

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Aivaras Andrikis

**KAUNO GELEŽINKELIO STOTIES 630 kVA GALIOS
TRANSFORMATORIŲ IR 5,5 kW ASINCHRONINIO VARIKLIO
DARBO REŽIMŲ ANALIZĖ**

Baigiamasis bakalauro projektas

Vadovas

Doc. dr. Artūras Kalvaitis

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**KAUNO GELEŽINKELIO STOTIES 630 kVA GALIOS
TRANSFORMATORIŲ IR 5,5 kW ASINCHRONINIO VARIKLIO
DARBO REŽIMŲ ANALIZĖ**

Baigiamasis bakalauro projektas

Elektros inžinerija (612H62001)

Vadovas

Doc. dr. Artūras Kalvaitis

2015-05-26

Recenzentas

Lekt. dr. Jonas Vanagas

2015-05-26

Projektą atliko

Aivaras Andrikis

2015-05-26

KAUNAS, 2015

Andrikis A. Kauno geležinkelio stoties 630 kVA galios transformatorių ir 5,5 kW asinchroninio variklio darbo režimų analizė. *Energijos keitikliai ir jų valdymas*, bakalauro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Artūras Kalvaitis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 65 psl.

SANTRAUKA

Dėl greitai besivystančių technologijų, keičiasi ir elektros energijos suvartojimas. Nenutrūkstamam elektros energijos tiekimui skiriamas didžiulis dėmesys, o šiam tikslui pasiekti reikalingas patikimas galios transformatorių darbas. Todėl šiame projekte analizuojama Kauno geležinkelio stoties 630 kVA galios transformatorių lygiagretus darbo atvejai, kuomet yra skirtingi transformacijos faktoriai ir kuomet skiriasi trumpojo jungimo įtampos. Taip pat skaičiuojama transformatoriaus išorinė charakteristika, esant skirtingo pobūdžio apkrovoms. Prie vienos iš žemos įtampos linijų prijungiamas 5,5 kW asinchroninis variklis, suskaičiuojamos jo darbo charakteristikos, statoriaus apvijų patikimumas, parenkami paleidimo įrenginiai. Patikrinama ar teisingai parinkti apsaugos aparatai, saugantys transformatorių, asinchroninį variklį ir kabelines linijas, pagal suskaičiuotas trumpųjų jungimų sroves. Įsitikinama, kad apsaugos aparatai veiks selektyviai.

Reikšminiai žodžiai: galios transformatorius, asinchroninis variklis.

Andrikis, Aivaras. Analysis of operating conditions of Kaunas railway station 630 kVA power transformers and 5.5 kW induction motor. Final project of *Energy converters and control* / supervisor doc.dr. Artūras Kalvaitis; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 65 pages.

SUMMARY

The consumption of electrical power is changing, because of fast developing technologies. Much attention is paid to an uninterruptible power supply and the way to reach this aim, is reliable work of power transformers. For this reason, there are analysing of parallel 630 kVA power transformers operations, when there are different turns ratios and parallel transformers operation and when there are different short-circuit voltages, at Kaunas railway station. Also there are calculating external characteristics of transformer when there are different types of loads. An 5.5 kW induction motor is connected to the one of the low voltage lines, calculating its performance characteristics, reliability of stator winding, choosing starting equipment. According to short-circuit currents, checking chosen security devices, which protect transformer, induction motor, cables, if they are chosen correctly and finally making sure of security devices selectivity.

Keywords: power transformer, induction motor.

TURINYS

ĮVADAS	10
1. TEORINIS PAGRINDIMAS	11
1.1. Bendrosios žinios apie transformatorius	11
1.1.1. Transformatorių įtampos reguliavimas	12
1.1.2. Lygiagretus transformatorių darbas	12
1.1.3. Lygiagretusis transformatorių darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams	14
1.1.4. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingoms trumpojo jungimo įtampoms	15
1.1.5. Transformatoriaus išorinė charakteristika	16
1.2. Bendrosios žinios apie asinchroninius variklius	16
1.2.1. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos	17
1.2.2. Asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi prijungimas į tinklą	18
1.2.3. Asinchroninio variklio statoriaus apvijų patikimumas	18
1.3. Trumpieji jungimai, atsiradimo priežastys ir galimos pasekmės	19
1.4. Komutacinių ir apsaugos aparatų bei kabelinių linijų parinkimas	20
2. PROJEKTINIAI SKAIČIAVIMAI	22
2.1. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams	23
2.2. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingoms trumpojo jungimo įtampos	27
2.3. Galios transformatorių išorinių charakteristikų skaičiavimas	28
2.4. Asinchroninio variklio maitinimo tinklo schemas sudarymas	33
2.5. Trumpųjų jungimų skaičiavimas	38
2.5.1. Smūgio srovių skaičiavimas	44
2.6. Selektyvumo charakteristikos	47
2.7. Įtampos kritimo linijoje skaičiavimas	48
2.8. Asinchroninio variklio darbo charakteristikų skaičiavimas	50
2.9. Asinchroninio variklio statoriaus apvijų patikimumo skaičiavimas	55
IŠVADOS	62
INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	64
PRIEDAI	65

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Dviejų transformatorių lygiagretus darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams: a) prieš įjungiant; b) po įjungimo	14
1.2 pav. Transformatorių su nevienodomis trumpojo jungimo įtampomis jungimo lygiagrečiam darbui schema	15
1.3 pav. Transformatoriaus išorinės charakteristikos, esant skirtingo pobūdžio apkrovoms	16
2.1 pav. 2x630 kVA galios transformatorinės principinė elektrinė schema	22
2.2 pav. Transformatoriaus apvijų jungimo schema Δ/Y	23
2.3 pav. Transformatorių su nevienodais transformacijos faktoriais jungimo schema lygiagrečiam darbui	26
2.4 pav. Transformatorių su nevienodomis trumpojo jungimo įtampomis jungimo lygiagrečiam darbui schema	28
2.5 pav. Galios transformatoriaus išorinės charakteristikos $U_2=f(\beta)$	32
2.6 pav. Asinchroninio variklio paleidimo įrenginių dėžė	37
2.7 pav. Asinchroninio variklio paleidimo elektrinė schema	37
2.8 pav. Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimo a) ir ekvivalentinė b) schemas	38
2.9 pav. Selektyvumo charakteristikos	48
2.10 pav. Perskaičiuotojo asinchroninio variklio su besisukančiu rotoriumi ekvivalentinė schema „T“	51
2.11 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristika $s=f(P_2)$	53
2.12 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos $\cos\varphi_1=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$	54
2.13 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos $I_1=f(P_2)$, $I'_2=f(P_2)$	54
2.14 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristika $P_1=f(P_2)$	55

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Galios transformatoriaus parametrai	29
2.2 lentelė. Galios transformatoriaus išorinių charakteristikų rezultatai, gauti programa „Matlab“	32
2.3 lentelė. Asinchroninio variklio parametrai	50
2.4 lentelė. Asinchroninio variklio darbo charakteristikų skaičiavimo rezultatai programa „Matlab“	52
2.5 lentelė. Integralo B vertės	59

IVADAS

Kasdieninis žmonių gyvenimas jau neįsivaizduojamas be elektros energijos. Didelė technologijų vystymosi sparta, vis labiau didina elektros energijos suvartojimą, o patikimas elektros energijos tiekimas vartotojams, yra vienas iš svarbiausių prioritetų. Tai įpareigoja atidžiai stebėti transformatorinėse esančių galios transformatorių darbo režimus, kad būtų išvengta transformatorių gedimų ir nutraukto elektros energijos tiekimo. Šiame bakalauro baigiamajame projekte atliekama būtent 630 kVA galios transformatorių, esančių Kauno geležinkelio stotyje, darbo režimų analizė.

Kitas nagrinėjamas objektas yra 5,5 kW asinchroninis variklis. Asinchroninių variklių pritaikymas yra labai platus, todėl jie sudaro didžiąją dalį buitijoje ir pramonėje naudojamų elektros variklių.

Išskiriami pagrindiniai projekto objektai – 630 kVA galios transformatoriai ir 5,5 kW asinchroninis variklis. Tikslas – prijungti asinchroninį variklį prie vienos iš žemos įtampos linijų, kurią maitina vienas iš galios transformatorių ir atlikti šių elektros įrenginių darbo režimų analizę. Atsižvelgiant į suformuluotą tikslą, yra išsikeliami uždaviniai:

1. Išnagrinėti lygiagretų transformatorių darbą, kada lygiagrečiai jungiamų transformatorių transformacijos faktoriai skirtingi ir apskaičiuoti dėl to atsirandančias vienodinančiąsias sroves;
2. Patikrinti galios pasiskirstymą tarp lygiagrečiai jungiamų transformatorių, kuomet jų trumpojo jungimo įtampos yra skirtingos;
3. Suskaičiuoti transformatoriaus išorines charakteristikas;
4. Sudaryti 5,5 kW asinchroninio variklio maitinimo tinklo schemą;
5. Suskaičiuoti trumpojo jungimo sroves;
6. Parinkti transformatoriaus, kabelinių linijų, vartotojų apsaugos ir komutavimo aparatus ir įsitikinti, kad bus apsaugotas 5,5 kW asinchroninis variklis bei, kad apsaugos aparatai veiks selektyviai;
7. Suskaičiuoti 5,5 kW asinchroninio variklio darbo charakteristikas, atlikti statoriaus apvijios patikimumo skaičiavimus.

1. TEORINIS PAGRINDIMAS

1.1. Bendrosios žinios apie transformatorius

Transformatorius – statinis elektrotechninis įrenginys, kuris keičia kintamosios srovės elektros energijos parametrus. Jis paaukština ar pažemina įtampą, sustiprina arba susilpnina srovę. Veikimas yra pagrįstas dviejų ar daugiau apvijų abipusės indukcijos reiškiniu. Sandara susideda iš kelių pagrindinių dalių: apvijų, magnetolaidžio, kontrolės įtaisų, apsaugos įtaisų, aušinimo sistemos. Pagal paskirtį transformatoriai skirstomi į galios, bandymų, matavimo, suvirinimo ir kitus. Darbe analizuojamas trifazis žeminantysis (10/0,4 kV) 630 kVA galios transformatorius. Visi galios transformatoriai skirstomi į:

- pagal fazių skaičių: vienfaziai, trifaziai;
- pagal apvijų skaičių: dviejų arba daugiau;
- pagal darbo sąlygas, kuriomis transformatoriai dirba: bendrosios arba specialiosios paskirties;
- pagal aušinančią aplinką: alyviniai, sausi arba nedegiu skysčiu aušinami.

Prie galios transformatorių galima priskirti trifazius, kurių galia nėra mažesnė už 6,3 kVA ir vienfazius transformatorius, kurių galia ne mažesnė už 5 kVA. Savo ruožtu trifaziai yra labiau paplitę dėl mažesnių energijos nuostolių ir medžiagų sąnaudų, lyginant su grupe vienfazių, tokios pat suminės galios transformatorių.

Dažnu atveju, visas galios transformatorius talpinamas į baką pripildytą transformatorinės alyvos, nes ji ne tik pagerina aušinimą, bet ir turi geresnes izoliacines savybes negu oras. Alyviniai transformatoriai aušinami natūralia arba priverstine alyvos cirkuliacija, apipučiant oru, prie bako sienelių montuojant papildomus radiatorius ar aušinimo vamzdelius, taip pat, pačios basko sienelės daromos briaunuotos, tam kad padidėtų jų plotas ir šiluma greičiau išsiskirtų į aplinką. Tačiau transformatorinė alyva turi savo trūkumų, nes yra degi ir gali sukelti gaisrą, o alyvos garai susimaišę su oru sudaro sprogų mišinį ir gali įvykti sprogoimas. Todėl cechuose, gyvenamosiose patalpose ir kitose patalpose, kuriose yra tiesioginis pavojus žmogui ar technikai – naudojami sausi (oru) aušinami transformatoriai. Pagrindiniai sausų galios transformatorių trūkumai, tai kad jų galia yra mažesnė ir juos galima mažiau perkrauti, negu alyvinius galios transformatorius.

Transformatoriaus pirminę apviją prijungus prie tinklo įtampos, o antrinę apviją palikus atvirą (neprijungta jokia apkrova), gaunamas transformatoriaus tuščiosios veikos režimas ir

antrine apvija srovė neteka. Antrinę apviją sujungus trumpai, gaunamas trumpojo jungimo režimas. Iš šių režimų bandymų rezultatų sužinomi svarbūs transformatoriaus parametrai – transformatoriaus elektriniai bei magnetiniai nuostoliai, antrinės apvijos įtampos priklausomybė nuo apkrovos dydžio, apvijų varžos ir kiti svarbūs eksploataciniai parametrai.

1.1.1. Transformatorių įtampos reguliavimas

Energetinėje sistemoje, dažnai kintant apkrovai, tuo pačiu kinta ir įtampa. Įtampos svyravimai yra nepageidaujami, todėl siekiama, kad įtampa būtų kuo pastovesnė ir artimesnė vardinei įtampai. Nustatytas leidžiama įtampos nuokrypis nuo vardinės įtampos yra $\pm 10\%$. Viršijus šią ribą, imtuvų tarnavimo laikas mažėja, o neretai įvyksta ir gedimai. Pastoviam įtampos dydžiui užtikrinti yra naudojami transformatoriai. Įtampa reguliuojama keičiant transformatoriaus transformacijos faktorių. Tai įgyvendinti naudojami šie būdai:

- pakopomis keičiant vijų skaičių, kai transformatorius veikia;
- pakopomis keičiant vijų skaičių, kada atjungiamos visos apvijos nuo tinklo;
- naudojant nuosekliai įjungtus transformatorius;
- bekontaktis, sklandus įtampos reguliavimas, kai transformatorius veikia.

Dažniausiai transformatoriaus atšakos yra perjungiamos aukštos įtampos pusėje. Tai leidžia atlikti atšakų perjungimo įrenginiai, rankenėlių pagalba, kurios valdomos rankomis. Retais atvejais rankenėlės valdomos elektros pavaromis. Aukštos įtampos apvija paprastai turi tris arba penkias atšakas. Esant trimis atšakoms, galimos padėtys $\pm 5\%$ nuo nurodytosios įtampos. Vidurinioji atšaka atitiks nurodytąją įtampą. Analogiškas principas esant penkioms atšakoms, galimos padėtys $2 \times \pm 2,5\%$ nuo nurodytosios įtampos, o vidurinioji atšaka atitiks nurodytąją įtampą.

Įtampos reguliavimas neatjungiant įtampos naudojamas transformatoriams, kurių galia didesnė, nei 1000 kVA.

1.1.2. Lygiagretus transformatorių darbas

Pastotės, kurių paskirtis yra elektros energiją transformuoti ir pasiskirstyti, paprastai turi du ar daugiau galios transformatorių, priklausomai nuo reikalingo galios poreikio. Galios transformatoriai, esantys pastotėje, gali būti jungiami lygiagrečiam darbui. Tokiu būdu yra užtikrinamas nenutrūkstamas elektros energijos tiekimas vartotojams, racionaliau išnaudojami transformatoriai, bei mažinami galios nuostoliai pastotėse. Transformatoriaus gedimo atveju, jį galima atjungti, o likusieji galios transformatoriai toliau nenutrūkstamai tieks elektros energiją,

tol kol bus suremontuotas neveikiantis transformatorius. Esant sumažėjusiam pastotės apkrovimui, tikslinga sumažinti lygiagrečiai dirbančių transformatorių kiekį, kad galios nuostoliai pastotėje būtų mažesni, o likusieji dirbtų su apkrova, artima nurodytajai.

Jungiant lygiagrečiam darbui vienodus transformatorius – apkrova pasiskirsto taip, kad kiekvienas transformatorius apkraunamas vienodai. Kur kas dažnesnis atvejis, kuomet lygiagrečiam darbui jungiami skirtingos galios ir parametrų transformatoriai. Tuomet reikia laikytis lygiagretaus jungimo sąlygų, kas leistų paskirstyti apkrovą transformatoriams, priklausomai nuo jų galios.

Lygiagretus transformatorių darbas laikomas idealiu, kuomet maksimali galima apkrova yra lygi lygiagrečiai dirbančių transformatorių nurodytajai galių sumai:

$$S_{maks} = S_{NI} + S_{NII} + \dots + S_{Nn} . \quad (1.1)$$

Tai galima pasiekti, kuomet yra tenkinamos šios sąlygos:

- 1) lygiagrečiai dirbančių transformatorių antrinių apvijų srovių algebrinė suma $I_{2I}, I_{2II}, \dots, I_{2n}$ lygi I_2 . Kitaip tariant, antrinių apvijų srovės turi sutapti faze;
- 2) kada nėra apkrovos antrinėmis apvijomis srovė neteka ir jos turi būti lygios nuliui ($I_2=0$). Jeigu transformatoriai dirba tuščiąja veika (nėra apkrovos) ir tarp jų teka srovė, tuomet transformatoriai bus apkrauti, net ir nesant jokiai apkrovai. Tokiu atveju maksimalioji galia S_{maks} bus mažesnė negu lygiagrečiai sujungtų transformatorių galia;
- 3) kiekvieno transformatoriaus apkrova privalo didėti proporcingai jo nurodytajai galiai, kuomet yra didinama apkrova. Kitaip, vienas iš transformatorių bus apkraunamas nurodytąja galia, o kiti mažiau, negu nurodytoji galia.

Antros sąlygos įgyvendinimui reikia, kad lygiagrečiai jungiamų transformatorių antrinių apvijų įtampos būtų lygios ir sutaptų faze. Įtampos bus lygios, kada visų transformatorių transformacijos faktoriai bus vienodi, o įtampos sutaps faze – esant tokioms pat transformatorių apvijų jungimo grupėms. Trečioji sąlyga įgyvendinama, kuomet srovės pasiskirsto proporcingai nurodytosioms galioms, o tai pasiekiam, kai trumpojo jungimo įtampos yra lygios.

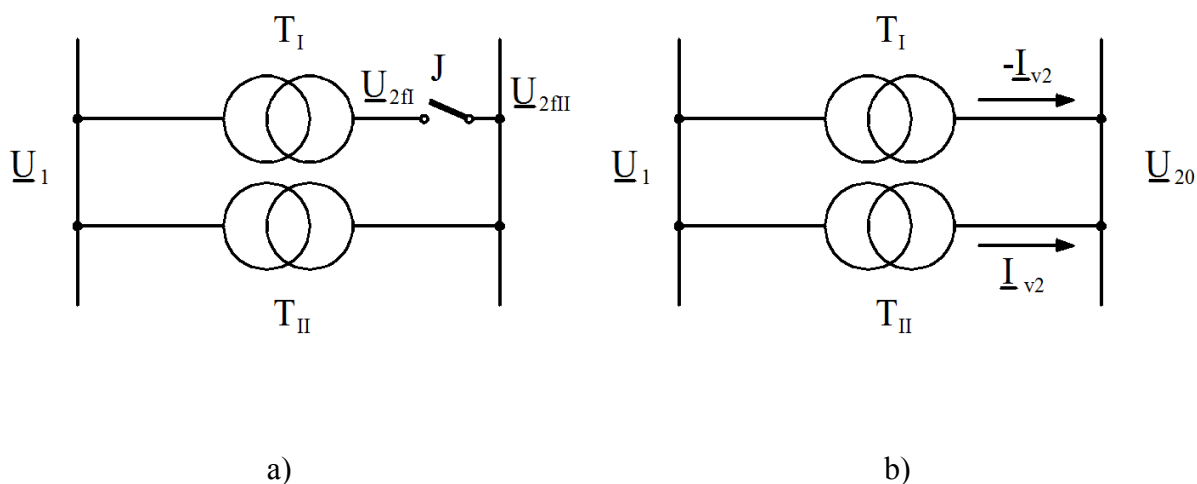
Taigi jungiant transformatorius lygiagrečiam darbui, laikomasi šių sąlygų:

- 1) vienodos trumpojo jungimo įtampos;
- 2) vienodi transformacijos faktoriai;
- 3) vienodos apvijų jungimo grupės.

Trečioji sąlyga yra būtina, norint sujungti transformatorius lygiagrečiam darbui. Praktikoje dažnai pasitaiko atveju, kada nesilaikoma pirmos ir antros sąlygų. Tuomet atliekami skaičiavimai ir surandamos vienodinančios srovės ir transformatoriams tenkančios apkrovos pasiskirstymas.

1.1.3. Lygiagretusis transformatorių darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams

Laikoma, kad lygiagrečiai dirbančių transformatorių, apvijų jungimo grupės bei kampai vienodi $\varphi_{kI} = \varphi_{kII} = \dots = \varphi_{kN}$, o skiriasi tik transformacijos faktoriai k . Apkrova prie antrinių šynų nėra prijungta, todėl $I_2=0$. Šio atvejo transformatorių jungimo schema pateikta 1.1 paveiksle.



1.1 pav. Dviejų transformatorių lygiagretus darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams: a) prieš įjungiant; b) po įjungimo

Paveiksle matyti, kad transformatoriaus T_I antrinė apvija neįjungta. Dėl transformatorių transformacijos faktorių nevienodumo, tarp jungiklio J gnybtų susidaro potencialų skirtumas. Įjungus T_I transformatorių lygiagrečiam darbui, antrinės apvijos sudaro uždara kontūrą ir pradeda tekėti vienodinančioji (išlyginamoji) srovė \underline{I}_{v2} ir antrinėse transformatorių šynose atsiranda tuščiosios veikos įtampa \underline{U}_{20} . Vienodinančioji srovė teka iš transformatoriaus, kurio antrinė įtampa didesnė, į transformatorių, kurio antrinė įtampa mažesnė. Prijungus apkrovą, antrinės apvijos šynose atsiranda įtampa \underline{U}_2 . Vieną transformatorių pilnai apkrovus, kitas bus arba perkrautas arba pilnai neapkrautas. Todėl privaloma laikytis GOST standartų, kurie nurodo, jog lygiagrečiam darbui negali būti jungiami transformatoriai su transformacijos faktoriais besiskiriančiais vienas nuo kito 0,5% arba 1,0% priklausomai nuo transformatoriaus tipo.

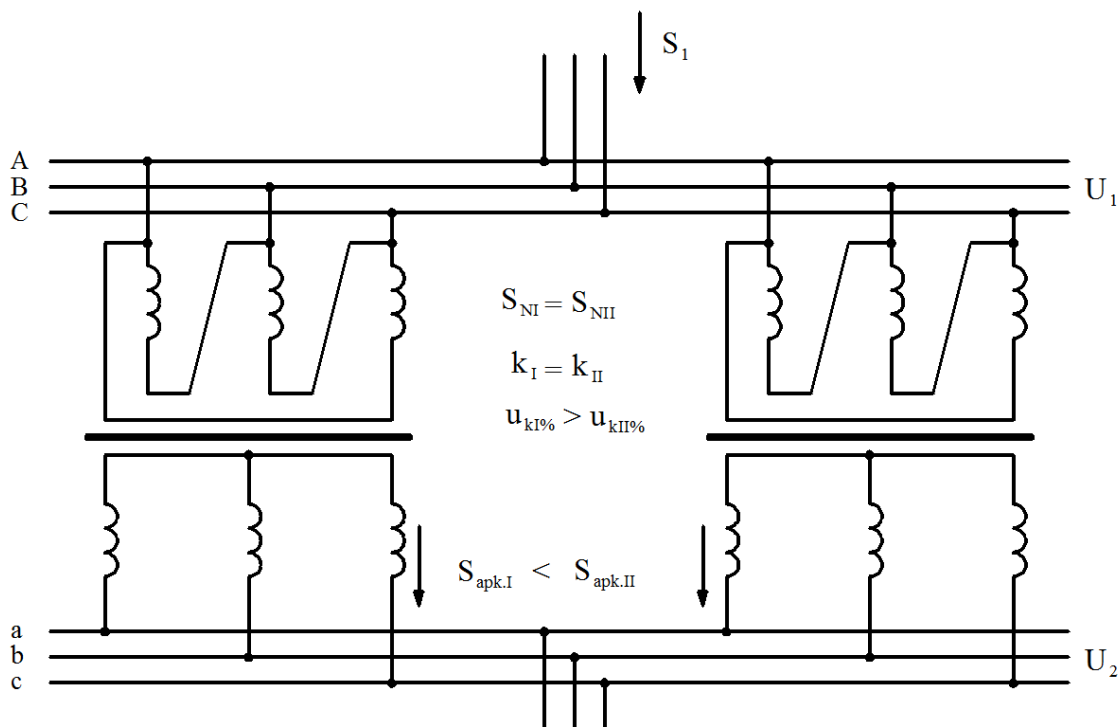
1.1.4. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingoms trumpojo jungimo įtampoms

Laikoma, kad yra tenkinamos 1.1.2. punkte nurodytos antra (vienodi transformacijos faktoriai) ir trečia (vienodos apvijų jungimo grupės) sąlygos. Taip pat, kiekvieno lygiagrečiai dirbančio transformatoriaus, reaktyviosios trumpojo jungimo įtamos dedamosios u_{kr} ir aktyviosios trumpojo jungimo įtamos dedamosios u_{ka} santykis yra vienodas, tai ir kampai bus lygūs: $\varphi_{kI} = \varphi_{kII} = \dots = \varphi_{kN}$.

Geriausias transformatorių išnaudojimas gaunamas tada, kai didžiausią galią turintis transformatorius turi mažiausią trumpojo jungimo įtampą $u_{k\%}$. Didžiausią galią turintį transformatorių pilnai apkrovus, likę mažesnės galios transformatoriai bus dar pilnai neapkrauti.

Jeigu kampai φ_k skiriasi, tuomet transformatoriai bus dar blogiau išnaudojami, nes antrinių srovių geometrinė suma gaunasi mažesnė už aritmetinę sumą. Tiesa, kampai pernelyg nesiskiria vienas nuo kito, todėl minėtų srovių geometrinė ir aritmetinė sumos yra labai panašios ir remiantis skaičiavimais bei praktika, kampų nevienodumas neturi didelės įtakos transformatorių lygiagrečiam darbui.

Apibendrinant galima teigti, kad transformatoriams su skirtingomis trumpojo jungimo įtampomis $u_{k\%}$, dirbant lygiagrečiai, apkrova tarp transformatorių pasiskirsto atvirkščiai proporcingai trumpojo jungimo įtampoms. Labiau apkraunamas tas transformatorius, kurio trumpojo jungimo įtampa mažesnė. Šis atvejis parodytas 1.2 paveiksle.

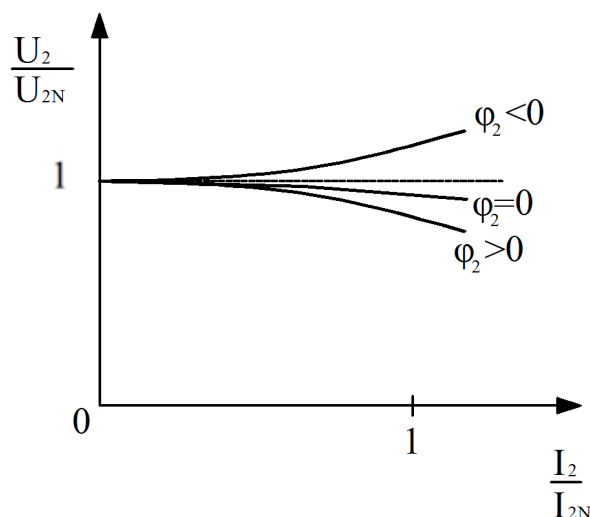


1.2 pav. Transformatorių su nevienodomis trumpojo jungimo įtampomis jungimo lygiagrečiam darbui schema

Kada visų transformatorių galia vienoda, tačiau skirtinga trumpojo jungimo įtampa – prie tokių transformatorių negalima jungti visos apkrovos. GOST standartuose nurodyta, kad draudžiama jungti transformatorių lygiagrečiam darbui, jeigu jo trumpojo jungimo įtampa yra mažesnė arba didesnė 10% nuo aritmetinio trumpojo jungimo įtampų vidurkio.

1.1.5. Transformatoriaus išorinė charakteristika

Transformatoriaus išorinė charakteristika yra viena iš svarbiausių eksploatacinių transformatoriaus charakteristikų. Ši charakteristika parodo, kaip kinta transformatoriaus antrinės apvijos įtampa, priklausomai nuo apkrovos srovės, o tai atitinka funkciją $U_2 = f(I_2)$. Charakteristika priklauso nuo apkrovos pobūdžio. Dažniausiai apkrova būna aktyviojo ($\varphi_2=0$) arba aktyviojo–induktyviojo pobūdžio ($\varphi_2>0$). Tai įvairios apšvietimo lempos, kaitinimo krosnys, asinchroniniai varikliai, suvirinimo aparatai ir kiti elektros įrenginiai. Šiuo atveju, apkrovus transformatorių kokia nors iš paminėtų apkrovų (aktyvine arba aktyvine–induktyvine) – apkrovai didėjant, mažėja antrinės apvijos įtampa U_2 , bet didėja apkrovos srovė I_2 . Esant talpinei apkrovai ($\varphi_2<0$) (kondensatorių baterijos, sinchroniniai varikliai ir kt.) didėjant apkrovos srovei I_2 , transformatoriaus antrinė apvijos įtampa U_2 taip pat didėja. Transformatoriaus išorinės charakteristikos esant skirtingo tipo apkrovoms pateikiamos 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Transformatoriaus išorinės charakteristikos, esant skirtingo pobūdžio apkrovoms

1.2. Bendrosios žinios apie asinchroninius variklius

Didžioji dalis buitinių bei bendrosios paskirties pramoninių elektros variklių yra asinchroniniai. Asinchroniniai varikliai yra energijos keitikliai, kurie elektros energiją paverčia mechanine energija. Sandara susideda iš dviejų pagrindinių dalių: judamosios dalies – rotoriaus

ir nejudamos dalies statoriaus. Priklausomai nuo rotoriaus tipo, asinchroniniai varikliai skirstomi:

- su faziniu rotoriumi;
- su narveliniu rotoriumi.

Dėl savo paprastumo ir patikimumo, dažniau naudojamos asinchroninės mašinos su narveliniais rotoriais. Darbe nagrinėjamas 5,5 kW asinchroninis variklis taip pat turi tokio tipo rotorių.

Asinchroninio variklio veikimas remiasi elektromagnetinės indukcijos reiškiniu. Prijungus trifazio asinchroninio variklio statoriaus apviją prie simetrinio trifazio įtampos tinklo, statoriaus apvijomis pradeda tekėti srovės. Šios srovės statoriaus oro tarpe sukuria sukamąjį magnetinį lauką, kurio sukimosi greitis n_1 . Sukamasis magnetinis laukas kirsdamas rotoriaus apvijas sužadina vidines įtampas (įtampų kryptis nustatoma pagal dešinėsios rankos taisyklę). Kada rotoriaus apvija uždara, ja teka srovės, kurios savo ruožtu sąveikaudamos su statoriaus sukamuoju magnetiniu lauku sukuria rotoriaus apvijų laidininkuose elektromagnetines jėgas (jėgų kryptis surandama pagal kairės rankos taisyklę). Šių jėgų visuma sukuria elektromagnetinį momentą, kuris suka rotorių greičiu n .

Asinchroninio variklio rotoriaus greitis n , visada mažesnis už sukamojo magnetinio lauko greitį n_1 . Rotoriaus atsilikimas nuo statoriaus sukamojo magnetinio lauko išreiškiamas slydimu s ir lygus:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (1.2)$$

Slydimas yra bedimensinis dydis. Kada $s=1$, variklis nesisuka.

1.2.1. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos

Asinchroninio variklio darbo charakteristikomis vadiname iš elektros tinklo imamos aktyviosios galios P_1 , slydimo s , galios faktoriaus $\cos\varphi_1$, naudingumo faktoriaus η bei statoriaus apvijų srovės I_1 , priklausomybės nuo naudingosios veleno mechaninės galios P_2 , kada yra tenkinamos šios sąlygos:

- tinklo įtampa pastovi $U_1=const$;
- tinklo dažnis pastovus $f_1=const$.

Darbo charakteristikos yra informatyvios, kadangi iš jų galime surasti visus dydžius, kurie apibūdina variklio darbą, prie skirtingų variklio veleno galių.

1.2.2. Asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi prijungimas į tinklą

Nagrinėjama 5,5 kW asinchroninį variklį su narveliniu rotoriumi galima jungti į tinklą tiesiogiai, nes paleidimo metu galima nemažinti asinchroninio variklio paleidimo srovės I_p . Kuomet yra naudojamas tiesioginis jungimas į tinklą, narvelinį rotorių turinčiu asinchroninių variklių kartotina paleidimo srovė būna 5,0÷7,5. Tokiu būdu prijungiant variklį į tinklą, priklausomai nuo galios, naudojami magnetiniai paleidikliai arba kontaktoriai.

Antroje dalyje aptariama 5,5 kW asinchroninio variklio maitinimo tinklo schema ir ją sudarantys elementai. Prijungtas asinchroninis variklis suka žemo slėgio ventiliatorių (oro našumas 80 m³/min).

1.2.3. Asinchroninio variklio statoriaus apvijos patikimumas

Patikimumas yra vienas iš svarbiausių kriterijų ne tik projektuojant, bet ir renkantis jau pagamintą, norimą elektros įrenginį. Jis leidžia nuspėti įrenginio stabilų veikimą, jam atliekant savo funkcijas tam tikrą laiko tarpą, išlaikant nustatytas eksploatacinių rodiklių leidžiamąsias vertes, kuomet yra vadovaujama visomis naudojimo, techninės priežiūros, periodinių patikrų, transportavimo bei taisymo sąlygomis nesugedus. Visa tai gali būti išreikšta negedimo tikimybe. Kuo minėta tikimybė artimesnė 1, tuo elektros įrenginys yra patikimesnis.

Iš praktikoje pasitaikančių asinchroninių variklių gedimų, yra išskiriami dažniausiai pasitaikantys atvejai: guolių ir statoriaus apvijos pažeidimai (gedimai). Guoliams tenka tik iki 8% asinchroninio variklio gedimo priežasčių, kai tuo tarpu apvijos pažeidimai siekia virš 90%. Tai reiškia, kad statoriaus apvijos patikimumas yra labai svarbus, siekiant išsiaiškinti minėtos rūšies, elektros įrenginio sėkmingą eksploatavimą trukmę. Šiuo tikslu ir atliekami asinchroninio variklio statoriaus apvijos patikimumo skaičiavimai.

Į asinchroninio variklio statoriaus apviją, žiūrint iš patikimumo pusės, galima laikyti, kaip sistemą, kurią sudaro nuosekliai sujungti elementai. Šie elementai yra laidų griovelinė, tarpvijinė, tarpsekcijinė, tarpfazinė izoliacija. Sistemos silpniausias elementas yra laikoma tarpvijinė izoliacija, o jos gedimo priežastis – tai trumpojo jungimo atsiradimas tarp srovėlaidžių su skirtingais potencialais.

Statoriaus apvijos negedimo tikimybė $R_a(t)$ apskaičiuojama:

$$R_a(t) = R_{lv}(t)R_g(t)R_{tf}(t)R_{ts}(t). \quad (1.3)$$

čia $R_{lv}(t)$, $R_g(t)$, $R_{tf}(t)$, $R_{ts}(t)$ – tarpvijinės, griovelinės, tarpfazinės, tarpsekcijinės (kai apviją yra dvisluoksnė) izoliacijos negedimo tikimybės.

1.3. Trumpieji jungimai, atsiradimo priežastys ir galimos pasekmės

Trumpasis jungimas – įtampą turinčios elektros grandinės fazių (polių) susijungimas tarpusavyje, tarpusavyje ir su žeme arba tik su žeme, arba su įžemintomis elektros įrenginių pasyviosiomis dalimis tiesiogiai įžemintos neutralės (įžeminto vidurinio taško) tinkle [12].

Skiriamos tokios trumpųjų jungimų rūšys:

- 1) Trifaziai, $K^{(3)}$ – kada visos trys elektros tinklo elemento fazės susijungia tarpusavyje. Jie sudaro 3 – 5 % visų TJ (TJ – trumpasis jungimas).
- 2) Dvifaziai, $K^{(2)}$ – kada kurios nors dvi elektros tinklo elemento fazės susijungia tarpusavyje. Jie sudaro 10 – 15% visų TJ.
- 3) Vienfaziai, $K^{(1)}$ – kada viena elektros tinklo elemento fazė susijungia su žeme arba nuliniu laidu. Jie sudaro 60 – 70% visų TJ.
- 4) Dvifazis su žeme, $K^{(1,1)}$ – kada kurios nors dvi elektros tinklo elemento fazės susijungia tarpusavyje ir su žeme ar nuliniu laidu. Jie sudaro 20 – 25% visų TJ [11].

Pagrindinėmis trumpojo jungimo priežastimis dažniausiai būna elektros tinklą sudarančių įrenginių ir elementų izoliacijos pažeidimai dėl senėjimo ar įvairių mechaninių pažeidimų (laidų nutrūkimas, kabelių pažeidimas atliekant kasimo darbus ir pan.). Trumpieji jungimai taip pat gali įvykti dėl personalo klaidų, viršįtampių, gyvūnų kaltės.

Trumpųjų jungimų padariniams turi įtakos pačio trumpojo jungimo trukmė bei vieta (atstumas nuo maitinimo šaltinio). Sutrinka elektros sistemos darbas ir nutrūksta elektros energijos tiekimas vartotojams. Srovė avarijos metu išauga net iki kelių dešimčių kartų, lyginant su vardine srove (kuo arčiau maitinimo šaltinio tuo srovė didesnė), todėl labai svarbu tinkamai parinkti atitinkamas apsaugos priemones, taip užtikrinant, kuo mažesnę galimų pažeidimų tikimybę bei pasekmes, kuo greičiau atjungiant pažeistą grandinę.

Didelis srovės padidėjimas įvyksta dėl staigaus grandinės varžos sumažėjimo. Įtampa taip pat sumažėja, ypač arti trumpojo jungimo vietos. Išaugusi srovė sukelia stiprias mechanines jėgas, kurios veikia izoliatorius, srovines dalis, elektros mašinų apvijas. Tiek srovinių dalių, tiek izoliacijos įkaitimas iki neleistinos temperatūros yra veiksniai, galintys sukelti tolimesnę avarijos plitimą. Įtampai nukritus apie 30 % nuo vardinės, varikliai ima stoti. Įtampos mažėjimas neigiamai veikia lygiagrečiai dirbančias elektrines, kurios gali desinchronizuotis.

Analizuojant veikiančių sistemų darbą, atliekant naujos elektros energijos tiekimo sistemos projektavimo darbus, būtina apsiskaičiuoti trumpojo jungimo sroves. Nustatomos didžiausios galimos TJ srovės ir pagal jas yra tikrinami apsaugos aparatai ir laidininkai atsižvelgiant į terminį ir mechaninį atsparumą. Turint didžiausias TJ srovės vertes, yra parenkamos atitinkamos

priemonės TJ srovės ir jos poveikio trukmei apriboti.

Taip pat svarbu apskaičiuoti mažiausias galimas TJ sroves. Šiuo atveju tikrinamas apsaugos aparatų jautrumas. Parenkama apsaugos sistema su reikalingais jos parametrais, prieš tai nustačius didžiausias galimas apsaugos poveikio trukmes.

1.4. Komutacinių ir apsaugos aparatų bei kabelinių linijų parinkimas

Tinkamai parinkti komutaciniai ir apsaugos aparatai, kabelinių linijų skerspjūviai, leidžia užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą, mažą gedimo tikimybę, o atsiradus normalaus darbo režimo pažeidimams – tinkamą apsaugą.

Visų komutacinių aparatų parinkimas yra panašus. Pirmiausia atsižvelgiama į vardinę srovę ir įtampą. Atlikus trumpojo jungimo skaičiavimus, tikrinama ar parinktieji aparatai sugebės atjungti trumpojo jungimo srovę.

Komutaciniai aparatai privalo atjungti elektros įrenginių maitinimą per kuo trumpesnę laiką, esant pavojingam srovės padidėjimui ar perkrovai ir kuo selektyviau. Apsaugos selektyvumas – tai toks apsaugos aparatų veikimas, kai į atsiradusias dideles sroves reaguoja tik artimiausias pažeidimo vietai apsaugos aparatas, o esantys už jo neatsijungia. Apsaugos aparatų selektyvumas užtikrinamas tinkamai suderinant jų selektyvumo charakteristikas.

Apsaugos charakteristikos derinamos grafiniu būdu, braižant laiko ir srovės koordinačių ašyse apsaugos suveikimo srovės priklausomybę nuo laiko ir tikrinant selektyvumo laiko pakopą tarp charakteristikų. Charakteristikų grafikai parodo ar tinkamai parinkti apsaugos aparatai. Jei apsaugos aparatų charakteristikos susikerta, tuomet apsaugos aparatus reikia koreguoti, atsižvelgiant į gretimų apsaugos aparatų suveikimo sroves [11].

Parenkant elektros laidininkus, reikia žinoti srovę, kuri jais tekės, reikalingą laidininko tipą, būsimą darbo aplinką. Laidininkų skerspjūviai pirmiausia parenkami, pagal apskaičiuotą tekėsiančią srovę I_{sk} . Kiekvienas laidininkas turi pagrindinį parametą, kuris nurodo ilgalaikę leistinąją srovę I_{leist} . Parinkimo principas toks, kad laidininku tekėsianti srovė turi būti mažesnė, negu ilgalaikė leistinoji pasirinkto laidininko srovė:

$$I_{leist} \geq I_{sk} . \quad (1.4)$$

Ši sąlyga yra pakankama, kada kabeliai nėra ilgi. Esant ilgesnėms linijoms, reikia papildomai skaičiuoti įtampos nuostolius ir žiūrėti ar nėra viršijamos leistinos ribos. 0,4 kV kabeliuose, įtampos kritimas neturėtų viršyti $\pm 5\%$ vardinės įtampos U_N . Įtampos nuokrypis ap –

skaičiuojamas:

$$\Delta U = U_1 - U_2. \quad (1.5)$$

čia U_1 – maitinimo šaltinio įtampa, U_2 – įtampa imtuvo prijungimo taške.

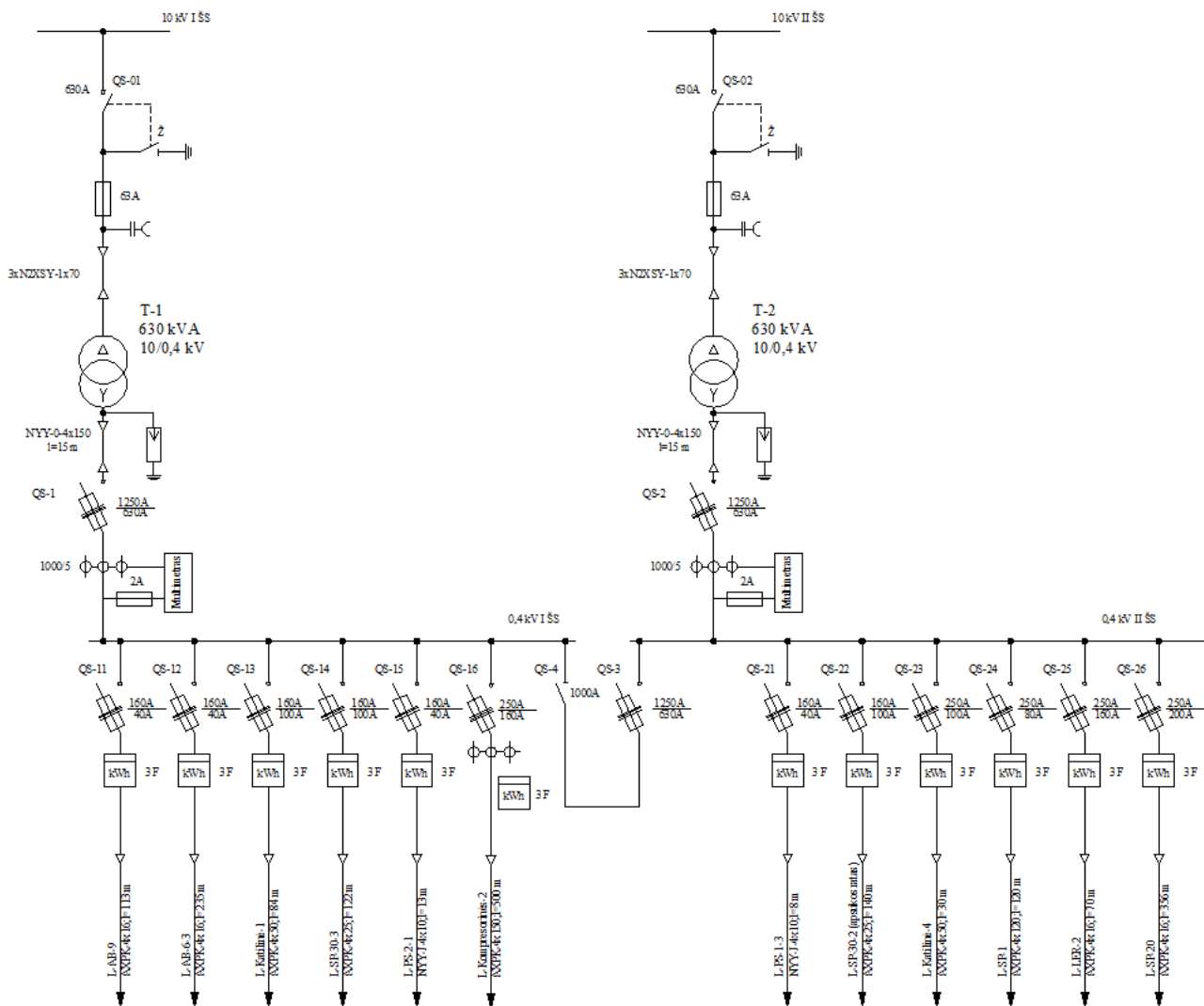
Įtampos kritimas procentais, nuo vardinės įtampos gali būti išreikštas:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \cdot 100. \quad (1.6)$$

čia U_N – vardinė įtampa.

2. PROJEKTINIAI SKAIČIAVIMAI

Šioje darbo dalyje nagrinėjamas lygiagretus 630 kVA galios transformatorių darbas Kauno geležinkelio stoties 10/0,4 kV transformatorinėje. Analizuojami du atvejai, kuomet galios transformatoriai turi skirtingus transformacijos faktorius k ir atvejis, kada galios transformatoriai turi skirtingas trumpojo jungimo įtampas $u_{k\%}$. Taip pat atliekami transformatoriaus išorinių charakteristikų skaičiavimai. Prie vienos iš linijų prijungiamas 5,5 kW asinchroninis variklis, apskaičiuojamos jo darbo charakteristikos, nustatomas statoriaus apvijų patikimumas. Parenkami apsaugos ir komutavimo aparatai, užtikrinamas jų selektyvumas ir gebėjimas atjungti apskaičiuotas trumpojo jungimo sroves. Paveiksle 2.1 pateikta 2x630 kVA galios transformatorinės principinė elektrinė schema, kurioje yra didžioji dalis duomenų, reikalingų atlikti minėtoms užduotims.



2.1 pav. 2x630 kVA galios transformatorinės principinė elektrinė schema

2.1. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingiems transformacijos faktoriams

Abiejų galios transformatorių parametrai:

$S_N = 630 \text{ kVA}$ – nurodytoji galia;

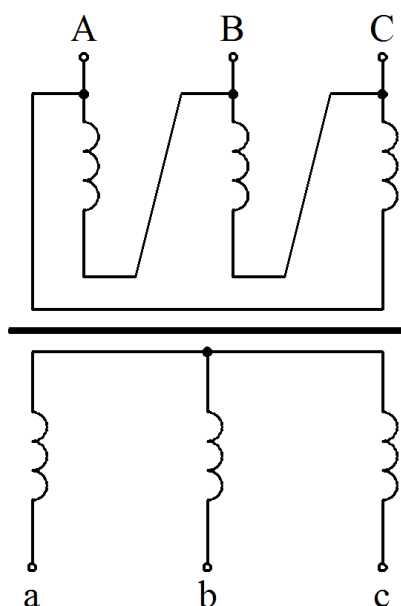
$U_{1N} = 10 \text{ kV}$ – pirminės apvijos nurodytoji įtampa;

$U_{2N} = 0,4 \text{ kV}$ – antrinės apvijos nurodytoji įtampa;

$u_k = 5,5\%$ – trumpojo jungimo įtampa;

$\Delta/Y-11$ – transformatoriaus apvijų jungimo schema ir grupė.

Nagrinėjamų galios transformatorių jungimo grupės vienodos, pirminė ir antrinė apvijos yra sujungtos taip pat vienodai. Transformatoriaus apvijų jungimo schema pateikiama 2.2 paveiksle.



2.2 pav. Transformatoriaus apvijų jungimo schema Δ/Y

Šiuo atveju, panaudojamas galios transformatoriaus atšakų perjungimo įrenginys, kuris keičia vijų skaičių aukštosios įtampos apvijoje, o tuo pačiu kinta ir transformacijos faktorius:

$$k = \frac{w_1}{w_2} \quad (2.1)$$

čia w_1 – pirminės apvijos vijų skaičius;

w_2 – antrinės apvijos vijų skaičius.

Vieno galios transformatoriaus jungiamo į tinklą pirminės apvijos atšaka yra +5% (t.y. transformacijos faktorius padidinamas 5%), o kito transformatoriaus jungiamo į tą patį tinklą pirminės apvijos atšaka yra -5% (t.y. transformacijos faktorius sumažinamas 5%).

1. Transformatoriaus transformacijos faktorius, kai atšakų perjungimo rankenėlė yra neutralioje padėtyje:

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}; \quad (2.2)$$

$$k = \frac{10000}{400} = 25.$$

2. Apskaičiuojami transformacijos faktoriai pirmojo ir antrojo transformatoriaus. Pirmojo atšakų perjungimo rankenėlė yra padėtyje +5% :

$$k_I = \frac{k \cdot 105}{100}; \quad (2.3)$$

$$k_I = \frac{25 \cdot 105}{100} = 26,25.$$

Antrojo transformatoriaus atšakų perjungimo rankenėlė yra padėtyje -5%, tuomet transformacijos faktorius :

$$k_{II} = \frac{k \cdot 95}{100}; \quad (2.4)$$

$$k_{II} = \frac{25 \cdot 95}{100} = 23,75.$$

3. Suskaičiavus abiejų transformatorių transformacijos faktorius, atliekami šių transformatorių antrinių apvijų įtampų skaičiavimai:

Abiejų transformatorių pirminės apvijos įjungtos į tą patį tinklą ir jos skirtis negali.

$$U_{2L} = \frac{U_{1L}}{k}; \quad (2.5)$$

$$U_{2LI} = \frac{U_{1LI}}{k_I} = \frac{10000}{26,25} = 380,95 \text{ V};$$

$$U_{2LII} = \frac{U_{1LII}}{k_{II}} = \frac{10000}{23,75} = 421,05 \text{ V}.$$

4. Transformatorių antrinių apvijų fazinė įtampa, kada apvijos sujungtos žvaigžde:

$$U_{2f} = \frac{U_{2L}}{\sqrt{3}}; \quad (2.6)$$

$$U_{2fl} = \frac{U_{2LI}}{\sqrt{3}} = \frac{380,95}{\sqrt{3}} = 219,94 \text{ V};$$

$$U_{2fII} = \frac{U_{2LII}}{\sqrt{3}} = \frac{421,05}{\sqrt{3}} = 243,09 \text{ V}.$$

5. Apskaičiuojamas transformatorių antrinių apvijų įtampų skirtumas ΔE , V:

$$\Delta E = U_{2fII} - U_{2fl}; \quad (2.7)$$

$$\Delta E = 243,09 - 219,94 = 23,15 \text{ V}.$$

6. Antrinės apvijos fazinės srovės abiejų transformatorių:

$$I_{2f} = \frac{S}{3 \cdot U_{2f}}; \quad (2.8)$$

$$I_{2fl} = \frac{S}{3 \cdot U_{2fl}} = \frac{630000}{3 \cdot 219,94} = 954,81 \text{ A};$$

$$I_{2fII} = \frac{S}{3 \cdot U_{2fII}} = \frac{630000}{3 \cdot 243,09} = 863,88 \text{ A}.$$

7. Transformatorių pilnutinės trumpojo jungimo varžos:

$$Z_k = \frac{u_{K\%} \cdot U_{2f}}{100 \cdot I_{2f}}; \quad (2.9)$$

$$Z_{kl} = \frac{u_{K\%} \cdot U_{2fl}}{100 \cdot I_{2fl}} = \frac{5,5 \cdot 219,94}{100 \cdot 954,81} = 12,7 \text{ m}\Omega;$$

$$Z_{kII} = \frac{u_{K\%} \cdot U_{2fII}}{100 \cdot I_{2fII}} = \frac{5,5 \cdot 243,09}{100 \cdot 863,88} = 15,5 \text{ m}\Omega.$$

8. Apskaičiuojama vienodinančioji (išlyginamoji) srovė I_{v2} , kuri teka uždaru kontūru per abiejų transformatorių pilnutinės trumpojo jungimo varžas:

$$I_{v2} = \frac{\Delta E}{Z_{kl} + Z_{kII}}; \quad (2.10)$$

$$I_{v2} = \frac{23,15}{12,7 \cdot 10^{-3} + 15,5 \cdot 10^{-3}} = 820,92 \text{ A}.$$

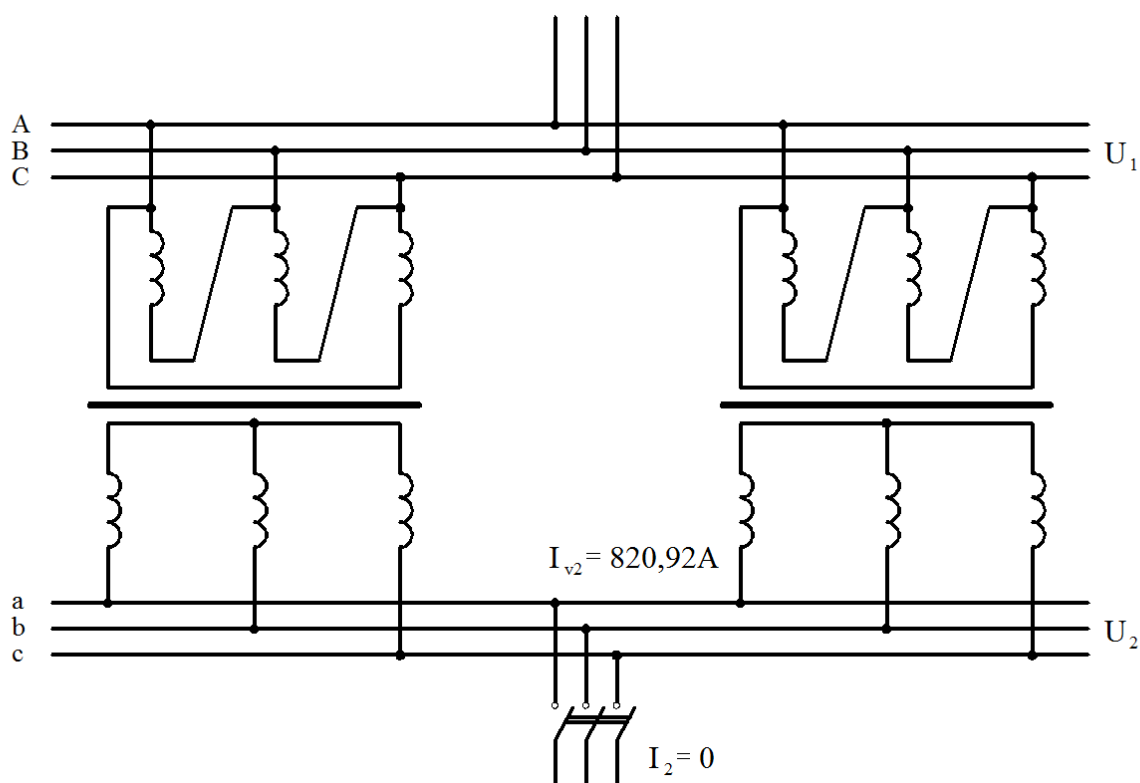
9. Apskaičiuojama, kaip bus apkrauti abu transformatoriai, net ir nesant jokiai apkrovai, dėl atsiradusios vienodinančiosios (išlyginamosios) srovės, kai $\cos \varphi_2 = 0,85$:

$$P_2 = 3 \cdot U_{2f} \cdot I_{2f} \cdot \cos \varphi_2 ; \quad (2.11)$$

$$P_{2I} = 3 \cdot U_{2fI} \cdot I_{2fI} \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 219,94 \cdot 954,81 \cdot 0,85 = 535,502 \text{ kW};$$

$$P_{2II} = 3 \cdot U_{2fII} \cdot I_{2fII} \cdot \cos \varphi_2 = 3 \cdot 243,09 \cdot 863,88 \cdot 0,85 = 535,501 \text{ kW}.$$

Skaičiavimai buvo atlikti, kuomet lygiagrečiai dirbančių transformatorių transformacijos faktoriai buvo skirtingi, trumpojo jungimo įtampos ir apvijų jungimo grupės vienodos, o prie transformatoriaus antrinių šynų neprijungta apkrova. Apskaičiuota vienodinančioji srovė, kuri teka tarp transformatorių antrinių apvijų. Tokio atvejo, lygiagrečiai dirbančių transformatorių jungimo lygiagrečiam darbui schema pateikiama 2.3 paveiksle.



2.3 pav. Transformatorių su nevienodais transformacijos faktoriais jungimo schema lygiagrečiam darbui

2.2. Lygiagretus transformatorių darbas, esant skirtingoms trumpojo jungimo įtampoms

Nagrinėjamas kitas atvejis, kada transformatoriaus faktoriai ir jungimo grupės yra vienodos, tačiau skiriasi trumpojo jungimo įtampoms $u_k\%$. Esant šioms sąlygoms, transformatoriai yra apkraunami ne vienodai. Vienas jų visada bus apkrautas daugiau už kitą. Toliau atliekami skaičiavimai, tam kad išsiaiškinti trumpojo jungimo įtampoms įtaką transformatoriaus lygiagrečiam darbui.

1. Surandama suminė lygiagrečiai dirbančių transformatorių pilnutinė galia $S_{I,II}$:

$$S_{I,II} = S_I + S_{II}; \quad (2.12)$$

$$S_{I,II} = 630 + 630 = 1260 \text{ kVA.}$$

2. Apskaičiuojama pirmojo transformatoriaus trumpojo jungimo įtampa $u_{kI}\%$.

Yra žinoma, kad antrojo transformatoriaus trumpojo jungimo įtampa yra $u_{kII}\% = 5,5\%$.

Priimama, kad pirmojo transformatoriaus trumpojo jungimo įtampa 1,2 karto didesnė ir tuomet:

$$u_{kI}\% = u_{kII}\% \cdot 1,2; \quad (2.13)$$

$$u_{kI}\% = 5,5 \cdot 1,2 = 6,6 \%.$$

3. Kadangi santykinės transformatorių apkrovos atvirkščiai proporcingos jų trumpojo jungimo įtampoms, apskaičiuojama šių santykinių apkrovų suma:

$$\frac{S_{I,II}}{u_{kI,II}\%} = \frac{S_I}{u_{kI}\%} + \frac{S_{II}}{u_{kII}\%}; \quad (2.14)$$

$$\frac{S_{I,II}}{u_{kI,II}\%} = \frac{630}{6,6} + \frac{630}{5,5} = 210;$$

$$S^* = \frac{S_I + S_{II} + S_n}{u_{k\%} \cdot \left(\frac{S_I}{u_{kI\%}} + \frac{S_{II}}{u_{kII\%}} + \frac{S_n}{u_{kn\%}} \right)}; \quad (2.15)$$

$$S_I^* = \frac{S_I + S_{II}}{u_{kI\%} \cdot \left(\frac{S_I}{u_{kI\%}} + \frac{S_{II}}{u_{kII\%}} \right)} = \frac{630 + 630}{6,6 \cdot \left(\frac{630}{6,6} + \frac{630}{5,5} \right)} = 0,91;$$

$$S_{II}^* = \frac{S_I + S_{II}}{u_{kII\%} \cdot \left(\frac{S_I}{u_{kI\%}} + \frac{S_{II}}{u_{kII\%}} \right)} = \frac{630 + 630}{5,5 \cdot \left(\frac{630}{6,6} + \frac{630}{5,5} \right)} = 1,09;$$

5. Turint suminės apkrovos pasiskirstymą santykiniais vienetais abiem transformatoriams, galima apskaičiuoti, kokia apkrova teks kiekvienam iš jų:

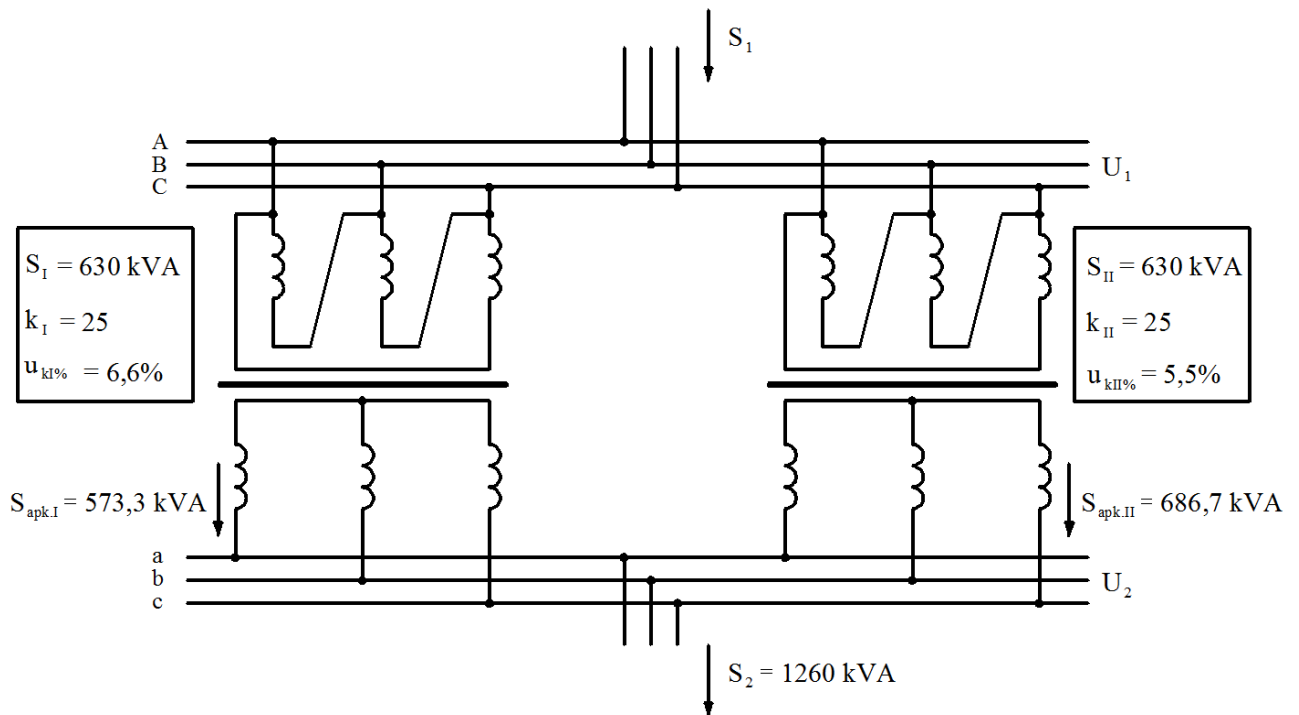
$$S = S_N \cdot S^*; \quad (2.16)$$

$$S_{apk.I} = S_I \cdot S_I^* = 630 \cdot 0,91 = 573,3 \text{ kVA};$$

$$S_{apk.II} = S_{II} \cdot S_{II}^* = 630 \cdot 1,09 = 686,7 \text{ kVA};$$

Atlikti skaičiavimai parodė, kad esant skirtingoms transformatorių trumpojo jungimo įtampoms, apkrova pasiskirsto netolygiai. Apkrova yra atvirkščiai proporcinga trumpojo jungimo įtampoms. Daugiau apkraunamas transformatorius, kurios trumpojo jungimo įtampa mažesnė.

Prie vienodos galios transformatorių, kurių trumpojo jungimo įtampoms yra skirtingos, negalima jungti visos apkrovos. Nagrinėto atvejo jungimo lygiagrečiam darbui schema pateikiama 2.4 paveiksle.



2.4 pav. Transformatorių su nevienodomis trumpojo jungimo įtampomis jungimo lygiagrečiam darbui schema

2.3. Galios transformatorių išorinių charakteristikų skaičiavimas

Galios transformatorių išorinių charakteristikų skaičiavimui reikalingi duomenys yra pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Galios transformatoriaus parametrai

S_N , kVA	$\varphi_{2,1}$, °	$\varphi_{2,2}$, °	$\varphi_{2,3}$, °	P_0 , kW	P_k , kW	U_{1N}/U_{2N} , kV	u_k , %	i_0 , %	Jungimo grupė
630	46	-37	0	1,120	7,650	10/0,4	5,5	1,3	$\Delta/Y-11$

Čia atitinkamai yra:

S_N – galios transformatoriaus nurodytoji galia;

$\varphi_{2,1}$ – kampas tarp antrinės apvijios įtampos ir antrinės apvijios srovės fazorių, esant induktyvinio pobūdžio apkrovai;

$\varphi_{2,2}$ – kampas tarp antrinės apvijios įtampos ir antrinės apvijios srovės fazorių, esant talpinio pobūdžio apkrovai;

$\varphi_{2,3}$ – kampas tarp antrinės apvijios įtampos ir antrinės apvijios srovės fazorių, esant aktyvinio pobūdžio apkrovai;

P_0 – tuščiosios veikos galios nuostoliai;

P_k – trumpojo jungimo galios nuostoliai;

U_{1N} – transformatoriaus pirminės apvijios nurodytoji įtampa;

U_{2N} – transformatoriaus antrinės apvijios nurodytoji įtampa;

u_k – trumpojo jungimo įtampa;

i_0 – tuščiosios veikos srovė.

Taip pat, kad būtų galima atlikti galios transformatoriaus išorinių charakteristikų skaičiavimus, dar yra reikalinga trumpojo jungimo įtampos aktyvioji dedamoji u_{ka} , išreikšta procentine išraiška bei trumpojo jungimo įtampos reaktyvioji dedamoji u_{kr} , išreikšta procentine išraiška. Šiam tikslui atliekami skaičiavimai:

Transformatoriaus pirminė apvija sujungta trikampiui, todėl pirminės apvijios fazinė įtampa yra lygi linijinei įtampai:

$$U_{1f} = U_l = 10000 \text{ V};$$

1. Pirminės apvijios nurodytoji srovė:

$$I_{1N} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{1N}}; \quad (2.17)$$

$$I_{1N} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10} = 36,37 \text{ A}.$$

2. Apskaičiuojame pirminės apvijios fazinę srovę:

$$I_{1f} = \frac{I_{1N}}{\sqrt{3}}; \quad (2.18)$$

$$I_{1f} = \frac{36,37}{\sqrt{3}} = 21 \text{ A.}$$

3. Trumpojo jungimo galios nuostoliai tenkantys vienai fazei:

$$P_{kf} = \frac{P_k}{m}; \quad (2.19)$$

čia m – fazių skaičius.

$$P_{kf} = \frac{7,650}{3} = 2,55 \text{ kW.}$$

4. Trumpojo jungimo aktyvioji varža:

$$R_k = \frac{P_{kf}}{I_{1f}^2}; \quad (2.20)$$

$$R_k = \frac{2,55 \cdot 10^3}{21^2} = 5,78 \text{ } \Omega.$$

5. Pirminės apvijios fazinė trumpojo jungimo įtampa:

$$U_{1kf} = \frac{U_{1f} \cdot u_k}{100}; \quad (2.21)$$

$$U_{1kf} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 5,5}{100} = 550 \text{ A.}$$

6. Transformatoriaus trumpojo jungimo pilnutinė varža:

$$Z_k = \frac{U_{1kf}}{I_{1f}}; \quad (2.22)$$

$$Z_k = \frac{550}{21} = 26,19 \text{ } \Omega.$$

7. Transformatoriaus trumpojo jungimo sklaidos induktyvioji varža:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \quad (2.23)$$

$$X_k = \sqrt{26,19^2 - 5,78^2} = 25,54 \text{ } \Omega.$$

8. Trumpojo jungimo įtampos aktyvioji dedamoji procentine išraiška:

$$u_{ka} = \frac{I_{1f} \cdot R_k}{U_{1f}} \cdot 100; \quad (2.24)$$

$$u_{ka} = \frac{21 \cdot 5,78}{10 \cdot 10^3} \cdot 100 = 1,21 \%$$

9. Trumpojo jungimo įtampos reaktyvioji dedamoji išreikšta procentais:

$$u_{kr} = \frac{I_{1f} \cdot X_k}{U_{1f}} \cdot 100; \quad (2.25)$$

$$u_{kr} = \frac{21 \cdot 25,54}{10 \cdot 10^3} \cdot 100 = 5,36 \%$$

Turint visus reikalingus duomenis, kurie yra pateikti 2.1 lentelėje ir gauti 2.24 bei 2.25 formulėmis, galima suskaičiuoti galios transformatoriaus išorines charakteristikas, kada transformatorius yra apkrautas skirtingomis apkrovomis:

- talpine;
- aktyvine;
- induktyvine.

Skaičiavimams atlikti naudojama programa „Matlab“. Išskiriamos trys pagrindinės sąlygos, kurios turi būti įgyvendintos (turi būti pastovios) :

1. transformatoriaus pirminės apvijios įtampa $U_1 = U_{1N} = const$;
2. tinklo dažnis $f_1 = f_{1N} = const$;
3. galios faktorius $\cos\varphi_2 = const$.

Formulė, pagal kurią gaunamos charakteristikos:

$$U_2 = \frac{U_{1N}}{k} \left[1 - \beta \frac{u_{ka\%} \cdot \cos\varphi_2 + u_{kr\%} \cdot \sin\varphi_2}{100} - \beta^2 \frac{(u_{kr\%} \cdot \cos\varphi_2 - u_{ka\%} \cdot \sin\varphi_2)^2}{20000} \right] \quad (2.26)$$

čia U_2 – transformatoriaus antrinės apvijios įtampa;

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2N}} \text{ – apkrovos faktorius;} \quad (2.27)$$

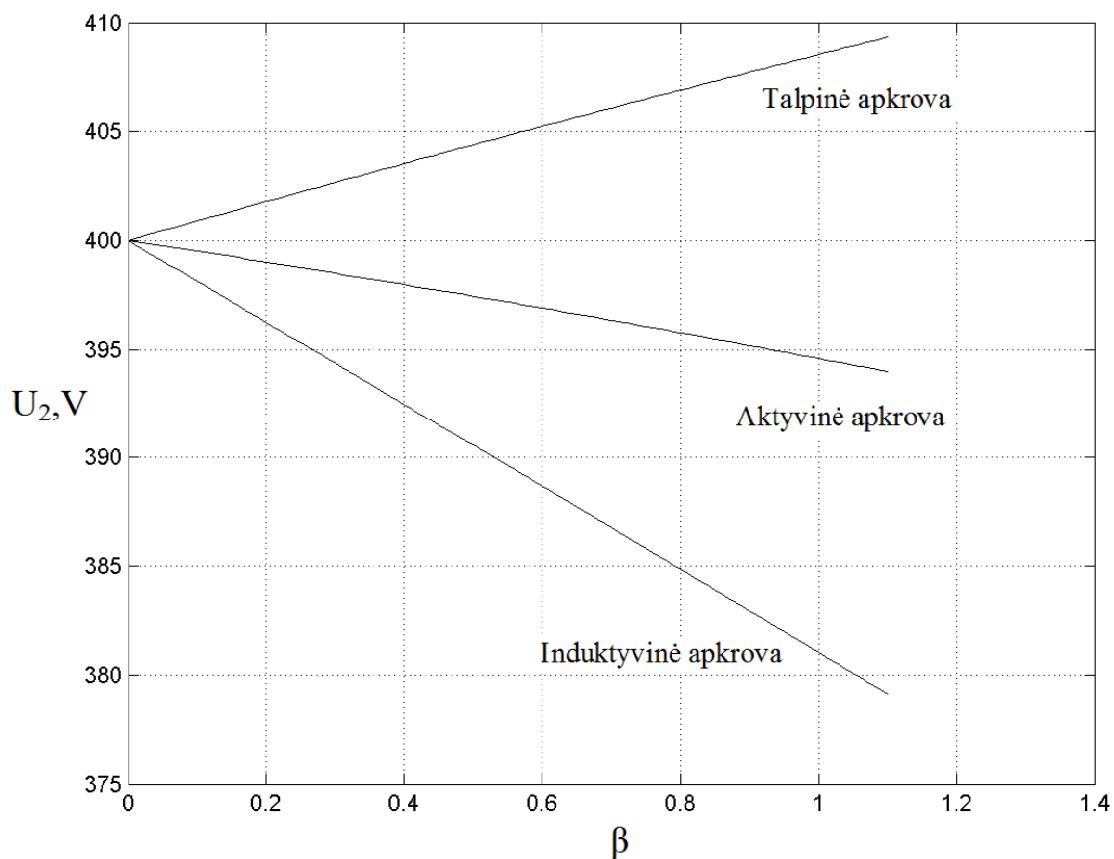
φ_2 – antrinės apvijios srovės ir įtampos fazių skirtumas;

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \text{ – transformacijos faktorius.} \quad (2.28)$$

Skaičiavimo rezultatai gauti programa „Matlab“ pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Galios transformatoriaus išorinių charakteristikų rezultatai, gauti programa „Matlab“

β	U_2, V		
	φ_{21}	φ_{22}	φ_{23}
0,00	400,00	400,00	400,00
0,11	397,93	400,98	399,46
0,22	395,85	401,96	398,92
0,33	393,78	402,92	398,34
0,44	391,70	403,87	397,75
0,55	389,61	404,81	397,16
0,66	387,53	405,74	396,55
0,77	385,43	406,66	395,93
0,88	383,34	407,56	395,29
0,99	381,24	408,45	394,64



2.5 pav. Galios transformatoriaus išorinės charakteristikos $U_2=f(\beta)$

Iš galios transformatoriaus charakteristikų, pateiktų 2.5 paveiksle, matyti, kad apkraunant transformatorių aktyvine arba induktyvine apkrova, transformatoriaus antrinės apvijos srovė I_2 didėja, bet antrinės apvijos įtampa U_2 mažėja. Apkraunant transformatorių talpine apkrova, antrinės apvijos srovė taip pat didėja, kaip ir apkraunant aktyvine bei induktyvine apkrovomis, tačiau antrinės apvijos įtampa, šiuo atveju didėja.

2.4. Asinchroninio variklio maitinimo tinklo schemos sudarymas

Asinchroninio variklio duomenys:

Nurodytoji naudingoji galia: 5,5 kW;

Nurodytoji fazinė tinklo įtampa: 230 V;

Tinklo dažnis: 50 Hz;

Fazių skaičius: 3;

Naudingumo faktorius: 0,848;

Galios faktorius: 0,838;

Polių skaičius: 6.

Asinchroninio variklio vardinė ir paleidimo srovės:

Asinchroninio variklio vardinė srovė:

$$I_N = \frac{P_N}{m \cdot U_f \cdot \cos \varphi \cdot \eta}; \quad (2.29)$$

čia P_N – asinchroninio variklio nurodytoji naudingoji galia;

m – fazių skaičius;

U_f – tinklo fazinė įtampa;

$\cos \varphi$ – galios faktorius;

η – variklio naudingumo faktorius.

$$I_N = \frac{5,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 230 \cdot 0,838 \cdot 0,848} = 11,22 \text{ A.}$$

Asinchroninio variklio paleidimo srovė:

$$I_p = i_p \cdot I_N; \quad (2.30)$$

čia i_p – asinchroninio variklio kartotina paleidimo srovė.

$$I_p = 5 \cdot 11,22 = 56,1 \text{ A.}$$

Automatinio jungiklio parinkimas:

Automatinis jungiklis parenkamas pagal apskaičiuotą variklio srovę I_N , kuri lygi 11,22A. Taip pat pagal paleidimo srovę, kuri šio asinchroninio variklio paleidimo metu išauga 5 kartus. Tam tikslui reikalingas C charakteristikos automatinis jungiklis, kuris leidžia tam tikrą laiko tarpą tekėti 5-10 kartų didesnei srovei. Parenkant automatinį jungiklį atsižvelgiama į fazių skaičių, maksimalią srovę, kuri gali būti atjungta, vardinį dažnį, nurodytąją įtampą.

Gamintojas: ABB;

Pavadinimas: C203-C16;

Vardinė srovė: 16 A;

Vardinė įtampa: 400 V;

Polių skaičius: 3;

Atjungimo geba: 6 kA;

Vardinis dažnis: 50-60 Hz;

Charakteristika: C;

Aukštis/plotis/ilgis: 88 mm/52,5 mm/69 mm.

Magnetinio paleidiklio parinkimas:

Magnetinis paleidiklis parinktas atsižvelgiant į apskaičiuotą vardinę variklio srovę I_N , bei įvadinio automatinio jungiklio vardinę srovę.

Gamintojas: CHINT;

Pavadinimas: NCI-1-18;

Vardinė srovė: 18 A;

Vardinė įtampa: 400 V;

Vardinė izoliacijos įtampa: 690 V;

Valdymo ritės įtampa: 230 V;

Jėgos grandinės kontaktų konfigūracija: 3 NA;

Valdymo grandinės kontaktų konfigūracija: 1 NA;

Standartas: IEC/EN 60947-4-1;

Aukštis/plotis/ilgis: 76 mm/47 mm/87 mm.

Šiluminės relės parinkimas:

Šiluminė relė skirta visoms trimis fazėms ir parenkama pagal asinchroninio variklio srovę, to paties gamintojo, kaip ir magnetinis paleidiklis, nes yra galimybė šiluminę relę tvirtinti prie

magnetinio paleidiklio kontaktų.

Gamintojas: CHINT;

Pavadinimas: NCI-2-11,5;

Vardinė srovė: 9 – 13 A;

Valdymo ritės įtampa: 230 V;

Kontaktų konfigūracija: 1 NA ir 1 NU;

Standartas: IEC/EN 60947-4-1;

Aukštis/plotis/ilgis: 75 mm/47 mm/65 mm.

Paleidimo ir stabdymo mygtukų parinkimas:

Valdymo mygtukai parenkami pagal vardinę srovę, vardinę izoliacijos įtampą. Taip pat pagal patogumą. Mygtukai dviejų skirtingų spalvų. Juodas mygtukas paleidimo, o raudonas stabdymo.

Pavadinimas: ПKE 212-2;

Vardinė įtampa maksimali: 660 V;

Vardinė srovė: 10 A;

Dažnis: 50-60 Hz;

Mygtukų skaičius: 2;

Kiekvieno mygtuko kontaktų konfigūracija: 1NA ir NU.

Aukštis/plotis/ilgis: 140/76/79 mm.

Montavimo dėžės parinkimas:

Montavimo dėžė parenkama pagal darbinę įtampą (400 V). Taip pat pagal dėžės matmenis, kad tilptų variklio paleidimo ir apsaugos elementai.

Gamintojas: T&J;

Darbinė įtampa: 400V (esant 50 Hz dažniui);

Aukštis/plotis/ilgis: 300/200/150 mm;

Apsaugos klasė: I (įžeminta), IP65;

Laidų įvadai: apačioje;

Korpusas ir durelės: 1,5 mm plieninė skarda;

Montažinė plokštė: 2 mm storio, padengta aliuminiu ir cinku;

Tinka naudoti: lauke, viduje;

Montavimo tipas: virštinkinis.

Jėgos kabelio parinkimas:

Kabelio skerspjūvis parankamas pagal asinchroninio variklio srovę, pagal kabelio leistiną ilgalaikę srovę ir pagal įtampos kritimą jame. Įvadinio automatinio jungiklio vardinė srovė yra 16 A, todėl kabelio ilgalaikė srovė turi būti didesnė.

Kabelio skerspjūvio plotas: 2,5 mm²;

Ilgalaikė leistinoji srovė: 25 A;

Laidininkas: varis;

Laidininkų skaičius: keturi;

Laidininkų izoliacija: PVC;

Vardinė įtampa: 0,6/1 kV;

Galimybė kloti: lauke, žemėje, sausose, drėgnose ir šlapiose patalpose, tiesiogiai į betoną, kabeliniuose kanaluose ir vamzdžiuose;

Nefiksuota instaliacija: nuo -5°C iki +50°C;

Fiksuota instaliacija: nuo -30°C iki +70°C.

Valdymo grandinės kabelio parinkimas:

Šiuo atveju parenkamas viengyslis kabelis. Skerspjūvis 1 mm², nes valdymo grandinėje teka mažos srovės.

Kabelio skerspjūvio plotas: 1 mm²;

Laidininkas: varis;

Laidininkų skaičius: vienas;

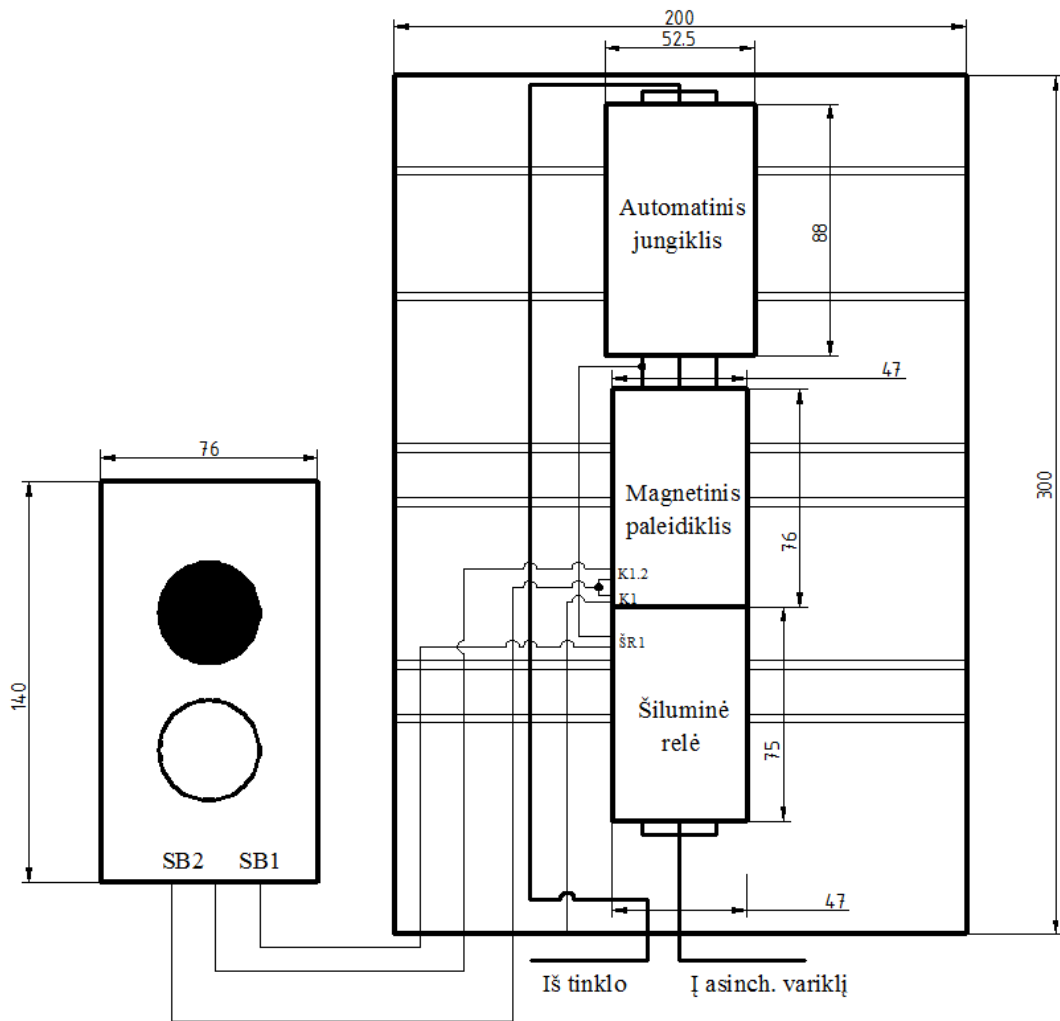
Laidininkų izoliacija: PVC;

Vardinė įtampa: 450/750 V;

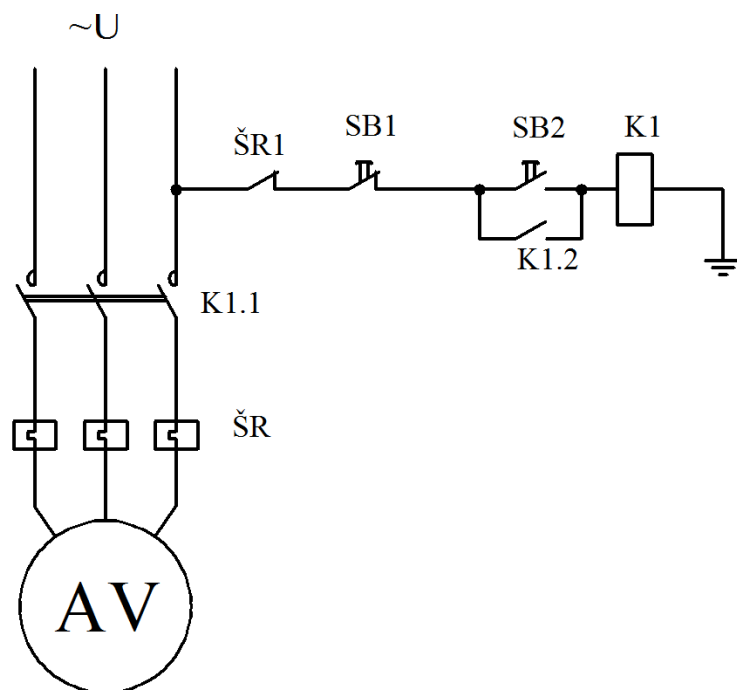
Eksploatavimo sąlygos: lauke, patalpoje;

Maksimali darbinė temperatūra: 70°C.

Parinktų įrenginių išdėstymas dėžėje pateikiamas 2.6 paveiksle, o 2.7 paveiksle pateikiama asinchroninio variklio paleidimo elektrinė schema.



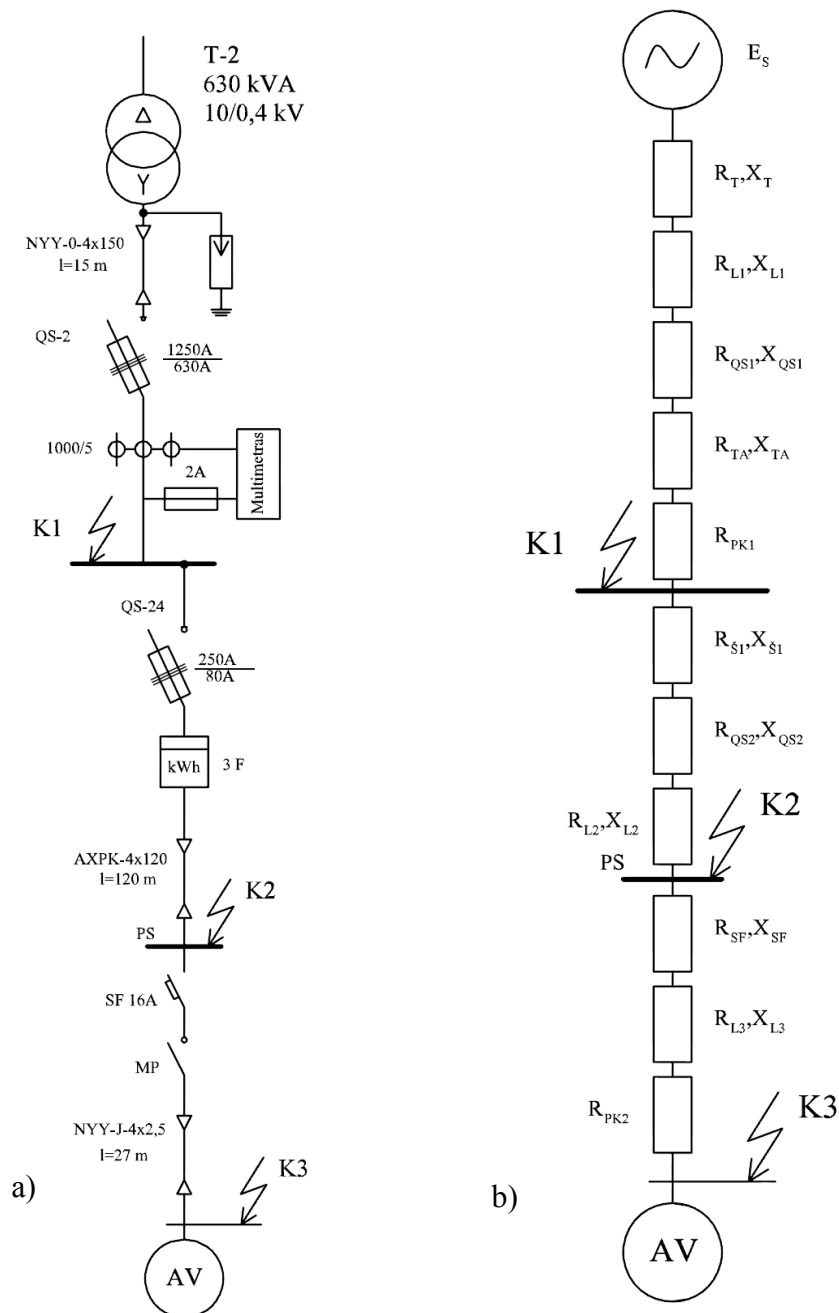
2.6 pav. Asinchroninio variklio paleidimo įrenginių dėžė



2.7 pav. Asinchroninio variklio paleidimo elektrinė schema

Kuomet paspaudžiamas mygtukas SB2, magnetinio paleidiklio ritė K1 prijungiama prie įtampos šaltinio, nes magnetinis paleidiklis sujungia K.1.1 ir K1.2 kontaktus. Asinchroninis variklis prie įtampos prijungiamas K.1.1 kontaktų pagalba. Paleidimo mygtukas SB2 blokuojamas kontaktų K.1.2 pagalba ir taip užtikrinamas maitinimas magnetinio paleidiklio ritei K1. Nuspaudus mygtuką SB1 yra nutraukiamas maitinimas ritei K1 ir magnetinis paleidiklis bus išjungtas. Šiluminė relė ŠR naudojama apsaugai nuo ilgalaikių variklio perkrovų. Jos kontaktai ŠR1 yra įjungti į magnetinio paleidiklio ritės K1 maitinimo grandinę, o tai leidžia atjungti asinchroninį variklį nuo tinklo, kada variklio apkrova viršija leistiną ribą.

2.5. Trumpųjų jungimų skaičiavimas



2.8 pav. Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimo a) ir ekvivalentinė b) schemas

Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimai atliekami Kauno geležinkelio stoties transformatorinėje, kuri aprūpina elektros energija vartotojus, vienoje iš linijų. Prie šios linijos yra prijungtas asinchroninis variklis. Trumpieji jungimai skaičiuojami šynoje, paskirstymo skyde ir prie pat asinchroninio variklio, o skaičiavimo ir ekvivalentinės schemos pateikiamos 2.8 paveiksle.

2.8 a paveiksle esantis transformatorius (10/0,4 kV), maitina žemos įtampos tinklą. Šio transformatoriaus galia 630 kVA ir ji yra gerokai mažesnė, lyginant su elektros sistemoje esančiais generatoriais ir transformatoriais, kurie maitina 10 kV elektros skirstomąjį tinklą. Šiuo atveju maitinimo sistema yra pastovaus dydžio elektrovaros šaltinis (E_s), kuris turi nulinę vidaus varžą. Todėl skaičiuojant TJ ji nėra vertinama.

Pirmiausia sudaroma ekvivalentinė TJ schema, kuri pavaizduota 2.8 b paveiksle. Sudarinėjant šią schemą, vertinamos aktyviosios ir reaktyviosios elementų varžos. Atsižvelgiant į tai, kad bet kokioje laidininkų sujungimo vietoje bei trumpojo jungimo vietoje visada atsiranda papildoma varža, kuri siekia iki 0,1 mΩ, į skaičiavimus įvedama papildoma varža. Ji yra vadinama pereinamųjų kontaktų ir lanko varža R_{PK} , o jos dydis pastotės skirstykloje 15 mΩ.

Sudarius TJ ekvivalentinę schemą atliekami skaičiavimai. 630 kVA galios transformatoriaus aktyvioji varža R_T , bet transformatoriaus reaktyvioji varža X_T perskaičiuota antrinei įtampai (0,4 kV) paimama iš lentelių:

$$R_T = 2,62 \text{ m}\Omega;$$

$$X_T = 13,72 \text{ m}\Omega.$$

Kabelio aktyvioji varža:

$$R_L = r_L \cdot L; \tag{2.31}$$

čia: L – kabelio ilgis, m;

r_L – aktyvioji varža, mΩ/m;

$$R_{L1} = 0,13 \cdot 15 = 1,95 \text{ m}\Omega.$$

Reaktyvioji kabelio varža:

$$X_L = x_L \cdot L; \tag{2.32}$$

čia: L – kabelio ilgis, m;

x_L – reaktyvioji varža, mΩ/m;

$$X_{L1} = 0,06 \cdot 15 = 0,9 \text{ m}\Omega.$$

Saugiklių-kirtiklių bloko QS-2 aktyvioji ir reaktyvioji varžos:

$$R_{QS1} = 0,12 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{QS1} = 0,084 \text{ m}\Omega.$$

Srovės transformatoriaus, kurio transformacijos koeficientas 1000/5 aktyvioji ir reaktyvioji varžos yra nykstamai mažos, todėl jos nėra vertinamos.

Suminė aktyvioji varža:

$$R_{1\Sigma} = R_T + R_{L1} + R_{QS1} + R_{PK1}; \quad (2.33)$$

$$R_{1\Sigma} = 2,62 + 1,95 + 0,12 + 15 = 19,69 \text{ m}\Omega.$$

Suminė reaktyvioji varža:

$$X_{1\Sigma} = X_T + X_{L1} + X_{QS1}; \quad (2.34)$$

$$X_{1\Sigma} = 13,72 + 0,9 + 0,084 = 14,704 \text{ m}\Omega.$$

Tuomet trifazio trumpojo jungimo srovė taške K1 yra :

$$I_k^{(3)} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}; \quad (2.35)$$

čia U_N – vidutinė vardinė linijinė įtampa tos tinklo dalies, kurios TJ nagrinėjamas.

$$I_{k1}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{19,69^2 + 14,704^2}} = 9,398 \text{ kA}.$$

Apskaičiuojamas ir vienfazis trumpasis jungimas taške K1. Tai daroma todėl, kad reikia patikrinti apsaugos aparatų veikimą tinkle, kada yra minimalios galimos srovių vertės. Tam yra reikalingos suminės aktyvioji ($R_{01\Sigma}$) ir reaktyvioji ($X_{01\Sigma}$) trumpai jungtos grandinės fazinio laido nulinės sekos varžos.

Transformatorius sujungtas Δ/Y , todėl aktyvioji ir reaktyvioji nulinės sekos varžos yra tokios pat kaip ir tiesioginės sekos varžų:

$$R_{0T} = 2,62 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{0T} = 13,72 \text{ m}\Omega.$$

Kabelio LI nulinės sekos varžos randamos:

$$R_{0L} = 4 \cdot R_L; \quad (2.36)$$

$$R_{0L1} = 4 \cdot 1,95 = 7,8 \text{ m}\Omega.$$

$$X_{0L} = 3,5 \cdot X_L; \quad (2.37)$$

$$X_{0L1} = 3,5 \cdot 0,9 = 3,15 \text{ m}\Omega.$$

Remiantis [11] šaltiniu, kitų elementų nulinės sekos aktyviašias ir reaktyviašias varžas rekomenduojam prilyginti tiesioginėms sekos varžų vertėms. Tuomet nulinės sekos suminės varžos:

$$R_{01\Sigma} = R_{0T} + R_{0L1} + R_{QS1} + R_{PK1}; \quad (2.38)$$

$$R_{01\Sigma} = 2,62 + 7,8 + 0,12 + 15 = 25,54 \text{ m}\Omega.$$

$$X_{01\Sigma} = X_{0T} + X_{0L1} + X_{QS1}; \quad (2.39)$$

$$X_{01\Sigma} = 13,72 + 3,15 + 0,084 = 16,954 \text{ m}\Omega.$$

Vienfazis trumpasis jungimas taške K1:

$$I_k^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_N}{\sqrt{(2 \cdot R_\Sigma + R_{0\Sigma})^2 + (2 \cdot X_\Sigma + X_{0\Sigma})^2}}; \quad (2.40)$$

$$I_{k1}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 19,69 + 25,54)^2 + (2 \cdot 14,704 + 16,954)^2}} = 8,685 \text{ kA}.$$

Toliau skaičiuojami trumpieji jungimai taške K2:

60x8 varinių šynų aktyvioji ir reaktyvioji varžos:

$$R_\delta = r_\delta \cdot L_\delta; \quad (2.41)$$

čia r_δ – varža, mΩ/m;

L_δ – šynos ilgis metrais;

$$R_{\delta1} = 0,042 \cdot 3 = 0,126 \text{ m}\Omega.$$

$$X_\delta = x_\delta \cdot L_\delta; \quad (2.42)$$

čia x_δ – varža, mΩ/m, kai vidutinis atstumas tarp fazių 200 mm;

$$X_{\delta1} = 0,163 \cdot 3 = 0,489 \text{ m}\Omega.$$

Saugiklių-kirtiklių bloko QS-24 aktyvioji ir reaktyvioji varžos:

$$R_{QS2} = 2,35 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{QS2} = 1,3 \text{ m}\Omega.$$

Kabelio aktyvioji R_{L2} ir reaktyvioji X_{L2} atitinkamai apskaičiuojamos pagal 2.31 ir 2.32 formules:

$$R_{L2} = 0,28 \cdot 120 = 33,6 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{L2} = 0,06 \cdot 120 = 7,2 \text{ m}\Omega.$$

Suminė aktyvioji varža:

$$R_{2\Sigma} = R_{1\Sigma} + R_{S1} + R_{QS2} + R_{L2}; \quad (2.43)$$

$$R_{2\Sigma} = 19,69 + 0,126 + 2,35 + 33,6 = 55,766 \text{ m}\Omega.$$

Suminė reaktyvioji varža:

$$X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma} + X_{S1} + X_{QS2} + X_{L2}; \quad (2.44)$$

$$X_{2\Sigma} = 14,704 + 0,489 + 1,3 + 7,2 = 23,693 \text{ m}\Omega.$$

Pagal 2.35 formulę apskaičiuojama trifazio trumpojo jungimo srovė taške K2:

$$I_{k2}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{55,766^2 + 23,693^2}} = 3,811 \text{ kA}.$$

Vienfaziam trumpajam jungimui taške K2, surandamos nulinės sekos varžos.

Kabelio $L2$ nulinės sekos varžos pagal 2.36 ir 2.37 formules:

$$R_{0L2} = 4 \cdot 33,6 = 134,4 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{0L2} = 3,5 \cdot 7,2 = 25,2 \text{ m}\Omega.$$

Šiuo atveju, taip pat remiamasi [11] šaltiniu ir kitų elementų nulinės sekos aktyviosios ir reaktyviosios varžos prilyginamos tiesioginėms sekos varžų vertėms. Tuomet nulinės sekos suminės varžos:

$$R_{02\Sigma} = R_{01\Sigma} + R_{S1} + R_{QS2} + R_{0L2}; \quad (2.45)$$

$$R_{02\Sigma} = 25,54 + 0,126 + 2,35 + 134,4 = 162,416 \text{ m}\Omega.$$

$$X_{02\Sigma} = X_{01\Sigma} + X_{S1} + X_{QS2} + X_{0L2}; \quad (2.46)$$

$$X_{02\Sigma} = 16,954 + 0,489 + 1,3 + 25,2 = 43,943 \text{ m}\Omega.$$

Vienfazis trumpasis jungimas taške K2 apskaičiuojamas remiantis 2.40 formule:

$$I_{k2}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 55,766 + 162,416)^2 + (2 \cdot 23,693 + 43,943)^2}} = 2,399 \text{ kA.}$$

Toliau skaičiuojami trumpieji jungimai taške K3:

Automatinio jungiklio aktyvioji ir reaktyvioji varžos:

$$R_{SF} = 5,5 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{SF} = 2,7 \text{ m}\Omega.$$

Asinchroninio variklio maitinimo kabelio aktyvioji R_{L3} ir reaktyvioji X_{L3} apskaičiuojamos taip pat pagal 2.31 ir 2.32 formules:

$$R_{L3} = 8 \cdot 27 = 216 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{L3} = 0,09 \cdot 27 = 2,43 \text{ m}\Omega;$$

Suminė aktyvioji varža:

$$R_{3\Sigma} = R_{2\Sigma} + R_{SF} + R_{L3} + R_{PK2}; \quad (2.47)$$

$$R_{3\Sigma} = 55,766 + 5,5 + 216 + 15 = 292,266 \text{ m}\Omega.$$

Suminė reaktyvioji varža:

$$X_{3\Sigma} = X_{2\Sigma} + X_{SF} + X_{L3}; \quad (2.48)$$

$$X_{3\Sigma} = 23,693 + 2,7 + 2,43 = 28,823 \text{ m}\Omega.$$

Pagal 2.35 formulę apskaičiuojama trifazio trumpojo jungimo srovė taške K3:

$$I_{k3}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{292,266^2 + 28,823^2}} = 0,786 \text{ kA.}$$

Vienfaziam trumpajam jungimui taške K3, surandamos nulinės sekos varžos.

Kabelio $L3$ nulinės sekos varžos pagal 2.36 ir 2.37 formules:

$$R_{0L3} = 4 \cdot 216 = 864 \text{ m}\Omega;$$

$$X_{0L3} = 3,5 \cdot 2,43 = 8,505 \text{ m}\Omega.$$

Remiamasi [11] šaltiniu, todėl kitų elementų nulinės sekos aktyviosios ir reaktyviosios varžos prilyginamos tiesioginėms sekos varžų vertėms. Tuomet nulinės sekos suminės varžos:

$$R_{03\Sigma} = R_{02\Sigma} + R_{SF} + R_{0L3} + R_{PK2}; \quad (2.49)$$

$$R_{03\Sigma} = 162,416 + 5,5 + 864 + 15 = 1046,9 \text{ m}\Omega.$$

$$X_{02\Sigma} = X_{02\Sigma} + X_{SF} + X_{0L3}; \quad (2.50)$$

$$X_{03\Sigma} = 43,943 + 2,7 + 8,505 = 55,148 \text{ m}\Omega.$$

Vienfazis trumpasis jungimas taške K3 apskaičiuojamas remiantis 2.40 formule:

$$I_{k3}^{(1)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 400}{\sqrt{(2 \cdot 292,266 + 1046,9)^2 + (2 \cdot 28,823 + 55,148)^2}} = 0,424 \text{ kA}.$$

2.5.1. Smūgio srovių skaičiavimas

Smūgine srove yra vadinama didžiausia momentinė trumpojo jungimo srovė. Ši srovė skaičiuojama tam, kad būtų galima įvertinti elektros įrenginių, kuriuos veikia TJ srovė, mechaninį atsparumą. Tekant smūginei srovei atsiradusios mechaninės jėgos, kurios veikia įrenginius ir izoliatorius yra pačios didžiausios.

Nagrinėjamu atveju, smūgio srovės skaičiuojamos taškuose K1, K2 ir taške K3, esant trifaziam trumpajam jungimui, nes gautos trifazės TJ srovės yra didesnės negu vienfazės TJ srovės. Taške K3 yra vertinama asinchroninio variklio įtaka, nes TJ metu jis generuoja įtampą tol, kol yra pakankamas kiekis magnetinio lauko energijos, sukauptos variklio rotorijoje ir statorijoje. Variklio generuojama srovė nuslopsta per 0,1-0,2 s.

Smūgio srovė taške K1:

Apskaičiuojamas smūgio faktorius, kuris priklauso nuo suminių aktyviosios ir reaktyviosios varžų:

$$k_{sm} = 1 + e^{-\frac{\Pi \cdot R_{\Sigma}}{X_{\Sigma}}}; \quad (2.51)$$

$$1 < k_{sm} < 2; \quad (2.52)$$

$$k_{sm1} = 1 + e^{-\frac{3,14 \cdot 19,69}{14,704}} = 1,015.$$

Žinant smūgio faktorių, apskaičiuojama smūgio srovė:

$$i_p = k_{sm} \cdot \sqrt{2} \cdot I_k; \quad (2.53)$$

$$i_{p1} = 1,015 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,398 \cdot 10^3 = 13,49 \text{ kA.}$$

Smūgio srovė taške K2:

Apskaičiuojamas smūgio faktorius pagal 2.51 formulę:

$$k_{sm} = 1 + e^{\frac{3,14 \cdot 55,766}{23,693}} = 1,001.$$

Smūgio srovė pagal 2.53 formulę:

$$i_{p2} = 1,001 \cdot \sqrt{2} \cdot 3,811 \cdot 10^3 = 5,395 \text{ kA.}$$

Smūgio srovė taške K3:

Apskaičiuojamas smūgio faktorius pagal 2.51 formulę:

$$k_{sm} = 1 + e^{\frac{3,14 \cdot 292,266}{28,823}} = 1 + 1,487 \cdot 10^{-14} \approx 1.$$

Smūgio srovė pagal 2.53 formulę:

$$i_{p3} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,786 \cdot 10^3 = 1,111 \text{ kA.}$$

Dar įvertinama ir asinchroninio variklio įtaka:

Pagal 2.29 formulę buvo apskaičiuota variklio vardinė srovė, kuri yra $I_N = 11,22 \text{ A}$.

Tiesioginės sekos reaktyviosios varžos faktorius:

$$X_d'' = \frac{1}{i_p}; \tag{2.54}$$

čia i_p – kartotina paleidimo srovė;

$$X_d'' = \frac{1}{5} = 0,2.$$

Trumpojo jungimo srovė nuo asinchroninio variklio:

$$I_{k.AV} = \frac{0,9}{X_d''} \cdot I_N; \tag{2.55}$$

$$I_{k.AV} = \frac{0,9}{0,2} \cdot 11,22 = 50,49 \text{ A.}$$

Smūgio srovė dėl asinchroninio variklio poveikio:

$$i_{p.AV} = \sqrt{2} \cdot I_{k.AV} ; \quad (2.56)$$

$$i_{p.AV} = \sqrt{2} \cdot 50,49 = 71,40 \text{ A.}$$

Suminė trifazio trumpojo jungimo srovė:

$$I_{k3\Sigma}^{(3)} = I_{k3}^{(3)} + I_{k.AV} ; \quad (2.57)$$

$$I_{k2\Sigma}^{(3)} = 0,786 \cdot 10^3 + 50,49 = 836,49 \text{ A.}$$

Suminė smūgio srovė:

$$i_{p3\Sigma} = i_{p3} + i_{p.AV} ; \quad (2.58)$$

$$i_{p3\Sigma} = 1,111 \cdot 10^3 + 71,40 = 1182,4 \text{ A.}$$

Nustačius trumpųjų jungimų ir smūgio sroves, tikrinama ar apsaugos aparatai parinkti teisingai ir gali atlikti savo funkcijas. Esant neatitikimams – bus keičiami kitais, sąlygas tenkinančiais elementais.

Taške K1:

Smūgio srovė trifazio TJ metu: $i_{p1} = 13,49 \text{ kA}$.

Vienfazio TJ srovė: $I_{k1}^{(1)} = 8,685 \text{ kA}$.

120 kA – vardinė saugiklių-kirtiklių bloko (QS-2) įdėklo atjungimo geba.

120 kA > 13,49 kA (sąlyga tenkinama).

Jautrumas yra užtikrinamas, jei mažiausios TJ srovės santykis su saugiklio vardine srove yra lygus 3 arba didesnis:

$$\frac{8685}{630} = 13,78 \text{ karto (sąlyga tenkinama).}$$

Prieš 630 kVA galios transformatorių esantis 63 A saugiklis (saugiklis skirtas 10 kV įtampai), turi sugebėti atjungti minėtas sroves. Dinaminio atsparumo srovė yra 31,5 kA, o minimali srovė, kuriai esant išsilydo tirptukas yra 630A.

31,5 kA > 13,49 kA (sąlyga tenkinama);

630 A < 8,685 kA (sąlyga tenkinama).

Taške K2:

Smūgio srovė trifazio TJ metu: $i_{p2} = 5,395 \text{ kA}$.

Vienfazio TJ srovė: $I_{k2}^{(1)} = 2,399 \text{ kA}$.

120 kA – vardinė saugiklių-kirtiklių bloko (QS-24) įdėklo atjungimo geba.

120 kA > 5,395 kA (sąlyga tenkinama).

Jautrumas yra užtikrinamas, jei mažiausios TJ srovės santykis su saugiklio vardine srove yra lygus 3 arba didesnis:

$$\frac{2399}{80} = 29,98 \text{ karto (sąlyga tenkinama).}$$

Taške K3:

Smūgio srovė trifazio TJ metu: $i_{p3} = 1182,4 \text{ A}$.

Vienfazio TJ srovė: $I_{k3}^{(1)} = 0,424 \text{ kA}$.

Parinkto automatinio jungiklio (C-16) atjungimo geba yra 6 kA.

6 kA > 1182,4 A (sąlyga tenkinama).

Jautrumas yra užtikrinamas, jei mažiausios TJ srovės santykis su automatinio jungiklio vardine srove yra lygus 3 arba didesnis:

$$\frac{424}{16} = 26,5 \text{ karto (sąlyga tenkinama).}$$

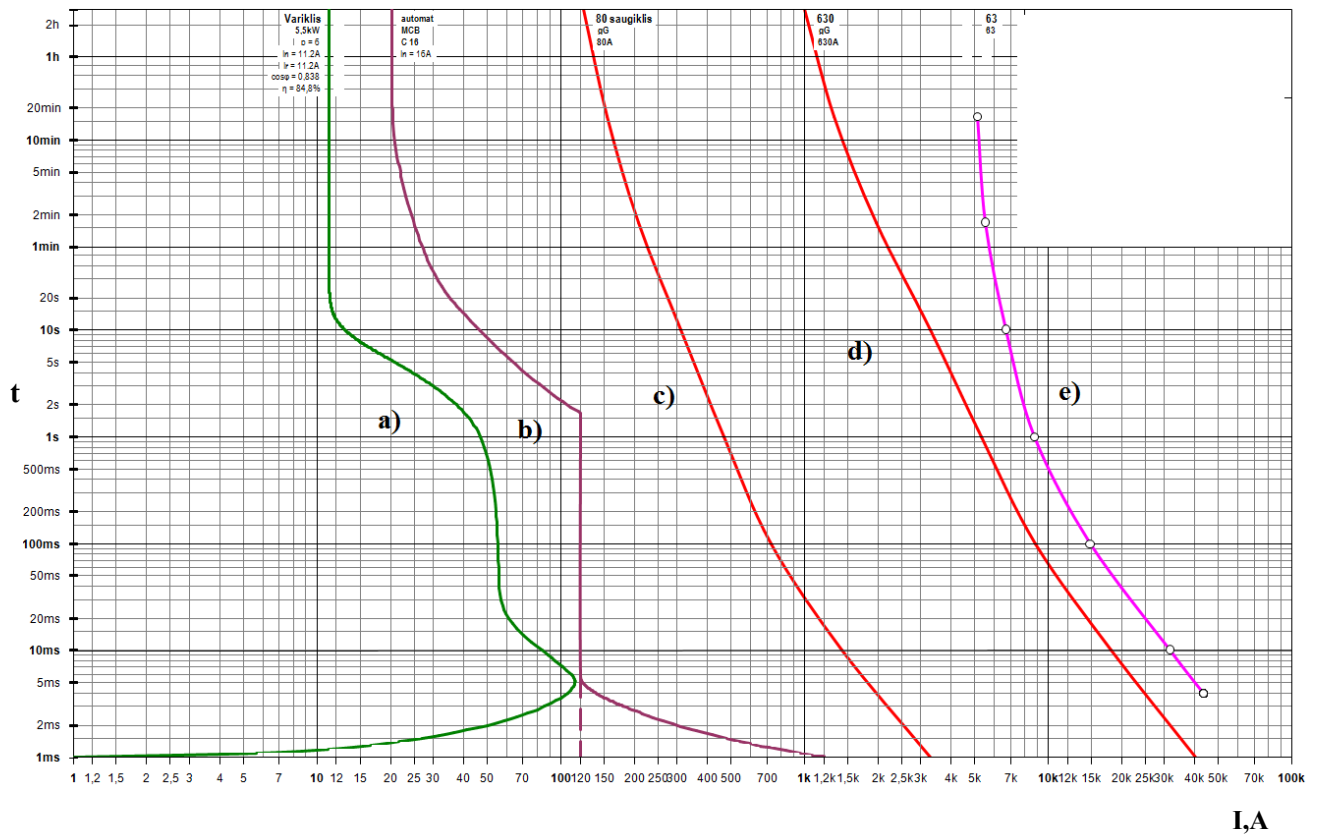
Matome, kad automatinis jungiklis suveiks akimirksniu ir esant mažiausiai TJ jungimo srovei, nes srovė, kurią automatinis jungiklis praleidžia neišjungdamas yra viršijama net 26,5 karto.

Matome, kad apsaugos aparatai parinkti teisingai ir jie gali atjungti apskaičiuotas TJ sroves.

2.6. Selektivityumo charakteristikos

Apsaugos aparatų selektivityumas patikrinamas naudojantis EATON „CurveSelect“ programa, kurios pagalba sudaroma selektivityumo (laiko ir srovės) charakteristikos. Taip pat yra nubraižoma 5,5 kW asinchroninio variklio laiko ir srovės charakteristika paleidimo metu tam, kad įsitikinti ar variklis pasileis. 2.9 paveiksle pateikiama selektivityumo charakteristikos.

- a) Asinchroninio variklio srovės ir laiko priklausomybė paleidimo metu;
- b) Automatinio jungiklio C16 suveikimo charakteristika;
- c) 80 A saugiklio suveikimo charakteristika;
- d) 630 A saugiklio suveikimo charakteristika;
- e) 63 A saugiklio (skirto 10 kV įtampai) suveikimo charakteristika.



2.9 pav. Selektyvumo charakteristikos

2.9 paveiksle matyti, kad kreivės niekur nesikerta, todėl apsaugos aparatai dirbs selektyviai. Taip pat matyti, kad nebus atjungtas 5,5 kW asinchroninis variklis jam pasileidžiant. Apibendrinant galima teigti, jog apsaugos aparatai parinkti teisingai, nes gali atjungti apskaičiuotas trumpųjų jungimų sroves ir veikti selektyviai (reaguoja tik artimiausias pažeidimo vietai apsaugos aparatas).

2.7. Įtampos kritimo linijoje skaičiavimas

Atliekami įtampos kritimo skaičiavimai, tam kad įsitikinti ar nėra viršijamas leidžiamas įtampos nuokrypis nuo imtuvų vardinės įtampos. Kabelio ilgis nuo 0,4 kV šynų iki paskirstymo skydo yra 120 m. Kabelis 4 gyslų ir 120 mm². Kabeliui tenkanti apkrovos galia lygi 5,5 kW asinchroninio variklio galia, ir 1,4 kW apšvietimo galia.

Bendra 4x120 mm² apkrovos galia:

$$P_{\Sigma} = P_{AV} + P_{apšv.}; \quad (2.59)$$

$$P_{\Sigma} = 5,5 + 1,4 = 6,9 \text{ kW.}$$

Kabeliu tekanti skaičiuojamoji fazinė trifazės apkrovos srove I_{sk} yra lygi:

$$I_{sk} = \frac{P_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi}; \quad (2.60)$$

$$I_{sk} = \frac{6900}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85} = 11,72 \text{ A.}$$

Įtampos kritimas esant 6,9 kW apkrovai:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{sk} \cdot R; \quad (2.61)$$

čia R – aktyvioji varža, šiuo atveju ji lygi minėto kabelio varžai $R = R_{L2} = 33,6 \text{ m}\Omega$.

$$\Delta U_1 = \sqrt{3} \cdot 11,72 \cdot 0,0336 = 0,682 \text{ V.}$$

Parinktas kabelis nuo paskirstymo skydo iki asinchroninio variklio yra varinis 4 gyslų ir $2,5 \text{ mm}^2$. Kabeliui tenkanti apkrovos galia ir 5,5 kW (lygi asinchroninio variklio galiai). Kabeliu tekanti skaičiuojamoji fazinė trifazės apkrovos srove I_{sk} yra lygi variklio nurodytajai srovei, kuri buvo apskaičiuota pagal 2.29 formulę.

Įtampos kritimas esant 5,5 kW apkrovai pagal 2.61 formulę:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{sk} \cdot R_{L3};$$

čia R – aktyvioji varža, ji lygi 27 metrų kabelio varžai nuo paskirstymo skydo iki asinchroninio variklio $R = R_{L3} = 216 \text{ m}\Omega$.

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} \cdot 11,22 \cdot 0,216 = 4,19 \text{ V.}$$

Suminis įtampos kritimas:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2; \quad (2.62)$$

$$\Delta U = 0,682 + 4,19 = 4,872 \text{ V.}$$

Procentinė išraiška nuo nominaliosios įtampos:

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100; \quad (2.63)$$

$$\Delta U_{\%} = \frac{4,872}{400} \cdot 100 = 1,22 \text{ \%}.$$

Gauta procentinė išraiška rodo, kad kabeliai parinkti teisingai, nes nėra viršijamos leistinos ribos. Leidžiamas įtampos nuokrypis nuo imtuvų vardinės įtampos varikliams ir jų valdymo aparatūrai yra nuo -5% iki +10%.

2.8. Asinchroninio variklio darbo charakteristikų skaičiavimas

Reikalingi 5,5 kW asinchroninio variklio parametrai yra pateikiami 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Asinchroninio variklio parametrai

Žymėjimas	Reikšmė
$2p$	6
s_N	0,04
P_{1N}, kW	6,62
P_{2N}, kW	5,5
R_1, Ω	1,26
X_1, Ω	1,47
R'_2, Ω	0,82
X'_2, Ω	1,92
R_m, Ω	1,51
X_m, Ω	41,52
U_{1N}, V	230
P_{Fe1}, W	131,2
P_{Fe2}, W	12,59
P_{MS}, W	15,06
I_{1N}, A	11,22

Čia atitinkamai yra:

$2p$ – polių skaičius;

s_N – nurodytasis slydimas;

P_{1N} – nurodytoji iš tinklo imama variklio galia;

P_{2N} – nurodytoji naudingoji galia;

R_1 – statoriaus apvijos aktyvioji varža;

X_1 – statoriaus apvijos sklaidos induktyvioji varža;

R'_2 – rotoriaus apvijos perskaičiuotoji aktyvioji varža;

X'_2 – rotoriaus apvijos perskaičiuotoji sklaidos induktyvioji varža;

R_m – aktyvioji įmagnetinimo kontūro varža;

X_m – induktyvioji įmagnetinimo kontūro varža;

U_{1N} – nurodytoji statoriaus apvijos fazinė įtampa;

P_{Fe1} – statoriaus magnetiniai nuostoliai;

P_{Fe2} – rotoriaus magnetiniai nuostoliai;

P_{MS} – mechaniniai nuostoliai;

I_{1N} – nurodytoji statoriaus apvijos fazinė srovė.

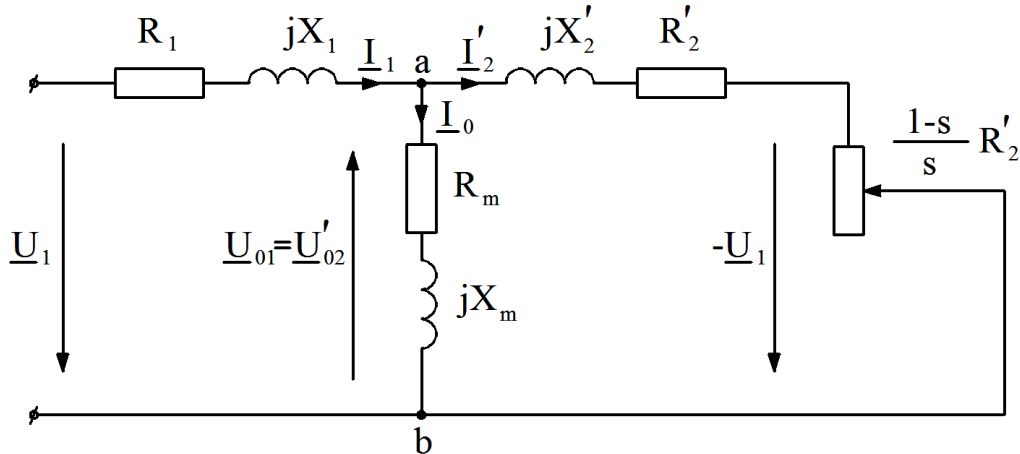
Nagrinėjant asinchroninį variklį, dažnai rotoriaus apvija pakeičiama į tokią apviją, kuri turi vienodą skaičių vijų ir fazių, bei tokį patį apvijos faktorių, kaip ir variklio statoriaus apvija. Šitaip pakeista rotoriaus apvija yra laikoma perskaičiuotąja, o jos dydžiai perskaičiuotaisiais. Priimta vertinti, kad šie perskaičiuotieji parametrai, neturi įtakos asinchroninio variklio energetiniams rodikliams ir jie lieka nepakitę. Tai daroma todėl, kad būtų paprasčiau nagrinėti elektros mašiną.

Yra žinoma, kad lentelėje pateiktų rotoriaus apvijos perskaičiuotosios aktyviosios ir sklaidos induktyviosios varžos buvo gautos įvertinus, jog fazių skirtumo kampas tarp rotoriaus srovės ir vidinės įtampos bei elektriniai galios nuostoliai nesikeičia.

Asinchroninio variklio atstojamoji schema pateikta 2.10 paveiksle. Šiuo atveju slydimas nėra lygus vienetui:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \neq 1; \quad (2.64)$$

čia: n_1 – asinchroninio variklio statoriaus sukamojo magnetinio lauko greitis;
 n – asinchroninio variklio rotoriaus sukimosi greitis.



2.10 pav. Perskaičiuotojo asinchroninio variklio su besisukančiu rotoriumi ekvivalentinė schema „T“

Norint suskaičiuoti asinchroninio variklio darbo charakteristikas, reikia pasinaudoti šiomis išraiškomis:

- statoriaus apvijos varža: $Z_1 = R_1 + jX_1$;
- rotoriaus apvijos perskaičiuotoji pilnutinė varža: $Z_2' = \frac{R_2'}{s} + jX_2'$;
- įmagnetinimo šakos pilnutinė varža: $Z_m = R_m + jX_m$;
- lygiagrečiai sujungtos rotoriaus perskaičiuotosios apvijos pilnutinės varžos su įmagnetinimo šakos pilnutine varža, gaunama suminė varža: $Z_{m-2} = \frac{Z_m \cdot Z_2'}{Z_m + Z_2'}$;
- pilnutinė asinchroninio variklio varža: $Z_{m12} = Z_1 + Z_{m-2}$;
- statoriaus apvijos srovė: $I_1 = \frac{U_{1N}}{Z_{m12}}$;
- statoriaus apvijos vidinė įtampa: $\underline{U}_{m-2} = I_1 \cdot Z_{m-2}$;
- įmagnetinimo šakos srovė: $I_0 = \frac{\underline{U}_{m-2}}{Z_m}$;
- perskaičiuotoji rotoriaus srovė: $I_2' = \frac{\underline{U}_{m-2}}{Z_2'}$;

- galios faktorius: $\cos\varphi_1 = \frac{I_{1A}}{|I_1|}$;
- iš tinklo imama aktyvioji galia: $P_1 = 3U_{1N} \cdot I_{1A}$;
- statoriaus apvijų elektriniai nuostoliai: $P_{Cu1} = 3I_1^2 \cdot R_1$;
- rotoriaus apvijų elektriniai nuostoliai: $P_{Cu2} = 3(I_2')^2 \cdot R_2'$;
- tuščiosios veikos nuostoliai: $P_0 = P_{Fe1} + P_{Fe2} + P_{MS}$;
- papildomi apkrovos nuostoliai: $P_a = 0,005 \cdot P_1 \cdot \left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right)^2$;
- asinchroninio variklio visuminiai (suminiai) nuostoliai: $P_\Sigma = P_{Cu1} + P_{Cu2} + P_0 + P_a$;
- naudingumo faktorius: $\eta = 1 - \frac{P_\Sigma}{P_1}$;
- naudingoji variklio galia: $P_2 = P_1 - P_\Sigma$.

Darbo charakteristikų braižymui naudojama programa „Matlab“. Tam tikslui, reikalingi duomenys paaimami iš 2.3 lentelės. Šios programos pagalba gauti rezultatai pateikiami 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Asinchroninio variklio darbo charakteristikų skaičiavimo rezultatai programa „Matlab“

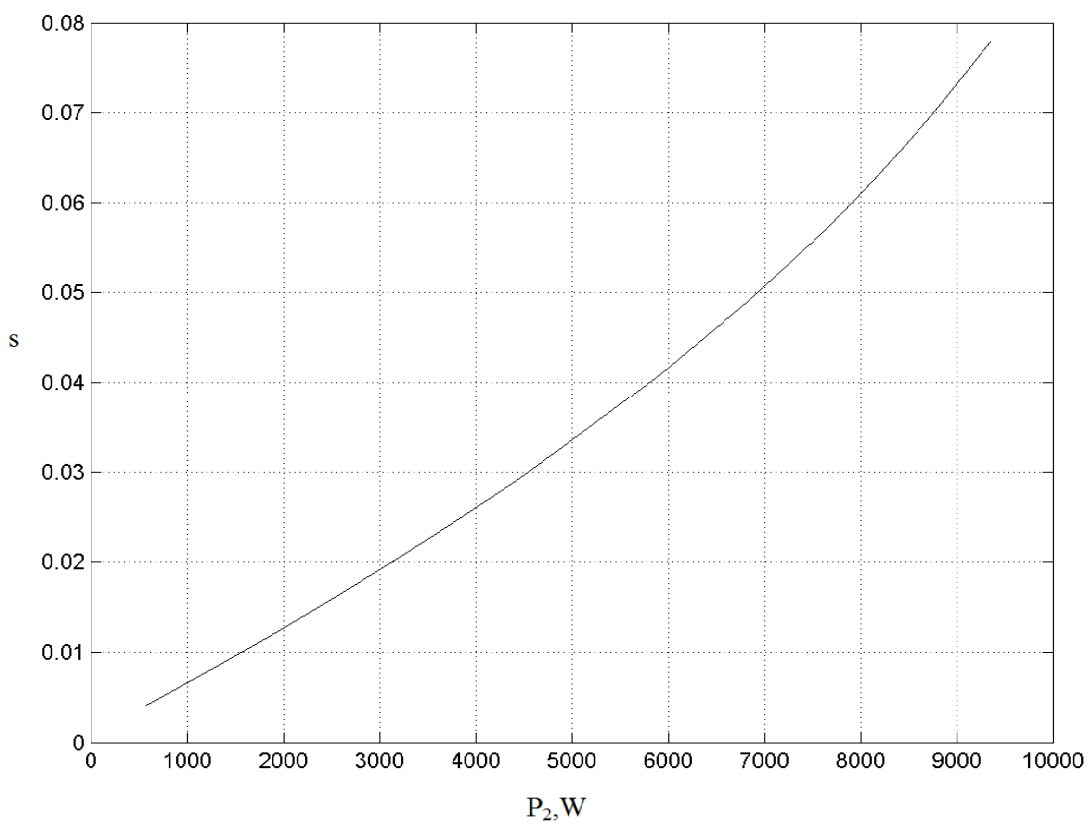
P_2, W	I_1, A	I_2', A	s	P_1, W	$\cos\varphi_1$	η
578,105	5,4661	1,0918	0,0041	963,084	0,2553	0,6003
1271,374	5,8133	2,1701	0,0082	1680,788	0,4190	0,7564
1940,150	6,3353	3,2344	0,0123	2389,278	0,5466	0,8120
2584,161	6,9859	4,2840	0,0164	3087,634	0,6406	0,8369
3203,233	7,7258	5,3185	0,0205	3775,017	0,7082	0,8485
3797,290	8,5254	6,3375	0,0246	4450,672	0,7566	0,8532
4366,348	9,3636	7,3405	0,0287	5113,923	0,7915	0,8538
4910,502	10,2256	8,3273	0,0328	5764,176	0,8170	0,8519
5429,930	11,1008	9,2975	0,0369	6400,910	0,8357	0,8483
5924,875	11,9818	10,2510	0,0410	7023,683	0,8496	0,8436
6395,649	12,8632	11,1875	0,0451	7632,121	0,8599	0,8380
6842,620	13,7410	12,1070	0,0492	8225,921	0,8676	0,8318
7266,209	14,6123	13,0094	0,0533	8804,842	0,8733	0,8253
7666,880	15,4748	13,8945	0,0574	9368,704	0,8774	0,8184
8045,140	16,3269	14,7624	0,0615	9917,386	0,8803	0,8112
8401,527	17,1674	15,6131	0,0656	10450,818	0,8823	0,8039
8736,610	17,9952	16,4467	0,0697	10968,981	0,8834	0,7965
9050,980	18,8097	17,2632	0,0738	11471,898	0,8839	0,7890
9345,248	19,6102	18,0628	0,0779	11959,637	0,8839	0,7814

Programa „Matlab“ gauti nominalieji parametrai:

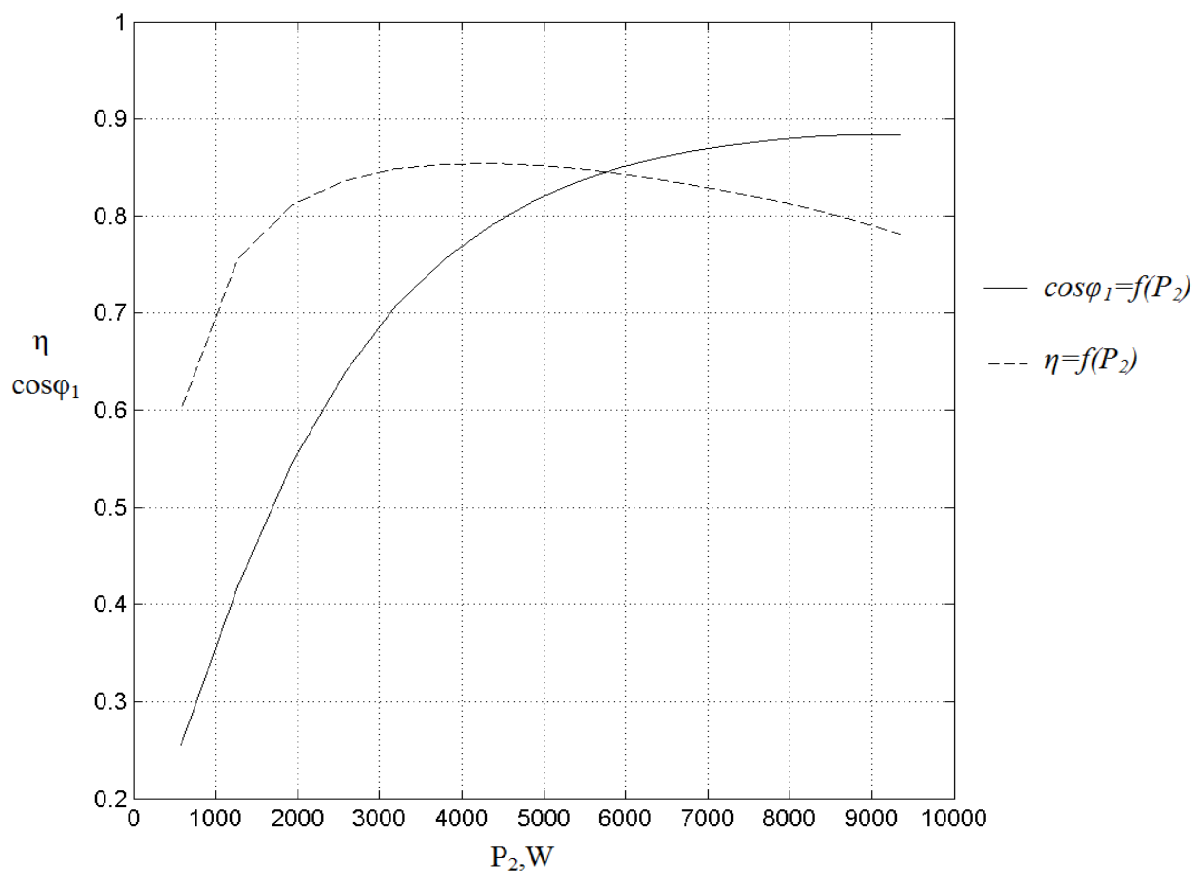
$U_{1N} = 230 \text{ V};$	$I_{1N} = 11,2245 \text{ A};$	$P_{2N} = 5500 \text{ W};$
$s_N = 0,0375;$	$\cos\varphi_N = 0,8376;$	$\eta = 0,8476;$
$P_{1N} = 6489,0774 \text{ W};$	$I'_{2N} = 9,4325 \text{ A};$	

Galiausiai minėtos programos dėka, panaudojant 2.4 lentelėje pateiktus duomenis, braižomos asinchroninio variklio darbo charakteristikos:

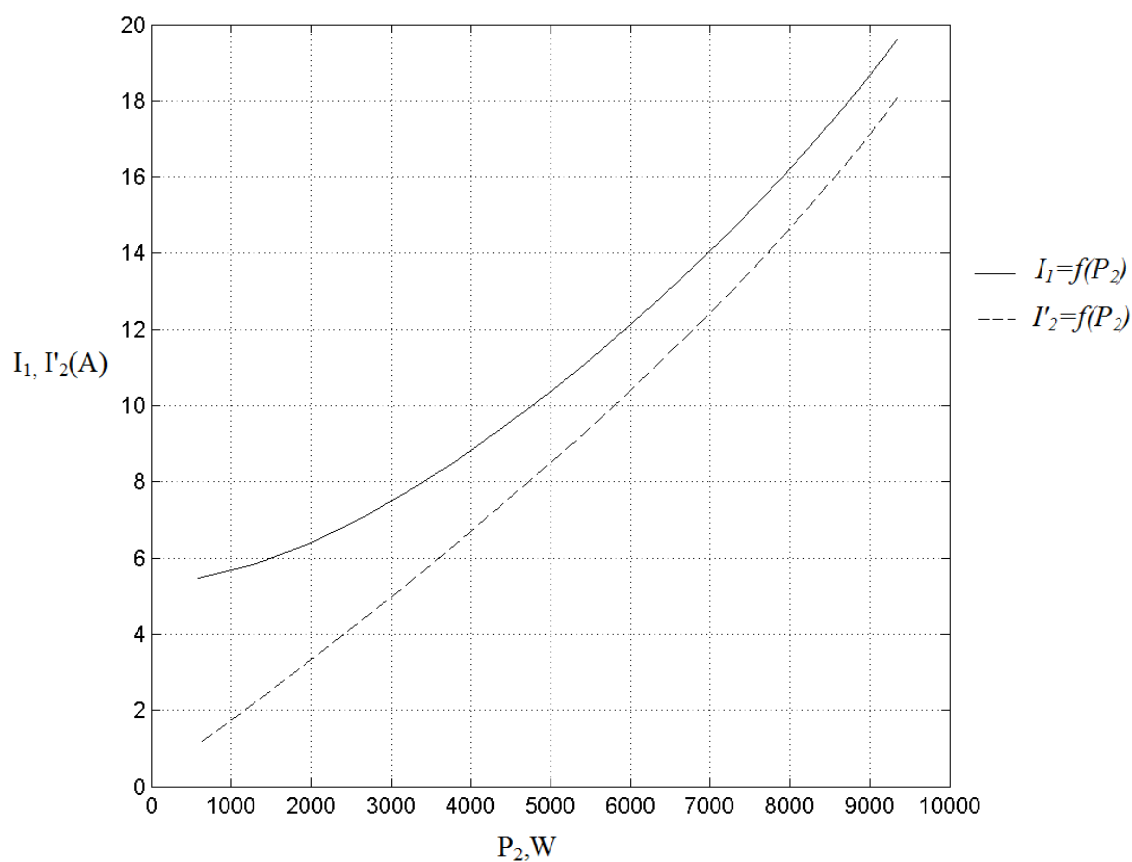
- $s=f(P_2);$
- $I_1=f(P_2);$
- $I'_2=f(P_2);$
- $\cos\varphi_1=f(P_2);$
- $\eta=f(P_2);$
- $P_1=f(P_2).$



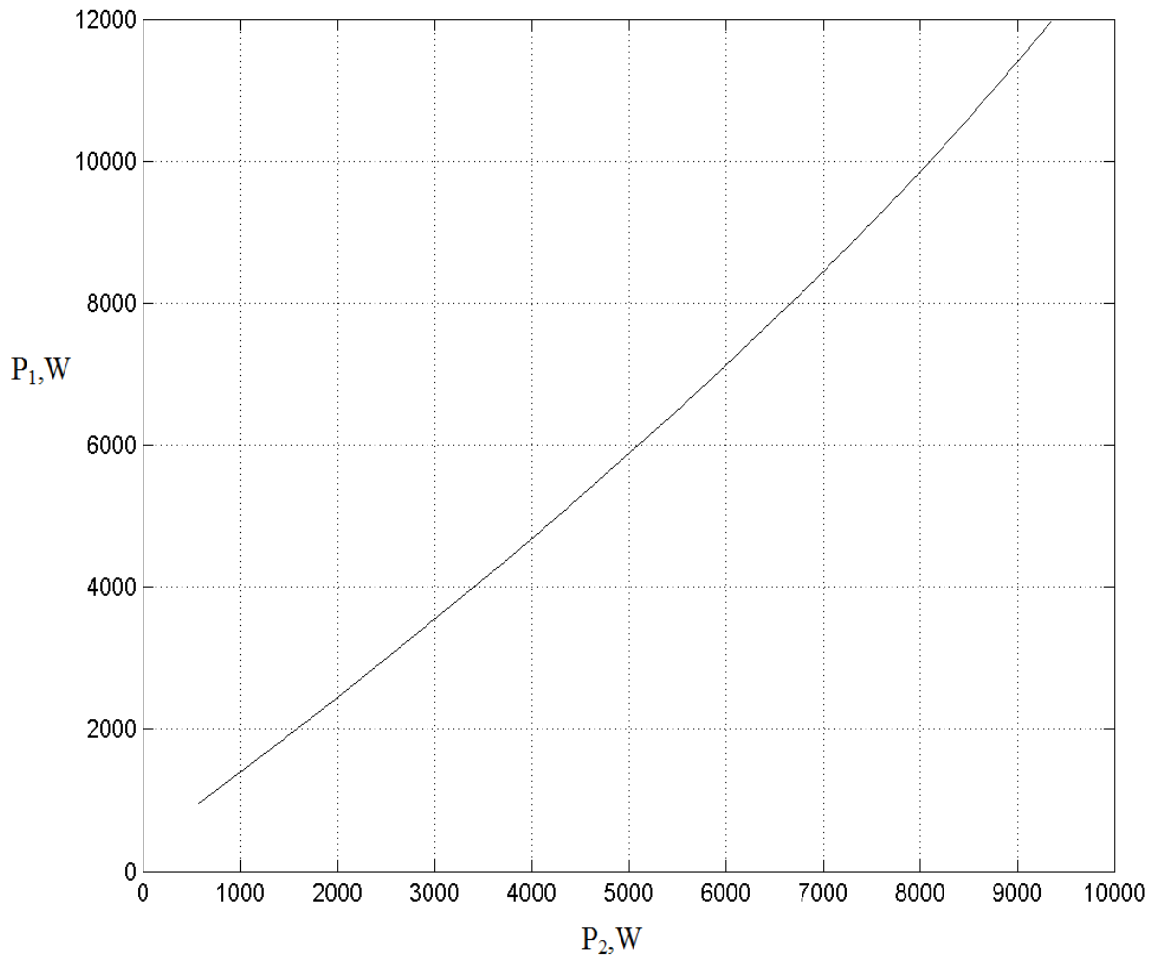
2.11 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristika $s=f(P_2)$



2.12 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos $\cos\varphi_1=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$



2.13 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos $I_1=f(P_2)$, $I_2=f(P_2)$



2.14 pav. Asinchroninio variklio darbo charakteristika $P_1=f(P_2)$

Iš pateiktų asinchroninio variklio darbo charakteristikų matyti, kad didėjant variklio naudingajai veleno mechaninei galiai P_2 , variklio veleno greitis mažėja, nes slydimas didėja beveik tiesiniu dėsnio. Tai matyti 2.11 paveiksle.

Statoriaus apvijos srovė I_1 , perskaičiuotoji rotoriaus apvijos srovė I_2 bei iš tinklo imama galia P_1 didėja, didėjant veleno mechaninei galiai P_2 . Tai matyti 2.13 ir 2.14 paveiksluose.

2.12 paveiksle galima matyti, kad galios faktorius $\cos\varphi_1$ ir naudingumo faktorius η vertės didžiausios, kuomet variklio veleno naudingoji mechaninė galia yra artima nurodytajai naudingajai galiai P_{2N} .

2.9. Asinchroninio variklio statoriaus apvijos patikimumo skaičiavimas

Kaip jau buvo minėta 1 skyriaus 1.2.3. punkte, statistiškai statoriaus apvijos pažeidimai siekia virš 90%, tad yra svarbu suskaičiuoti statoriaus apvijos negedimo tikimybę.

5,5 kW asinchroninio variklio įterptinės statoriaus apvijos negedimo tikimybė, gali būti apskaičiuojama pagal supaprastinta metodika. Atliekant skaičiavimus remiamasi matematinio modeliu, kuris teigia, jog tarpvijinės izoliacijos pramušimas įvyksta vietose (veikiant įtampai

tarp vijų), kur pažeista izoliacija, o šios vietos yra vadinamos defektais. Eksploatuojant elektros variklį, izoliacijos defektų kiekis duotame laido ilgyje vis didėja su tam tikru greičiu.

Statoriaus apvijos negedimo tikimybė $R_a(t)$ apskaičiuojama:

$$R_a(t) = R_{t.v}(t)R_g(t)R_{t.f}(t); \quad (2.65)$$

čia $R_{t.v}(t)$, $R_g(t)$, $R_{t.f}(t)$ – tarpvijinės, griovelinės ir tarpfazinės izoliacijos negedimo tikimybės.

Apskritai, griovelinės ir tarpvijinės izoliacijos negedimo tikimybės daug didesnės negu tarpvijinės izoliacijos negedimo tikimybė.

Trifazio asinchroninio variklio, su narveliniu rotoriumi, statoriaus apvijos negedimo tikimybę $R_a(t)$, bus apskaičiuota panaudojant šiuos duomenis:

nurodytoji naudingoji galia $P_{2N} = 5500\text{W}$;

polių skaičius $2p = 6$;

statoriaus apvijos jungimas – žvaigždė;

100 mm ilgio laido izoliacijos bent vieno defekto tikimybė suklojus apviją $q_{100} = 0,2$;

griovelio užpildos koeficientas $k_{cu1} = 0,735$;

statoriaus griovelio perimetras $\Pi = 45,02$ mm;

elementaraus izoliuoto laido skersmuo $d_1 = 1,12$ mm;

efektyvus laidų skaičius statoriaus griovelyje $N_{n1} = 18$;

elementarių laidų skaičius efektyviajame laidininke $c = 2$;

apvijos sluoksnių skaičius $k_{sl} = 1$;

apvijos vijos vidutinis ilgis $l_{vid} = 621,55$ mm;

statoriaus dantų skaičius $Z_1 = 54$;

apvijos lygiagrečių šakų porų skaičius $a_1 = 1$;

variklio vardinė fazinė įtampa $U_{1v} = 230$ V;

elementaraus neizoliuoto laido skersmuo $d = 1,04$ mm;

izoliacijos klasė B;

išdirbio laikai $t_1 = 10000$ h, $t_2 = 20000$ h.

Taigi, statoriaus apvijos tarpvijinės izoliacijos negedimo tikimybė apskaičiuojama taip:

1) Tarpvijinės izoliacijos defektiškumas iki eksploatacijos pradžios, mm^{-1} :

$$\lambda_o = -\frac{k_{im}}{l_{pav}} \ln(1 - q_{100}); \quad (2.66)$$

čia $q_{100} = 0,2$; k_{im} – koeficientas, apibūdinantis tarpvijnės izoliacijos impregnavimo kokybę. Jei eksperimentinių duomenų nėra, $k_{im} = 0,3-0,7$. Priimama $k_{im} = 0,5$; l_{pav} – laido pavyzdžio ilgis. Paprastai $l_{pav} = 100$ mm.

$$\lambda_o = -\frac{0,5}{100} \ln(1 - 0,2) = 0,001116 .$$

2) Gretimų izoliuotų vijų susilietimo tikimybė:

$$g = 0,93 \sqrt{k_{cul}} ; \quad (2.67)$$

čia $k_{cul} = 0,735$.

$$g = 0,93 \sqrt{0,735} = 0,797 .$$

3) Išorinio sekcijos sluoksnio laidininkų skaičius (pagal sekcijos perimetrą):

$$N_{is} = \frac{\Pi g}{d_1} ; \quad (2.68)$$

čia $\Pi = 45,02$ mm; $d_1 = 1,12$ mm.

$$N_{is} = \frac{45,02 \cdot 0,797}{1,12} = 32,049 \approx 32 .$$

4) Vidinio sekcijos sluoksnio laidininkų skaičius:

$$N_{vid} = N_s - N_{is} ; \quad (2.69)$$

$$\text{čia } N_s = \frac{N_{n1} \cdot c}{k_{sl}} ; \quad (2.70)$$

($N_{n1} = 18$; $c = 2$; $k_{sl} = 1$);

$$N_s = \frac{18 \cdot 2}{1} = 36 ;$$

$$N_{vid} = 36 - 32 = 4 .$$

5) Vienam efektyviajam laidininkui priklausančių gretimų elementarių vijų porų dalis:

$$P_p = \left(1 - \left(1 - \frac{c-1}{N_s} \right)^3 \right) \left(\frac{N_s}{2N_s - c} \right) ; \quad (2.71)$$

$$P_p = \left(1 - \left(1 - \frac{2-1}{36}\right)^3\right) \left(\frac{36}{2 \cdot 36 - 2}\right) = 0,042;$$

kuomet $c=1$, tada $P_p = 0$.

6) Apvijos gretimų vijų porų bendrasis ilgis, mm:

$$L = (1 - P_p)(N_{is} + 1,5N_{vid} - 1,5)k_{sl}l_{vid}Z_1; \quad (2.72)$$

čia $k_{sl}=1$; $l_{vid}=621,55$ mm; $Z_1=54$;

$$L = (1 - 0,042)(32 + 1,5 \cdot 4 - 1,5) \cdot 1 \cdot 621,55 \cdot 54 = 1,176 \cdot 10^6 \text{ mm.}$$

7) Fazės nuosekliai sujungtų ričių skaičius:

$$n_s = \frac{Z_1 k_{sl}}{2m_1 a_1}; \quad (2.73)$$

čia $m_1=3$ – statoriaus apvijos fazių skaičius; $a_1=1$;

$$n_s = \frac{54 \cdot 1}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 9.$$

8) Ritės fazinio komutacinio viršįtampio vidutinė vertė, kV:

$$\bar{U}_s = \frac{\bar{U}_{1k}}{n_s}; \quad (2.74)$$

čia \bar{U}_{1k} – komutacinio viršįtampio vidutinė vertė, kV. Kadangi eksperimentinių duomenų nėra, priimame, kad $\bar{U}_{1k} = 1,4$ kV.

$$\bar{U}_s = \frac{1,4}{9} = 0,156 \text{ kV.}$$

9) Ričių fazinio komutacinio viršįtampio vidutinis kvadratinis nuokrypis, kV:

$$\sigma_{us} = \frac{\sigma_{ul}}{n_s}; \quad (2.75)$$

čia σ_{ul} – fazinio komutacinio viršįtampio vidutinis kvadratinis nuokrypis. Įprasta priimti, jog $\sigma_{ul} = 0,35$ kV.

$$\sigma_{us} = \frac{0,35}{9} = 0,039 \text{ kV.}$$

10) Ritės nurodytoji įtampa, kV:

$$U_{Ns} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{IN} \cdot 10^{-3}}{n_s}; \quad (2.76)$$

čia $U_{IN}=230$ V.

$$U_{Ns} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230 \cdot 10^{-3}}{9} = 0,036 \text{ kV}.$$

11) Tarpvijnės izoliacijos gedimo tikimybė, paveikus vienam viršįtampio impulsui, su sąlyga, kad susiliečiančiose vijose yra vienodi defektai, V:

$$q_z = \frac{3(0,007U_{Ns} - 0,000154\bar{U}_s)B}{\Delta}; \quad (2.77)$$

$$\text{čia } \Delta = d_1 - d; \quad (2.78)$$

tai abipusis laido izoliacijos storis. Kadangi $d_1 = 1,12$ mm, $d = 1,04$ mm :

$$\Delta = 1,12 - 1,04 = 0,08 \text{ mm};$$

$$B = \int_0^1 F \left(\frac{k\bar{U}_s - \bar{U}_z}{\sqrt{k^2\sigma_{u_s}^2 - \sigma_{u_z}^2}} \right) k(k-1)^2 dk; \quad (2.79)$$

Integralo B apskaičiavimo supaprastinimui 2.5 lentelėje pateikta jo vertės esant skirtingoms \bar{U}_s ir σ_{us} vertėms.

2.5 lentelė. Integralo B vertės

\bar{U}_s , kV	σ_{us} , kV	B , $\times 10^{-5}$	\bar{U}_s , kV	σ_{us} , kV	B , $\times 10^{-5}$
0,0480	0,0100	1,734	0,1088	0,0300	2,782
0,0525	0,0125	1,860	0,1300	0,0333	3,279
0,0700	0,0167	2,096	0,1400	0,0360	3,488
0,0810	0,0200	2,281	0,1625	0,0450	4,231
0,0840	0,0225	2,312	0,2167	0,0600	6,578
0,1050	0,0250	2,687	0,3250	0,0900	16,310

Matyti, kai $\bar{U}_s = 0,156$ kV ir $\sigma_{us} = 0,039$ kV, tuomet $B \approx 3,75 \cdot 10^{-5}$.

$$q_z = \frac{3(0,007 \cdot 0,036 - 0,000154 \cdot 0,156) \cdot 3,75 \cdot 10^{-5}}{0,08} = 3,221 \cdot 10^{-7} \text{ A}.$$

12) Tarpvijnės izoliacijos defektiškumo didėjimo greitis, $\text{mm}^{-1}\text{h}^{-1}$:

$$H_v = c_v \cdot \exp(0,0014 f_{ij} + a_v (\bar{\theta} - \theta_0 + 0,5a_v \sigma_\theta^2)); \quad (2.80)$$

čia c_v, a_v – lygties koeficientai, apsprendžiantys tarpvijnės izoliacijos defektiškumo didėjimo greitį: $c_v = (0,1 \div 0,2)10^{-6} \text{ mm}^{-2}$; $a_v = (0,04 \div 0,08) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Priimama $c_v = 0,15 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-2}$; $a_v = 0,06 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;

f_{ij} – variklio įjungimų skaičius, kai eksploataavimo grupė normali $f_{ij} = 2-4$;

priimama $f_{ij} = 3$;

$\bar{\theta}$ – vidutinė leidžiamoji apvijos temperatūra, $^\circ\text{C}$;

kai B klasės izoliacija, $\bar{\theta} = 120^\circ\text{C}$;

σ_θ – vidutinis leidžiamasis apvijos temperatūros kvadratinis nuokrypis, $^\circ\text{C}$;

priimama $\sigma_\theta = 5^\circ\text{C}$;

θ_0 – leidžiamoji izoliacijos klasės temperatūra, $^\circ\text{C}$;

B klasės izoliacijai $\theta_0 = 130^\circ\text{C}$;

$H_v = 0,15 \cdot 10^{-6} \exp(0,0014 \cdot 3 + 0,06(120 - 130 + 0,5 \cdot 0,06 \cdot 5^2)) = 0,086 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

13) Tarpvijnės izoliacijos trumpojo sujungimo tikimybės vijų lietimosi ilgyje, kai $t=10000$ h ir, kai $t=20000$ h.

$$P(t) = 2l_{el}^2 g q_z f_{ij} \left(\lambda_0^2 t + \lambda_0 H_v t^2 + \frac{H_v^2}{3} t^3 \right); \quad (2.81)$$

čia l_{el} – elementarus lietimosi ilgis, mm. Paprastai imama $l_{el} = 0,11$ mm.

$$P(10000) = 2 \cdot 0,11^2 \cdot 0,797 \cdot 3,221 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \left(0,001116^2 \cdot 10000 + 0,001116 \cdot 0,086 \cdot 10^{-6} \cdot 10000^2 + \frac{(0,086 \cdot 10^{-6})^2}{3} \cdot 10000^3 \right) = 0,458 \cdot 10^{-9};$$

$$P(20000) = 2 \cdot 0,11^2 \cdot 0,797 \cdot 3,221 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \left(0,001116^2 \cdot 20000 + 0,001116 \cdot 0,086 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^2 + \frac{(0,086 \cdot 10^{-6})^2}{3} \cdot 20000^3 \right) = 1,555 \cdot 10^{-9}.$$

14) Tarpvijnės izoliacijos gedimo tikimybės per laiką, kai $t=10000$ h ir, kai $t=20000$ h:

$$Q_{t,v}(t) = 1 - (1 - P(t))^{\frac{t}{l_{el}}}; \quad (2.82)$$

$$Q_{t,v}(10000) = 1 - \left(1 - 0,458 \cdot 10^{-9} \right)^{\frac{1,176 \cdot 10^6}{0,11}} = 1 - \left(1 - 0,458 \cdot 10^{-9} \right)^{1,0697} \approx 0,004887;$$

$$Q_{t,v}(20000) = 1 - \left(1 - 1,555 \cdot 10^{-9} \right)^{\frac{1,176 \cdot 10^6}{0,11}} = 1 - \left(1 - 1,555 \cdot 10^{-9} \right)^{1,0697} \approx 0,016.$$

Pastarajam reiškiniui apskaičiuoti naudojama formulė:

$$(1-x)^n = 1 - nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}x^3 + \dots \quad (2.83)$$

čia $x = R_1(t)$; $n = L/l_{el}$. Skaičiuojant pakanka įvertinti tik 2-3 pirmuosius eilutės (2.83) narius.

15) Tarpvijinės izoliacijos negedimo tikimybės, kai $t=10000$ h ir, kai $t=20000$ h:

$$R_{t.v}(t) = 1 - Q_{t.v}(t); \quad (2.84)$$

$$R_{t.v}(10000) = 1 - Q_{t.v}(10000) = 1 - 0,004887 = 0,995;$$

$$R_{t.v}(20000) = 1 - Q_{t.v}(20000) = 1 - 0,016 = 0,984.$$

16) Statoriaus apvijos negedimo tikimybės, kai $t=10000$ h ir, kai $t=20000$ h:

Jos apskaičiuojamos panaudojant 2.65 formulę:

$$R_a(t) = R_{t.v}(t)R_g(t)R_{t.f}(t);$$

Kada asinchroninio variklio išdirbio laikas $t=10000$ h, tuomet griovelinės ir tarpfazinės izoliacijos negedimo tikimybių sandauga $R_g(10000) \cdot R_{t.f}(10000) \approx 0,998$, o statoriaus apvijos negedimo tikimybė:

$$R_a(10000) = 0,995 \cdot 0,998 = 0,993.$$

Analogiškai apskaičiuojama statoriaus apvijos negedimo tikimybė, kai asinchroninio variklio išdirbio laikas $t=20000$ h, atitinkamai griovelinės ir tarpfazinės izoliacijos negedimo tikimybių sandauga $R_g(20000) \cdot R_{t.f}(20000) \approx 0,994$ ir statoriaus apvijos negedimo tikimybė prie šio variklio išdirbio:

$$R_a(20000) = 0,984 \cdot 0,994 = 0,978.$$

IŠVADOS

1. Apskaičiuota vienodinančioji (išlyginamoji) srovė, kada lygiagrečiai dirbančių transformatorių transformacijos faktoriai k yra skirtingi (galia, trumpojo jungimo įtampos, apvijų jungimo grupės vienodos). Ji priklauso nuo transformatoriaus faktorių skirtumo bei nuo pačių transformatoriaus galios ir lygi $I_{v2} = 820,92$ A. Išnagrinėtu atveju, tarp lygiagrečiai jungiamų transformatorių transformacijos faktorių skirtumas buvo net 10% ($k_I = 26,25$; $k_{II} = 23,75$), kai GOST standartai nurodo skirtumą vienas nuo kito iki 1%. Taip buvo pasirinkta neatsitiktinai, nes toks variantas yra tikėtinas dėl personalo klaidos (blogai nustačius transformatoriaus atšakų perjungimo rankenėlę). Kadangi vienodinančioji srovė teka, kai apkrova net nėra prijungta, todėl transformatoriai taip pat bus apkrauti, kai jie dirbs tuščiaja veika.
2. Lygiagrečiam darbui sujungus vienodos galios (abu po 630 kVA) transformatorius (transformacijos faktoriai, jungimo grupės vienodos), bet turinčius skirtingas trumpojo jungimo įtampas $u_k\%$, pastebėta, kad esant šioms sąlygoms transformatoriai apkraunami ne vienodai. Labiau apkrautas buvo transformatorius, kurio trumpojo jungimo įtampa buvo mažesnė: ($u_{kI\%} = 6,6\%$) $S_{apk.I} = 573,3$ kVA, o kitas ($u_{kII\%} = 5,5\%$) $S_{apk.II} = 686,7$ kVA.
3. Atlikus transformatoriaus išorinių charakteristikų skaičiavimus programa „Matlab“, pastebėta, kad jos priklauso nuo apkrovos pobūdžio. Apkraunant transformatorių aktyvine arba induktyvine apkrova, transformatoriaus antrinės apvijos srovė I_2 didėja, bet antrinės apvijos įtampa U_2 mažėja. Esant talpinio pobūdžio apkrovai, didėja ne tik antrinės apvijos srovė I_2 bet ir antrinės apvijos įtampa U_2 .
4. Sudarinėjant 5,5 kW asinchroninio variklio maitinimo tinklo schemą, buvo parinktas įvadinis automatinis jungiklis su C charakteristika, nes asinchroninio variklio srovė paleidimo metu išauga 5 kartus. Taip pat parinktas magnetinis paleidiklis, šiluminė relė, kuri saugo variklį nuo ilgalaikių perkrovų. Jėgos ir valdymo kabeliai parinkti pagal ilgalaikę leistiną srovę. Tam, kad įsitikinti ar kabeliai parinkti teisingai, suskaičiuotas įtampos kritimas. Gautas įtampos nuokrypis $\Delta U\% = 1,22\%$, neviršijo leidžiamo įtampos nuokrypio nuo imtuvų vardinės įtampos varikliams ir jų valdymo aparatūrai (leidžiama nuo -5% iki +10% vardinės įtampos).
5. Trumpieji jungimai buvo skaičiuojami 0,4 kV šynoje (K1), paskirstymo skyde (K2) ir prie pat asinchroninio variklio (K3). Visuose trijuose taškuose suskaičiuotos tiek trifazio trumpojo jungimo srovės, tiek vienfazio trumpojo jungimo srovės. Taip pat trifazio TJ

smūginės srovės. Taške K1: $I_{k1}^{(3)} = 9,398 \text{ kA}$, $I_{k1}^{(1)} = 8,685 \text{ kA}$, $i_{p1} = 13,49 \text{ kA}$. Taške K2: $I_{k2}^{(3)} = 3,811 \text{ kA}$, $I_{k2}^{(1)} = 2,399 \text{ kA}$, $i_{p2} = 5,395 \text{ kA}$. Taške K3: $I_{k3}^{(3)} = 836,49 \text{ A}$, $I_{k3}^{(1)} = 0,424 \text{ kA}$, $i_{p3} = 1182,4 \text{ A}$.

6. Parinkti apsaugos ir komutavimo aparatai patikrinti pagal didžiausias smūgines ir mažiausias apskaičiuotas TJ srovės vertes. Pagal didžiausią smūginę srovės vertę buvo tikrinamas apsaugos aparato mechaninis atsparumas (ar sugebės atjungti susidariusią didžiausią TJ srovę), o pagal mažiausią TJ srovę, buvo tikrinamas apsaugos jautrumas (ar apsaugos aparatas atjungs saugomą linijos dalį nuo minimalios TJ srovės). Apsaugos aparatų selektyvumas patikrintas sudarius selektyvumo charakteristikas. Kreivės niekur nesikerta, todėl apsaugos aparatai veiks selektyviai – į atsiradusias TJ sroves reaguoja tik artimiausias pažeidimo vietai apsaugos aparatas, o esantys už jo neatsijungia. Tai leidžia teigti, kad transformatorius, kabelinės linijos ir 5,5 kW asinchroninis variklis bus tinkamai apsaugoti.
7. Programos „Matlab“ pagalba gautos 5,5 kW asinchroninio variklio darbo charakteristikos: $s=f(P_2)$, $I_1=f(P_2)$, $I_2=f(P_2)$, $\cos\varphi_1=f(P_2)$, $\eta=f(P_2)$, $P_1=f(P_2)$. Iš šių charakteristikų galima surasti visus dydžius, kurie apibūdina variklio darbą, prie skirtingų variklio veleno galių. Atlikus asinchroninio variklio statoriaus apvijų patikimumo skaičiavimus galima teigti, kad asinchroninių elektros variklių statoriaus apvijų patikimumui turi įtakos ne tik apvijų laidų ir impregnavimo lakų suderinamumas, izoliacinės medžiagų savybės, bet ir išdirbio laikas. Išdirbio laikui didėjant, mažėja negedimo tikimybė, o kartu ir patikimumas. Po 10000 darbo valandų, negedimo tikimybė $R_a(10000) = 0,993$, o po 20000 darbo valandų gauta negedimo tikimybė $R_a(20000) = 0,978$. Kuo statoriaus apvijų negedimo tikimybė artimesnė 1, tuo didesnis patikimumas.

INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. Andriušienė, L.; Kairys, A.; Kostauskas, P. *Patikslintos galios transformatoriaus išorinės charakteristikos nustatymas*. Kaunas, 2002. 65-68 p.
2. Anthony J., Pansini E.E. *Electrical transformers and Power equipment*. Lilburn GA 1999. 385p.
3. Ažubalis V., Koryzna J. *Trumpieji jungimai elektros sistemose*. Vilnius, 1986. 100 p.
4. Gečys, S. *Elektros mašinų patikimumas ir eksploatacija: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2011. 264 p.
5. Gečys, S.; Kalvaitis, A.; Smolskas, P. *Elektros mašinos I dalis: Transformatoriai. Asinchroninės mašinos: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2012. 209 p.
6. Gečys, S.; Mukulys, R. *Asinchroninių narvelinių variklių parametrai: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2010. 100 p.
7. Kostrauskas, P. *Elektros mašinos. Transformatoriai: mokymo priemonė*. Kaunas: KPI, 1990. 79 p.
8. Kostrauskas, P. *Asinchroninės elektros mašinos: vadovėlis*. Kaunas: Technologija, 1996. 115p.
9. Rinkevičius, G.; Gečys, S.; Kalvaitis, A. *Elektros mašinų parametrai ir charakteristikos: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2006. 97 p.
10. Stankevičius, A. *Elektrinių ir pastočių elektriniai įrenginiai*. Vilnius, 1976. 442 p.
11. Svinkūnas, G.; Navickas, A. *Elektros energetikos pagrindai: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2013. 228 p.
12. Šatas, J. *Įmonių elektros įrenginiai ir tinklai: teorija, projektavimas, pavyzdžiai: mokomoji knyga*. Klaipėda: Klaipėdos universitetas, 2003. 129 p.
13. Elektros prekių katalogas internetinėje svetainėje. Prieiga per internetą: www.dogas.lt
14. Variklių valdymo prietaisų ir elektros spintų komponentų bendras gaminių katalogas. [žiūrėta 2015m. Balandžio 21d.] Prieiga per internetą: http://media.klinkmann.lt/news/05-11/CHINT_Control_components_36p_lt_0708.pdf

PRIEDAI

- 1 PRIEDAS. Laidų ir kebelių aktyviosios bei induktyviosios varžos;
- 2 PRIEDAS. Plokščiųjų šynų aktyviosios ir induktyviosios varžos;
- 3 PRIEDAS. 2x630 kVA galios transformatorinės principinė elektrinė schema;
- 4 PRIEDAS. Lygiagretus transformatorių darbas, kai skirtingi transformacijos faktoriai;
- 5 PRIEDAS. Lygiagretus transformatorių darbas, kai skirtingos trumpojo jungimo įtampos;
- 6 PRIEDAS. 630 kVA galios transformatoriaus išorinės charakteristikos;
- 7 PRIEDAS. Asinchroninio variklio paleidimo elektrinė schema;
- 8 PRIEDAS. Asinchroninio variklio paleidimo įrenginių dėžė;
- 9 PRIEDAS. Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimo ir ekvivalentinės schemos;
- 10 PRIEDAS. Selektyvumo charakteristikos;
- 11 PRIEDAS. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos;
- 12 PRIEDAS. Asinchroninio variklio darbo charakteristikos.

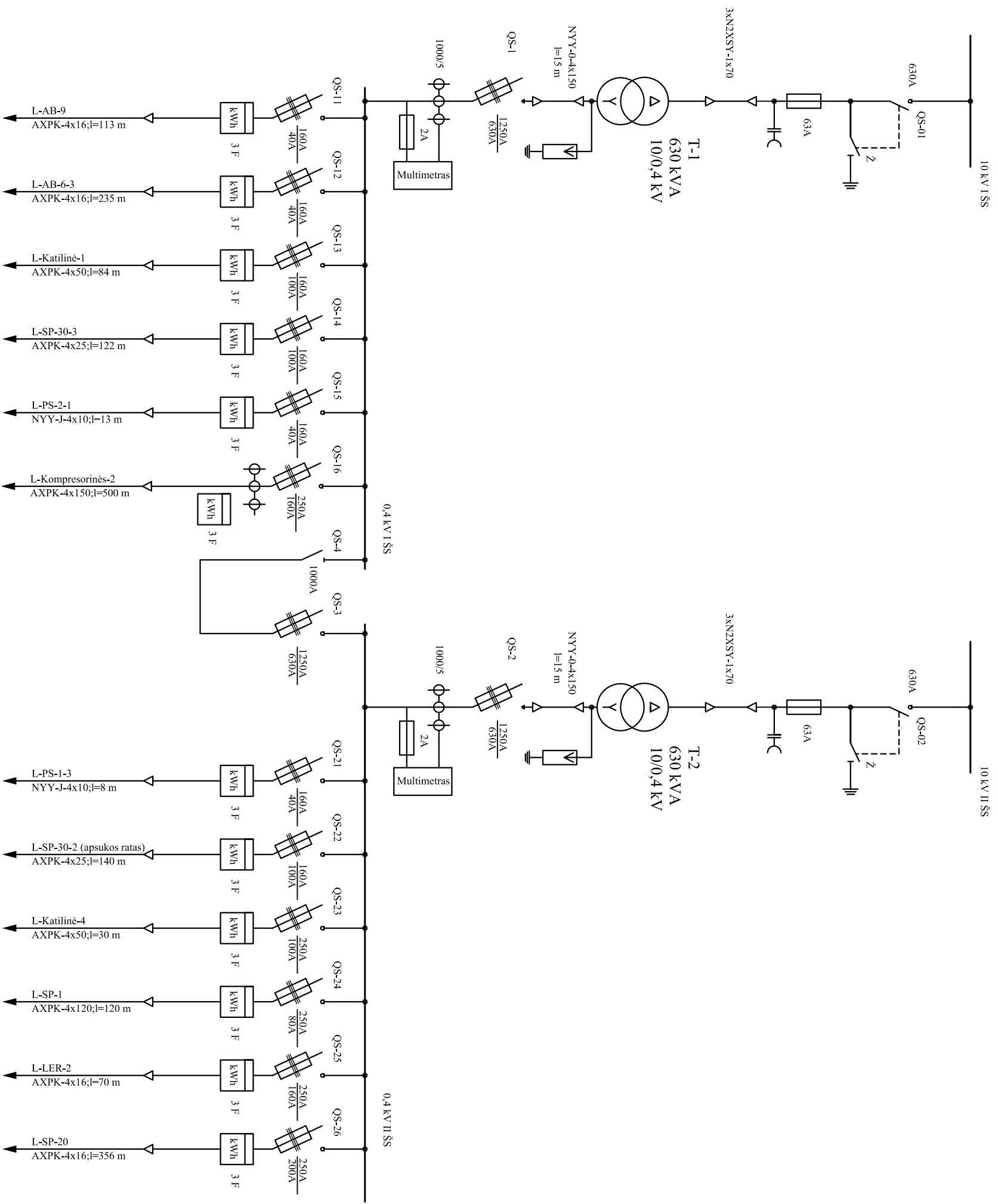
Laidų ir kabelių aktyviosios ir induktyviosios varžos

Gyslų skerspjūvis, mm ²	Varža, mΩ/m			
	Aktyvioji		Induktyvioji	
	Aliuminis	Varis	Atvirai pakloti laidai	Laidai vamzdžiuose, kabeliai
1,5	22,2	13,35	-	0,11
2,5	13,3	8	-	0,09
4	8,35	5	0,33	0,1
6	5,55	3,33	0,32	0,09
10	3,33	2	0,31	0,07
16	2,08	1,25	0,29	0,07
25	1,33	0,8	0,27	0,07
35	0,95	0,57	0,26	0,06
50	0,67	0,4	0,25	0,06
70	0,48	0,29	0,24	0,06
95	0,35	0,21	0,23	0,06
120	0,28	0,17	0,22	0,06
150	0,22	0,13	0,21	0,06
185	0,18	0,11	0,21	0,06
240	0,15	0,08	0,2	0,06
300	0,12	0,07	0,19	0,06

Plokščiųjų šynų aktyviosios ir induktyviosios varžos

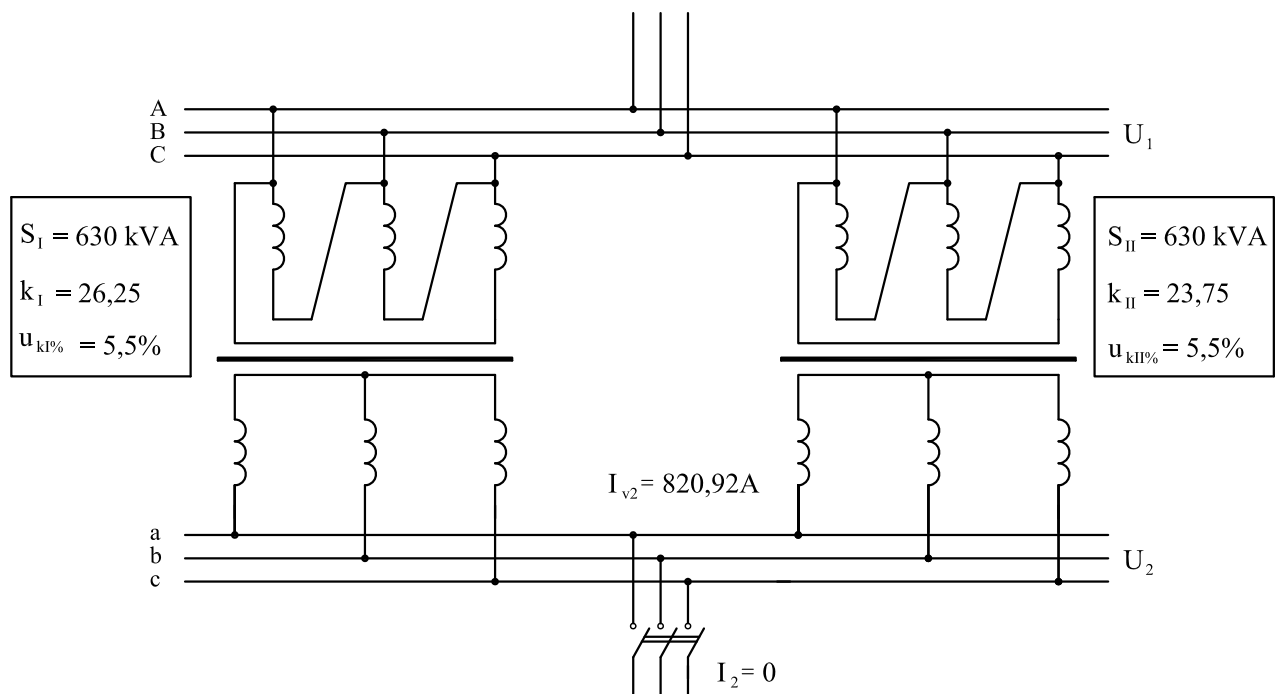
Šynų matmenys, mm	Varža, mΩ/m					
	<i>r</i> , kai 65° C		<i>x</i> , kai vidutinis atstumas tarp fazių (mm)			
	Varis	Aliuminis	100	150	200	300
25x3	0,268	0,457	0,179	0,200	0,295	0,244
30x3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30x4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40x4	0,125	0,222	0,145	0,170	0,189	0,214
40x5	0,100	0,177	0,145	0,170	0,189	0,214
50x5	0,080	0,142	0,137	0,156	0,180	0,200
50x6	0,067	0,118	0,137	0,156	0,180	0,200
60x6	0,056	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60x8	0,042	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80x8	0,031	0,055	0,102	0,126	0,145	0,170
80x10	0,025	0,044	0,102	0,126	0,145	0,170
100x10	0,020	0,035	0,090	0,113	0,133	0,157

3 PRIEDAS



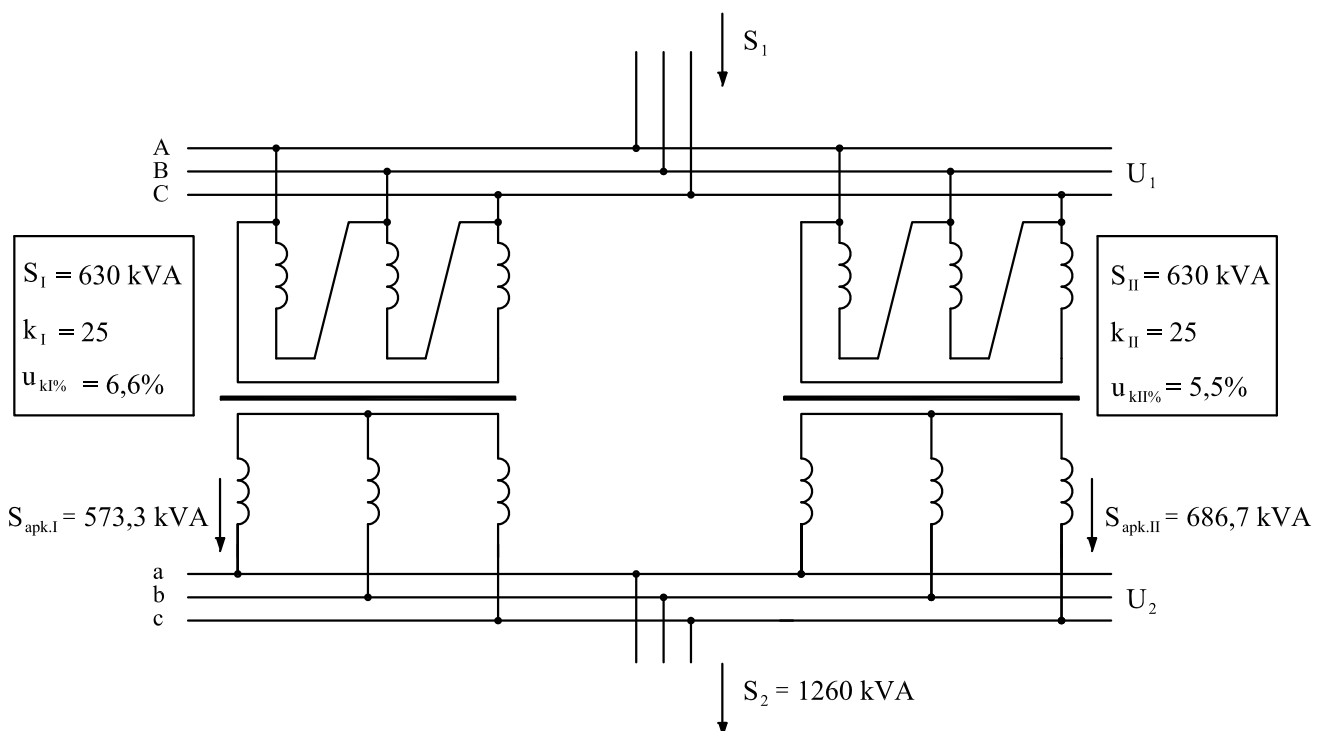
GRUPĖ EEKV-1		KTU elektros ir elektronikos fakultetas		Bakaluro baigiamasis projektas 2x630 kVA galios transformatorinės principlinė elektrinė schema	
V.Pavardė	Parašas				
Studentas	A.ANDRIKIS	15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS	15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra				
BBP	Studentų g. 48, Kaunas	2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas 1	Lapu 1

4 PRIEDAS



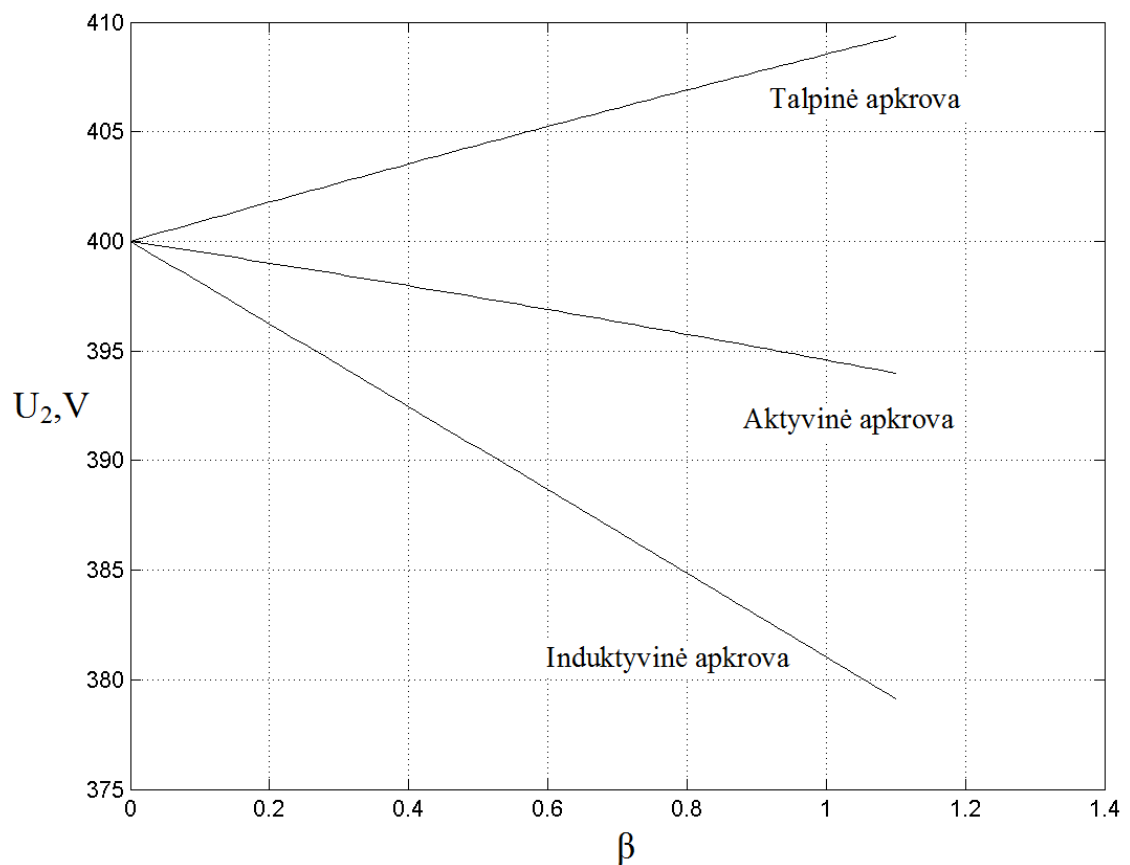
GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		Lygiagretus transformatorių darbas, kai skirtingi transformacijos faktoriai	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas
BBP	Studentų g. 48, Kaunas					Lapų
				1	1	

5 PRIEDAS

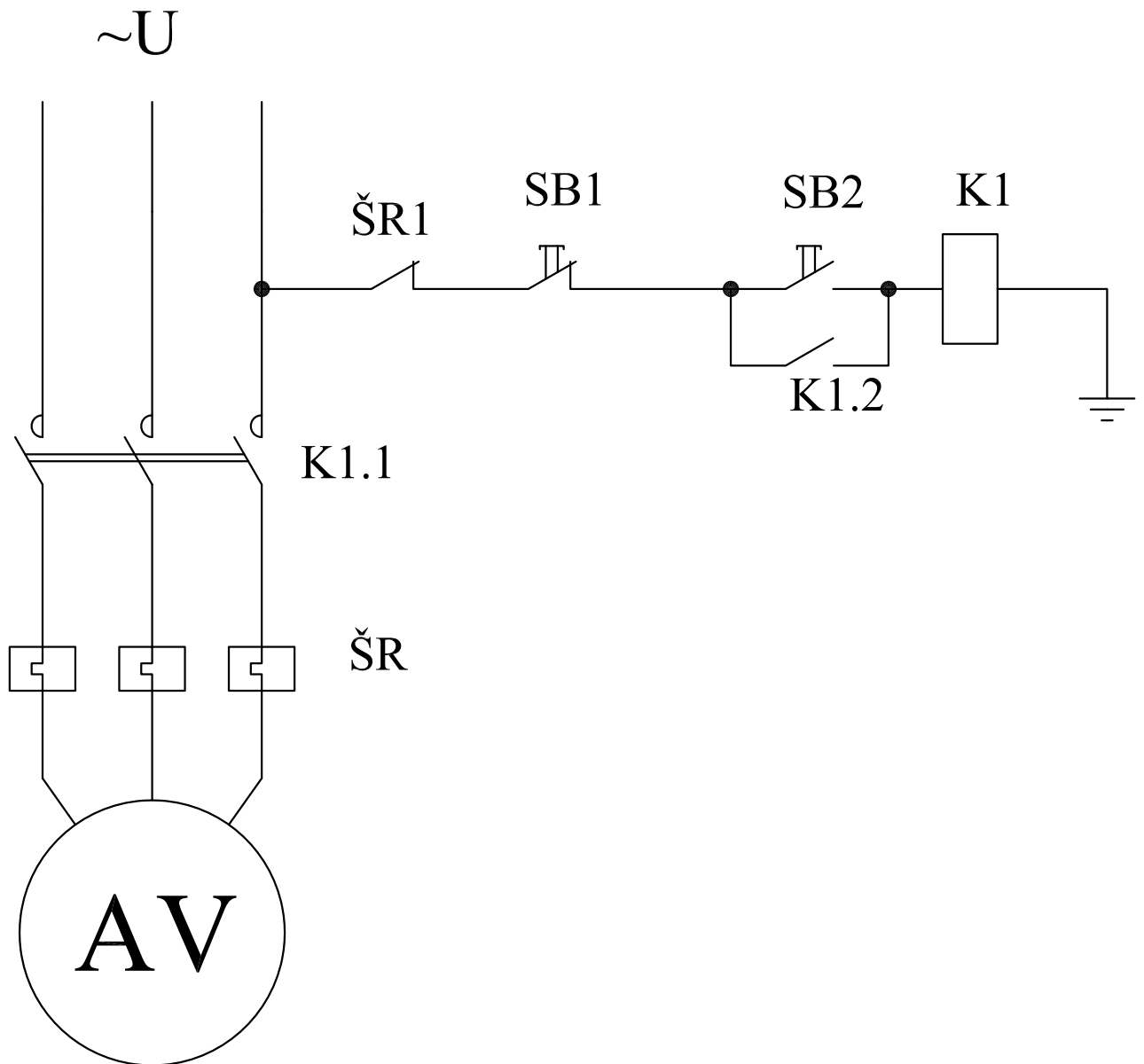


GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		Lygiagretus transformatorių darbas, kai skirtingos trumpojo jungimo įtampos	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas
BBP	Studentų g. 48, Kaunas					Lapų
					1	1

6 PRIEDAS

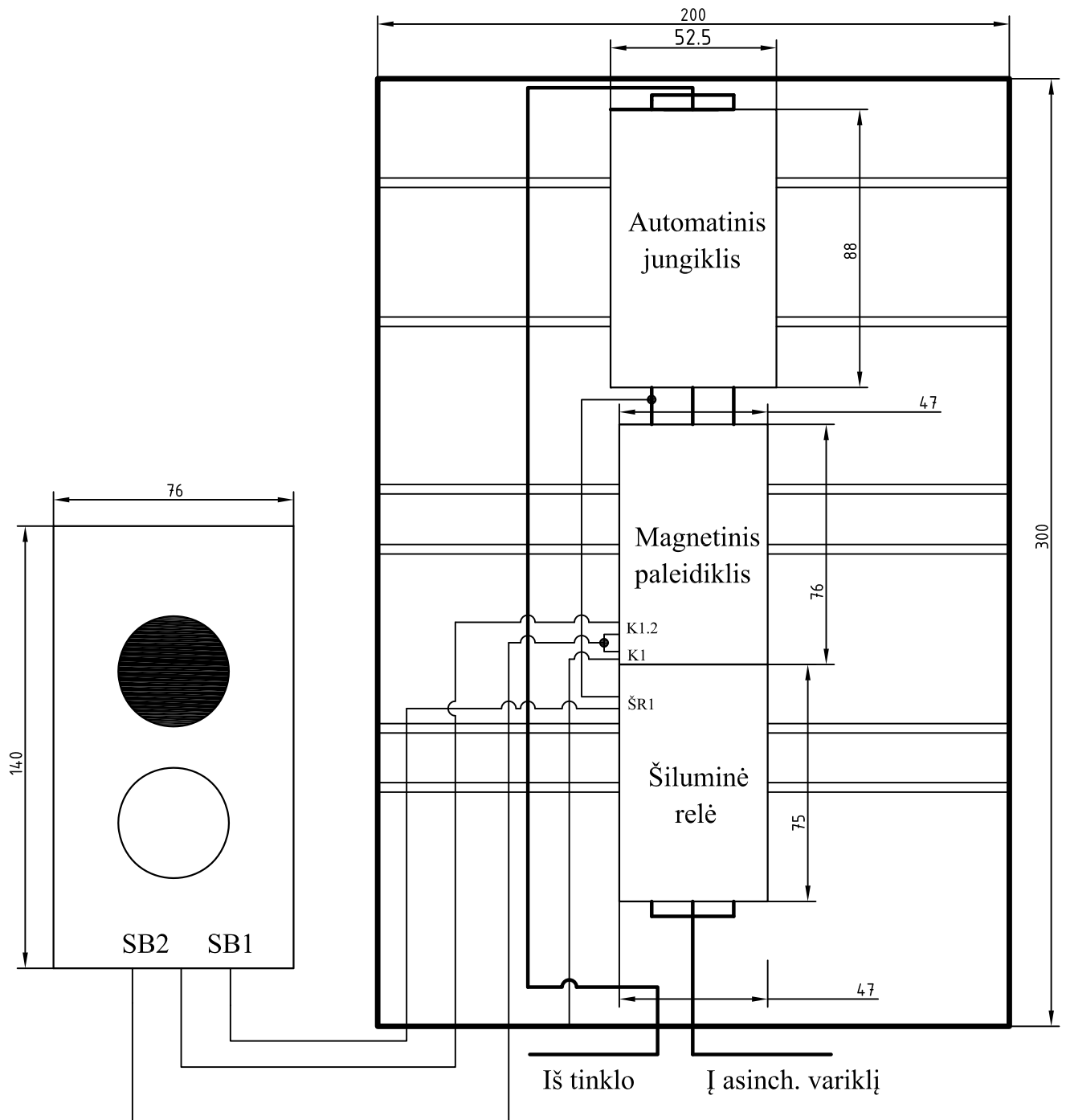


GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		630 kVA galios transformatoriaus išorinės charakteristikos	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra	Lapas	Lapų
BBP	Studentų g. 48, Kaunas				1	1



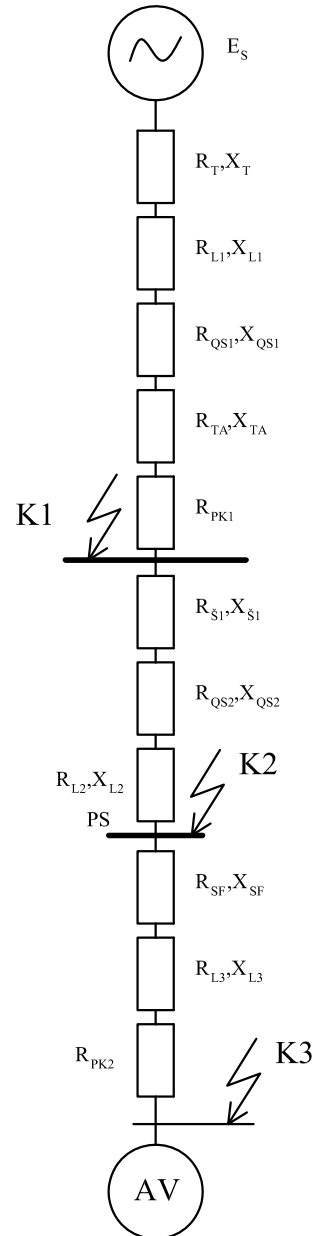
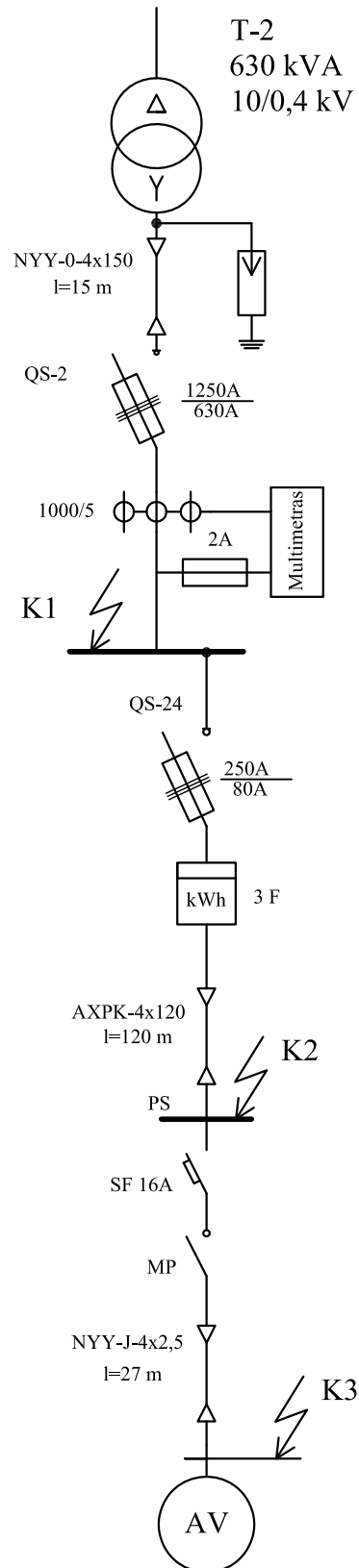
GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		Asinchroninio variklio paleidimo elektrinė schema	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra	Lapas	Lapų
BBP	Studentų g. 48, Kaunas				1	1

8 PRIEDAS



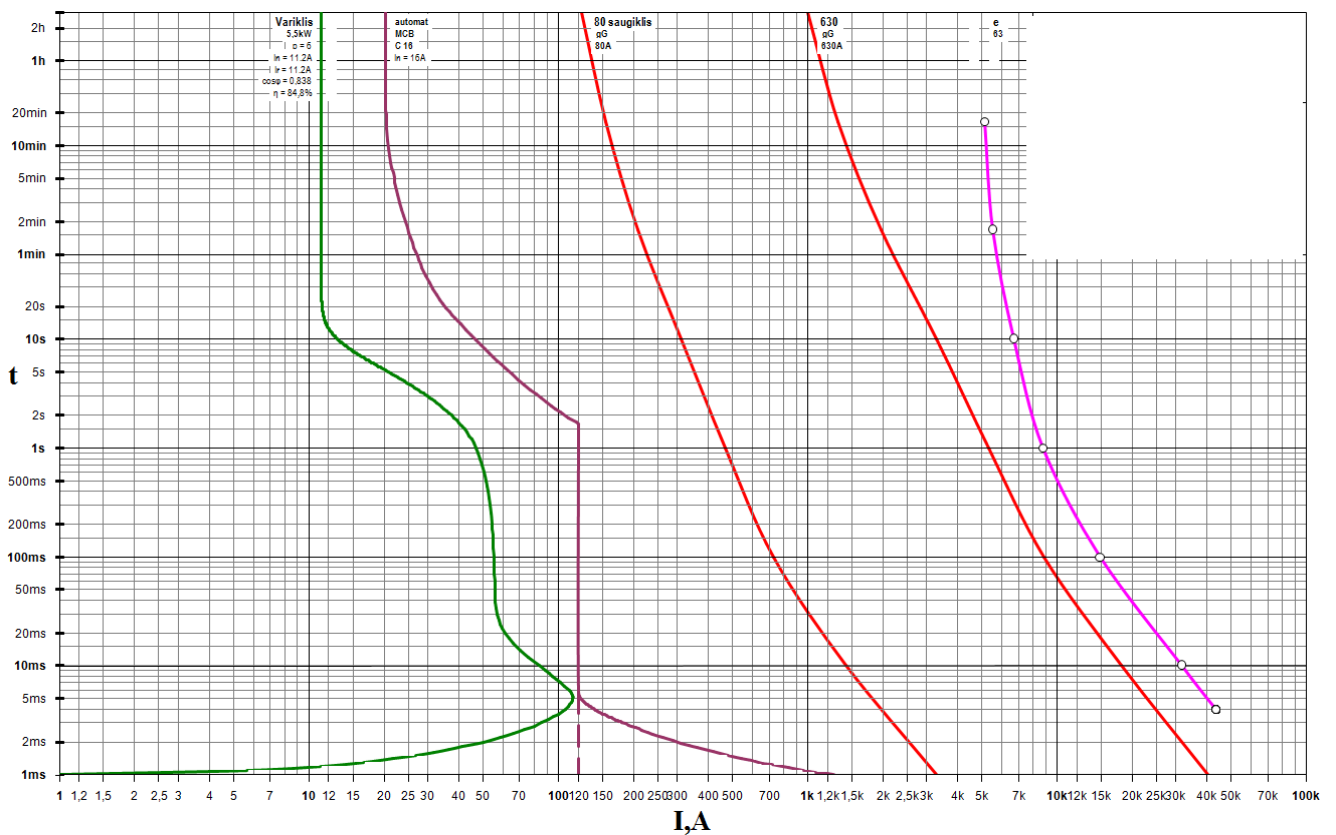
GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas			
	V.Pavardė	Parašas		Asinchroninio variklio paleidimo įrenginių dėžė	Mastelis		
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16		1:2		
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16				
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra	Lapas	Lapų	
BBP	Studentų g. 48, Kaunas				1	1	

9 PRIEDAS



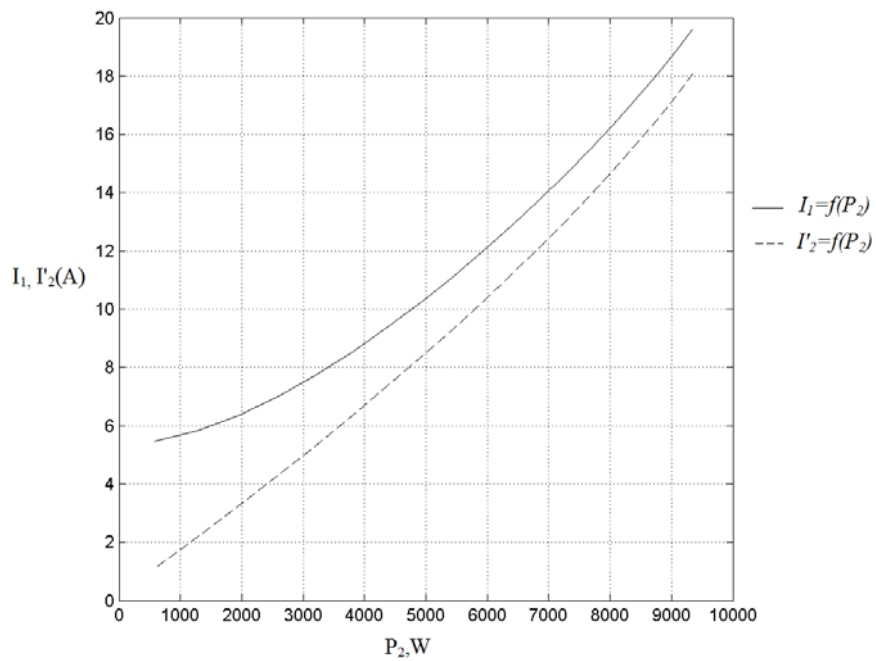
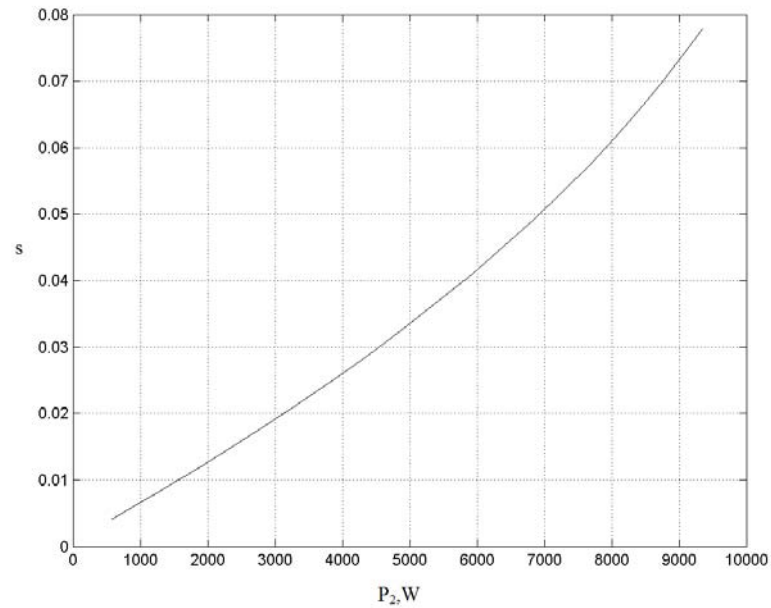
GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimo ir ekvivalentinė schemas	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra	Lapas	Lapų
BBP	Studentų g. 48, Kaunas				1	1

10 PRIEDAS



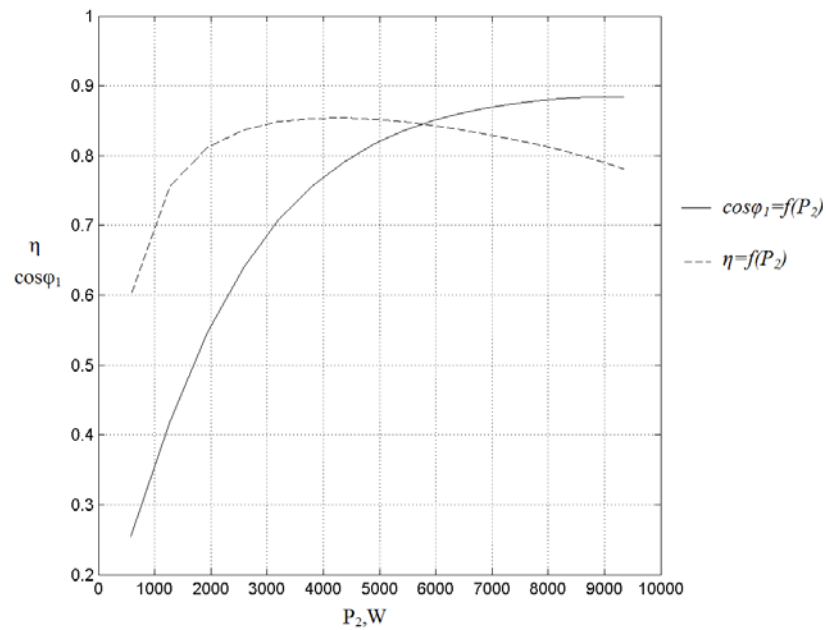
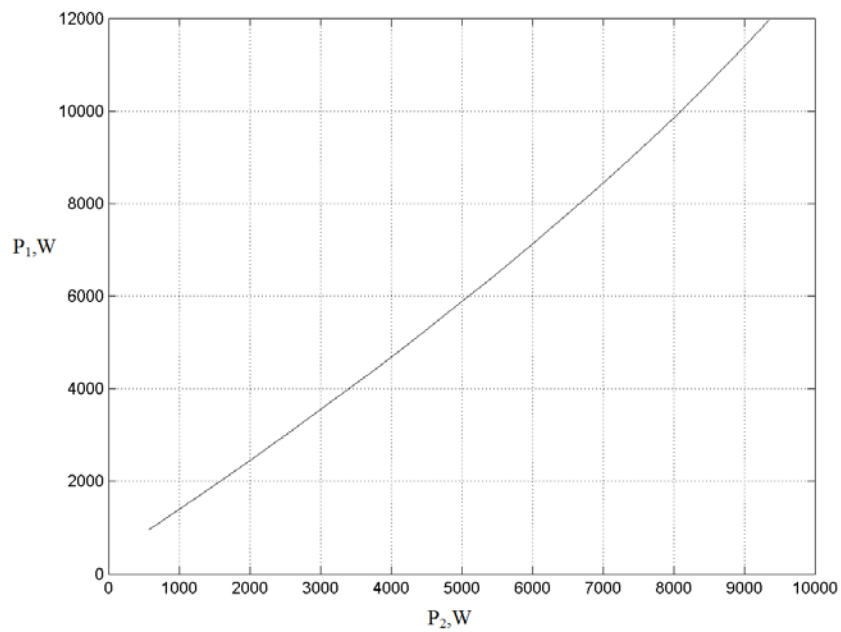
GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		Selektyvumo charakteristikos		Mastelis
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas
BBP	Studentų g. 48, Kaunas					Lapų
						1
						1

11 PRIEDAS



GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		5,5 kW asinchroninio variklio darbo charakteristikos	Mastelis	
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas
BBP	Studentų g. 48, Kaunas					Lapų
				1	2	

12 PRIEDAS



GRUPĖ EEKV-1	KTU elektros ir elektronikos fakultetas			Bakalauro baigiamasis projektas		
	V.Pavardė	Parašas		5,5 kW asinchroninio variklio darbo charakteristikos		Mastelis
Studentas	A.ANDRIKIS		15.05.16			
Vadovas	A.KALVAITIS		15.05.16			
Stadija	Elektros energetikos sistemų katedra			2015-BBP-Elektros energetikos sistemų katedra		Lapas
BBP	Studentų g. 48, Kaunas					Lapų
				2		2