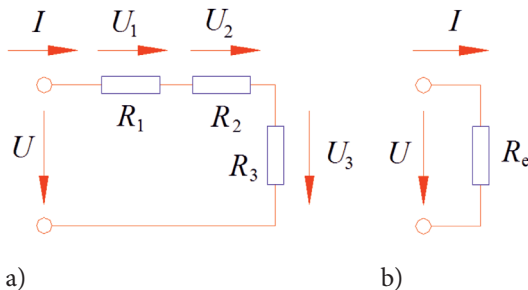
4.20 pav. Inverterio generuojamų įtampų, esančių U, V, W fazėse, ir tarpfazinių įtampų U_{UV} su vienu (1) ir trimis impulsais (2) per pusperiodį diagramos

Taikant impulso pločio moduliaciją PWM (angl. *pulse with modulation*) inverterio generuojamų įtampų, esančių U, V, W fazėse, ir tarpfazinių įtampų U_{UV} su vienu ir trimis impulsais per pusperiodį diagramos pateiktos 4.20 pav.

5. LOKOMOTYVŲ ELEKTROS PAVARŲ PRATYBŲ UŽDAVINIAI

5.1. Nuolatinės ir kintamosios srovės grandinės

Nuosekliai sujungtų imtuvų grandinės trūkumas yra tas, kad kiekvieno imtuvo 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. Imtuvus sujungus nuosekliai, tinklo įtampa juose pasiskirsto proporcingai kiekvieno imtuvo varžai. Dėl to vieni iš jų gali būti nepakankamai išnaudojami, o kiti – perkrauti. Tarkime, nuosekliai sujungėme du imtuvus, kurių vardinės įtampos vienodos, bet vieno vardinė galia yra dvigubai mažesnė negu kito. Jų varžas galima apskaičiuoti šitaip: $R_1 = U_N^2 / P_N$; $R_2 = U_N^2 / (P_N)$. Matyti, kad $R_1 = 2R_2$, todėl, grandinė tekant 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. Nuosekliai sujungtų imtuvų grandinės (a) ir ekvivalentinio imtuvo (b) schemas pateiktos 5.1 pav.



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

1 uždavinys. Lempučių girlianda prijungiama prie 220 V nuolatinės įtamos tinklo. Apskaičiuokime: 1. Kiek 12 V, 5 W elektros lempučių reikia sujungti nuosekliai. 2. Kaip pasikeis lempučių režimai, jei viena iš jų: a) bus 3 W galios; b) perdegs.

Sprendimas:

1. Visos 5 W lemputės yra vienodos, todėl jų varžos yra lygios. Kad kiekvienos įtampa U_{N5} būtų vardinė, turi būti lempučių skaičius $n = U / U_{N5} = 220 / 12 = 18,3$. Girliandai parinkime $n_g = 19$ lempučių, kad kiekvienos jų tikroji įtampa U'_5 būtų ne didesnė už vardinę: $U'_5 = U / n_g = 220 / 19 = 11,6$ V.

2a. Pakeitę vieną lemputę mažesnės galios lempute, pakeičiame visos girliandos varžą, srovę, taip pat lempučių įtampas, apskaičiuojame lempučių varžas: 5 W lemputės varža $R_5 = U_{N5}^2 / P_{N5} = 12^2 / 5 = 28,8 \Omega$.

3 W lemputės varža: $R_3 = U_{N3}^2 / P_{N3} = 12^2 / 3 = 48,0 \Omega$;

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 matyti, 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 perdegs.

2b. Šiai (ar kuriai nors kitai) lemputei perdegus, grandinė nutrūksta: $R_g'' = \infty$, $I'' = 0$, todėl užgęsta visa girlianda.

Nuosekliai sujungti šaltiniai. Nuosekliai sujungtus šaltinius galima pakeisti vienu ekvivalentiniu (5.2 pav., b). Jo parametrai – ekvivalentinė EV E_e ir ekvivalentinė vidinė varža R_{ie} – turi būti tokie, kad juo tekėtų ta pati srovė.

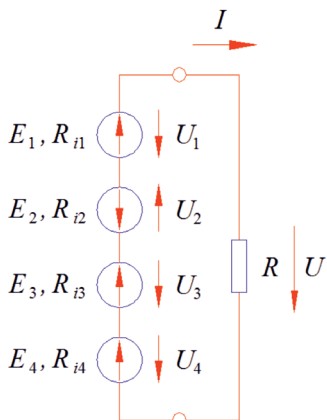
5.2 pav., a grandinės srovei išreikšti pasitelksime II Kirchhofo dėsni:

$$RI + R_{i4}I + R_{i3}I + R_{i2}I + R_{i1}I = E_4 + E_3 - E_2 + E_1.$$

Iš čia:

$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3 + E_4}{R + R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4}} = \frac{E_e}{R + R_{ie}};$$

a)

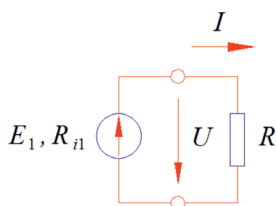


$$E_e = E_1 - E_2 + E_3 + E_4;$$

$$R_{ie} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4}.$$

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

b)



5.2 pav. Grandinės su nuosekliai sujungtais EV šaltiniais (a) ir su ekvivalentiniu šaltiniu (b) schemas

2 uždavinys. Grandinės (5.2 pav., a) šaltinių parametrai tokie: $E_1 = E_2 = E_3 = 12 \text{ V}$; $E_4 = 36 \text{ V}$; $R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} = 0,3 \Omega$; $R_{i4} = 0,2 \Omega$. Imtuvo varža $R = 20 \Omega$. Apskaičiuokime ekvivalentinio šaltinio E_e , vidinę varžą R_{ie} , jo ir kiekvieno šaltinio įtampą: U, U_1, U_2, U_3, U_4 .

Sprendimas:

Ekvivalentinio šaltinio

$$E_e = E_1 - E_2 + E_3 + E_4 = 12 - 12 + 12 + 36 = 48 \text{ V};$$

$$R_{ie} = R_{i1} + R_{i2} + R_{i3} + R_{i4} = 3R_{i1} + R_{i4} = 3 \cdot 0,3 + 0,2 = 1,1 \Omega.$$

Grandinės srovė:

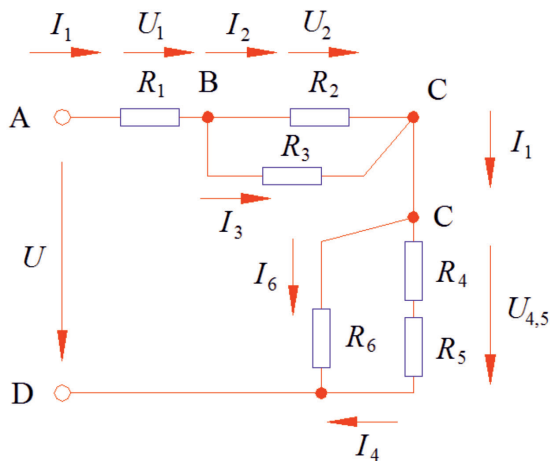
$$I = E_e / (R + R_{ie}) = 48 / (20 + 1,1) = 2,27 \text{ A}.$$

$$U = E_e - R_{ie}I = 48,0 - 1,1 \cdot 2,27 = 45,5 \text{ V}.$$

$$U_1 = U_3 = E_1 - R_{i1}I = 12,0 - 0,3 \cdot 2,27 = 11,3 \text{ V}.$$

$$U_4 = E_4 - R_{i4}I = 36,0 - 0,2 \cdot 2,27 = 35,5 \text{ V}.$$

Antrasis šaltinis dirba imtuvo režimu.



5.3 pav. 3 uždavinio schema

Pagal II Kirchhofo dėsny: $-U_2 + R_{i2}I = -E_2$, todėl $U_2 = E_2 + R_{i2}I = 12,0 + 0,3 \times 2,27 = 12,7$ V, t. y. jo įtampa didesnė už EV ir yra priešingos krypties nei kitų šaltinių.

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, sprendžiant konkretų uždavinį pasirinkamas reikiamas tyrimo nuoseklumas.

3 uždavinys.

Duota:

$$R_1 = R_2 = 4 \, \Omega, \, R_3 = 6 \, \Omega, \, R_4 = 5 \, \Omega, \, R_5 = 7 \, \Omega, \, R_6 = 10 \, \Omega;$$

$$U = 36 \, \text{V}. \text{ Apskaičiuokime ekvivalentinio imtuvo varžą ir srovę.}$$

Sprendimas:

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

Matyti, kad imtuvai R_6 ir R_{45} sujungti lygiagrečiai, o R_1 ir R_{23} – nuosekliai. Ekvivalentinių imtuvų varžos:

$$R_{456} = R_{45} R_6 / (R_{45} + R_6) = 12 \cdot 10 / (12 + 10) = 5,45 \, \Omega;$$

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 4 + 2,4 = 6,4 \, \Omega.$$

Pagaliau šiuos paskutinius nuosekliai sujungtus imtuvus keičiame vienu ekvivalentiniu, kurio varža $R_e = R_{123} + R_{456} = 6,4 + 5,45 = 11,9 \, \Omega$. Jo srovė $I = U / R_e = 36 / 11,9 = 3,03 \, \text{A}$.

4 uždavinys. Žinomi visi tiriamosios grandinės sąlygoje pateikti ir sprendime apskaičiuoti dydžiai. Apskaičiuokime visų imtuvų sroves.

Sprendimas:

Grandinės schemoje (5.3 pav.) pažymėkime visų imtuvų įtampas ir sroves, pastarosioms parinkdami imtuvų indeksus. Pirmuoju imtuvu R_1 tekanti srovė jau apskaičiuota: $I_1 = I = 3,03 \text{ A}$. Likusias sroves patogų skaičiuoti remiantis Omo dėsniu ir apskaičiavus lygiagrečiai sujungtų imtuvų grupių įtampas:

$$U_2 = U_3 = R_{23}I_1 = 2,4 \cdot 3,03 = 7,27 \text{ V};$$

$$I_2 = U_2 / R_2 = 7,27 / 4 = 1,82 \text{ A}; I_3 = U_2 / R_3 = 7,27 / 6 = 1,21 \text{ A};$$

$$U_6 = U_{45} = R_{456}I_1 = 5,45 \cdot 3,03 = 16,5 \text{ V};$$

$$I_4 = U_6 / R_{45} = 16,5 / 12 = 1,38 \text{ A};$$

$$I_6 = U_6 / R_6 = 16,5 / 10 = 1,65 \text{ A}.$$

Patikrinkime atsakymus, taikydami I ir II Kirchhofo dėsnius.

Laikome, kad atsakymai gali nesutapti 1–2 %.

$$\text{B mazgo: } I_1 = I_2 + I_3 = 1,82 + 1,21 = 3,03 \text{ A};$$

$$\text{C mazgo: } I_1 = I_4 + I_6 = 1,38 + 1,65 = 3,03 \text{ A};$$

$$\text{ABCD kontūro: } -U + U_1 + U_2 + U_6 = 0.$$

Iš čia:

$$U = R_1I_1 + U_2 + U_6 = 4 \cdot 3,03 + 7,27 + 1,65 = 35,9 \text{ V} \approx 36 \text{ V}.$$

$$\text{Kaip matyti, apskaičiuotoji įtampa skiriasi nuo tikrosios: } \frac{36 - 35,9}{36} \cdot 100 = 0,28 \text{ \%}.$$

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

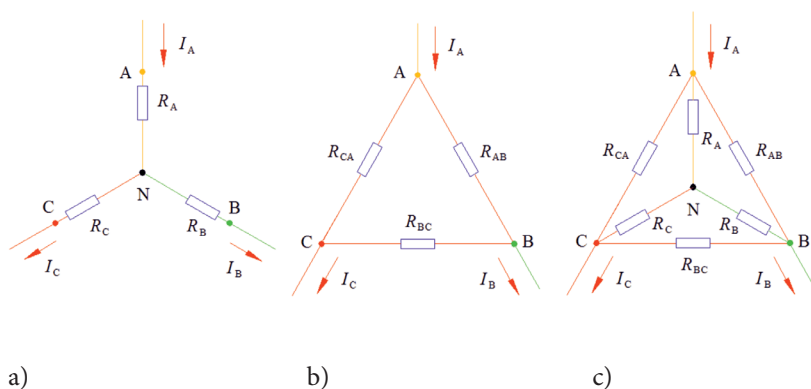
$$I_2 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} I_1 = \frac{6}{4 + 6} \cdot 3,03 = 1,83 \text{ A};$$

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

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

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

Žvaigžde ir trikampių sujungti imtuvai



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

Žvaigžde sujungtais imtuvais vadinsime tokius, kurių vieni galai yra sujungiami į bendrą mazgą, o kiti galai prijungiami prie kitų grandinės imtuvų ar mazgų (5.4 pav., a). Trikampių sujungtais imtuvais vadinsime tokius, kurių grandinė sudaro uždarą kontūrą, o kiekvienos jų poros sujungimo mazgai prijungiami prie trijų kitų grandinės imtuvų ar mazgų (5.4 pav., b). Žvaigžde ir trikampių sujungtų imtuvų grandinės galima ekvivalentiškai pakeisti vieną kita (5.4 pav., c) taip, kad jų

taškų (mazgų) A, B ir C potencialai išliktų tokie pat, vadinasi, ir srovės I_A , I_B ir I_C nepakistų. Keičiant trikampiu sujungtų imtuvų grandinę ekvivalentine, kurioje imtuvai sujungti žvaigžde: „ Δ “ $\Rightarrow$ „Y“:

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

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

$$R_C = \frac{R_{CA}R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}.$$

Keičiant žvaigžde sujungtų imtuvų grandinę ekvivalentine, kurioje imtuvai sujungti trikampiu:

$$„Y“ \Rightarrow „\Delta“,$$

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

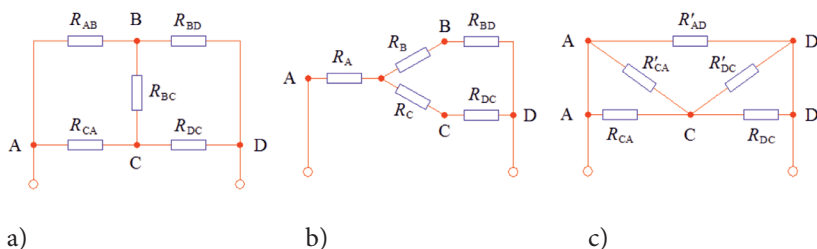
$$R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A};$$

$$R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}.$$

Jei imtuvai vienodi: $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R_{\Delta}$ arba $R_A = R_B = R_C = R_Y$, tai $R_Y = R_{\Delta} / 3$ arba $R_{\Delta} = 3R_Y$.

Žvaigžde ar trikampiu sujungtų imtuvų grandinės tiriamos ekvivalentinio keitimo metodu: ekvivalentiškai pakeitus taip sujungtus imtuvus vienus kitais, grandinėje lieka tik mišriai sujungti imtuvai. Tarkime, reikia pakeisti vienu ekvivalentiniu penkis imtuvus, sujungtus pagal vadinamąją tiltelio schemą (5.5 pav., a). Matyti, kad šioje

grandinėje nėra nei nuosekliai, nei lygiagrečiai sujungtų imtuvų, bet yra imtuvų, sujungtų žvaigžde arba trikampiui. Žvaigžde sujungti R_{AB}, R_{BC}, R_{BD} arba R_{CA}, R_{BC}, R_{DC} imtuvai. Trikampiui sujungti R_{AB}, R_{BC}, R_{CA} arba R_{BC}, R_{BD}, R_{DC} imtuvai. Pakeiskime tris trikampiu sujungtus (pavyzdžiui, tarp mazgų A, B, C) imtuvus ekvivalentiniais, sujungtais žvaigžde (5.5 pav., b). Matome, kad atlikę pakeitimą turime mišriai sujungtų imtuvų grandinę. Pakeitę tris žvaigžde sujungtus (pavyzdžiui, tarp mazgų A, C, D) imtuvus ekvivalentiniais, sujungtais trikampiui (5.5 pav., c), taip pat turime mišriai sujungtų imtuvų grandinę. Ir vieną, ir kitą pakeistą grandinę galima supaprastinti ir apskaičiuoti ekvivalentinio imtuvo varžą R_{AD} .



5.5 pav. Žvaigžde ar trikampiui sujungtų imtuvų grandinių, tiriamų ekvivalentinio keitimo metodu, schemas

5 uždavinys. Akumulatoriaus $E = 12,1 \text{ V}$, vidinė varža $R_i = 0,024 \Omega$, vardinė įtampa $U_N = 12,0 \text{ V}$ ir srovė $I_N = 2,75 \text{ A}$. Apskaičiuokime būdingų režimų srovę, įtampą, galią ir naudingumo koeficientą.

Sprendimas:

Tuščioji veika – kai visi imtuvai atjungti: $R = \infty$; $I_0 = 0$; $U_0 = E - R_i I_0 = E = 12,1 \text{ V}$. Naudingumo koeficientas šiuo atveju neturi prasmės, nes imtuvai atjungti.

$$P_N = U_N I_N = 12,0 \cdot 2,75 = 33,0 \text{ W}.$$

Vardinė galia P_N , t. y. įkrautas akumuliatorius gali tiekti elektros energiją imtuvams, kurių bendroji galia ne didesnė kaip 33 W. Vardinis naudingumo koeficientas

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

6 uždavinys. Kontūrų srovių metodu raskite sroves, pavaizduotas 5.6 pav. schemoje.

Duota:

$$E_1 = 20 \text{ V}, E_2 = 10 \text{ V}, E_3 = 10 \text{ V};$$

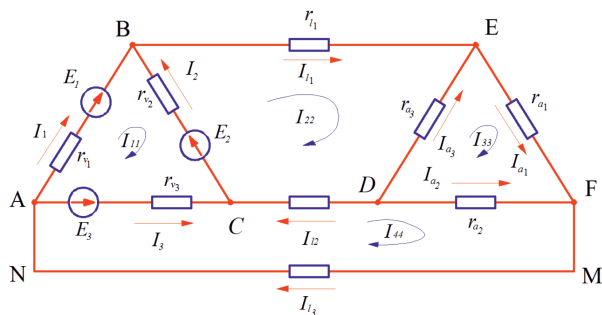
$$r_{v1} = r_{v2} = r_{v3} = 1 \Omega;$$

$$r_{l1} = r_{l2} = r_{l3} = 3 \Omega;$$

$$r_{a1} = r_{a2} = r_{a3} = 15 \Omega.$$

(Indeksas „a“ reiškia apkrovos varžą, indeksas „l“ – srovei laidžios linijos varžą.)

Išanalizavę 5.6 pav. schemą, matome, kad grandinė sudaryta iš šešių mazgų ir keturių kontūrų. Jeigu šią grandinę skaičiuotume G. Kirchhofo lygčių metodu, reikėtų parašyti penkias lygtis pagal



5.6 pav. 6 uždavinio elektrinių grandinių schema

pirmąjį G. Kirchhofo dėsnį bei keturias – pagal antrąjį ir išspręsti devynių lygčių sistemą su devyniais nežinomaisiais, t. y. reikėtų daug skaičiuoti. Šią grandinę skaičiuojant kontūrų srovių metodu, tereikia parašyti keturias lygtis ABC, CBED, DEF ir ACDFMN kontūrams.

Parašome šias lygtis:

$$\begin{cases} r_{11}I_{11} + r_{12}I_{22} + r_{14}I_{44} = E_{11}, \\ r_{21}I_{11} + r_{22}I_{22} + r_{23}I_{33} + r_{24}I_{44} = E_{22}, \\ r_{31}I_{11} + r_{32}I_{22} + r_{33}I_{33} + r_{34}I_{44} = E_{33}, \\ r_{41}I_{11} + r_{42}I_{22} + r_{43}I_{33} + r_{44}I_{44} = E_{44}. \end{cases}$$

Laisvai pasirenkame kontūrų apėjimo ir kontūrų srovių kryptis. Atsižvelgdami į ženklus, randame užrašytų lygčių varžas ir elektrovargas (EV):

$$\begin{aligned} r_{11} &= r_{v1} + r_{v2} + r_{v3} = 3 \, \Omega; & r_{13} &= r_{21} = -r_{v2} = -1 \, \Omega; \\ r_{13} &= r_{31} = 0; & r_{14} &= r_{41} = -r_{v3} = -1 \, \Omega; \\ r_{32} &= r_{v2} + r_{l1} + r_{a3} + r_{l2} = 1 + 3 + 15 + 3 = 22 \, \Omega; \\ r_{23} &= r_{32} = -r_{a3} = -15 \, \Omega; & r_{24} &= r_{42} = -r_{l2} = -3 \, \Omega; \\ r_{33} &= r_{a3} + r_{a2} + r_{a1} = 45 \, \Omega; & r_{34} &= r_{43} = -r_{a2} = -15 \, \Omega; \\ r_{44} &= r_{v3} + r_{l2} + r_{a2} + r_{l1} = 1 + 3 + 15 + 3 = 22 \, \Omega; \\ E_{11} &= E_1 - E_2 - E_3 = 20 - 10 = 10 \, \text{V}; \\ E_{22} &= E_2 = 10 \, \text{V}; & E_{33} &= 0 \, \text{V}; & E_{44} &= E_3 = 10 \, \text{V}. \end{aligned}$$

Šias reikšmes įrašome į sistemos lygtis:

$$\begin{cases} 3I_{11} - I_{22} + 0 - I_{44} = 0, \\ -I_{11} + 22I_{22} - 15I_{33} - 3I_{44} = 10, \\ 0 - 15I_{22} + 45I_{33} - 15I_{44} = 0, \\ -I_{11} - 3I_{22} - 15I_{33} + 22I_{44} = 10. \end{cases}$$

Išsprendę gautąją lygčių sistemą, randame kontūrines sroves:

$$I_{11} = 0,8 \text{ A}, I_{22} = 1,2 \text{ A}, I_{33} = 0,8 \text{ A}, I_{44} = 1,2 \text{ A}.$$

Parenkame tikrųjų šakų srovių kryptis, kaip parodyta schemeje, ir jas apskaičiuojame:

$$I_1 = I_{11} = 0,8 \text{ A}, I_3 = I_{22} - I_{11} = 1,2 - 0,8 = 0,4 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{44} - I_{11} = 1,2 - 0,8 = 0,4 \text{ A}; \quad I_{l1} = I_{22} - 1,2 \text{ A};$$

$$I_{l2} = I_{22} - I_{44} = 1,2 - 1,2 = 0; \quad I_{l3} = I_{44} = 1,2 \text{ A};$$

$$I_{a1} = I_{33} = 0,8 \text{ A}; \quad I_{a2} = I_{44} - I_{33} = 1,2 - 0,8 = 0,4 \text{ A};$$

$$I_{a3} = I_{22} - I_{32} = 1,2 - 0,8 = 0,4 \text{ A}.$$

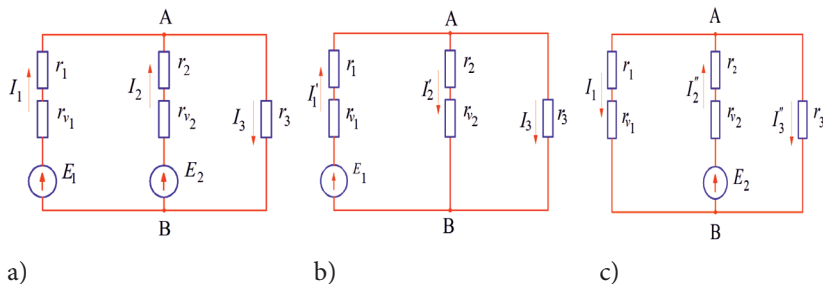
7 uždavinys. Superpozicijos metodu raskite 5.7 pav., a pavaizduotos schemos srovės I_1 , I_2 ir I_3 . Duota:

$$E_1 = 100 \text{ V}; r_{v1} = 1,5 \Omega; r_1 = 8,5 \Omega; E_2 = 110 \text{ V};$$

$$r_{v2} = 2 \Omega; r_2 = 18 \Omega; r_3 = 10 \Omega.$$

Tarkime, kad $E_2 = 0$ ir raskime šakų sroves, kai veikia tik pirmojo šaltinio EV – E_1 (5.7 pav., b):

$$r_{ekv1} = r_{v1} + r_1 + \frac{r_3(r_{v3} + r_2)}{r_{v2} + r_2 + r_3} = 1,5 + 8,5 + \frac{10(2 + 18)}{30} = \frac{50}{3} \Omega;$$



5.7 pav. 7 uždavinio elektrinių grandinių schemos

$$I_1^{\cdot} = \frac{E_1}{r_{ekv1}} = \frac{100 \cdot 3}{50} = 6 \text{ A};$$

$$U_{AB}^{\cdot} = I_1^{\cdot} \frac{r_3(r_{v2} + r_2)}{r_{v2} + r_2 + r_3} = 6 \frac{10 \cdot 20}{30} = 40 \text{ V};$$

$$I_2^{\cdot} = \frac{U_{AB}^{\cdot}}{r_{v2} + r_2} = \frac{40}{2 + 18} = 2 \text{ A}; \quad I_3^{\cdot} = \frac{U_{AB}^{\cdot}}{r_3} = \frac{40}{10} = 4 \text{ A}.$$

Laikome, kad $E_1 = 0$, ir randame šakų sroves, kai veikia tik antrojo šaltinio EV $-E_2$ (5.7 pav., c):

$$r_{ekv2} = r_{v2} + r_2 + \frac{r_3(r_{v1} + r_1)}{r_{v1} + r_1 + r_3} = 20 + \frac{10 \cdot 10}{20} = 25 \Omega;$$

$$I_2^{\cdot\cdot} = \frac{E_1}{r_{ekv2}} = \frac{110}{25} = 4 \text{ A};$$

$$U_{AB}^{\cdot\cdot} = I_2^{\cdot\cdot} \frac{r_3(r_{v1} + r_1)}{r_{v1} + r_1 + r_3} = 4,4 \frac{10 \cdot 10}{20} = 22 \text{ V};$$

$$I_1^{\cdot\cdot} = \frac{U_{AB}^{\cdot\cdot}}{r_{v1} + r_1} = \frac{22}{10} = 2,2 \text{ A}; \quad I_3^{\cdot} = \frac{U_{AB}^{\cdot}}{r_3} = \frac{22}{10} = 2,2 \text{ A}.$$

Randame tikrąsias šakų sroves:

$$I_1 = I_1^{\cdot} - I_1^{\cdot\cdot} = 6 - 2,2 = 3,8 \text{ A};$$

$$I_2 = I_2^{\cdot} - I_2^{\cdot\cdot} = 2 - 4,4 = -2,4 \text{ A};$$

$$I_3 = I_3^{\cdot} - I_3^{\cdot\cdot} = 4 + 2,2 = 6,2 \text{ A}.$$

Srovės I_1 kryptis sutampa su srovės $I_1^{\cdot}$ kryptimi, o srovės I_2 – su srovės $I_2^{\cdot}$ kryptimi, vadinasi, srovių I_1 ir I_2 kryptys sutampa su didesnių srovių kryptimis.

$$I_3 = I_3^{\cdot} - I_3^{\cdot\cdot} = 4 + 2,2 = 6,2 \text{ A}.$$

8 uždavinys. Mazgų potencialų metodu raskite schemos šakų sroves (5.8 pav.). Duota:

$$E_1 = 110 \text{ V}; r_{v1} = 2 \Omega; r_1 = 6 \Omega;$$

$$E_2 = 62 \text{ V}; r_{v2} = 1 \Omega; r_2 = 3 \Omega;$$

$$E_3 = 60 \text{ V}; r_{v3} = 3 \Omega; r_3 = 15 \Omega; r_4 = 5 \Omega; r_5 = 4\frac{2}{7} \Omega.$$

Randame visus dydžius, įeinančius į formulę:

$$U_{12} = \frac{g_1 E_1 + g_2 E_2 - g_3 E_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5};$$

$$g_1 = \frac{1}{r_{v1} + r_1} = \frac{1}{8} \text{ S}, \quad g_2 = \frac{1}{r_{v2} + r_2} = \frac{1}{4} \text{ S};$$

$$g_3 = \frac{1}{r_{v3} + r_3} = \frac{1}{18} \text{ S}, \quad g_4 = \frac{1}{r_{v4} + r_4} = \frac{1}{5} \text{ S}, \quad g_5 = \frac{1}{r_{v5} + r_5} = \frac{7}{30} \text{ S}.$$

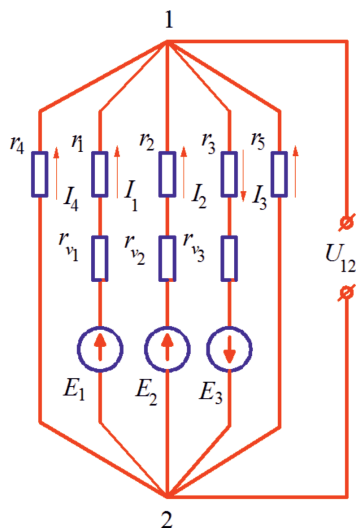
Gautąsias reikšmes įrašome į formulę ir apskaičiuojame:

$$U_{12} = \frac{110 \frac{1}{8} + 62 \frac{1}{4} - 60 \frac{1}{18}}{\frac{1}{8} + \frac{1}{4} + \frac{1}{18} + \frac{1}{5} + \frac{7}{30}}.$$

Randame sroves:

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{12}}{r_{v1} + r_1} = \frac{110 - 30}{8} = 10 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{62 - 30}{4} = 8 \text{ A}.$$

$$I_3 = \frac{-60 - 30}{18} = -5 \text{ A}; \quad I_4 = \frac{-30}{5} = -6 \text{ A}; \quad I_5 = \frac{-30}{\frac{30}{7}} = -7 \text{ A}.$$

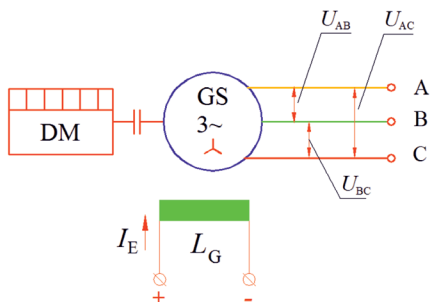


5.8 pav. 8 uždavinio elektrinių grandinių schema

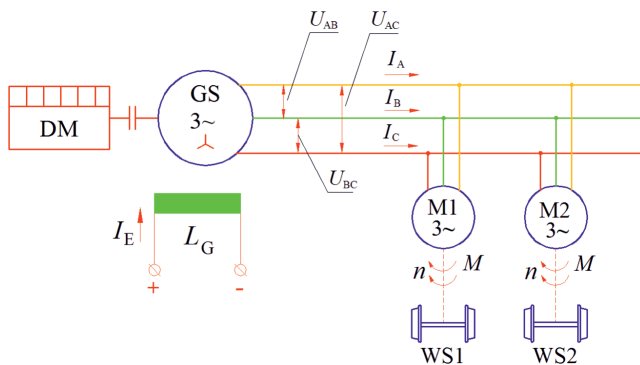
5.2. Lokomotyvų elektros pavarų grandinės elementų skaičiavimai

9 uždavinys. Apskaičiuoti, kaip pasikeis sinchroninio traukos generatoriaus fazinės ir linijinės įtampos, jeigu 5.9 pav. pateiktoje schemoje U_{AB} , U_{AC} , U_{BC} – linijinės traukos generatoriaus įtampos vertė yra 800 V, pakeitus traukos generatoriaus statoriaus apvijų jungimą iš „žvaigždės į trikampį“.

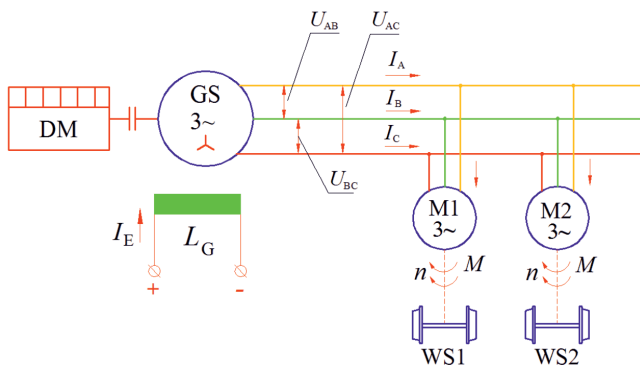
10 uždavinys. Apskaičiuoti sinchroninio traukos generatoriaus fazines ir linijines sroves, jeigu 5.10 pav. pateiktoje schemoje U_{AB} , U_{AC} , U_{BC} – linijinių traukos generatorių įtampos vertės yra 1000 V, asinchroninių traukos variklių aktyvioji galia P_{M1} , P_{M2} 300 kW, $\cos\varphi = 0,85$.



5.9 pav. 14 uždavinio schema: DM – dyzelinis variklis;
 U_{AB} , U_{AC} , U_{BC} – linijinės traukos generatoriaus įtampos



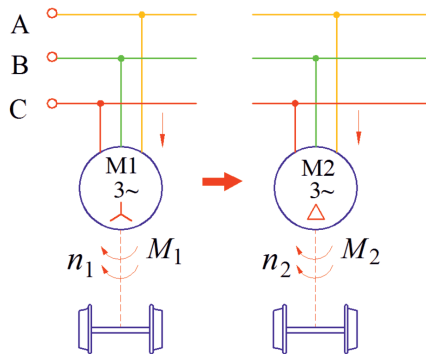
5.10 pav. 10 uždavinio schema



5.11 pav. 11 uždavinio schema

11 uždavinys. Apskaičiuoti sinchroninių traukos variklių M1, M2 fazines ir linijines sroves, jeigu 5.11 pav. pateiktoje schemoje U_{AB} , U_{AC} , U_{BC} – linijinių traukos generatorių įtampos vertės yra 1500 V, asinchroninių traukos variklių P_{M1} , P_{M2} aktyvioji galia 500 kW, $\cos\varphi = 0,85$.

12 uždavinys. Apskaičiuoti, kaip pasikeis traukos variklių M2 greitis n_2 , jeigu 5.12 pav. pateiktoje schemoje pakeisime traukos variklio M1 statoriaus apvijų jungimą iš „žvaigždės į trikampį“, kai tinklo įtampos vertė abiejose schemose tokia pati.

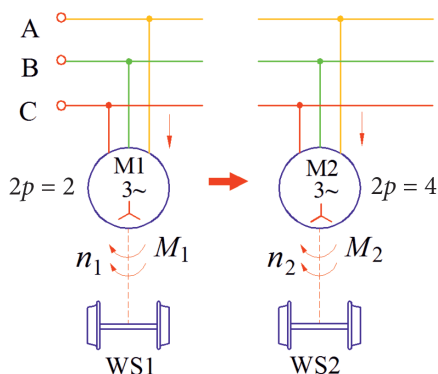


5.12 pav. 12 uždavinio schema

13 uždavinys. Apskaičiuoti, kaip pasikeis traukos variklių M2 greitis n_2 ir momentas M_2 , jeigu 5.13 pav. pateiktoje schemoje pakeisime traukos variklio M1 polių porų skaičių $2p$, kai tinklo įtampos vertė abiejose schemose tokia pati. Nubraižyti traukos variklių mechanines charakteristikas.

14 uždavinys.

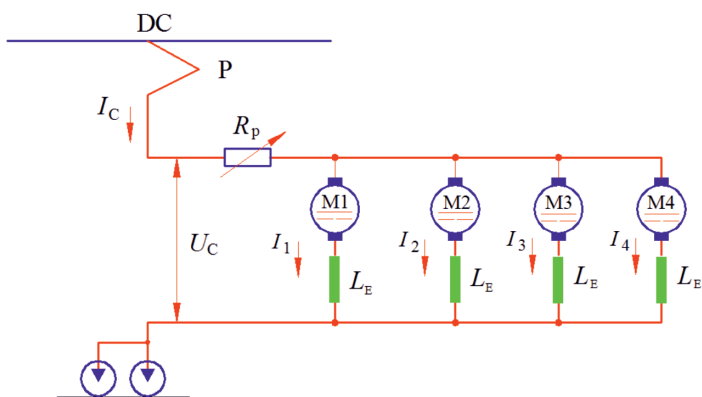
1. Apskaičiuoti nuolatinės srovės traukos variklių M1, M4 sroves, jeigu 5.14 pav. pateiktoje schemoje kontaktinio tinklo įtampos U_C



5.13 pav. 13 uždavinio schema

vertė yra 3000 V, traukos variklių $P_{M1} - P_{M4}$ galia – 500 kW, papildomas rezistorius R_p šuntuotas.

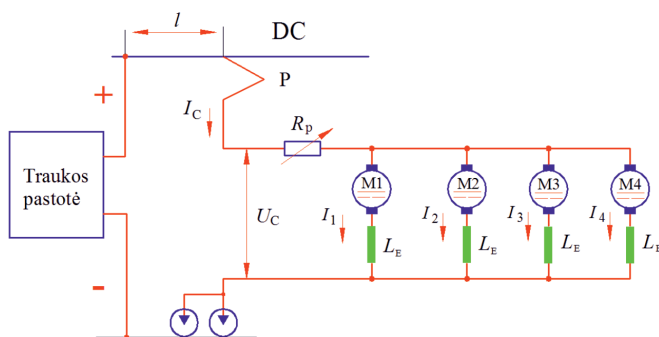
2. Apskaičiuoti, kokią papildomą rezistorių R_p reikia įjungti į nuolatinės srovės traukos variklių M1 – M4 grandinę, kad traukos variklių greitis pakistų 2 kartus. Nubraižyti mechanines traukos variklių charakteristikas.



5.14 pav. 14 uždavinio schema

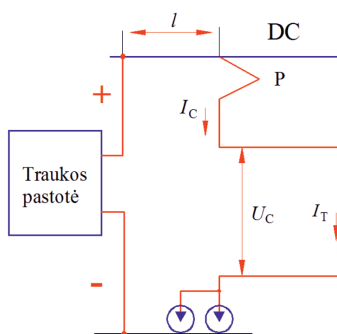
15 uždavinys.

Pagal 5.15 pav. pateiktą uždavinio schemą apskaičiuoti: įtampos kritimą kontaktiniame tinkle, nuolatinės srovės traukos variklių M1, M4 srovės, jeigu kontaktinio tinklo įtampos U_C vertė yra 3000 V, traukos variklių $P_{M1} - P_{M4}$ galia – 500 kW, (papildomas rezistorius R_p šuntuotas), elektrinis traukinys yra nutolęs nuo traukos pastotės $l = 15$ km, savitoji 1 km kontaktinio laido varža yra $0,04 \Omega$, o 1 km bėgių varža yra $0,01 \Omega$.



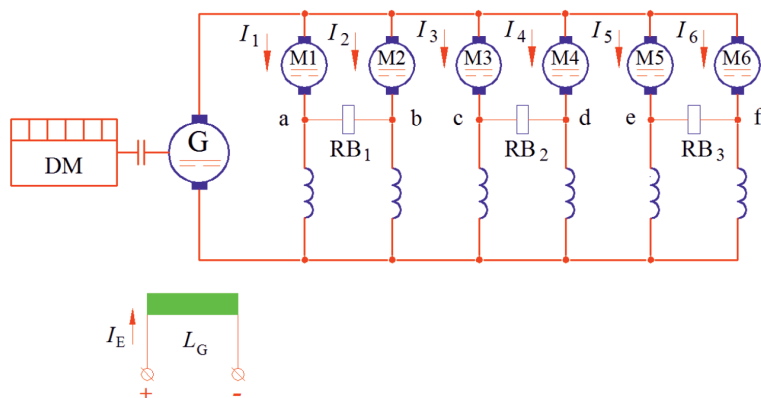
5.15 pav. 15 uždavinio schema

16 uždavinys.



5.16 pav. 16 uždavinio schema

Nubraižyti nepriklausomojo žadinimo nuolatinės srovės traukos variklio mechaninę charakteristiką esant traukos ir rekuperacinio stabdymo režimams. Mechaninę charakteristiką traukos ir rekuperacinio stabdymo režimais pavaizduoti atitinkamuose kvadrantuose.

17 uždavinys.**5.17 pav.** 17 uždavinio schema

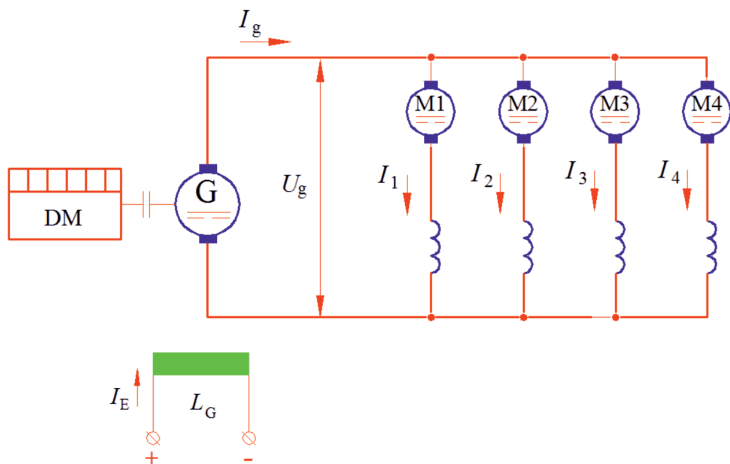
5.17 pav. pateiktoje schemoje įjungtos buksavimo proceso kontrolės relės RB1, RB2, RB3. Paaiškinkite jungimo principą. Kas pasikeis taškuose c-d, e-f, jeigu srovės I_5 , I_6 vertės proceso metu pakis?

18 uždavinys.

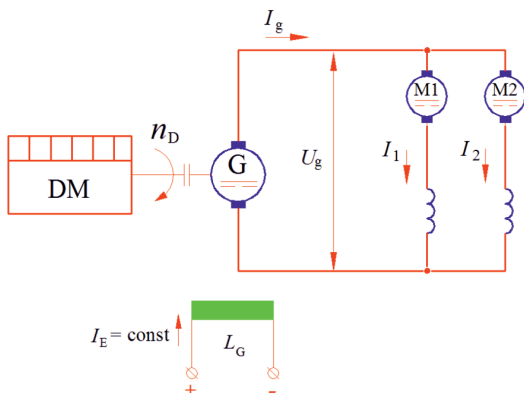
1. Apskaičiuoti DC/DC srovės sistemos šilumvežio, kurio principinė elektrinė schema pateikta 5.18 pav., nuolatinės srovės traukos variklių M1, M4 grandinių srovės, jeigu traukos generatoriaus įtampa $U_g = 800$ V, traukos variklių galia 300 kW.

2. Apskaičiuoti traukos generatoriaus, dyzelinio variklio galią, jeigu traukos variklių naudingumo koeficientas $\eta = 0,9$, traukos generatoriaus $\eta = 0,85$.

19 uždavinys. Apskaičiuoti DC/DC srovės sistemos šilumvežio, kurio vieno vežimėlio principinė elektrinė schema pateikta 5.19 pav., nuolatinės srovės traukos variklių M1, M2 grandinių srovės, jeigu



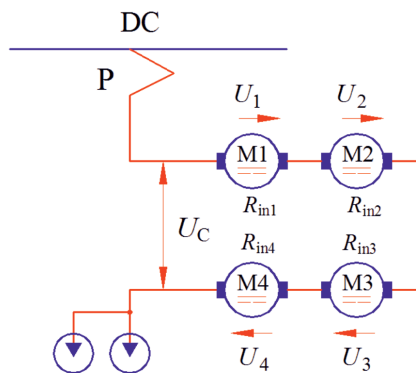
5.18 pav. 18 uždavinio schema



5.19 pav. 19 uždavinio schema

traukos generatoriaus įtampa $U_g = 600$ V, traukos variklių galia 300 kW. Nubraižyti nepriklausomojo žadinimo traukos generatoriaus išorines charakteristikas, kai dyzelinio variklio alkūninio veleno greitis $n_D = 400$ aps/min, 600 aps/min, žadinimo srovė I_E nekinta. Paaiškinti jų pobūdį ir išsidėstymą koordinacių ašyje.

20 uždavinys. Apskaičiuoti DC/DC srovės sistemos tramvajaus, kurio principinė elektrinė schema pateikta 5.20 pav., nuolatinės srovės traukos variklių M1, M4 įtampas, jeigu kontaktinio tinklo DC įtampa 750 V, vieno traukos variklių galia 300 kW, $R_{in1} = 0,15 \, \Omega$, $R_{in2} = 0,2 \, \Omega$, $R_{in3} = 0,25 \, \Omega$, $R_{in4} = 0,18 \, \Omega$.



5.20 pav. 20 uždavinio schema

21 uždavinys. Nustatyti, kokias įtampas gauna nuolatinės srovės elektrovežio traukos varikliai, kai nuosekliai sujungiami šeši, trys ir du traukos varikliai, o kontaktinio tinklo įtampa yra $U_t = 3000 \, \text{V}$.

Sprendimas:

Kai yra nuosekliai sujungti šeši varikliai, kiekvienam jų tenka įtampa:

$$U_{\text{var}} = \frac{U_t}{6} = \frac{3000}{6} = 500 \, \text{V};$$

Kai yra nuosekliai sujungti trys varikliai, kiekvienam jų tenka įtampa:

$$U_{\text{var}} = \frac{U_t}{3} = \frac{3000}{3} = 1000 \, \text{V};$$

Kai yra nuosekliai sujungti du varikliai, kiekvienam jų tenka įtampa:

$$U_{\text{var}} = \frac{U_t}{2} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ V.}$$

22 uždavinys. Nustatyti dviejų lygiagrečiai sujungtų paleidimo reostato sekcijų $r_1 = 4\Omega$ ir $r_2 = 10\Omega$ ekvivalentinę varžą ir jomis tekančias sroves, jei bendra srovė, tekanti reostatu, yra 250 A.

Sprendimas: ekvivalentinė dviejų reostato sekcijų varža yra:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{4 \cdot 10}{4 + 10} = 2,86 \Omega.$$

Srovių pasiskirstymas tarp reostato sekcijų:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{10}{4} = 2,5.$$

Bendra srovė:

$$I = I_1 + I_2 = 2,5I_2 + I_2 = 3,5I_2$$

arba

$$I_2 = \frac{I}{3,5} = \frac{250}{3,5} = 71,4 \text{ A.}$$

Pirmąją sekciją tekanti srovė:

$$I_1 = I - I_2 = 250 - 71,4 = 178,6 \text{ A.}$$

23 uždavinys. Į 220 V įtampos tinklą įjungta 10 vienodų varžų $r_L = 100 \Omega$ lygiagrečiai sujungtų lempučių. Apskaičiuokite ekvivalentinę grandinės varžą, kiekviena lemputė tekančios srovės stiprį ir bendrą grandinę tekančios srovės stiprį.

Sprendimas:

Ekvivalentinė visų lempučių varža:

$$r = \frac{r_L}{10} = \frac{100}{10} = 10 \, \Omega.$$

Kiekviena lemputė tekančios srovės stipris:

$$I_L = \frac{U}{r_L} = \frac{220}{100} = 2,2 \, \text{A}.$$

Bendra grandinės srovė:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{10} = 22 \, \text{A}$$

arba

$$I = nI_L = 10 \cdot 2,2 = 22 \, \text{A}.$$

24 uždavinys. Nustatyti elektrovežio iš kontaktinio tinklo vartojamą srovę, kai yra lygiagrečiai sujungiami du, trys traukos varikliai, jei kiekvieno variklio inkaro grandine tekanti vardinė srovė yra 250 A.

Sprendimas:

Kai lygiagrečiai sujungti du varikliai:

$$I_{el} = nI_{\text{var}} = 2 \cdot 250 = 500 \, \text{A};$$

Kai lygiagrečiai sujungti trys traukos varikliai:

$$I_{el} = nI_{\text{var}} = 3 \cdot 250 = 750 \, \text{A}.$$

25 uždavinys. Elektrovežio nuolatinės srovės traukos variklis maitinamas iš 1500 V kontaktinio tinklo ir juo teka 380 A srovė. Apskaičiuoti traukos variklio galią.

Sprendimas: $P = UI = 1500 \cdot 380 = 570000 \text{ W} = 570 \text{ kW}$.

26 uždavinys. Elektrinio traukinio vagonas šildomas elektrinėmis krosnelėmis. 24Ω varžos elektrinė krosnelė teka 5 A srovė. Apskaičiuoti krosnelės galią.

Sprendimas: $P = I^2 r = 5^2 \cdot 24 = 600 \text{ W}$.

27 uždavinys. Elektrinio traukinio vagonui apšviesti naudojamos kaitrinės elektros lemputės. Viena 484Ω varžos elektros lemputė įjungta į 220 V įtampos tinklą. Apskaičiuoti lemputės galią.

Sprendimas: $P = \frac{U^2}{r} = \frac{220^2}{484} = 100 \text{ W}$.

28 uždavinys. Nustatyti 400 kW galios nuolatinės srovės traukos variklio naudingumo koeficientą, jei galios nuostoliai sudaro $\Delta P = 32 \text{ kW}$.

Kokia naudojama tinklo galia ir kokia srovė teka traukos variklio inkaro apvijomis, jei jis prijungtas prie kontaktinio tinklo įtampos $U = 1500 \text{ V}$?

Sprendimas:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{400}{400 + 32} = 0,926 \text{ arba}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \cdot 100\% = \frac{400}{400 + 32} \cdot 100\% = 92,6\%.$$

Naudojama tinklo galia:

$$P_1 = P_2 + \Delta P = 400 + 32 = 432 \text{ kW}.$$

Variklio inkaro apvijomis tekanti srovė:

$$I = \frac{P_1}{U} = \frac{432\,000}{1500} = 288\text{ A}.$$

29 uždavinys. Nuolatinės srovės traukos elektros pastotės įtampa yra 3300 V. Kokia įtampa elektrovežio pantografo įvade, elektrovežiui vartojant 1000 A srovę, kai jis yra 2 km ir 8 km nutolęs nuo nuolatinės srovės traukos elektros pastotės? 1 km kontaktinio laido varža yra $0,04\ \Omega$, o 1 km bėgių varža yra $0,01\ \Omega$.

Sprendimas:

Įtampos kritimas 2 km ilgio kontaktinio tinklo laide:

$$\Delta U_{kl} = I r_{kl} = 1000 \cdot 0,04 \cdot 2 = 80\text{ V}.$$

Įtampos kritimas 8 km ilgio kontaktinio tinklo laide:

$$\Delta U_{kl} = I r_{kl} = 1000 \cdot 0,04 \cdot 8 = 320\text{ V}.$$

Įtampos kritimas 2 km ilgio bėgiuose:

$$\Delta U_b = I r_b = 1000 \cdot 0,01 \cdot 2 = 20\text{ V}.$$

Įtampos kritimas 8 km ilgio bėgiuose:

$$\Delta U_b = I r_b = 1000 \cdot 0,01 \cdot 8 = 80\text{ V}.$$

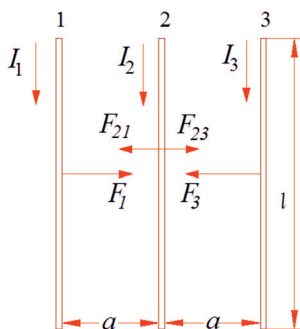
Įtampa elektrovežio pantografo įvade, kai jis yra 2 km atstumu nuo traukos pastotės:

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{kl} - \Delta U_b = 3300 - 80 - 20 = 3200\text{ V}.$$

Įtampa elektrovežio pantografo įvade, kai jis yra 8 km atstumu nuo traukos pastotės:

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{kl} - \Delta U_b = 3300 - 320 - 80 = 2900\text{ V}.$$

30 uždavinys. Trys lygiagretūs laidai yra vienoje plokštumoje. Laidais teka vienodos srovės $I_1 = I_2 = I_3 = 100\text{ A}$ (5.21 pav.). Atstumas tarp laidų $a = 20\text{ cm}$, jų ilgis $l = 1\text{ m}$. Apskaičiuokite tarp laidų veikiančias jėgas.



5.21 pav. 30 uždavinio schema

Sprendžiant uždavinį, būtina, žinant srovių kryptis, nustatyti laidus veikiančių jėgų kryptis. Kadangi srovių kryptys vienodos, visi laidai vienas kitą traukia (5.21 pav.). Žinome, kad srovės lygios, todėl jėga, veikianti vidurinę laidą (F_2), lygi nuliui, kadangi pirmasis ir trečiasis laidai antrąjį laidą traukia ta pačia jėga ($F_{21} = F_{23}$), bet priešinga kryptimi: $F_2 = F_{21} = F_{23} = 0$.

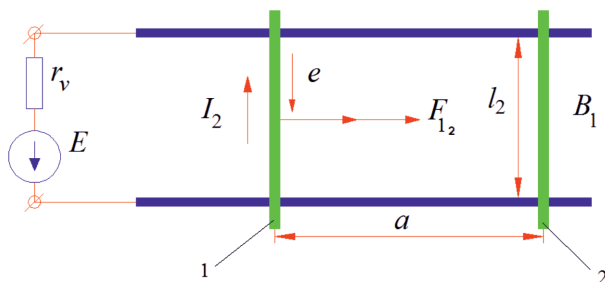
Pirmąjį laidą antrojo ir trečiojo laidų jėgos, atitinkamai F_{12} ir F_{13} , traukia, todėl atstojamoji jėga F_1 , veikianti pirmąjį laidą, lygi: $F_1 = F_{12} + F_{13}$. Apskaičiuosime jėgas F_{12} ir F_{13} :

$$F_{12} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} \cdot l = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{100^2 \cdot 1}{2\pi \cdot 0,2} = 0,01 \text{ N};$$

$$F_{13} = \mu_0 \frac{I_1 I_3}{2\pi a} \cdot l = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{100^2 \cdot 1}{2\pi \cdot 0,2 \cdot 2} = 0,005 \text{ N}.$$

Tada jėga $F_1 = 0,01 + 0,005 = 0,015 \text{ N}$. Jėga, veikianti trečiąjį laidą $F_1 = F_3$, o jos kryptis parodyta 5.21 paveiksle.

31 uždavinys. Plikais metaliniais laidais, veikiamas elektromagnetinės jėgos F_{em} , statmenai magnetinėms linijoms juda 1 laidininkas (5.22 pav.). Vienalyčio magnetinio lauko, kuriame juda laidininkas, magnetinio srauto tankis (indukcija) $B_1 = 1\text{ T}$, laido ilgis $l_2 = 1,2\text{ m}$. Apskaičiuokite laidininku tekančią srovę ir sudarykite kontūro galių balansą, kai elektrovara $E = 2\text{ V}$, laidininko judėjimo greitis $v = 0,6\text{ m/s}$, o jo varža $r = 0,2\ \Omega$.



5.22 pav. 31 uždavinio schema

Lygiagrečių laidų ir šaltinio vidaus varžas galima paneigti. Įjungus maitinimo šaltinį, laidininku l_2 pradeda tekėti srovė I_2 . Jos kryptis parodyta 5.22 pav. Tuo pat metu laidininką pradeda veikti elektromagnetinė jėga F_{em} , ir laidininkas l_2 paslenka. Jėgos kryptis nustatoma pagal kairiosios rankos taisyklę laidininkui l_2 judant, jame indukuojama EV apskaičiuojama:

$$e = B_1 l_2 v = 1 \cdot 1,2 \cdot 0,6 = 0,72\text{ V}.$$

Indukuotos EV kryptis nustatoma pagal dešinėsios rankos taisyklę; galima įsitikinti, kad jos kryptis priešinga šaltinio E kryptčiai. Apskaičiuosime srovę I_2 :

$$I_2 = \frac{E - e}{r} = \frac{2 - 0,72}{0,2} = 6,4\text{ A}.$$

Elektromagnetinė jėga apskaičiuojama:

$$F_{em} = B_1 l_2 I_2 = 1 \cdot 1,2 \cdot 6,4 = 7,68 \text{ N}.$$

Elektromagnetinė galia:

$$P_{em} = F_{em} v = B_1 l_2 v = e l_2 = 0,72 \cdot 6,4 = 4,6 \text{ W}.$$

Šilumos nuostoliai:

$$P_{em} = r I_2^2 = 0,2 \cdot 6,4^2 = 8,2 \text{ W}.$$

Grandinės suvartojama galia:

$$P_{em} = P_{\xi} = 6,4 + 8,2 = 12,8 \text{ W}.$$

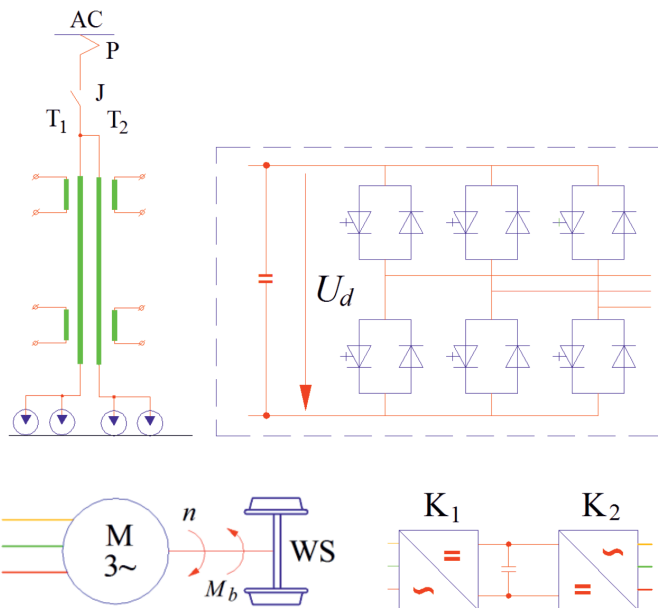
Šaltinio atiduodama į grandinę galia:

$$P_{\xi} = E I_2 = 2 \cdot 6,4 = 12,8 \text{ W}.$$

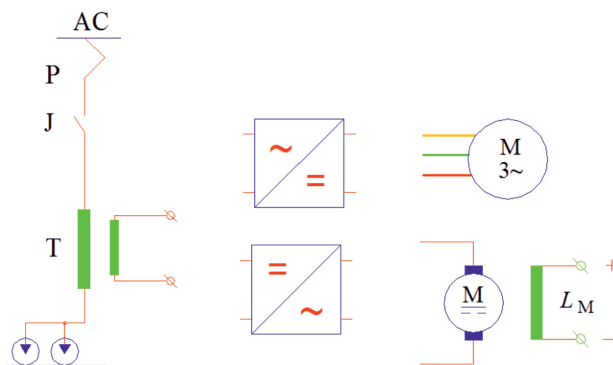
32 uždavinys. Nubraižyti struktūrinę ir principinę AC/AC srovės sistemos elektrovežio dažninės elektros pavaros supaprastintą sandaros schemą, naudojant 5.23 pav. pateiktus elementus, kai valdomieji puslaidininkiniai elementai – GTO tiristoriai.

33 uždavinys. Nubraižyti AC/AC ir AC/DC srovės sistemos elektrinio traukinio, elektrovežio keturių kvadrantų valdymo supaprastintą elektros pavaros sandaros schemą, naudojant 5.24 pav. pateiktus elementus.

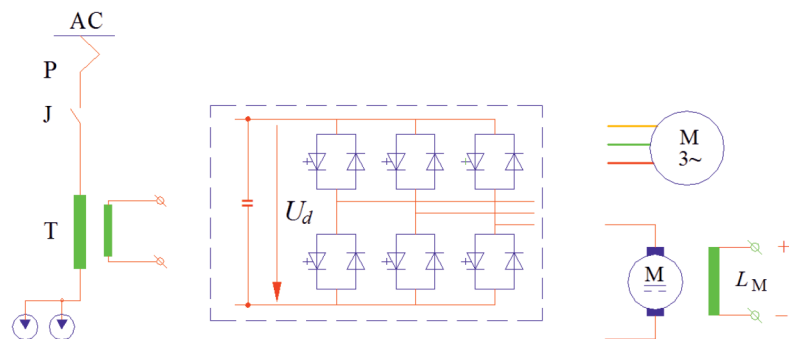
34 uždavinys. Nubraižyti AC/AC srovės sistemos elektrinio traukinio supaprastintą elektros pavaros sandaros schemą, naudojant 5.25 pav. pateiktus elementus.



5.23 pav. Elektros pavaros schemos elementų rinkinys: J – jungtuvas;
P – pantografas; M – traukos variklis; T1, T2 – traukos transformatoriai;
K1 – lygintuvas; K2 – inverteris; M – asinchroninis traukos variklis;
C – energijos kaupimo kondensatorius; WS – aširatis



5.24. pav. Elektros pavaros schemos elementų rinkinys: J – jungtuvas;
P – pantografas; T – traukos transformatorius; M – traukos varikliai



5.25 pav. Elektros pavaros schemos elementai:
 J – jungtuvas; P – pantografas; T – traukos transformatorius;
 M – traukos varikliai

LITERATŪRA

- Andresen, E. Ch.; Haun, A. 1993. Influence of the pulse-width modulation control method on the performance of frequency inverter induction motor drives. *Eur. Trans. Elec. Power*. (Vol. 3, No. 2. Mar./Apr.) 151–161.
- Antriebsysteme. 2002. *Faulhaber grupės firmos Minimotor SA katalogas*. Crioglio (Šveicarija): Minimotor. 191 p.
- Bazaras, Ž.; Dundulis, R. 1997. *Lokomotyvai: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija. 241 p.
- Bäckström, T., *et al.* 1997. Integrated energy transducer for hybrid electric vehicles, *Proc. 8th EMD Conf. IEE*, Cambridge, UK, 239–243.
- Braess, H.; Seiffert, U. 2000. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft GmbH, Wiesbaden.
- Burstenlose DC-Servomotoren. 2001. Firmos Minimotor inf. medžiaga-katalogas. Crioglio (Šveicarija): Minimotor. 147 p.
- Chen, S.; Lipo, T. A.; Novotny, D. W. 1996. Circulating type motor bearing currents in inverter drives, in *Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Mtg.*, San Diego, CA. Vol. 1. Oct. 1996, 162–167.
- Crowder, R. M. 1998. *Electric Drives and Their Control*. Oxford: Oxford University Press. 256 p.
- Černys, P.; Kepalas, V.; Kubilius, V.; Lipnickas, A.; Masteika, R. K. *et al.* 1994. *Elektros pavarų laboratoriniai darbai*. Kaunas: Technologija. 88 p.
- De Broe, A. M.; Julian, A. L.; Lipo, T. A. 1996. Neutral-to-ground voltage minimization in a PWM-rectifier/inverter configuration, in *Proc. IEE Conf. Power Electron. Variab. Speed Drives*, Nottingham, UK, Sept. 1996, 564–568.
- Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W. 1996. *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill.
- Favre, E.; Cardoletti, L.; Jufer, M. 1993. Permanent magnet synchronous motors: A comprehensive approach to cogging suppression, *IEEE Trans. on Ind. Appl.* Vol. 29, No. 6, 1141–1149, Nov/Dec, 1993.
- Fitzgerald, A. E.; Kingsley, C. Jr.; Umans, S. D. 1992. *Electric Machinery*. McGraw-Hill, London.
- Fuest, K.; Döring, P. 2000. *Elektrische Maschine und Antriebe. Lehr- und Arbeitsbuch*. Vieweg. Wiesbaden.
- Geleževičius, V.; Kriščiūnas, K.; Kubilius, V. 1990. *Elektros pavarų valdymo sistemos*. Vilnius: Mokslas. 358 p.

-
- Gordon, R. Slemon. 1992. *Electric Machines and Drives*. Addison-Wesley Publ. Comp. ISBN 0-201-57885-9.
- Gustavson, F. 1996. *Elektriška maskiner*. Royal Institute of Technology, Department of Elecuic Power Engineering. Electrical Machines and Drives, Stockholm.
- Howe, D.; Jenkins, M. K.; Zhu, Z. Q. 1993. Permanent magnet machines and drives – an integrated design approach, *Sixth Int. Conf. on Electrical Machines and Drives*, IEE No. 376, Oxford, 625–630.
- High Precision Drives and Systems*. 2001. Firmos *Maxon motor* inform. medžiaga-katalogas. Sachseln: Maxon. 185 p.
- Inarida, S. et al. 2001. Train Traction Systems for Passenger Confort and Easier Maintenance. *Hitachi Review* 50: 134–138.
- Incropera, F. P.; David, P. de Witt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. ABB Motors catalogue.
- Yamaguchi, J. 2006. Blue skies at Makuhari, *Automotive Engineering International*, No 1 5562.
- Kempkes, J.; Sattler, Ph. K. 1993. Comparison of true running at different concepts of controlling brushless DC-motors, *IEE Conf. Publ.* No. 377, EPE'93 Brighton. Vol. 5, Drives I, p. 15–20.
- Kênio, T.; Sugawara, A. 1995. *Stepping motors and their microprocessor controls*. 2 Ed. Oxford: Oxford University fress.
- Kostrauskas, P. 1993. *Nuolatinės srovės mašinos: mokymo priemonė*. Kaunas: Technologija. 94 p.
- Kvedaras, V.; Zaveckas, V. 2006. *Gamybinė ir gaisrinė automatika: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika. 173 p.
- Läftman, L. 1991. Acoustical noise generating factors in PWM induction motor drives – a new approach, *Licentiate Thesis*, Dept. of Ind. Elec. Eng. and Autom., Lund Inst. of Tech.
- Leistung auf kleinstem Raum*. 2001. Firmos *Minimotor* inf. medžiaga-katalogas. Crioglio (Šveicarija): Minimotor. 147 p.
- Lingaitis, L. P. 2001. Maintenance and reliability of electric trains (*Elektrinių riedmenų priežiūra ir patikimumas*). Vilnius: Technika. 232 p.
- Lingaitis, L. P. 2000. *Riedmenų diagnostika: vadovėlis Transporto inžinerijos fakulteto studentams*. Vilnius: Technika. 223 p. ISBN 9986-05-395-1.
- Lingaitis, L. P.; Liudvinavičius, L. 2006. Electric drives of traction rolling stocks with AC motors, *Transport XXI* (3): 223–229.

- Lingaitis, L. P.; Liudvinavičius, L.; Butkevičius, J.; Podagėlis, I.; Sakalauskas, K.; Vaičiūnas, G.; Bureika, G.; Gailienė, I.; Petrenko, V.; Subačius, R. 2009. *Geležinkeliai. Bendrasis kursas: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 280 p. ISBN 9789955283997.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, L. P. 2010. *New locomotive energy management systems / Maintenance and reliability = Eksploatacja i niezawodność, Polish Academy of Sciences Branch in Lublin*. Warszawa. ISSN 1507-2711. No 1: 35–41.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, L. P.; Dailydka, S. 2010. *Traukos riedmenų elektros pavaros ir jų valdymas: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 320 p. ISBN 978-9955-28-559-5.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, L. P.; Dailydka, S.; Jastremskas, V. 2009. The aspect of vector control using the asynchronous traction motor in locomotives, *Transport* 24 (4): 318–324.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, L. P. 2007. Electrodynamic braking in high-speed rail transport, *Transport XXII* (3): 178–186.
- Masiokas, S. 1994. *Elektrotechnika*. Kaunas: Candela. 431 p.
- Masteika, R. 2003. *Elektros pavaros. Teorija, schemos, projektavimas, uždaviniai, pavyzdžiai: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija. 40 p.
- Maxon 2003. *Firmos „Maxon motor“ katalogas*. 2003. München: Maxon. 265 p.
- Minotti, P.; Ferreira, A. 1998. *Les micromachines*. Hermes – Collection automatique. 352 p.
- Mitsubishi Electric Transportation Systems*. 2003. Japan: 2–21.
- Ogawa, T. et al. 2003. Test Running with Speed Sensorless Vector Control for Rolling Stock, in *Proceedings of the 2003 National Convention I.E.E.* Japan (Mar. 2003). Vol. 5: 296–297.
- Pal, S. K. 1993. Comparative study of design and manufacturing processes of electrical motors with low and high energy permanent magnets. *IEEE 6th Int. Conf. on Electrical Machines and Drives*, No. 376, Oxford, UK, September 1993, 339–346.
- Precision inductosyn position transducers for industrial automation, aerospace and military application. 1996. Farrand Controls information Issue. USA. 15 p.
- Rufer, A.; Philippe, P. 2002. A supercapacitor-based energy storage system for elevators with soft commutated interface. *IEEE Transactions on industry applications*. Vol. 38, No. 5: 1151–1159.

-
- Saari, J. Thermal Modelling of High-Speed Induction Machines, *Acta Polytechnica Scandinavia, Electrical Engineering Series* No. 82. ISBN 951-666-454-7.
- Scheibenlauferrmotoren. Antriebe für Ansprüche.* 2000. Schonau (Šveicarija): Fritz Heinzmann GmbH&Co. 8 p.
- Schiferl, R.; Lipo, T. A. 1989. Core loss in buried magnet permanent magnet synchronous motors, *IEEE Trans, on Energy Conversion*. Vol. 4, No. 2, June, 1989, 279–284.
- Sen, P. C. 1996. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore-Weinheim: John Wiley&Sons.
- Smilgevičius, A. 2005. *Automatikos mikromašinos: vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams, studijuojantiems elektros inžineriją*. Vilnius: Technika. 343 p.
- Stemme, O.; Wolf, P. 1998. *Wirkungsweise und Eigenschaften hochdynamischer Gleichstrom-Kleinstmotoren*. 3 Ausgabe. Sachseln: Maxon motor AG. 80 p.
- Stölting, H.D. 2002. *Elektronisch betriebene Kleinmaschine. Vorlesungsmanuskript*. Universität Hannover.
- Subrahmanyam, V. 1996. *Electric Drives*. USA: McGraw-Hill. 715 p.
- Švėgžda, O.; Bagdonas, V. 1995. *Geležinkelio automatikos schemas: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija. 63 p.
- Takahashi, L.; Noguchi, T. 1986. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor, *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 522 (No. 2, Sept. / Oct.) 820–827.
- Takashi, K. et al. 2004. *Easy Maintenance and Environmentally-friendly Train Traction System*, *Hitachi Review*. Vol. 53, (No. 1): 17–19.
- The smallest drive system in the world.* 2002. Faulhaber inf. Schonaich (Vokietija): The Faulhaber-Gtcnso. 12 p.
- Theeg, G.; Baumgartner, S.; Maschek, U. 2006. Comparison of signalling systems for high-speed train movements, *Rail International*. No 10: 65–73.
- Vilkievič, B. I. 1980. *Automatic control of electric drives and electric circuits of diesel locomotives*. Moscow: Mashinostroenie. 224 p.
- Волков, Н. И.; Миловзоров, В. П. 1978. *Электромашинные устройства автоматики*. Москва: Высшая школа. 336 с.
- Калинин, В. К. 1991. *Электровозы и электропоезда*. Москва: Транспорт.

- Стрекопытов, В. В.; Гришченко, А. Б.; Кручек, В. А. 2003. *Электрические передачи локомотивов*. Москва: Маршрут.
- Хрущев, В. В. 1976. *Электрические микромашины автоматических устройств*. Ленинград: Энергия. 383 с.
- Юферов, Ф. М. 1976. *Электрические машины автоматических устройств*. Москва: Высшая школа. 416 с.