



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vilmantas Kutka

ELEKTROS SISTEMOS VARŽOS MATAVIMO TIKSLUMO
ĮVERTINIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**ELEKTROS SISTEMOS VARŽOS MATAVIMO TIKSLUMO
ĮVERTINIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Gytis Svinkūnas

(data)

Recenzentas

(parašas) dr. Renata Miliūnė

(data)

Projektą atliko

(parašas) Vilmantas Kutka

(data)

KAUNAS, 2016

Kutka, V. Elektros sistemos varžos matavimo tikslumo įvertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros Energetikos Sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 53 psl.

SANTRAUKA

Darbe nagrinėjama tema – elektros tinklo varžų matavimo tikslumas – labiausiai liečia vidinę gamyklų, komercinių didesnių pastatų ar netgi paprastų gyvenamųjų namų elektros instaliaciją, bet tai galima pritaikyti ir platesnėje praktikoje, kaip pavyzdžiui skirstomajame tinkle projektuojant apsaugas ir skaičiuojant trumpuosius jungimus .

Projektuojant elektros sistemas yra įprasta priimti teorines varžas laidininkams, elektros energijos keitikliams ir pereinamiesiems kontaktams, taip pat ekvivalentines elektrovaras, kurių skaitinės vertės įstatomos į sumodeliuotą trumpojo jungimo skaičiuojamąją ekvivalentinę schemą. Taip apskaičiuojama galima trumpojo jungimo srovė.

Praktikoje ir pagal norminius teisės aktus elektros sistemos trumpojo jungimo (toliau – TJ) srovei gauti yra naudojami sertifikuoti matuokliai, kurie išmatuoja realiai egzistuojančios elektros sistemos grandinės varžą ir apskaičiuoja numatomąją TJ srovės vertę.

Pasitaiko atvejų, kai matuokliai parodo labai mažas numatomosios TJ srovės vertes ir tada iškyla klausimas ar jie matuoja teisingai : ar įvertinama induktyvinė varža, elektromagnetiniai pereinamieji procesai, grandinės varžų pokyčiai TJ metu ir t.t.

Šiai problemai spręsti darbe atliekami eksperimentai žinant tikslią tinklo sistemos dalies schemą, t.y. matuojama pasirinktos elektros grandinės varža matuokliu, tada yra kuriamas matematinis schemos modelis, pritaikytas trumpojo jungimo srovės skaičiavimui, įstatant jau žinomus pasirinktos elektros tinklo dalies parametrus.

Modeliavimo ir matavimo rezultatai yra palyginami ir nustatinėjami parametrai, kurie labiausiai įtakoja matavimo ir modeliavimo rezultatų nesutapimo priežastis.

Raktiniai žodžiai: trumpasis jungimas; elektros tinklo pilnoji varža; matematinis ekvivalentinės schemos modelis

Kutka, Vilmantas. Evaluation of Electric Power Grid Impedance Measurement Accuracy. Final project of Master degree / supervisor doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems

Kaunas, 2016. 53 p.

SUMMARY

The main topic of this thesis is the analysis of the accuracy of electrical grid impedance measurement related to electric networks of factories, large commercial and even residential properties. The measurement methods may also have a wider use e.g. in larger distribution networks and stations as well as security systems development and short circuits calculations.

When electric systems are being designed the use of theoretical values of resistance for conductors, converters and transitional contacts is common. Same is true for the values of equivalent electromotive. The respective figures are simply inserted into the model of the equivalent short-circuit scheme. This yields the value of the current of the short circuit.

In practice and as legally required, short circuit characteristics are measured using certified measurement devices. The latter measure the resistance of an actual electric system, to calculate the short circuit's current value.

In events, when these devices return an intuitively too low values for the current, a concern is caused whether the measurements are feasible: are inductive impedance, transitional electromagnetic processes and the circuit resistance changes in the event of short circuit evaluated etc.

This abovementioned problem is approached in this thesis using an analysis of a scheme fragment of an actual electric system, i.e. using a measuring device to determine the resistance of a selected electric circuit, then designing a mathematical model to calculate the short circuit current values with already known electric system parameters inserted.

Keywords: short-circuit; electrical grid impedance; mathematical model of the scheme



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
Elektros ir elektronikos inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Vilmantas Kutka

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros sistemos varžos matavimo tikslumo įvertinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. Gegužės 25 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Vilmanto Kutkos** baigiamasis projektas tema „**Elektros sistemos varžos matavimo tikslumo įvertinimas**“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesažiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS	10
ĮVADAS	11
1. TRUMPIEJI JUNGIMAI	13
1.1. Trumpųjų jungimų skaičiavimas	14
1.2. Trifazio trumpojo jungimo skaičiavimas.....	15
1.2. Dvifazio trumpojo jungimo skaičiavimas.....	18
1.3. Vienfazio trumpojo jungimo skaičiavimas.....	19
1.4. Trumpieji jungimai 1000V įtampos pakopoje.....	20
2. MATAVIMO PRIETAISAI.....	21
3. TINKLO SCHEMA.....	22
4. EKSPERIMENTAS PIRMOJOJE LABORATORIJOJE	23
4.1 BANDYMAS	23
4.2. Rezultatų palyginimas, apskaičiuojant varžas teoriniu būdu.....	27
5. TRUMPOJO JUNGIMO SIMULIACIJA PROGRAMA „SIMULINK“	28
5.1 Vienfazis trumpasis jungimas.....	29
5.2 Dvifazis trumpasis jungimas	37
6. Tikslus sistemos varžos modeliavimas, pasitelkiant TJ skaičiavimo metodiką	40
6.1 Vienfazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas	40
6.2 Vienfazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius	43
6.3 Dvifazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas	43
6.4 Dvifazis trumpasis jungimas, kai veikia T2 transformatorius	45
7. EKSPERIMENTINIAI MATAVIMAI ANT TIESIOGINIO ĮVADO NUO TRANSFORMATORINĖS GNYBTŲ IR JŲ PALYGINIMAS SU MODELIAVIMO REZULTATAIS	45
8. EKSPERIMENTINIAI MATAVIMAI ANT PAPILDOMO TRANSFORMATORIAUS GNYBTŲ IR JŲ PALYGINIMAS SU MODELIAVIMO REZULTATAIS	46
8.1 Papildomo transformatoriaus aprašymas.....	46

8.2 Vienfazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas	47
8.3 Dvifazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas	48
8.4 Vienfazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius	49
8.5 Dvifazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius.....	50
8.6 Eksperimentinio matavimo rezultatai	50
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	52
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	53
PRIEDAS NR.1 SP-423 schema	
PRIEDAS NR.2 TR-1203 schema	
PRIEDAS NR.3 TR-483 schema	
PRIEDAS NR.4 Metrologinės prietaiso patikros sertifikatas	

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Trumpųjų jungimų skaičiavimas.....	14
1.2 pav. TJ ekvivalentinės schemos prastinimo pavyzdys.....	16
2.1 pav. Linijos pilnosios varžos matavimo principinė schema.....	21
2.2 pav. Matavimo prietaisas.....	22
3.1 pav. Blokinė elektros energijos tiekimo schema.....	23
4.1 pav. 1-ojo bandymo schema.....	23
4.2 pav. 2-ojo bandymo schema.....	24
4.3 pav. 3-ojo ir 4-ojo bandymų schema.....	24
4.4 pav. 5-ojo bandymo schema.....	25
4.5 pav. 6-ojo bandymo schema.....	25
4.6 pav. 7-ojo bandymo schema.....	25
4.7 pav. 8-ojo bandymo schema.....	26
4.8 pav. 9-ojo bandymo schema.....	26
4.9 pav. 10,11,12,13 bandymų schema.....	26
5.1 pav. Principinė nagrinėjamo tinkle schema.....	28
5.2 pav. Ekvivalentinė schema programoje „Matlab“.....	29
5.3 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T1.....	32
5.4 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T2.....	33
5.5 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T1 ir T2.....	33
5.6 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia tik T1.....	35
5.7 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia tik T2.....	36
5.8 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia T1 ir T2.....	36
5.9 pav. Dvifazio TJ schema programoje „Matlab“.....	38
5.10 pav. Dvifazio trumpojo jungimo srovės oscilograma.....	39
6.1 pav. Blokinė vienfazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“.....	42
6.2 pav. Blokinė dvifazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“.....	44
8.1 pav. Transformatoriaus TII techninis pasas.....	47
8.2 pav. Blokinė vienfazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“ su papildomu TII transformatoriumi.....	48
8.3 pav. Blokinė dvifazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“ su papildomu TII transformatoriumi.....	49

LENTELIŲ SĄRAŠAS

4.1 lentelė. Bandymų rezultatai.....	27
5.1 lentelė. Vienfazio TJ matavimo rezultatai.....	37
5.2 lentelė. Dvifazio TJ matavimo rezultatai.....	39
7.1 lentelė. Matavimo rezultatai ant tiesioginio įvado gnybtų.....	45
7.2 lentelė. Matavimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas.....	46
8.1 lentelė. Matavimo rezultatai su prijungtu papildomu TII transformatoriumi.....	50
8.2 lentelė. Matavimo ir modeliavimo rezultatų su prijungtu papildomu TII transformatoriumi palyginimas.....	51

SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

TJ – trumpasis jungimas;

Y/Y₀ – transformatoriaus apvijų jungimo būdas – žvaigždė – žvaigždė, su įžeminta neutrale;

Y/Z₀ – transformatoriaus apvijų jungimo būdas – žvaigždė – zigzagas, su įžeminta neutrale;

$I_K^{(3)}$ – trifazio trumpojo jungimo srovė;

$I_K^{(2)}$ – dvifazio trumpojo jungimo srovė ;

$I_K^{(1)}$ – vienfazio trumpojo jungimo srovė ;

T – įtampos keitimo ekvivalentinės trumpojo jungimo schemos elementas;

T1 – TR483 transformatorinėje esantis 1-asis galios transformatorius (400kVA);

T2 – TR483 transformatorinėje esantis 2-asis galios transformatorius (320kVA);

TII – papildomai jungiamas 8kVA transformatorius;

Kilpa – trumpai jungta elektros grandinės dalis, dažniausiai nusakanti grandinę nuo šaltinio iki nuo šaltinio per varžų atstojamą atskirtų trumpai sujungtų gnybtų.

Pilnoji grandinės varža Z – elektros grandinės aktyvinės ir induktyvinės verčių geometrinis vidurkis

IVADAS

Elektros tinklo elementų varžų reikšmių tikslus žinojimas dažniausiu atveju reikalingas trumpųjų jungimų skaičiavimui ir įtampos nuostolių įvertinimui. Šiame darbe yra apžvelgiami tik trumpieji jungimai.

Trumpieji jungimai yra skaičiuojami žinant tikslią tinklo schemą ir įvertinant ekvivalentinės tinklo schemas elementų varžas ir EVJ. Praktikoje, elektros tinklo varžos matuojamos specialiais prietaisais, kurie parodo tiek tinklo dalies elementų varžų reikšmes, tiek perspektyvinę (numatomąją) trumpojo jungimo srovę.

Skaičiuojant teoriškai trumpojo jungimo sroves, beveik visada gaunamos didelės srovės išraiškos vertės, skaičiuojamos kA tikslumu. Praktikoje matuojant su matuokliais, matuokliai labai retai parodo 10^3 A eilės reikšmes, todėl iškyla klausimas – ar teoriniai skaičiavimai atitinka realius matavimų rezultatus ir kas tai įtakoja?

Šiame darbe nagrinėjama problema teisingai apibrėžti tinklo elementų varžas ir jas pritaikyti trumpojo jungimo skaičiavimui. Išanalizavus žinomą tinklo schemą yra paskaičiuojama trumpojo jungimo srovė, tinklo kilpos pilnoji varža, o tada su metrologinę patikrą turinčiu matuokliu matuojama tos pačios dalies tinklo kilpos pilnoji varža ir nurodoma perspektyvinė trumpojo jungimo srovė. Dažniausiai įvykstantys trumpieji jungimai – dvifaziai ir vienfaziai. Būtent šios trumpųjų jungimų rūšys ir nagrinėjamos darbe.

Temos aktualumas

Norint įvykdyti elektros įrenginių įrengimo bendrųjų taisyklių reikalavimus, pridodant pastatus Valstybinei Energetikos Inspekcijai ir profilaktiškai pagal reglamentą yra matuojamos elektros instaliacijos varžos. Matuojamos pereinamųjų kontaktų, įžeminimo, izoliacijos bei kitos varžos, pvz. Pilnoji linijos varža (impedansas [impedance-angl. k.]). Pilnoji linijos varža matuojama norint kuo tiksliau parinkti apsaugos aparatus, saugant linijas tiek nuo perkrovų, tiek nuo trumpųjų jungimų. Pasitaiko atvejų (senos statybos pastatuose), kad trumpojo jungimo srovė dėl labai ilgos linijos ir plonų laidininkų (kas sąlygoja didelę linijos pilnąją varžą) tampa artima vardinei automato ar kito apsaugos aparato srovei. Tokiu atveju trumpasis jungimas atjungiamas ne iš karto, o praėjus tam tikram laikui, priklausomai nuo apsaugos aparato charakteristikų ir selektyvumo kreivės.

Pamatuojant linijos pilnąją varžą yra nustatoma perspektyvinė (numatomoji) trumpojo jungimo srovė. Dažnu atveju ji gaunama gan maža, jei lyginant su teoriniais skaičiavimais

projektuose. Tikslesnė informacija, kaip matuojant tinklo varžą aparatu apskaičiuojama perspektyvinė trumpojo jungimo srovė, pateikiama darbe. Todėl šiuo darbu norima pagrįsti arba paneigti matavimo aparatų išmatuotų verčių tikslumą teoriniais skaičiavimais, kai tiksliai žinoma tinklo varža ir kai tinklo varža apskaičiuojama teoriniu būdu, žinant pasirinkto tinklo elektros grandinės svarbiausius mazgus, reikalingus trumpojo jungimo skaičiavimui.

Darbo tikslas: Palyginti teoriniu būdu apskaičiuotas tinklo varžų ir trumpųjų jungimų rezultatų vertes su išmatuotomis metrologinę patikrą turinčiu matuokliu.

Uždaviniai :

1. Sumodeliuoti keletą schemų ir eksperimentiškai išmatuoti jų varžas su matuokliu;
2. Pagal esamą tinklo schemą sumodeliuoti ekvivalentinę schemą – matematinį modelį trumpojo jungimo srovių skaičiavimui ;
3. Išmatuoti pilnąsias tinklo varžas fazė-nulis ir fazė-fazė;
4. Apskaičiuoti trumpuosius jungimus ir palyginti su matavimais;
5. Palyginti ir išanalizuoti rezultatus.

1. TRUMPIEJI JUNGIMAI

Trumpasis jungimas (TJ) – normaliomis darbo sąlygomis nenumatytas įvykis, kurio metu tarpusavyje susiliečia įtampą turinčios elektros grandinės dalys. Trumpojo jungimo metu tarpusavyje gali susiliesti dvi arba trys fazės, o tinkluose, turinčiuose įžemintą neutralę – viena ar kelios fazės su nuliniu laidu ar žeme [1], [2].

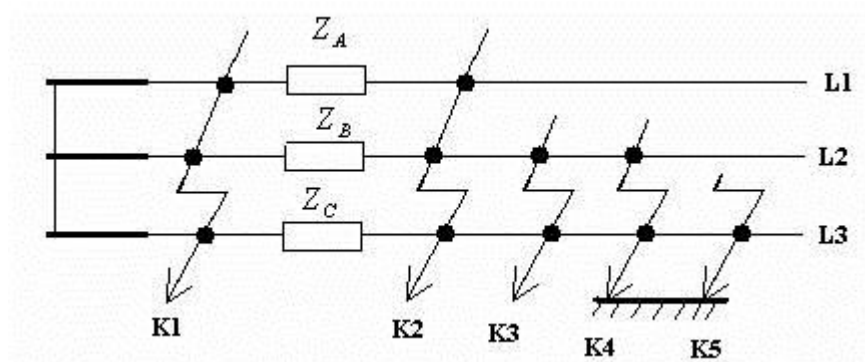
Fazės su žeme gali susiliesti ir tinkluose, neturinčiuose įžemintos neutralės (transformatoriaus apvijoms esant sujungtoms paprastąją žvaigžde ar trikampiui). Tokie trumpieji jungimai vadinami įžemėjimais, nes neteka labai didelės srovės.

Trumpieji jungimai gali įvykti dėl daugelio priežasčių, priklausomai nuo to, kokios įtampos tinkle, jie įvyksta. Tarpusavyje laidai gali susiliesti senstant izoliacijai, suklydus operatyviniams darbuotojams, sugedus įrengimams (žemos įtampos tinkle), pakilus įtampai (atsiradus dideliems viršįtampiams tinkle dėl įvairių pereinamųjų ar atmosferinių reiškinių), paukščių ar kitų gyvūnų atitinkamų veiksmų (vidutinės ir aukštos įtampos tinkluose).

Didėjant įtampai avarijos vietoje, didėja ir užsidegančio lanko dydis, kurio didžiausiąją varžos dalį sudaro aktyvinė varža. [2, p. 4]

Kaip jau buvo minėta, trumpieji jungimai skirstomi į kategorijas pagal tarpusavio kontaktų susilietimo prigimtį:

- 1) Trifazis TJ – tai simetrinis trumpasis jungimas tarp generatoriaus gnybtų arba elektros tinkle, kai tarpusavyje susiliečia visos trys fazės, žymimas $K^{(3)}$;
- 2) Dvifazis TJ – nesimetrinis trumpasis jungimas tarp dviejų fazių, žymimas $K^{(2)}$;
- 3) Vienfazis įžemėjimas arba vienfazis TJ - 65 % visų TJ [1](viena fazė per žemę susijungia su neutrale), žymima $K^{(1)}$. Tai taip pat nesimetrinis trumpasis jungimas, nesimetrijos priežastys bus nagrinėjamos tolesniuose darbo puslapiuose;
- 4) Dvifazis įžemėjimas - 20 % visų TJ [1](susijungia dvi fazės ir žemė). Žymima $K^{(1,1)}$



1.1 pav. Trumpųjų jungimų skirstymas [3]

1.1. Trumpųjų jungimų skaičiavimas

Trumpieji jungimai yra skaičiuojami atsižvelgiant į TJ pobūdį – tai simetris ar nesimetris TJ. Vienintelis simetris trumpasis jungimas yra trifazis – susilietus trims fazės tarpusavyje, įtampa U tampa lygia nuliui kiekvienoje fazėje, o srovė, jei sistema simetrinė, teka vienoda.

TJ skaičiavimai panaudojami projektuojant elektros sistemas, nuo kabelių parinkimo iki automatikos įtaisų avarinio režimo sąlygų nustatymo.

Norint apskaičiuoti TJ itin tiksliai reikia padaryti keletą prielaidų, nes priešingu atveju, reikėtų įvertinti visus sistemoje TJ metu vykstančius elektromagnetinius ir elektromechaninius procesus [2, p. 6], o kartais net ir elektrocheminius pereinamuosius procesus. O tai padaryti yra sunku ne tik dėl daug nežinomųjų, bet ir dėl šių procesų eiliškumo tvarkos – elektromagnetinis pereinamasis procesas įvyksta daug anksčiau nei kiti du minėti procesai.

Pagrindinės prielaidos TJ skaičiavimo supaprastinimui:

1. Visos magnetinės grandinės yra neįsotintos ir visi schemų elementai yra tiesiniai;
2. Įtampos keitikliuose neatsižvelgiama į įmagnetėjimo sroves;
3. Sistema yra idealiai simetrinė;
4. Nėra talpinio laidumo;
5. Apkrovos įvertinamos apytiksliai;
6. Skaičiuojant TJ aukštos įtampos tinkluose, nevertinama aktyvinė varža;
7. Laikoma, kad generatorių elektrovaros jėgų fazės sutampa.

Skaičiuojant trumpojo jungimo sroves reikia sudaryti tos grandinės, kurioje skaičiuojamas TJ, skaičiuojamąją ekvivalentinę schemą:

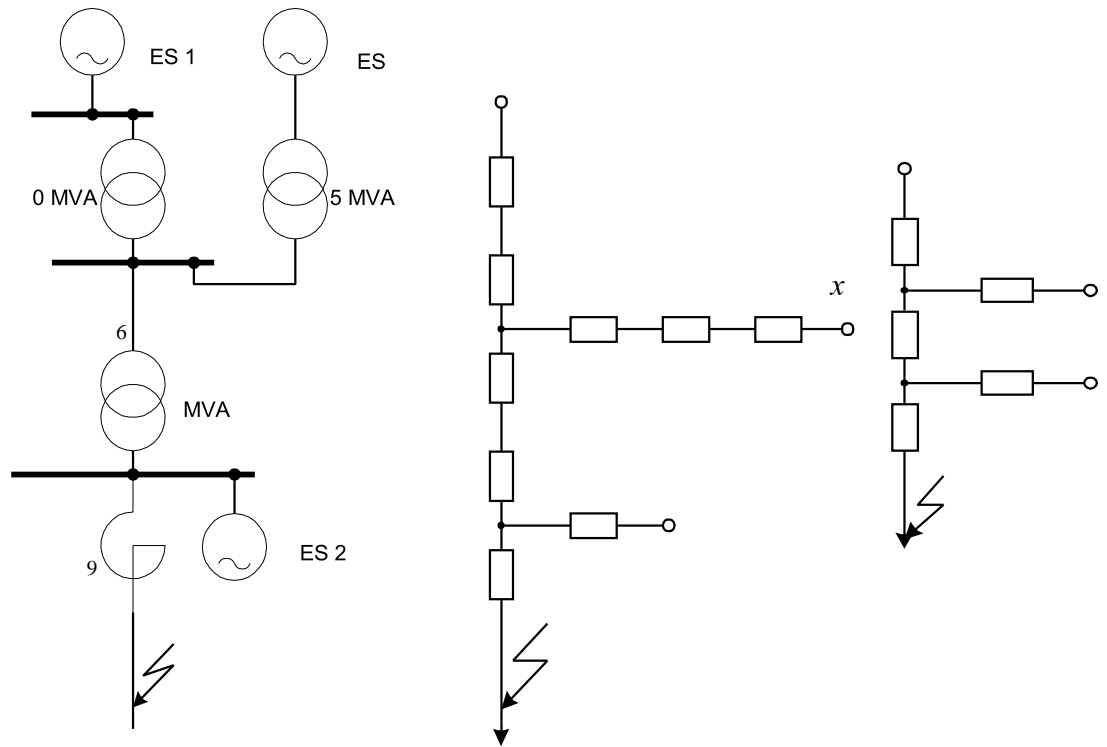
Schemoje yra pateikiami visi šaltiniai, kurie maitina trumpojo jungimo vietą ir visi elektros energijos tiekimo elementai (transformatoriai, linijos, reaktoriai), taip pat apkrovos, kurios esant atitinkamoms sąlygoms, taip pat gali tapti maitinimo šaltiniais. Visi schemas elementai, esantys tarp maitinimo taško ir TJ vietos, pakeičiami ekvivalentinėmis varžomis ir ekvivalentinėmis elektrovaromis.

Svarbiausia yra teisingai ir kuo tiksliau apsisrašyti ekvivalentinės schemos parametrus (jei žinome tikslią tinklo schemą), nes nuo to priklausys skaičiavimo rezultatų tikslumas.

Skaičiuojant nesimetrinius trumpuosius jungimus yra sudaromos kompleksinės ekvivalentinės schemos, kai kiekviena fazė išskirstoma atskirai. Atsiranda matematinė fikcija: tiesioginė, atvirkštinė ir nulinė sekos. Šiuo atveju reikia surasti kabelių ir transformatorių tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos ekvivalentines varžas TJ metu. Skirtingų sekų dydžius lemia ne tik įrenginių ar kabelių pagrindiniai parametrai, bet ir kitos konstrukcinės detalės. Vienfazį trumpąjį jungimą nuo simetrinio trifazio skiriantis proporcingumo koeficientas priklauso nuo nulinės sekos varžos. Todėl, jei reikia apytikslio skaičiavimo galima naudoti ir 0,1-1,5 koeficientą. Tačiau tai yra labai netikslu ir todėl vienfaziam trumpajam jungimui beveik visada reikia naudoti detalius skaičiavimus panaudojant sekų teoriją – tiesioginę, atvirkštinę ir nulinę sekas kiekvienai fazei. Taip apskaičiuojamos srovės dedamosios yra gana tikslios, jei tik teisingai yra įvertinamos skirtingų sekų varžos. Sekų teorija įvertina tarpfazinį ryšį TJ metu ir sumažina nežinomųjų skaičių.

1.2. Trifazio trumpojo jungimo skaičiavimas

Schemoje nurodomi pagrindiniai visų elementų parametrai (galia, transformatorių TJ įtampa, linijų ilgiai, laidų skerspjūviai, maitinimo šaltinių varžos) ir pažymimi TJ taškai.



1.2 pav. TJ ekvivalentinės schemos prastinimo pavyzdys [3]

Remiantis skaičiavimo schema sudaroma ekvivalentinė schema, kurioje visi elementai keičiami varžomis, perskaičiuotomis bazinėms sąlygoms.

Lygiagrečiai, nuosekliai ir mišriai sujungtos varžos keičiamos viena ekvivalentine.

Kai yra keli maitinimo šaltiniai su elektrovaromis E_1, E_2, \dots, E_n ir varžomis x_1, x_2, \dots, x_n schemą galima supaprastinti keičiant maitinimo šaltinių elektrovaras ir varžas ekvivalentinėmis naudojantis superpozicijos principu.

TJ gali būti skaičiuojami dviem skirtingais būdais – baziniais vienetais ir vardiniais. Trumpai apžvelgsime skaičiavimo vardiniais vienetais pavyzdį.

Trumpojo jungimo skaičiavimas – tai srovių ir įtampų suradimas ekvivalentinėje schemoje (panaudojant Omo ir Kirchhofo dėsnius). Iš pradžių surandama ekvivalentinė varža Z_{Σ} ir ekvivalentinė elektrovaros jėga (EVJ) E_{Σ} , ir tada surandama trumpojo jungimo srovė:

$$I_k = \frac{E_{\Sigma}}{Z_{\Sigma}}; \quad (1.1)$$

Vėliau, srovių ir įtampų pasiskirstymas surandamas vėl įstatant nežinomuosius į sudarytas lygčių sistemas.

Skaičiuojant trifazį jungimą vardiniais vienetais, pirmiausia reikia pasirinkti įtampos pakopą U_p skaičiavimams atlikti. Patogiausia yra pasirinkti tą įtampos pakopą, kurioje įvyko trumpasis jungimas. Skaičiuojant kitų ekvivalentinės schemos elementų varžas, esančių kitoje įtampos pakopoje, varžos perskaičiuojamos taikant koeficientą k_i [1]:

$$U_p = U_{vid} k_i; \quad (1.2)$$

čia: U_p – pasirinktas įtampos lygis;

U_{vid} – tikroji elemento įtampa;

Pvz. skaičiuojant elemento H varžą, kuris yra prijungtas prie įtampos U_{vid} , o trumpojo jungimo taške esanti įtampa yra U_p , varžos perskaičiavimo formulė:

$$Z_{Hpersk,U=U_p} = Z_{H,U=U_{vid}} U_p / U_{vid}; \quad (1.3)$$

Patartina atkreipti dėmesį į tai, kad ar skaičiuojant vienfazį, kai t.j. vietoje egzistuoja fazinė srovė, ar trifazį, kai TJ vyksta linijinėje įtampoje, parametrai E_Σ visada priskiriama tik linijinė įtampa.

Skirtingų elementų ekvivalentinės varžos TJ skaičiavimui apsirašo skirtingai:

Linijai:

$$R = R_0 l k_i; \quad (1.4)$$

$$X = X_0 l k_i; \quad (1.5)$$

čia : R_0, X_0 – savitoji kabelio varža Ω/m ;

Transformatoriui:

$$Z = \frac{U_{TJ}\%}{100} \frac{U_p^2}{S_{TN}}; \quad (1.6)$$

čia : $U_{TJ}\%$ – trumpojo jungimo įtampa, %;

S_{TN} – vardinė transformatoriaus galia, VA;

Varikliui ar generatoriui:

$$X_G = X''_{d*N} \frac{U_p^2}{S_G}; \quad (1.7)$$

čia : X''_{d*N} – trumpalaikė pereinamoji varža, varžų vertės pateiktos [1, p. 135];

S_G – variklio ar generatoriaus vardinė galia, VA;

EVJ varikliui ar generatoriui pradiniu TJ metu:

$$E'' = E''_{*N} \frac{U_p}{\sqrt{3}}; \quad (1.8)$$

čia: E''_{*N} – trumpalaikė pereinamoji elektrovara, V, vertės pateiktos [1, p. 135];

Galingos apkrovos varža:

$$X_A = X''_{d*N(\infty)} \frac{U_p^2}{S_A}; \quad (1.9)$$

čia: $X''_{d*N(\infty)}$ – nusistovėjusio TJ momento varžos vertė, vertės pateiktos [1, p. 135];

S_A – apkrovos galia, VA;

Galingos apkrovos EVJ skaičiuojama taip pat, kaip varikliui ar generatoriui;

Sistemos (elektros tinklo) varža apskaičiuojama tik žinant šynų TJ srovę arba TJ galią:

$$X_S = \frac{U_{vid}}{\sqrt{3} I''} k_i^2 = \frac{U_p^2}{S''}; \quad (1.10)$$

Čia: I'' – sistemos šynų trumpojo jungimo srovė, A;

S'' – sistemos šynų trumpojo jungimo galia, A.

Galingos sistemos varža $X_S = 0$.

1.3 Dvifazio trumpojo jungimo skaičiavimas

Matuokliu, kuriuo lyginame teorinių ir praktinių rezultatų atitikimą (varžų matavimo srityje), galima imituoti tik 2-iejų polių susilietimą arba kitaip tariant, dvifazį arba vienfazį trumpąjį jungimą.

Abu atvejai – vienfazis ir dvifazis trumpieji jungimai priskiriami nesimetriniams trumpiesiems jungimams.

Nesimetriniams trumpiesiems jungimams yra sudaromos trys lygtys, siejančios atskirų sekų sroves, įtampas ir varžas [1], lygtys sudaromos vienai ypatingai fazei, pvz. A fazei:

$$U_{A1} = E_{A1} - jI_{A1}X_1; \quad (1.11)$$

$$U_{A2} = -jI_{A2}X_2; \quad (1.12)$$

$$U_{A0} = -jI_{A0}X_0; \quad (1.13)$$

Tiek nulinėje, tiek atvirkštinėje sekoje elektrovaros neegzistuoja, nes šaltinis generuoja tik simetrinę tiesioginės sekos įtampą.

Visų fazių simetrinių dedamųjų srovių ir įtampų tarpusavio ryšius parodo 9 lygtys, iš kurių galima rasti ir srovę ir įtampą bet kuriame tinklo taške. Tačiau jos turi per daug nežinomųjų, todėl skirtingai tiek dvifaziam, tiek vienfaziam TJ skaičiuoti prisirašo dar 3 lygtys [1]:

Dvifaziam TJ skaičiuoti (ypatingoji fazė : A):

$$I_A = I_{A1} + I_{A2} + I_0;$$

$$I_B = a^2I_{A1} + aI_{A2} + I_0;$$

$$I_C = aI_{A1} + a^2I_{A2} + I_0;$$

$$U_A = U_{A1} + U_{A2} + U_0;$$

$$U_B = a^2U_{A1} + aU_{A2} + U_0; \quad (1.14)$$

$$U_C = aU_{A1} + a^2U_{A2} + U_0;$$

$$I_A^{(2)} = 0;$$

$$I_B^{(2)} = I_C^{(2)};$$

$$U_B^{(2)} = U_C^{(2)};$$

Iš lygčių gauname formules dvifazio TJ skaičiavimui:

$$I_{A1}^{(2)} = -I_{A2}^{(2)}; \quad (1.15)$$

$$I_{A1}^{(2)} = E_{A\Sigma} / [j(X_1 + X_2)]; \quad (1.16)$$

Tačiau dvifazį TJ galima apskaičiuoti ir paprasčiau. Kadangi dvifazio TJ metu nuliniu laidu srovė neteka, o laikydami, kad tarpusavyje fazės yra simetriškos (varžos), praktikoje $I_K^{(2)}$ galima apskaičiuoti iš trifazio TJ srovės reikšmės $I_K^{(3)}$ panaudojant daugiklį α .

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,86; \\ I_K^{(2)} &= I_K^{(3)} \alpha; \end{aligned} \quad (1.17)$$

Vienfazio trumpojo jungimo srovės reikšmę iš trifazio jungimo srovės reikšmės tiesiogiai surasti negalima, nes didelę įtaką daro nulinės sekos varžos, kurios skiriasi nuo tiesioginės ir atvirkštinės sekos varžų reikšmių.

1.4 Vienfazio trumpojo jungimo skaičiavimas

Vienfaziam TJ jungimui skaičiuoti galioja tos pačios taisyklės, kaip ir dvifaziam TJ, nes tai taip pat yra nesimetrinis trumpasis jungimas, kai viena fazė susiliečia su nuliniu laidininku arba žeme.

Devynių lygčių sistema išlieka ta pati kaip ir dvifaziam TJ:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{A1} + I_{A2} + I_0; \\ I_B &= a^2 I_{A1} + a I_{A2} + I_0; \\ I_C &= a I_{A1} + a^2 I_{A2} + I_0; \\ U_A &= U_{A1} + U_{A2} + U_0; \\ U_B &= a^2 U_{A1} + a U_{A2} + U_0; \\ U_C &= a U_{A1} + a^2 U_{A2} + U_0; \end{aligned} \quad (1.18)$$

Tačiau kitos lygtys pasikeičia [1]:

$$\begin{aligned} I_A^{(1)} &= 0; \\ I_B^{(1)} &= 0; \\ I_C^{(1)} &= 0; \end{aligned} \quad (1.19)$$

Iš lygčių gauname formules vienfazio TJ skaičiavimui:

$$I_{A1}^{(1)} = I_{A2}^{(1)} = I_{A0}^{(1)}; \quad (1.20)$$

$$I_{A1}^{(1)} = E_{A\Sigma} / [j(X_1 + X_2 + X_0)]; \quad (1.21)$$

$$I_A^{(1)} = 3I_{A1}^{(1)}; \quad (1.22)$$

Jeigu ekvivalentinės schemos elementų tiesioginės ir atvirkštinės sekų varžos yra vienodos, galima išvesti supaprastintą formulę, pagal kurią ir sudarinėsime matematinį modelį

šiam darbe (taip yra apskaičiuojama periodinė srovės dedamoji, tačiau 0,4kV tinkle, aperiodinė srovės dedamoji užgęsta greičiau, nei matuoklis spėja užfiksuoti):

$$I_A^{(1)} = \sqrt{3}U_N / \sqrt{(2R_{1\Sigma} + R_{0\Sigma})^2 + (2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}; \quad (1.23)$$

Čia:

U_N – vardinė linijinė įtampa tinklo dalies, kurioje įvyko TJ;

$R_{1\Sigma}$ – suminė visų elementų aktyvinė tiesioginės sekos varža;

$R_{0\Sigma}$ – suminė visų elementų aktyvinė nulinės sekos varža;

$X_{1\Sigma}$ – suminė visų elementų reaktyvinė tiesioginės sekos varža;

$X_{0\Sigma}$ – suminė visų elementų reaktyvinė nulinės sekos varža.

1.5 Trumpieji jungimai 1000V įtampos pakopoje

Mūsų atveju trumpuosieji jungimai vykdomi žemos įtampos (iki 1000V) tinkle, todėl trumpai apžvelgsime žemos įtampos trumpųjų jungimų skaičiavimo metodiką[3].

Trumpųjų jungimų srovių skaičiavimo iki 1000 V įtampos elektros įrenginiuose sąlygos:

- TJ skaičiavimo vieta pasirenkama taip, kad tikrinamu aparatu ar laidininku tekėtų didžiausia srovė, t.y. tikrinamosios linijos pradžioje, po tikrinamojo aparato ir pan. ;
- Visi šaltiniai, maitinantieji skaičiuojamąjį TJ tašką, dirba vienu metu vardine galia. Synchroninės mašinos turi automatinius įtampos reguliatorius ir žadinimo forsavimo įtaisus ;
- TJ vyksta tada, kai jo srovė yra didžiausia ir visų šaltinių elektrovarų fazės sutampa ;
- Kiekvienos įtampos tinkle laipto skaičiuojamoji įtampa 5 % didesnė už vardinę ;
- Skaičiuojant TJ srovę, vertinamos induktyviosios ir aktyviosios visų tinklo elementų varžos bei aktyviosios pereinamųjų kontaktų varžos (mūsų atveju pereinamųjų kontaktų varžos nebus, nes matuolio kontaktai stipriai prispaudžiami prie šynų ar kištukinio lizdo gnybtų ;

Šiuo atveju įvertinamos oro ir kabelinių linijų aktyviosios varžos. Be to skaičiuojama jėgos transformatorių apvijų varža, laikoma, kad likusi sistemos dalis yra neriboto galingumo ir todėl garantuojama pastovi įtampa aukštos įtampos pusėje. Atskirų sistemos elementų varžos perskaičiuojamos TJ vietos vardinei įtampai ir surandama trifazio TJ srovės periodinė dedamoji.[3]

$$I_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}\sqrt{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2}}; \quad (1.24)$$

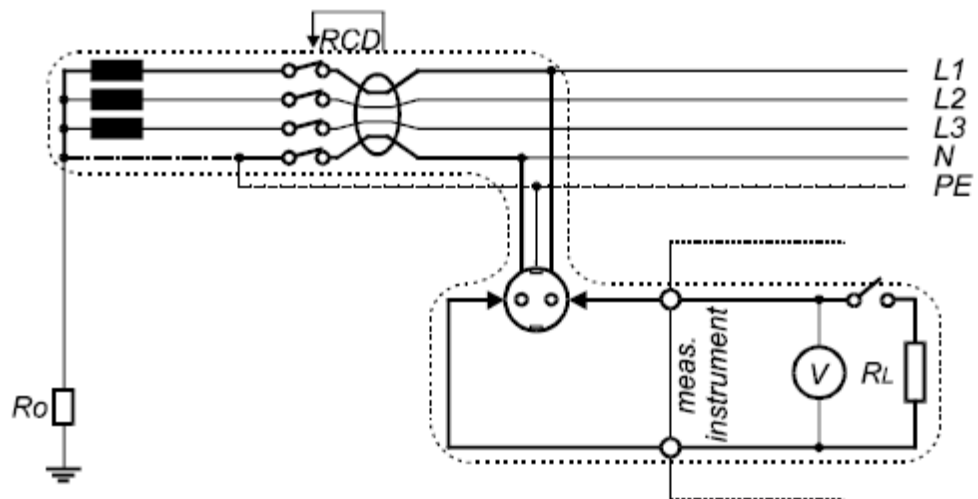
Trumpojo jungimo srovę i_t galima išskaidyti į dvi dedamąsias [1]:

- periodinę (priverstinę) i_{pt} ;
- aperiodinę (laisvąją) i_{at} .

$$i_t = i_{pt} + i_{at}; \quad (1.25)$$

2. MATAVIMO PRIETAISAI

Pastatų elektros instaliacijoje pilnutinės varžos nuo laidininko iki apsaugos aparato TJ metu, matuojamos patikrinti ar teisingai yra parinktas apsaugos aparatas [6, 28.8]. Būtent tam yra atliekami tradiciniai varžų matavimai, iš kurių vienas yra būtent linijos pilnosios varžos matavimas linija tekant trumpojo jungimo srovei. Vis dažniau tokie matavimai reikalaujami atlikti prie tinklo prijungiant galios elektronikos prietaisus, dažniausiai – inverterius arba el. energijos imtuvus, kurių sandaroje yra panaudoti inverteriniai mechanizmai. Taip siekiama išvengti aukštesniųjų harmonikų patekimo į prietaisą. Tai taip pat aktualu ir saulės elektrinių prijungimui. Iš linijos varžos yra apskaičiuojama perspektyvinė (numatomoji) trumpojo jungimo srovė. Pavyzdžiui linijos pilnutinės varžos matavimo tarp fazinio laido ir neutralės T/N sistemoje schema pateikta 2.1. pav.:



2.1 pav. Linijos pilnosios varžos matavimo principinė schema

Matavimams gali būti naudojami tik sertifikuoti Lietuvoje prietaisai, kuriems yra atlikta metrologinė patikra. Vienas tokių, kurį naudosime palyginti teorinį linijos varžos apskaičiavimą su realiu matavimu yra Metrel Eurotest 61557 (žr. 2.2 pav).



2.2 pav. Matavimo prietaisas [www.metrel.si]

Pilnosios kilpos varžos matavimo funkcija yra apribota atitinkamomis matavimo vertėmis:

minimali įtampa – 100V;

minimali matavimo pilnoji varža $Z - 0,11 \Omega$.

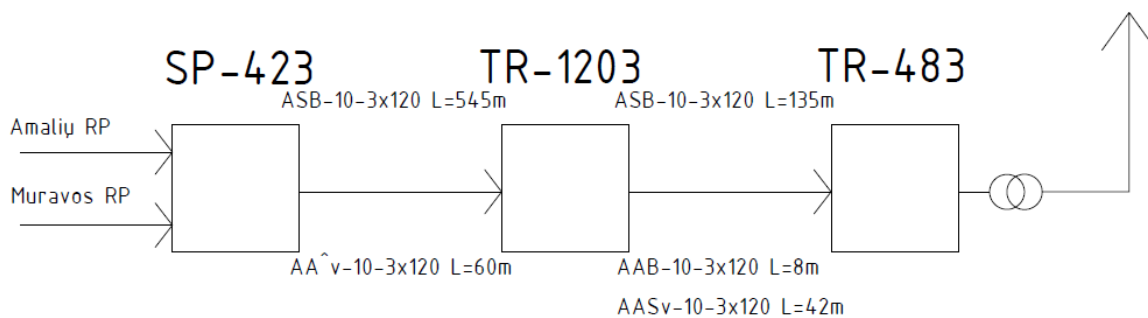
Matavimai atliekami 2015-09/2016-05 periodu. Metrologinės patikros lapas prisegamas prieduose. Šis prietaisas matuoja tik linijos varžą Z_l ir pagal ją apskaičiuoja numatomą trumpojo jungimo srovę I_k [4]:

$$I_k = 1,06 U/Z_l; \quad (2.1)$$

Problema yra ta, kad skaičiuojant trumpuosius jungimus dažnai gaunamos itin didelės srovės, tačiau matuojant su matuokliu, tinklo varžos yra gana didelės, kas įtakoja ir mažas trumpojo jungimo sroves. Todėl šio darbo tikslas yra patikrinti ar skaičiuojamieji rezultatai atitinka išmatuotus ir jei ne, kas įtakoja rezultatų skirtumus.

3. TINKLO SCHEMA

Bandymai atliekami Kauno Technologijos Universiteto Elektros ir Elektronikos inžinerijos fakulteto laboratorijoje, adresu Studentų g. 48, Kaunas. Fakultete stovi transformatorinė 10/0,4kV Nr. TR-483 (žr. priedus), TR-483 yra prijungta prie TR – 1203 (žr. priedus), o TR- 1203 yra prijungta prie SP-423 (žr. priedus), kuri turi dvipusį maitinimą iš 110kV Amalių ir Muravos transformatorinių pastočių. Blokinė principinė transformatorinių pastočių tarpusavio sujungimo ir tiekimo schema pateikta 3.1. pav.



3.1 Pav. Blokinė elektros energijos tiekimo schema

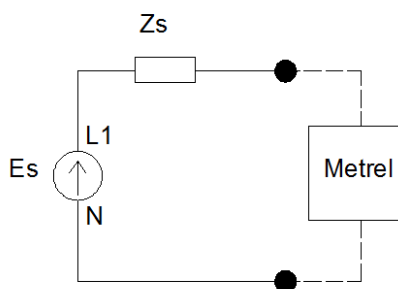
4. EKSPERIMENTAS PIRMOJOJE LABORATORIJOJE

4.1. Bandymas

Atliekamas eksperimentas, norint įvertinti matuoklio tikslumą į tinklą įvedinėjant tiek induktyvines, tiek aktyvines varžas ir stebint bendros varžos kitimą. Varžų vertės yra žinomos.

Naudojamos 3 skirtingos induktyvinės ritės: Д26, ОД56, Д69.

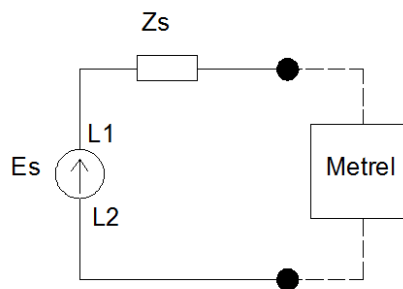
1-uojų bandymu matuojama tinklo varža laboratorijos kištukiniame lizde tarp L1 ir N kontaktų (žr. 4.1. pav.)



4.1 pav. 1-ojo bandymo schema

Išmatuotos varžų vertės: $R=0,65\Omega$; $X=0,13\Omega$; $Z=0,66\Omega$; $I_{kpersp.}=367A$

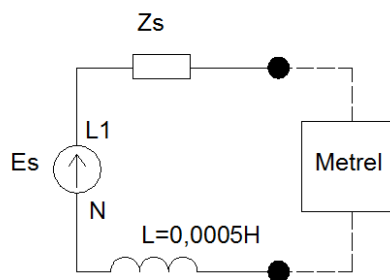
2-uojų bandymu matuojama tinklo varža laboratorijos kištukiniame lizde tarp L1 ir L2 kontaktų (žr. 4.2. pav.)



4.2 pav. 2-ojo bandymo chema

Toliau visuose bandymuose varžos matuojamos tarp L1 ir N kištukinio lizdo kontaktų.

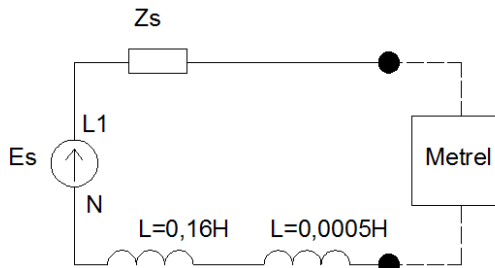
3-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos induktyvinės OCД56 (0,0005H) ritės varža (žr. 4.3. pav.)



4.3 pav. 3-iojo ir 4-ojo bandymų schema

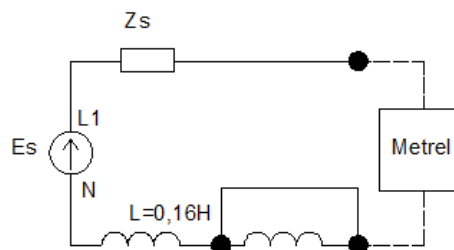
4-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos induktyvinės OCД56 (0,0005H) ritės varža antrą kartą matavimų kitimui pamatyti (žr. 4.3. pav.)

5-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtų induktyvinių OCД56 (0,0005H) ir Д26 (0,16H) ričių varža (žr. 4.4. pav.)



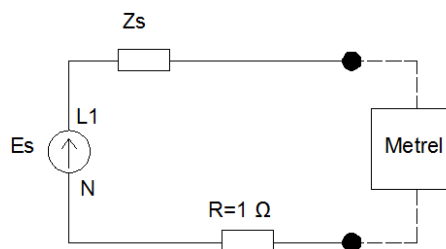
4.4 pav. 5-ojo bandymo schema

6-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos induktyvinės Д26 (0,16H) ritės varža (žr. 4.5. pav.)



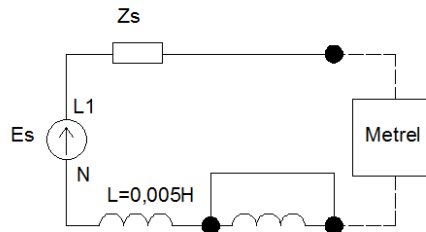
4.5 pav. 6-ojo bandymo schema

7-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos aktyvinės 1 Ω varžos varža (žr. 4.6. pav.)



4.6 pav. 7-ojo bandymo schema

8-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos induktyvinės Д69 (0,005H) ritės varža (žr. 4.7. pav.)



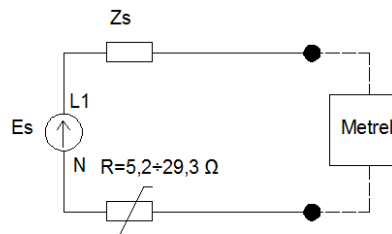
4.7 pav. 8-ojo bandymo schema

9-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtų induktyvinių ОСД56 r Д26 ir ОСД 56 ričių varža (žr. 4.8. pav.)



4.8 pav. 9-ojo bandymo schema

10-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos aktyvinės 5,2 Ω varžos varža (žr. 4.9. pav.)



4.9 pav. 10, 11, 12, 13 bandymų schema

11-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos aktyvinės 9 Ω varžos varža (žr. 4.9. pav.)

12-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos aktyvinės 19,5 Ω varžos varža (žr. 4.9. pav.)

13-uoju bandymu matuojama suminė tinklo ir prijungtos aktyvinės 29,3 Ω varžos varža (žr. 4.9. pav.)

4.1 lentelė. Bandymų rezultatai

Bandymo Nr.	Matuojamos grandinės (kilpos) pavadinimas	R, Ω	X, Ω	Z, Ω	I_{TJ}, A
1	Laboratorija be papildomų apkrovų tarp kontaktų L1-N	0,65	0,13	0,66	367
2	Laboratorija be papildomų apkrovų tarp kontaktų L1-L2	0,69	0,10	0,7	602
3	Laboratorija (toliau LAB) prijungus OCД56 induktyvinę ritę tarp kontaktų L1-N	0,76	0,36	0,76	320
4	-//- (3)	0,69	0,35	0,78	312
5	LAB prijungus Д26+ OCД56	0,72	0,94	1,19	305
6	LAB prijungus Д26	0,69	0,67	0,96	252
7	LAB prijungus 1 Ω	1,61	0,11	0,11	150
8	LAB prijungus Д69	0,78	2,29	2,42	100
9	LAB prijungus Д26 + OCД56 + Д69	0,87	2,87	3,00	81,0
10	LAB prijungus 5,2 Ω varža aktyvine	7,1	0,18	7,11	34,2
11	LAB prijungus 9 Ω aktyvine varža	10,8	0,30	10,84	22,4
12	LAB prijungus 19,5 Ω	20,9	0,36	20,9	11,6
13	LAB prijungus 29,3 Ω	30,9	0,58	30,9	7,88

4.2. Rezultatų palyginimas, apskaičiuojant varžas teoriniu būdu

Gautoji pilnoji tinklo varža iki laboratorijos kištukinio lizdo be papildomų apkrovų, kilpoje L1-N: $Z_0=0,66\Omega$;

$$Z_{Д26} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} = \sqrt{0^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0,16)^2} = 50,24\Omega \quad (4.1)$$

$$Z_{OCД56} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} = \sqrt{0^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0,0005)^2} = 0,16\Omega \quad (4.2)$$

$$Z_{Д69} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} = \sqrt{0^2 + (2\pi \cdot 50 \cdot 0,005)^2} = 1,57\Omega \quad (4.3)$$

Apskaičiuojame gautus varžų skirtumus ΔZ , gautus matuojant:

Prijungus OCД56 induktyvinę ritę, varžos pokytis:

$$\Delta Z_{OCД56} = Z_{3band} - Z_0 = 0,78 - 0,66 = 0,12 \approx Z_{OCД56} \quad (4.4)$$

Prijungus Д26 induktyvinę ritę, varžos pokytis:

$$\Delta Z_{Д26} = Z_{6band} - Z_0 = 0,96 - 0,66 = 0,30\Omega \neq Z_{Д26} \quad (4.5)$$

Prijungus Д69 induktyvinę ritę, varžos pokytis:

$$\Delta Z_{D69} = Z_{8band} - Z_0 = 2,42 - 0,66 = 1,76\Omega \approx Z_{D69} \quad (4.6)$$

Prijungus aktyvinę 19,5Ω varžą, varžos pokytis:

$$\Delta Z_{19,5\Omega} = Z_{12band} - Z_0 = 20,9 - 0,66 = 20,24\Omega \approx 19,5\Omega \quad (4.7)$$

Matavimo paklaidos [5]:

$$\delta_{OC_{D56}} \% = 25\%;$$

$\delta_{D26} \% = 16646\%$; Darome išvada, jog ant induktyvinės ritės užrašyta markė buvo klaidinga .

$$\delta_{D69} \% = 11\%;$$

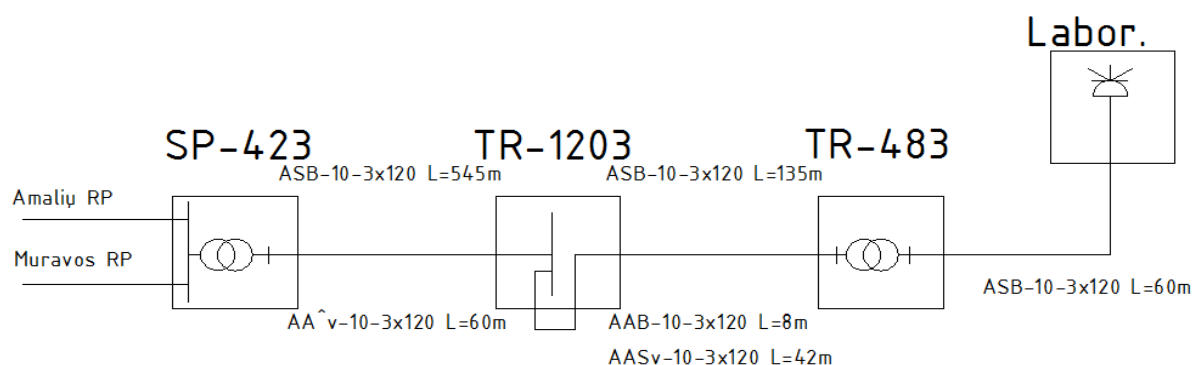
$$\delta_{19,5\Omega} \% = 4\%.$$

Išvada. Darant prielaidą, kad D26 ritė buvo nekokybiška, matavimai atitinka teorinius rezultatus pakankamu tikslumu, nes metrologinės patikros leidžiama didžiausia paklaidos reikšmė yra ne daugiau 30%.

5. TRUMPOJO JUNGIMO SIMULIACIJA PROGRAMA „SIMULINK“

Antrasis bandymas atliekamas tiksliai žinant tinklo schemą, 0,4kV tinkle, naujai atvestame įvade į fakulteto laboratoriją tiesiogiai nuo transformatoriaus. Vykdoma simuliacija trumpojo jungimo, kai matuojama varža tarp laboratorijos, iki kurios ateina tiesioginis įvadas nuo transformatorinės, šynų tarp fazė-nulis ir fazė-fazė kontaktų ir numatoma perspektyvinė vienfazio trumpojo jungimo srovė (matuokliu). Įvadinis kabelis, nutiestas nuo transformatoriaus apvijų sujungimo gnybtų iki laboratorijos jėgos spintos šynų – 4x120mm² Al.

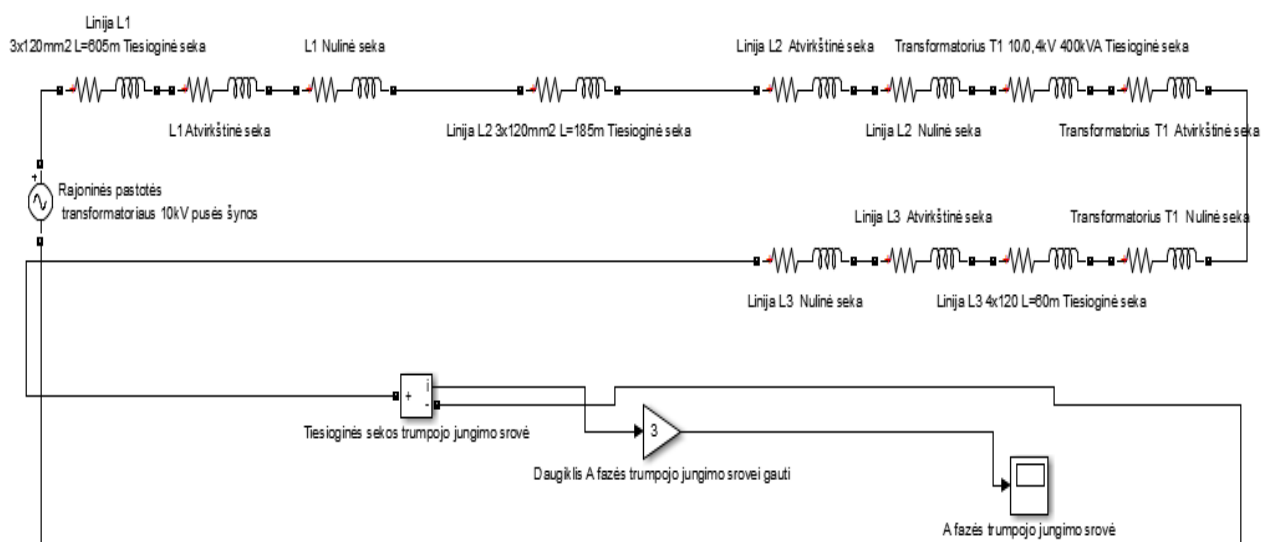
Skaiciuojama vienfazio TJ ir dvifazio TJ srovė, tada jos palyginamos tarpusavyje ir su išmatuotomis vertėmis laboratorijoje. Principinė tinklo schema pateikta 5.1 pav.



5.1 pav. Principinė nagrinėjamo tinklo schema

5.1 Vienfazis trumpasis jungimas

Programa „Matlab/Simulink“ sudarome ekvivalentinę schemą vienfazio trumpojo jungimo srovės skaičiavimui:



5.2 pav. Ekvivalentinė schema programoje „Matlab“

Pradėsime nuo varžų dedamųjų suradimo.

Skaičiavimai vykdomi 0,4kV įtampos pakopoje. Varžos, nesančios 0,4 kV pusėje, perskaičiuojamos 0,4kV lygmeniui panaudojant koeficientą k_i .

Tinklo sistemos varžą priimame lygią 0, nes lyginant su mūsų likusia sistema, ji yra nykstamai maža. Taigi Z , esanti rajoninės pastotės 110kV pusėje = 0. Todėl jos schemoje ir nematome.

Pradedame nuo linijos L1.

Linijos ilgis $l=605m$. Nutiestas kabelis : 3x120 Al.

Savitosios kabelio varžos [7] : Tiesioginė: $R_{10}=0,36 \Omega/km$; $X_{10}=0,09 \Omega/km$

Atvirkštinė: $R_{20}=0,36 \Omega/km$; $X_{20}=0,09 \Omega/km$

Nulinė: $R_{00}=0$, nes 10kV linijoje, nėra nei nulinio laido, nei įžeminimo, o nulinės sekos srovės, grįžtančios per žemę galime nepaisyti, nes ji taip pat nykstamai maža.

Kadangi trumpojo jungimo srovės simuliacija atliekama programa „Simulink“, todėl yra reikalingos kabelinės linijos aktyvinė varža Ω ir induktyvumas H kiekvienai sekai atskirai.

Linijos varžos:

$$R_1 = l R_{10} = 0,217 \Omega; \quad (5.1)$$

$$R_2 = l R_{20} = 0,2178 \Omega; \quad (5.2)$$

$$R_0 = l R_{00} = 0. \quad (5.3)$$

$$X_1 = l X_{10} = 0,0575 \Omega; \quad (5.4)$$

$$X_2 = l X_{20} = 0,0575 \Omega; \quad (5.5)$$

$$X_0 = l X_{00} = 0. \quad (5.6)$$

Čia: l – linijos ilgis, m

R_{10} , X_{00} – atitinkamai savitoji kabelio tiesoginės sekos aktyvinė ir nulinės sekos reaktyvinė varžos.

$$X = 2\pi f L; \quad (5.7)$$

$$L = \frac{X}{2\pi f}; \quad (5.8)$$

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi f} = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{H} \quad (5.9)$$

$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi f} = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{H} \quad (5.10)$$

$$L_0 = \frac{X_0}{2\pi f} = 0; \quad (5.11)$$

Perskaičiuojame varžas pasirinktai įtampos pakopai (šiuo atveju iš 10kV į 0,4kV):

Pagal formules:

$$R_{L1;2;3} = R_{1;2;3} \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2; \quad (5.12)$$

$$X_{L1;2;3} = X_{1;2;3} \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2, \quad (5.13)$$

kur: $R_{1;2;3}$, $X_{1;2;3}$ – linijos varža, Ω ;

U_p – pasirinktos įtampos pakopos įtampa, V;

U_{vid} – tikroji šakos įtampa, V.

Aktyvinės linijos varžos perskaičiuojamos paprastai pagal (5.12) formulę:

$$R_{L1} = R_1 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 3,485 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.14)$$

$$R_{L2} = R_2 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 3,485 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.15)$$

$$R_{L0} = R_0 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 0; \quad (5.16)$$

Induktyvumui perskaičiuoti gauname kitą formulę:

$$2\pi f L_L = 2\pi f L_{1;2;3} \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2; \quad (5.17)$$

$$L_1 = L_1 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 2,929 \cdot 10^{-7} \text{H}; \quad (5.18)$$

$$L_2 = L_2 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 2,929 \cdot 10^{-7} \text{H}; \quad (5.19)$$

$$L_0 = L_0 \left(\frac{U_p}{U_{vid}} \right)^2 = 0. \quad (5.20)$$

Programa „Matlab“ sudarome kodą, tinkantį apskaičiuoti linijų sekų varžas ir induktyvumus bet kokiai įtampos pakopai žinant tik linijos ilgį, įtampą ir savitąsias varžas. Taip pagreitinsime kitų schemos varžų dedamųjų radimą.

{clc

Linijos ilgis, m

l=605

Savitoji aktyvinė varža, Ω /km

R0=0.36

Savitoji reaktyvinė varža, Ω /km

X0=0.095

Pasirinkta įtampos pakopa, V

Up=400

Tikroji linijos pakopa, V

Uvid=10000

Linijos varža ohm

$$R_p = R_0 * l / 1000; \quad (5.21)$$

$$X_p = X_0 * l / 1000; \quad (5.22)$$

Induktyvumas, H

$$L_p = X_p / (314); \quad (5.23)$$

Perskaičiavimas pasirinktai įtampos pakopai, Ω

$$R = R_p * (U_p / U_{vid})^2 \quad (5.24)$$

$$L = L_p * (U_p / U_{vid})^2 \quad (5.25)$$

Taigi pirmosios linijos L1 varžos-induktyvumai–sekų dedamosios:

$$R_{L11} = 3,485 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L12} = 3,485 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L10} = 0;$$

$$L_{L11} = 2,929 \cdot 10^{-7} \text{H};$$

$$L_{L12} = 2,929 \cdot 10^{-7} \text{H};$$

$$L_{L10} = 0$$

Linija L2 yra nutiesta tokiu pačiu kabeliu: 3x120Al. Skiriasi tik jos ilgis, bet savitosios varžos yra tokios pačios, nulinės sekos nėra, nes linija veikia 10 kV įtampoje. Todėl varžas perskaičiuojame tik dėl linijos ilgio programa „Matlab“:

$$R_{L21} = 1,066 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L22} = 1,066 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L20} = 0;$$

$$L_{L21} = 8,955 \cdot 10^{-8} \text{H};$$

$$L_{L22} = 8,955 \cdot 10^{-8} \text{H};$$

$$L_{L20} = 0.$$

Toliau trumpojo jungimo skaičiavimo schemoje yra prijungtas transformatorius. Tačiau jam lygiagrečiai yra prijungtas antras transformatorius, todėl skaičiuosime 3-is variantus:

1) veikia tik 1-asis transformatorius (sekcijinis jungtuvas išjungtas).

Transformatoriaus T-1 techniniai parametrai:

Modelis: TM400/10

Vardinė galia: 400kVA;

Apvijų jungimo būdas: Y/Y₀.

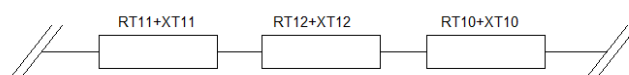
Remiantis {[1] 8.4.2 lent.}, šio transformatoriaus tiesioginės sekos varža, perskaičiuota 0,4kV pusėje $R_{T11}=5,7 \text{ m}\Omega$ ir $X_{T11}=17 \text{ m}\Omega$, nulinės sekos varža, perskaičiuota 0,4kV pusėje atitinkamai $R_{T10}=70 \text{ m}\Omega$ ir $X_{T10}=190 \text{ m}\Omega$.

Mums tereikia iš induktyviosios varžos rasti induktyvumą vertes, kurias reikės suvesti į programą „Matlab“, nes atvirkštinės sekos varža lygi tiesioginės sekos: $R_{T12} = R_{T11}=5,7 \text{ m}\Omega$ ir $X_{T12} = X_{T11}=17 \text{ m}\Omega$

$$L_{T11} = L_{T12} = \frac{X_{T11}}{2\pi f} = 5,414 \cdot 10^{-5} \text{H}; \quad (5.26)$$

$$L_{T10} = \frac{X_{T10}}{2\pi f} = 3,051 \cdot 10^{-4} \text{H}. \quad (5.27)$$

Principinė Transformatoriaus dalies schema trumpojo jungimo skaičiavimo schemoje:



5.3 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T1

2) veikia 2-asis transformatorius (sekcijinis jungtuvas išjungtas). Transformatoriaus

T-2 techniniai parametrai:

Modelis: TSMA320/10;

Vardinė galia: 320kVA;

Apvijų jungimo būdas: Y/Y0.

Remiantis [1, 8.4.2 lent.], šio transformatoriaus tiesioginės sekos varža, perskaičiuota 0,4kV pusėje $R_{T21}=7,55 \text{ m}\Omega$ ir $X_{T21}=21,7 \text{ m}\Omega$,

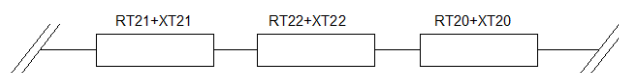
nulinės sekos varža, perskaičiuota 0,4kV pusėje atitinkamai $R_{T20}=83 \text{ m}\Omega$ ir $X_{T20}=211,5 \text{ m}\Omega$. (tikslios vertės nėra pateiktos, tad imamas aritmetinis vidurkis tarp 400kVA ir 250kVA transformatorių varžų verčių).

$$R_{T22} = R_{T21}=7,55 \text{ m}\Omega;$$

$$L_{T21} = L_{T22} = \frac{X_{T21}}{2\pi f} = 6,911 \cdot 10^{-5} \text{H}; \quad (5.28)$$

$$L_{T20} = \frac{X_{T21}}{2\pi f} = 6,736 \cdot 10^{-4} \text{H}. \quad (5.29)$$

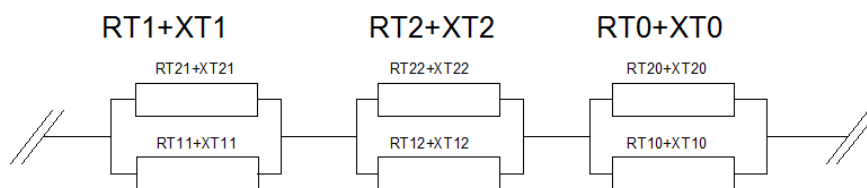
Principinė Transformatoriaus dalies schema trumpojo jungimo skaičiavimo schemeje:



5.4 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T2

3) veikia abu transformatoriai (sekcijinis jungtuvas įjungtas)

Tokiu atveju, varžos yra sujungtos lygiagrečiai, vertės jau apskaičiuotos, tik reikia suskaičiuoti atstojamasias varžas pagal schemą:



5.5 pav. Ekvivalentinės TJ skaičiavimo schemos dalis T, kai veikia tik T1 ir T2

Tada :

$$R_{T1} = \frac{R_{T11}R_{T21}}{R_{T11}+R_{T21}} = \frac{5,7 \cdot 7,55}{5,7+7,55}=3,248 \text{ m}\Omega; \quad (5.30)$$

$$R_{T2} = \frac{R_{T12}R_{T22}}{R_{T12}+R_{T22}} = \frac{5,7 \cdot 7,55}{5,7+7,55}=3,248 \text{ m}\Omega; \quad (5.31)$$

$$R_{T0} = \frac{R_{T10}R_{T20}}{R_{T10}+R_{T20}} = \frac{70 \cdot 83}{70+83} = 37,974 \text{ m}\Omega; \quad (5.32)$$

$$X_{T1} = \frac{X_{T11}X_{T21}}{X_{T11}+X_{T21}} = \frac{17 \cdot 21,7}{17+21,7} = 9,532 \text{ m}\Omega; \quad (5.33)$$

$$X_{T2} = \frac{X_{T12}X_{T22}}{X_{T12}+X_{T22}} = \frac{17 \cdot 21,7}{17+21,7} = 9,532 \text{ m}\Omega; \quad (5.34)$$

$$X_{T0} = \frac{X_{T10}X_{T20}}{X_{T10}+X_{T20}} = \frac{190 \cdot 211,5}{190+211,5} = 100,087 \text{ m}\Omega; \quad (5.35)$$

$$L_{T1} = L_{T2} = \frac{X_{T1}}{2\pi f} = 0,03 \text{ mH}; \quad (5.36)$$

$$L_{T0} = \frac{X_{T0}}{2\pi f} = 0,319 \text{ mH}; \quad (5.37)$$

Tolimesnė grandis trumpojo jungimo scheme – linija L3. Linija veikia jau 0,4 kV pusėje. Liniją sudaro 4x120mm² 60m aliuminis kabelis, kurio savitosios sekų varžos yra:

Tiesioginė seka: $R_{10}=0,36 \text{ }\Omega/\text{km}$; $X_{10}=0,09 \text{ }\Omega/\text{km}$

Atvirkštinė seka: $R_{20}=0,36 \text{ }\Omega/\text{km}$; $X_{20}=0,09 \text{ }\Omega/\text{km}$

Nulinės sekos reikšmės gaunamos pagal grafiką [1, P5]. Grafikas parodo santykį $\frac{R(X)_{00}}{R(X)_{10}}$, t.y. kiek kartų nulinės sekos varža atitinkamo skerspjuvio ir medžiagos kabeliui didesnė, nei tiesioginės sekos varža. Šiuo atveju:

$\frac{R_{00}}{R_{10}}=4$; $\frac{X_{00}}{X_{10}}=3,8$. Priimama sąlyga, kad srovė TJ metu grįžta į šaltinį tik kabelio neutrale.

Tada:

Nulinė : $R_{00}=1,44 \text{ }\Omega/\text{km}$; $X_{00}=0,342 \text{ }\Omega/\text{km}$

Programa „Matlab“ suskaičiuojame vertes:

$$R_{L31} = 0,0216 \text{ }\Omega;$$

$$R_{L32} = 0,0216 \text{ }\Omega;$$

$$R_{L30} = 0,086 \text{ }\Omega;$$

$$L_{L31} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ H};$$

$$L_{L32} = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ H};$$

$$L_{L30} = 6,535 \cdot 10^{-5} \text{ H}.$$

Ekvivalentinė elektrovara:

$$E = E'' \cdot \frac{U_p}{\sqrt{3}} = 230 \text{ V}; \quad (5.40)$$

Programoje „Matlab“ elektrovaros vertė turi būti įrašyta amplitudinė, todėl :

$$E_{AMPL} = E\sqrt{2} = 326,6 \text{ V}; \quad (5.41)$$

Suradus visas elementų sekų varžas galime apskaičiuoti trumpojo jungimo srovę. Kadangi netoli trumpojo jungimo taško neturime veikiančių galingų variklių, schema

supaprastinta, prasideda nuo šaltinio ir nuosekliai yra jungiamos varžos, esančios iki trumpojo jungimo vietos.

Gauname Tiesioginės sekos A fazės srovę:

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{E}{[(R_{L11} + jX_{L11}) + (R_{L12} + jX_{L12}) + (R_{L10} + jX_{L10})] + [(R_{L21} + jX_{L21}) + (R_{L22} + jX_{L22}) + (R_{L20} + jX_{L20})] + [(R_{T1} + jX_{T1}) + (R_{T2} + jX_{T2}) + (R_{T0} + jX_{T0})] + [(R_{L31} + jX_{L31}) + (R_{L32} + jX_{L32}) + (R_{L30} + jX_{L30})]} \quad (5.42)$$

Tada randame tikrąją vienfazio trumpojo jungimo A fazės srovę:

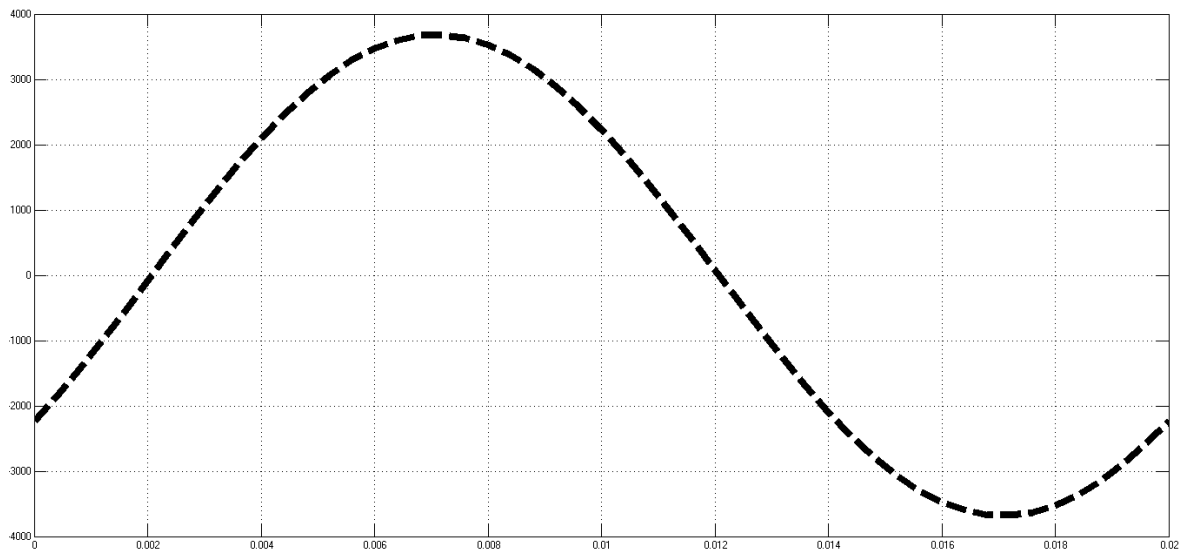
$$I_A^{(1)} = 3I_{A1}^{(1)}; \quad (5.43)$$

Kaip ir skaičiuojant transformatorių varžas, trumpojo jungimo srovę skaičiuosime trim atvejais:

1) Veikia, tik T1 transformatorius:

$$I_{A1}^{(1)} = 3I_{A11}^{(1)}; \quad (5.44)$$

Trumpojo jungimo srovės oscilograma be pereinamojo proceso:

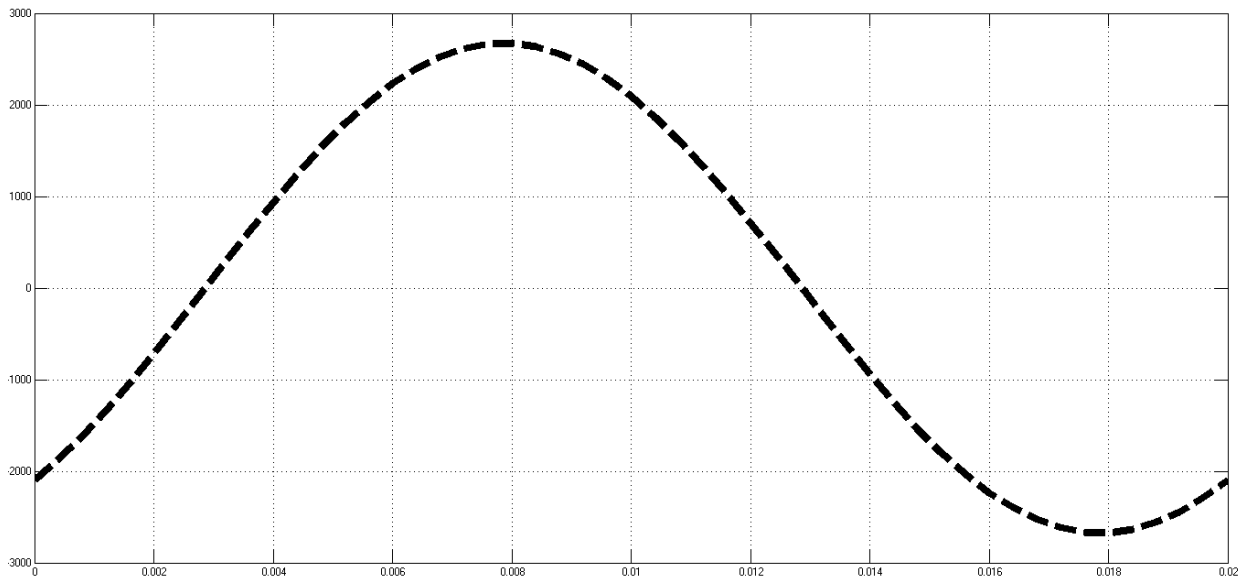


5.6 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia tik T1

$$I_{A1}^{(1)} = \frac{I_{A1}^{(1)A}}{\sqrt{2}} = \frac{3700}{\sqrt{2}} = 2605 \text{ A}; \quad (5.45)$$

$$Z_{linijos} = \frac{U}{I_{A1}^{(1)}} = \frac{230}{2605} = 0,088 \ \Omega \quad (5.46)$$

2) Veikia, tik T2 transformatorius:



5.7 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia tik T2

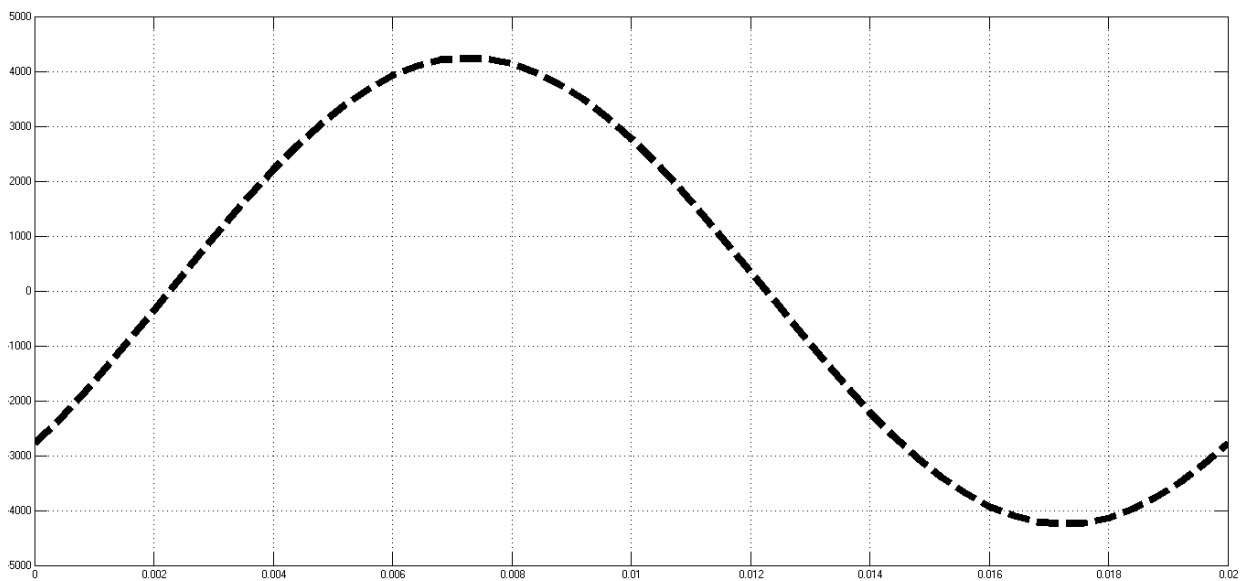
$$I_{A2}^{(1)} = \frac{I_{A2}^{(1)A}}{\sqrt{2}} = \frac{2700}{\sqrt{2}} = 1901 \text{ A}; \quad (5.47)$$

$$Z_{linijos} = \frac{U}{I_{A2}^{(1)}} = \frac{230}{1901} = 0,12 \ \Omega; \quad (5.48)$$

3) Veikia, T1 ir T2 transformatoriai:

$$I_{A3}^{(1)} = 3I_{A13}^{(1)}; \quad (5.49)$$

Oscilogramos simuliacija:



5.8 pav. Trumpojo jungimo srovės oscilograma, kai veikia T1 ir T2

$$I_{A2}^{(1)} = \frac{I_{A2}^{(1)A}}{\sqrt{2}} = \frac{4150}{\sqrt{2}} = 2922 \text{ A}; \quad (5.50)$$

$$Z_{linijos} = \frac{U}{I_{A2}^{(1)}} = \frac{230}{2922} = 0,079 \text{ } \Omega; \quad (5.51)$$

Egzistuoja tikimybė, kad transformatorinėje yra įjungtas sekcijinis kirtiklis, todėl palyginsime trečiąjį variantą su matavimais, atliktais laboratorijoje (žr. 5.1 lent.).

Matavimai laboratorijoje:

5.1 lentelė. Vienfazio TJ matavimo rezultatai

Bandymo Nr.	Matuojamos grandinės (kilpos) pavadinimas	R, Ω	X, Ω	Z, Ω	I _K , A
1	Laboratorija be papildomų varžų L1-N	0,65	0,13	0,66	367

Matavimo metu laboratorijoje išmatuota pilnoji linijos varža $Z=0,66 \text{ } \Omega$.

Apskaičiuotoji varža $Z_{linijos} = 0,079 \text{ } \Omega$;

Tada varža viso laidyno, esančio tarp laboratorijos kišt. lizdo ir tiesioginio įvado nuo transformatorinės yra:

$$Z_{tarp.linijaL1-N} = Z - Z_{linijos} = 0,66 - 0,079 = 0,581 \text{ } \Omega; \quad (5.52)$$

Darant prielaidą, jog tarpinius kabelius sudaro tik vienas 3x2,5mm² varinis kabelis, kurio 1m varža R_0 yra 0,0074 Ω, tokio kabelio ilgis turėtų būti:

$$l = \frac{Z_{tarp.linija}}{R_0} = \frac{0,581}{0,0074} = 78,51\text{m}. \quad (5.53)$$

Toks kabelio ilgis yra labai tikėtinas, ir galima teigti, kad matavimai ir skaičiavimai sutampa. Tačiau, kad tuo įsitikinti reikia padaryti matavimus ant tiesioginio įvado gnybtų.

5.2 Dvifazis trumpasis jungimas

Bandymas atliekamas analogiškai, kaip ir 5.1 skyriuje, skirtumas yra tik tas, kad matuojama tinklo varža (modeliuojama programa „Matlab“ tarp L1 ir L2 kontaktų, arba kitaip variant, nustatinėjama dvifazio trumpojo jungimo srovė).

Modeliuojant dvifazio trumpojo jungimo srovę yra nevertinama nulinės sekos varža, nes dvifazio trumpojo jungimo metu, srovė negrįžta nei per nulį laidininką nei žeme. Vien dėl šio skirtumo ženkliai padidėja trumpojo jungimo srovė, nes didelę dalį varžų sudaro būtent nulinės sekos varžos (Ypatingai, jei schemeje yra transformatorių su įžemintomis neutralėmis, arba daug keturlaidžių tinklų). Jei trumpojo jungimo principinę schemą sudarytų vien 10kV kabeliai ar oro

linijos (trilaidės linijos), dvifazio ir vienfazio trumpojo jungimo srovės skirtūsi minimaliai, nes srovė, grįžtanti per žemę arba kabelio ekranu yra tokia maža, kad nulinės sekos varža tokiems elementams skaičiavimuose nėra net vertinama [2].

Mūsų atveju srovė turėtų padidėti žymiai, nes turime tiek transformatorių T1/T2, kurio apvijos sujungtos Y/Y₀, t.y. 0,4kV pusėje jo neutralė įžeminta ir nulinės sekos varža yra daug didesnė nei tiesioginės ir atvirkštinės. Taip pat turime keturlaidę liniją 0,4kV pusėje. Tokios linijos nulinės sekos varža taip pat didesnė už tiesioginės ar atvirkštinės sekos varžas 3-4 kartus.

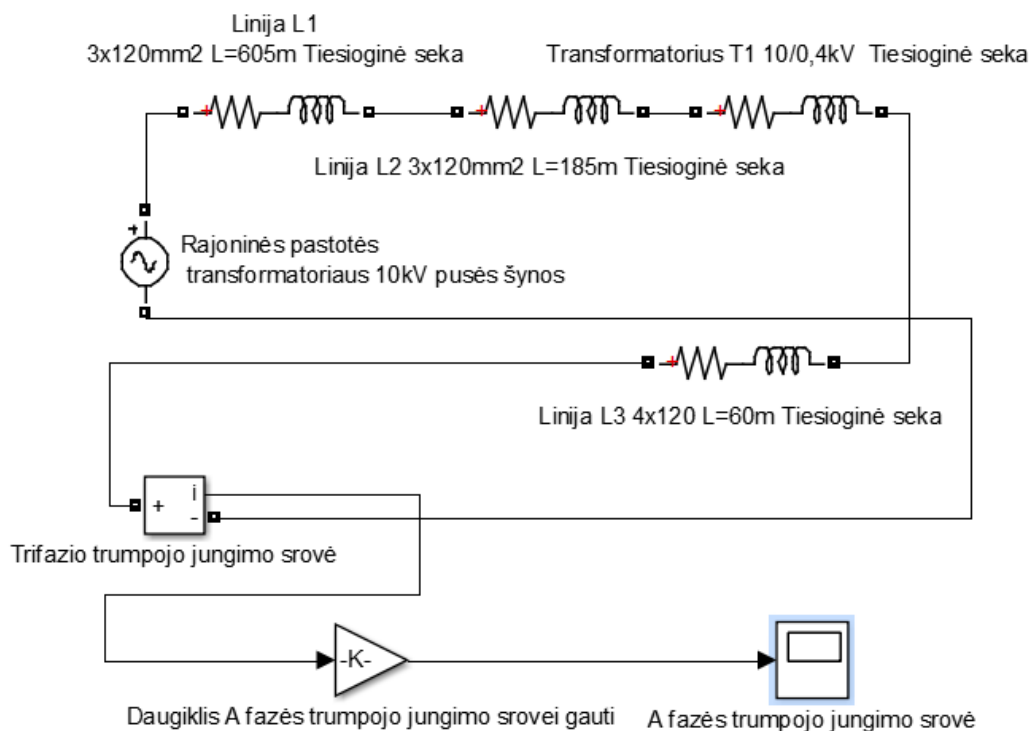
Modeliuojame schemą 3-iam atvejui, kai transformatorinėje, esančioje šalia fakulteto, sekcijinis jungtuvas(kirtiklis) yra įjungtas ir transformatoriai T1 ir T2 yra sulygiagretinti.

Modeliuojame trifazį TJ, o tada padauginsime TJ srovę $I_K^{(3)}$ iš daugiklio $\alpha = 0,86$.

Modelio schema ir EVJ(žr. 5.7 pav):

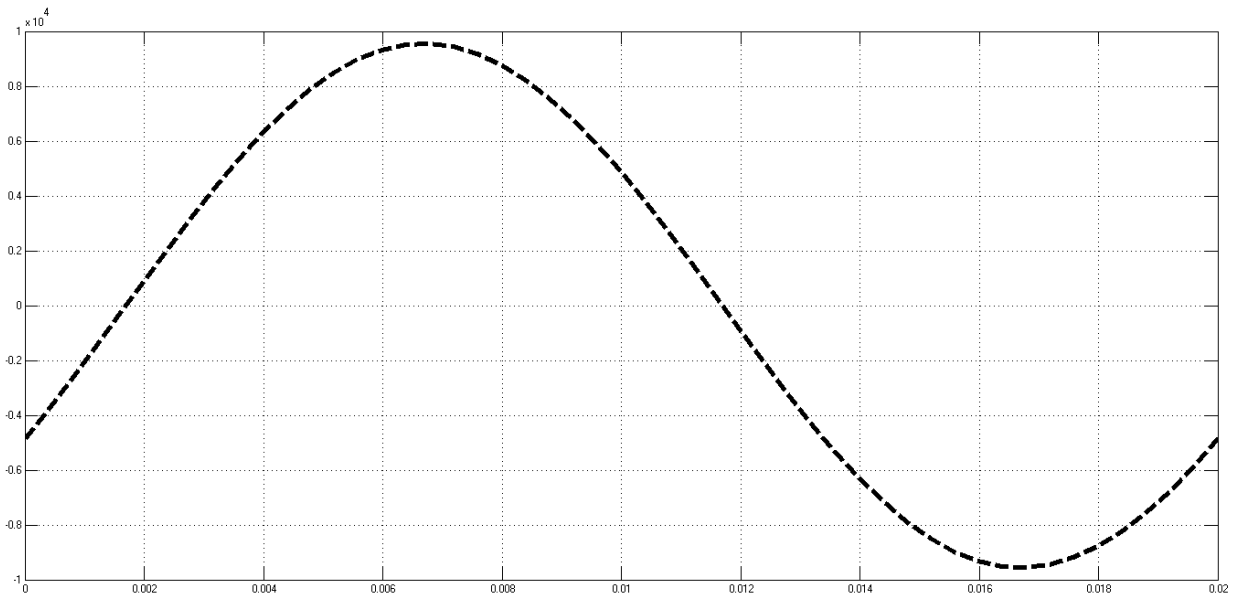
$$E = \frac{U_p}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230V; \quad (5.54)$$

$$E_{AMPL} = E\sqrt{2} = 326,6V; \quad (5.55)$$



5.9 pav. Dvifazio TJ schema programoje „Matlab“

Sumodeliuota oscilograma – dvifazio trumpojo jungimo srovė:



5.10 pav. Dvifazio trumpojo jungimo srovės oscilograma

$$I_{L1-L2}^{(K2)} = \frac{I_{L1-L2}^{(K2)A}}{\sqrt{2}} = \frac{9580}{\sqrt{2}} = 6746,5 \text{ A}; \quad (5.56)$$

$$Z_{linijos} = \frac{U}{I_{L1-L2}^{(K2)}} = \frac{400}{6746,5} = 0,059 \text{ } \Omega; \quad (5.57)$$

Palyginame matuotą varžą tarp L1-L2 kontaktų laboratorijoje:

5.2 lentelė. Dvifazio TJ matavimo rezultatai

Bandymo Nr.	Matuojamos grandinės (kilpos) pavadinimas	R, Ω	X, Ω	Z, Ω	I _K , A
2	Laboratorija be papildomų apkrovų L1-L2	0,69	0,1	0,7	602

Matavimo metu laboratorijoje išmatuota pilnoji linijos varža $Z=0,7 \text{ } \Omega$.

Apskaičiuotoji varža $Z_{linijos} = 0,059 \text{ } \Omega$;

$$Z_{tarp.linijaL1-L2} = Z - Z_{linijos} = 0,7 - 0,059 = 0,64 \text{ } \Omega \quad (5.58)$$

Palyginame tarpinio tinklo nuo tiesioginio įvado iki laboratorijos trifazio kišt. lizdo gnybtų varžą vienfazio ir dvifazio TJ modeliavimuose:

$$\Delta Z_{tarp.linija} = Z_{tarp.linijaL1-L2} - Z_{tarp.linijaL1-N} = 0,64 - 0,581 = 0,059 \Omega. \quad (5.59)$$

Jei priimant dvifazio matavimo varžos vertę kaip tikrąją, modeliavimo vienfazio ir dvifazio TJ atvejais, santykinė paklaida lygi:

$$\delta \Delta Z_{tarp.linija} = 8,4\%.$$

Išvada. Modeliuojant dvi skirtingas schemas su skirtingais skaičiavimais vienfazio ir dvifazio TJ atveju ir lyginant su matavimo rezultatais, santykinė paklaida, apskaičiuojant tarpinę

liniją, kurios nežinome, viršija 8%, kas rodo, kad tiek matavimai, tiek modeliavimai sutampa. Dvifazio TJ atveju varža galėjo būti didesnė dėl papildomų įžemintuvų ir nulinės sekos varžos nebuvimo, arba prietaiso netikslaus matavimo, nes prietaiso leistina santykinė paklaida – 30%.

6. Tikslus sistemos varžos modeliavimas, pasitelkiant TJ skaičiavimo metodiką

6.1 Vienfazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas

Prieš tai skyriuose TJ simuliaciją atlikome Simulink programa, tiesiogiai suvedę esamos schemas elementus su atitinkamomis charakteristikomis. Tačiau programa Simulink galimai nevertina vektorių R ir X tarpusavio pasisukimo TJ metu, todėl bandysime skaičiuoti vienfazį trumpąjį jungimą tiesiogiai pagal formulę:

$$I = \frac{\sqrt{3}U_{linijinė}}{\sqrt{(2R_{\Sigma 1}+R_{\Sigma 0})^2+(2X_{\Sigma 1}+X_{\Sigma 0})^2}}; \quad (6.1)$$

čia: $U_{linijinė}$ -linijinė įtampa vietos, kurioje įvyko trumpasis jungimas, V;

$R_{\Sigma 1}$ - tiesioginės sekos suminė elementų aktyvioji varža, Ω ;

$R_{\Sigma 0}$ - nulinės sekos suminė elementų aktyvioji varža, Ω ;

$X_{\Sigma 1}$ - tiesioginės sekos suminė elementų reaktyvioji varža, Ω ;

$X_{\Sigma 0}$ - nulinės sekos suminė elementų reaktyvioji varža, Ω ;

Pastaba. Visos varžos perskaičiuojamos pasirinktai įtampos pakopai.

Prieš sudarinėdami modelį, darome tą pačią prielaidą kaip ir ankstesniame bandyme, kad transformatoriai, esantys 10/0,4kV transformatorinėje pastotėje T1 ir T2 yra sulygiagretinti, t.y. sekcijinis jungtuvas yra įjungtas.

Sudarome Simulink modelį pagal aukščiau esančią formulę:

Programa „Matlab“ sudarytą kodą perrašome taip, kad skaičiuotų ne induktyvumus H, bet reaktyvines varžas Ω .

{clc

Linijos ilgis,m

l=40

Savitoji aktyvinė varža, Ω /km

R0=0.36

Savitoji reaktyvinė varža, Ω /km

X0=0.095

Pasirinkta įtampos pakopa, V

$$U_p=400$$

Tikroji linijos pakopa, V

$$U_{vid}=10000$$

Linijos varža, Ω

$$R_p=R_0 \cdot l / 1000 \quad (6.2)$$

$$X_p=X_0 \cdot l / 1000 \quad (6.3)$$

Perskaičiavimas pasirinktai įtampos pakopai, Ω

$$R=R_p \cdot (U_p / U_{vid})^2 \quad (6.4)$$

$$X=X_p \cdot (U_p / U_{vid})^2 \quad (6.5)$$

Taigi pirmosios linijos L1 varžos – sekų dedamosios (atvirkštinė seka neminima, nes lygi tiesioginei):

$$R_{L11} = 3,485 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L10} = 0;$$

$$X_{L11} = 9,196 \cdot 10^{-5} \Omega;$$

$$X_{L10} = 0.$$

Linija L2 :

$$R_{L21} = 1,066 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{L20} = 0;$$

$$X_{L21} = 2,812 \cdot 10^{-5} \Omega;$$

$$X_{L20} = 0.$$

Įtampos keitimo elemento T varžos:

$$R_{T1} = 0,003248 \Omega;$$

$$R_{T0} = 0,037974 \Omega;$$

$$X_{T1} = 0,009532 \Omega;$$

$$X_{T0} = 0,100087 \Omega;$$

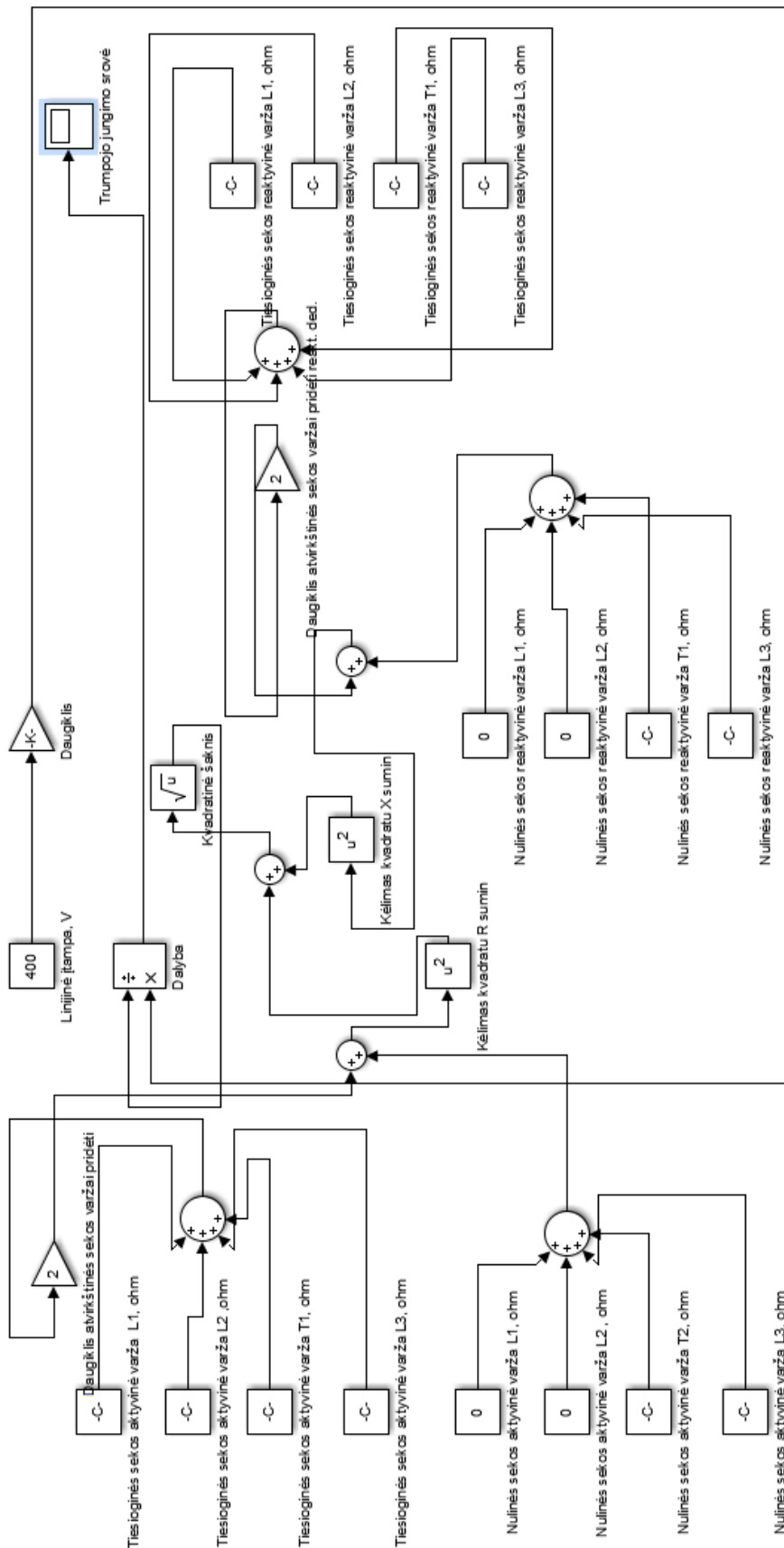
Linija L3.

$$R_{L31} = 0,0216 \Omega$$

$$R_{L30} = 0,0864 \Omega;$$

$$X_{L31} = 0,0054 \Omega;$$

$$X_{L30} = 0,0205 \Omega.$$



6.1 pav. Blokinė vienfazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“

Gautoji trumpojo jungimo srovė $I_k^{(1)} = 2996,7A$;

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z_{T1irT2} = \frac{U}{I_k^{(1)}} = \frac{230}{2996,7} = 0,077\Omega; \quad (6.6)$$

6.2 Vienfazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius

Darome dar vieną simuliaciją su sąlyga, kad ekvivalentinėje TJ schemoje įjungtas tik T2 transformatorius. Šis skaičiavimas reikalingas tam, kad sulygtinti ekvivalentinės schemos varžas tuo atveju, kai sistemos varža didžiausia ir mažiausia. Mažiausia sistemos varža bus ,kai transformatoriai T1 ir T2 dirbs lygiagrečiai (jei nevertinsime išlyginamųjų tarpusavio srovių), o didžiausia – dirbant tik T2 transformatoriui, nes jo varža yra didžiausia, kadangi vardinė galia yra mažesnė nei T1.

Ekvivalentinė schema lieka tokia pat, tik keičiasi T elemento varžų vertės:

$$R_{T1}=0,00755\Omega;$$

$$R_{T0} = 0,083 \Omega;$$

$$X_{T1}=0,0217 \Omega;$$

$$X_{T0}=0,2115\Omega;$$

Gautoji trumpojo jungimo srovė $I_k^{(1)}=1888,2\text{A};$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z_{T2} = \frac{U}{I_k^{(1)}} = \frac{230}{1888,2} = 0,12\Omega; \quad (6.7)$$

6.3 Dvifazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas

Simuliuojamas dvifazis trumpasis jungimas. Dvifazį trumpąjį jungimą gausime tiesiog padauginę trifazio trumpojo jungimo srovę iš daugiklio 0,86.

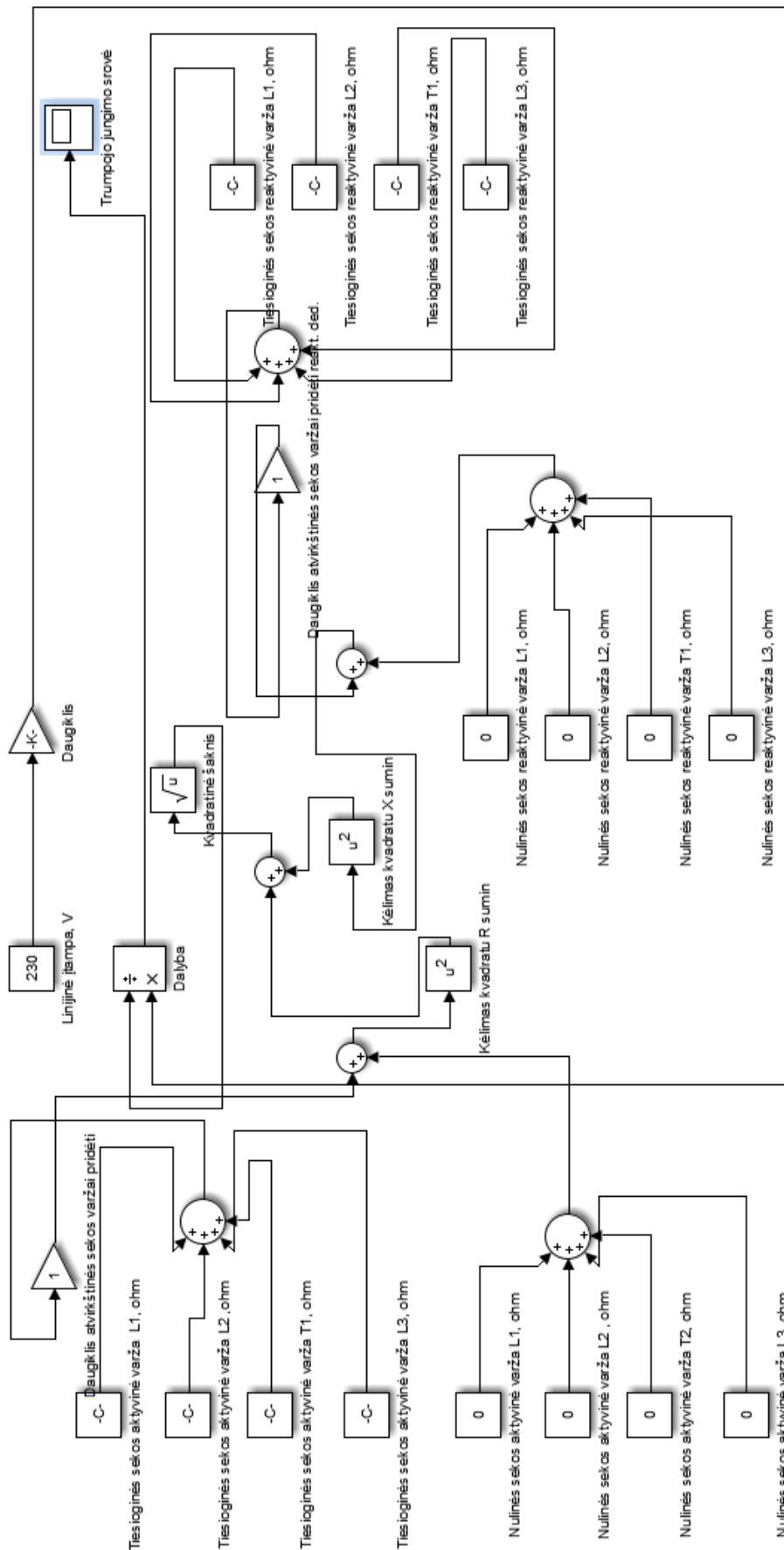
Pakoreguojame schemą palikdami tik tiesioginės sekos varžas ir panaikindami daugiklį 2, o nulinės sekos varžas prilyginame nuliui, taip pat skaitiklis (ekvivalentinė EVJ) tampa lygus 230 ($400\text{V}/\sqrt{3}$):

$$\text{Gautoji trumpojo jungimo srovė } I_k^{(2)} = 0,86I_k^{(3)}=6718,4\text{A}; \quad (6.8)$$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z = \frac{U}{I_k^{(2)}} = \frac{400}{6718,4} = 0,059\Omega; \quad (6.9)$$

Vienfazio trumpojo jungimo atveju kilpos varža gaunama didesnė.

Dvifazio trumpojo jungimo skaičiavimo schema analogiška kaip ir vienfazio, tik pakeičiamos kai kurios konstantos:



6.2 pav. Blokinė dvifazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“

6.4 Dvifazis trumpasis jungimas, kai veikia T2 transformatorius

Skaičiavimas atliekamas dėl tokių pat priežasčių kaip ir 6.2 skyriuje.

Ekvivalentinė schema lieka tokia pat, T elemento varžų vertės:

$$R_{T1}=0,00755\Omega;$$

$$X_{T1}=0,0217 \Omega;$$

$$\text{Gautoji trumpojo jungimo srovė } I_k^{(2)} = 0,86I_k^{(3)}=4918,4\text{A}; \quad (6.10)$$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z_{T2} = \frac{U}{I_k^{(2)}} = \frac{400}{4918,4} = 0,081\Omega; \quad (6.11)$$

7. EKSPERIMENTINIAI MATAVIMAI ANT TIESIOGINIO ĮVADO NUO TRANSFORMATORINĖS GNYBTŲ IR JŲ PALYGINIMAS SU MODELIAVIMO REZULTATAIS

Atliekami matavimai ant tiesioginio įvado gnybtų nuo transformatoriaus, laboratorijos jėgos spintoje. Matavimų rezultatai:

7.1 lentelė. Matavimo rezultatai ant tiesioginio įvado gnybtų

Matuojama kilpa	R, Ω	X, Ω	Z, Ω	I_k, A
L1-N	0,08	0,08	0,11	2110
L1-L2	0,07	0,04	0,09	4660
L2-N	0,09	0,11	0,14	1634
L3-N	0,11	0,1	0,15	1590
L2-L3	0,07	0,06	0,09	4260
L1-L3	0,08	0,03	0,09	4570

Kadangi skaičiavimai atliekami darant prielaidą, kad visose kilpose fazė – fazė ir fazė–nulis kabelių varža yra tokia pati, todėl išvedame aritmetinius vidurkius, kad galėtume palyginti su skaičiavimais (žr. 7.2 lent):

7.2 lentelė. Matavimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas

Matuojama kilpa	Matavimo rezultatai		Modeliavimo rezultatai			
			Veikia T1 ir T2 transformatoriai		Veikia tik T2 transformatorius	
	Z, Ω	I_k, A	Z, Ω	I_k, A	Z, Ω	I_k, A
L1-N	0,13	1778	0,0077	2996,7	0,12	1888,2
L1-L2	0,09	4496	0,0059	6718,4	0,081	4918,4

Apskaičiuojame santykinę paklaidą matavimo ir modeliavimo rezultatams įvertinti. Matome, kad panašiausi rezultatai yra tuo atveju, kai grandinėje įjungtas tik T2 transformatorius. Galima teigti, kad bent matavimo momentu veikė tik jis, nes vertės yra labai panašios. Santykinę paklaidą (varžų) skaičiuosime būtent atveju, kai veikia tik T2 transformatorius.

$$\delta Z_{L1-N} = 7,7\%;$$

$$\delta Z_{L1-L2} = 10\%.$$

Išvada. Nagrinėjamoje grandinėje yra įjungtas tik T2 transformatorius, nes modeliuojant ir matuojant varžų vertes, šios yra panašiausios tarpusavyje, matavimų paklaidos neviršija 10%, todėl galima padaryti išvadą, kad matuoklis matuoja teisingai, o mūsų ekvivalentinės schemos parametrų įvertinimas taip pat yra teisingas.

8. EKSPERIMENTINIAI MATAVIMAI ANT PAPILDOMO TRANSFORMATORIAUS GNYBTŲ IR JŲ PALYGINIMAS SU MODELIAVIMO REZULTATAIS

8.1 Papildomo transformatoriaus aprašymas

Papildomai prijungiamas transformatorius *TT-8/0,104 UXL4*. Transformatorius prie jėgos spintos prijungiamas 3x2,5 variniu kabeliu, kurio savitoji aktyvinė varža : 0,07Ω/km. Kabelio ilgis – 10m, kabelio aktyvinė varža-0,0007Ω.

Transformatoriaus techninės charakteristikos:

Linijinė įtampa U_{l1} pirminėse apvijose: 400V (Išmatuota);

Linijinė įtampa U_{l2} antrinėse apvijose: 203V(Išmatuota);

Fazinė įtampa U_{f2} antrinėse apvijose: 117V(išmatuota);

Transformatoriaus pilnoji vardinė galia S_N : 8000VA

Trumpojo jungimo įtampa U_k : 10%

Apvijų jungimo tipas: Y/ Z_0



8.1 pav. Transformatoriaus TII techninis pasas

Apskaičiuojame transformatoriaus (įvardinkime jį TII) pilnąją tiesioginės sekos varžą

Z_{TII1} :

$$Z_{TII1} = \frac{U_k \% U_p^2}{100 \cdot S_{TII N}} = \frac{10 \cdot 0,4^2}{100 \cdot 0,008} = 2; \quad (8.1)$$

Čia U_p – Pasirinkta įtampos pakopa, kV;

$S_{TII N}$ – Vardinė transformatoriaus galia, MVA;

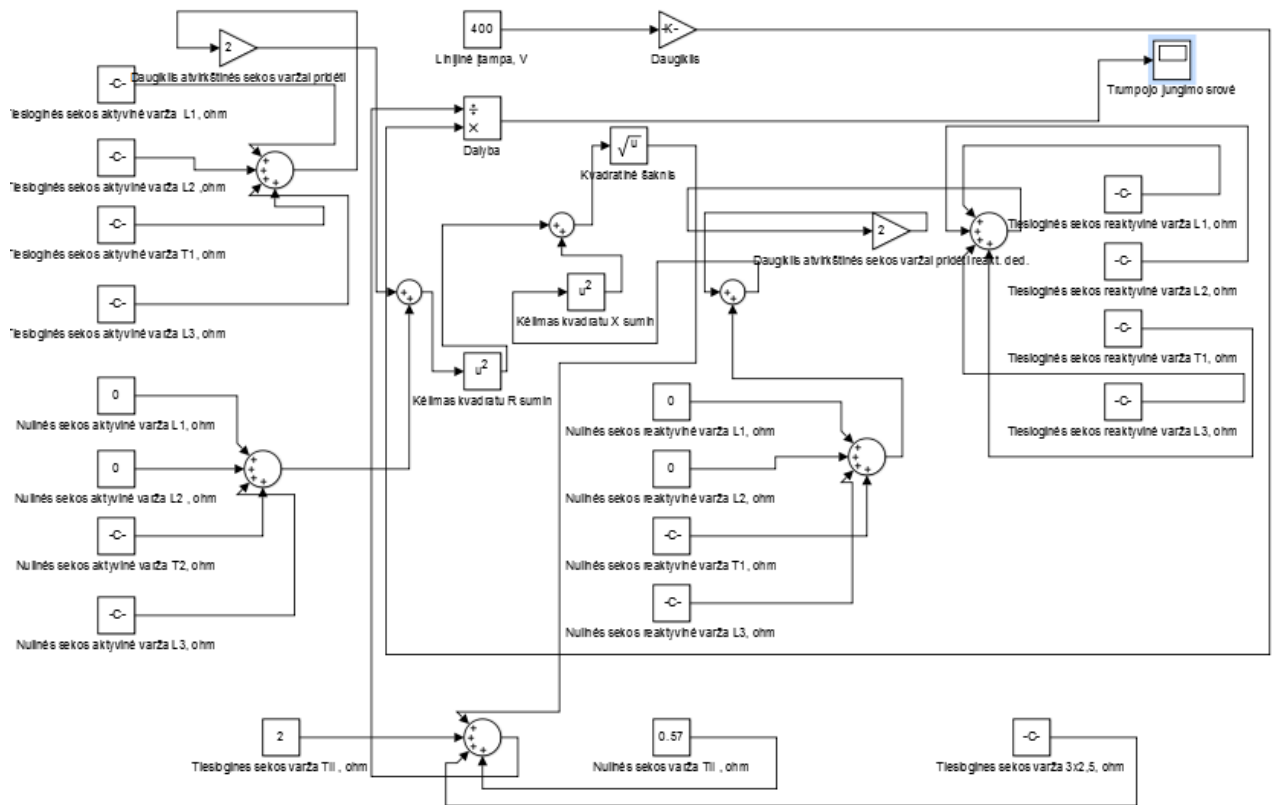
Transformatoriaus nulinės sekos varžos Z_{TII0} rasti literatūroje nepavyko, todėl priimsime jos vertę proporcingai pagal didesnės galios transformatorių, kurių apvijos sujungtos

Y/ Z_0 tiesioginės ir nulinės sekų varžų santykį $\frac{Z_{T1}}{Z_{T0}} = 3,5$;

$$Z_{TII0} = \frac{Z_{TII1}}{3,5} = \frac{2}{3,5} = 0,57 \Omega. \quad (8.2)$$

8.2 Vienfazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas

Modeliuojame schemą vienfazio trumpojo jungimo skaičiavimui, pridėdami transformatorių TII ir kabelį CU 3x2,5 (10m), su sąlyga, kad veikia T1 ir T2 transformatoriai.



8.2 pav. Blokinė vienfazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“ su papildomu TII transformatoriumi

Gautoji trumpojo jungimo srovė $I_k^{(1)}=247\text{A}$;

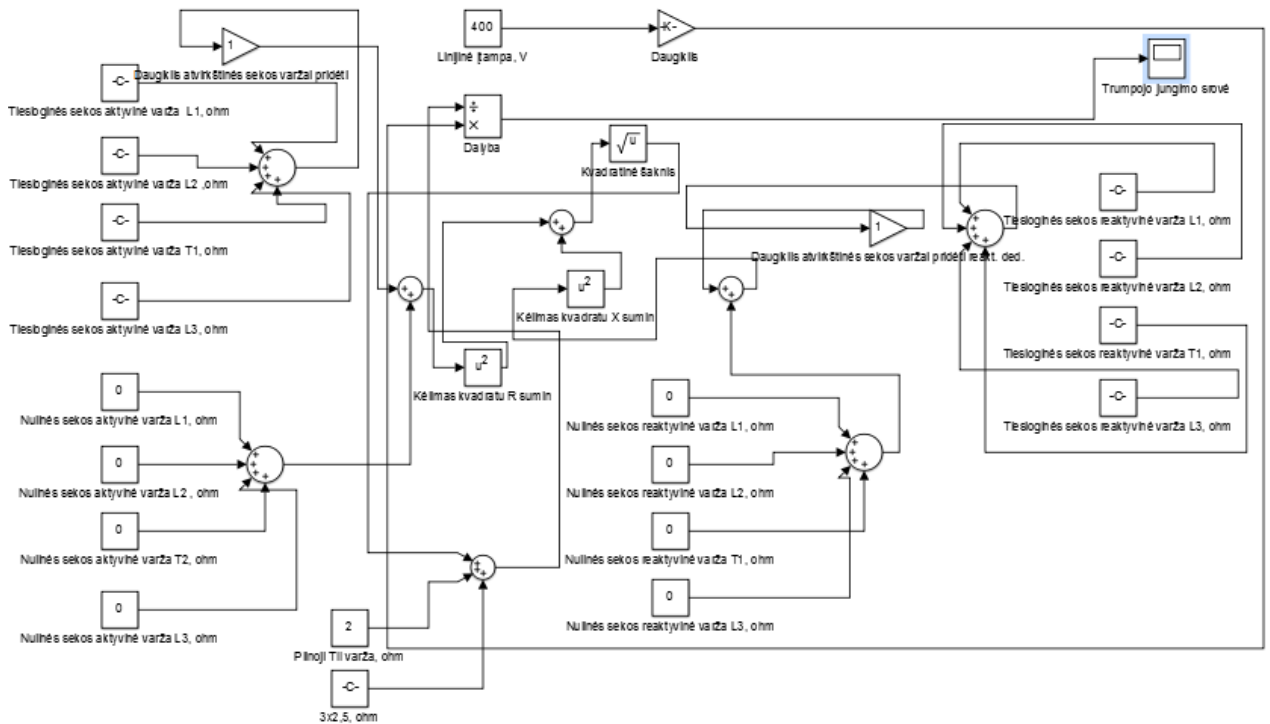
Kadangi varžų reikšmės buvo perskaičiuotos 400V įtampos pakopoje, 203V įtampoje, jų reikšmės ir trumpojo jungimo srovė perskaičiuojamos:

$$I_{k203V}^{(1)}=I_k^{(1)} \frac{U_p}{U_{vid}}=247 \frac{400}{203}=486,7\text{A}; \quad (8.3)$$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z = \frac{U}{I} = \frac{117}{486,7} = 0,24\Omega \quad (8.4)$$

8.3 Dvifazis trumpasis jungimas, kai sekcijinis jungtuvas įjungtas

Modeliuojame schemą dvifazio trumpojo jungimo skaičiavimui, pridėdami transformatorių TII ir kabelį CU 3x2,5 (10m):



8.3 pav. Blokinė dvifazio TJ skaičiuojamoji schema programoje „Matlab“ su papildomu TII transformatoriumi

Gautoji trumpojo jungimo srovė $I_k^{(2)}=97,5A$;

Kadangi varžų reikšmės buvo perskaičiuotos 400V įtampos pakopoje, 203V įtampoje, jų reikšmės ir trumpojo jungimo srovė perskaičiuojamos:

$$I_{k203V}^{(2)}=I_k^{(1)} \frac{U_p}{U_{vid}}=97,5 \frac{400}{203}=192,11A; \quad (8.5)$$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z = \frac{U}{I} = \frac{203}{192,11} = 1,05\Omega \quad (8.6)$$

8.4 Vienfazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius

Ekvivalentinė schema lieka tokia pati (kaip vienfaziam TJ) , tik keičiasi įtampos keitimo elemento T parametrai:

$$R_{T1}=0,00755\Omega;$$

$$R_{T0} =0,083 \Omega;$$

$$X_{T1}=0,0217 \Omega;$$

$$X_{T0}=0,2115\Omega;$$

Gautoji trumpojo jungimo srovė $I_k^{(1)}=236,6A$;

Kadangi varžų reikšmės buvo perskaičiuotos 400V įtampos pakopoje, 203V įtampoje, jų reikšmės ir trumpojo jungimo srovė perskaičiuojamos:

$$I_{k203V}^{(1)}=I_k^{(1)} \frac{U_p}{U_{vid}}=236,6 \frac{400}{203}=466,2A; \quad (8.7)$$

$$\text{Kilpos pilnoji varža: } Z = \frac{U}{I} = \frac{117}{466,6} = 0,25\Omega \quad (8.8)$$

8.5 Dvifazis trumpasis jungimas, kai veikia tik T2 transformatorius

Ekvivalentinė schema lieka tokia pati (kaip dvfaziam TJ), tik keičiasi įtampos keitimo elemento T parametrai:

$$R_{T1}=0,00755\Omega;$$

$$R_{T0} = 0 \Omega;$$

$$X_{T1}=0,0217 \Omega;$$

$$X_{T0}=0 \Omega;$$

$$\text{Gautoji trumpojo jungimo srovė } I_k^{(2)}=96,9\text{A};$$

Kadangi varžų reikšmės buvo perskaičiuotos 400V įtampos pakopoje, 203V įtampoje, jų reikšmės ir trumpojo jungimo srovė perskaičiuojamos:

$$I_{k203V}^{(2)}=I_k^{(2)} \frac{U_p}{U_{vid}}=96,9 \frac{400}{203}=190,9\text{A}; \quad (8.9)$$

Kilpos pilnoji varža:

$$Z = \frac{U}{I_{k203V}^{(2)}} = \frac{203}{190,9} = 1,06\Omega. \quad (8.10)$$

8.6 Eksperimentinio matavimo rezultatai

Matavimo rezultatai pateikiami 8.1. lent.:

8.1 lentelė. Matavimo rezultatai su prijungtu papildomu TII transformatoriumi

Matuojama kilpa	R,Ω	X, Ω	Z, Ω	I _k ,A
L1-N	0,22	0,16	0,28	866
L2-N	0,24	0,15	0,28	844
L3-N	0,24	0,17	0,29	817
L2-L3	0,42	0,16	0,45	530
L1-L2	0,43	0,16	0,47	518
L1-L3	0,42	0,14	0,44	544

Išvedame vidurkius ir palyginame su modeliavimo rezultatais(žr. 8.2 lent.).

8.2 lentelė. Matavimo ir modeliavimo rezultatų su prijungtu papildomu TII transformatoriumi palyginimas

Kilpa	Matavimo rezultatai		Modeliavimo rezultatai			
			Veikia T1 ir T2 transformatoriai		Veikia tik T2 transformatorius	
	Z, Ω	I_k, A	Z, Ω	I_k, A	Z, Ω	I_k, A
L1-N	0,28	842,3	0,24	486,7	0,25	466,2
L1-L2	0,45	530,7	1,05	192,11	1,06	190,9

Išvada. Vienfazio TJ rezultatai tiek modeliuojant, tiek skaičiuojant gauti panašūs (jei neatsižvelgsime į TJ srovės dydį), tačiau dvifazio TJ atveju reikšmės gautos labai skirtingos, tai galėjo įtakoti didelė aktyvinė transformatoriaus varža arba pasikeitę techniniai transformatoriaus parametrai dėl senėjimo. Santykinė paklaida vienfazio TJ atveju $\delta Z = 10,7\%$ rodo, kad matavimo ir modeliavimo rezultatai sutampa, nes paklaidos vertė neviršija reikšmės, duotos matuoklio metrologinės patikros sertifikate.

Atsižvelgiant į matuoklio TJ srovės dydį, matome, kad žemesnėje įtampoje, nei 230V, matuoklis matuoja neteisingai ir ypač neteisingai apskaičiuoja trumpojo jungimo srovę. Nors matuoklis pagal matavimo kraštines vertes turi tiksliai matuoti nuo 100V, bet rezultatai akivaizdžiai parodo, kad jį reikia kalibruoti ir pritaikyti žemesnės įtampos grandinėms matuoti.

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Montuojant elektros energijos imtuvus su galios elektronika ir inverterius, jų techninėse instrukcijose reikalaujama atlikti tinklo pilnosios varžos matavimus imtuvo prijungimo vietoje. Tokie patys matavimai rekomenduojami ir tikrinant apsaugos aparatų tinkamumą tinklui, todėl atsiranda poreikis ištirti kokių tikslumu specialūs tinklo varžos matavimo prietaisai išmatuoja tinklo varžą ir nustato orientacinę trumpojo jungimo srovę.

2. Atliekant matavimus taškuose, nutolusiuose nuo maitinimo transformatorių, nustatyta, kad matavimo prietaisai išmatuoja instaliacijos aktyvinės varžos ir induktyvumo pokyčius su tikslumu, nurodomu metrologinės patikros sertifikate.

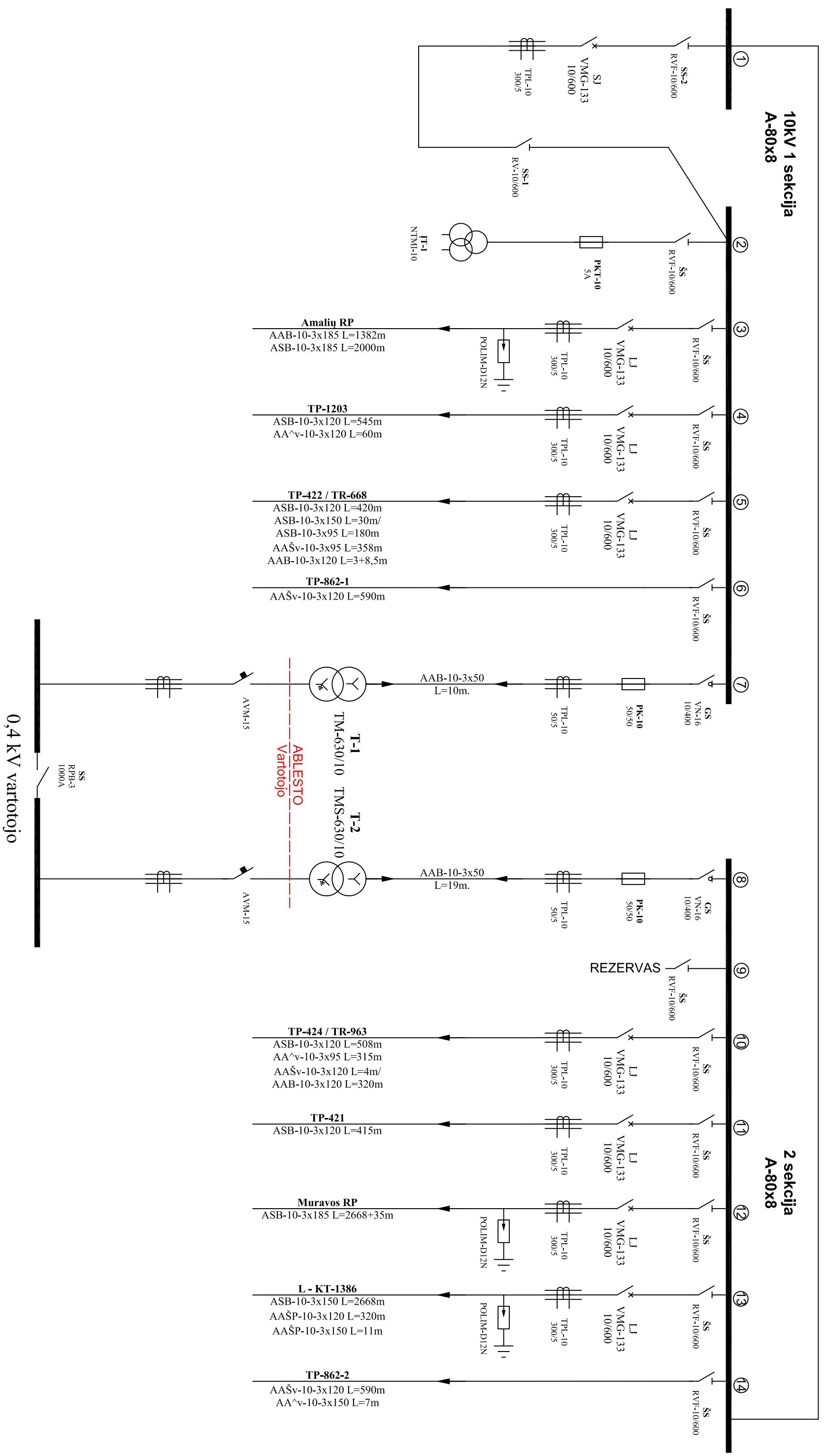
3. Atliekant matavimus tinklo maitinimo transformatorių antrinės apvijos gnybtuose, nustatyta, kad matavimo rezultatai ir apskaičiuotos trumpojo jungimo srovių ir varžų reikšmės sutampa su tikslumu, nurodomu metrologinės patikros sertifikate. Transformatoriaus vienfazio ir dvifazio trumpojo jungimo srovių skirtumus nulemia jo nulinės sekos varža, tokius pat trumpojo jungimo srovių skirtumus rodo ir matavimo prietaisu matuojamos varžų reikšmės fazė – fazė ir fazė – nulis kilpose.

4. Tyrimų rezultatai rodo, kad tinklo varžos matavimo prietaisai patikimai matuoja elektros tinklo pilną varžą, nulemtą tiek laidininkų aktyvinės ir induktyvinės varžos, tiek magnetinių reiškinių įtaką tinklo pilnajai varžai, transformatoriui dirbant nesimetriniu režimu. Matavimo tikslumas išlaikomas net tinklo varžai esant artimai mažiausiai leistinajai matavimo prietaiso skalės vertei.

5. Abejonės matavimo rezultatais dažniausiai kyla dėl tikslios tinklo schemos ir jos elementų parametrų nežinojimo. Išsiaiškinus tikslią tinklo schemą ir jos parametrus, skaičiavimo ir matavimo rezultatai turi sutapti.

INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. SVINKŪNAS, G., NAVICKAS, A. (2011). Elektros energetikos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2011, p. 202.
2. AŽUBALIS, V., KORYZNA, J. Trumpieji jungimai elektros sistemose. Vilnius: Lietuvos TSR Aukštojo ir specialiojo vidurinio mokslo ministerija, Kauno Antano Sniečkaus politechnikos institutas, 1986, p. 100.
3. SVINKŪNAS, G. Elektros energetika. [interaktyvus] Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2008, p. 87. [žiūrėta 2016 m. vasario 20 d.] Prieiga per internetą: http://www.leka.lt/sites/default/files/dokumentai/gytis_svinkunas_elektros_energetikos_teorija.pdf
4. METREL. Measurements on electric Installations in theory and practice. Ljulbljanska: METREL.2008, p. 124.
5. LAURUŠKA, V., ŠČIUKAITĖ J. Fizikos laboratoriniai darbaiV. Lauruška, J. Ščiukaitė. Fizikos laboratoriniai darbai. [žiūrėta 2016 m. Gegužės 7 d.] Prieiga per internetą: techno.su.lt/~lauruska/knyga3/a1.doc
6. NORMINIS TEISĖS AKTAS. ELEKTROS ĮRENGINIŲ BANDYMO NORMOS IR APIMTYS. Patvirtinta Ūkio ministro 2001 m. balandžio 24 d. įsakymu Nr. 141 [žiūrėta 2016 Gegužės 9d.]. Prieiga per internetą : <http://www3.lrs.lt/pls/inter3/oldsearch.preps2?Condition1=139696&Condition2=>
7. SIEMENS. Electrical Engineering Handbook. [interaktyvus] London: New Age International Ltd., 2006, p. 578. [žiūrėta 2016 m. vasario 10 d.] Prieiga per internetą: https://books.google.lt/books?id=wxDjhgTabmQC&pg=PA468&lpg=PA468&dq=3x120+Xl&source=bl&ots=L9JiNW6hvj&sig=zqEKJoiZ6hBO3QpsTJiEJpaCB74&hl=lt&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=3x120%20Xl&f=false

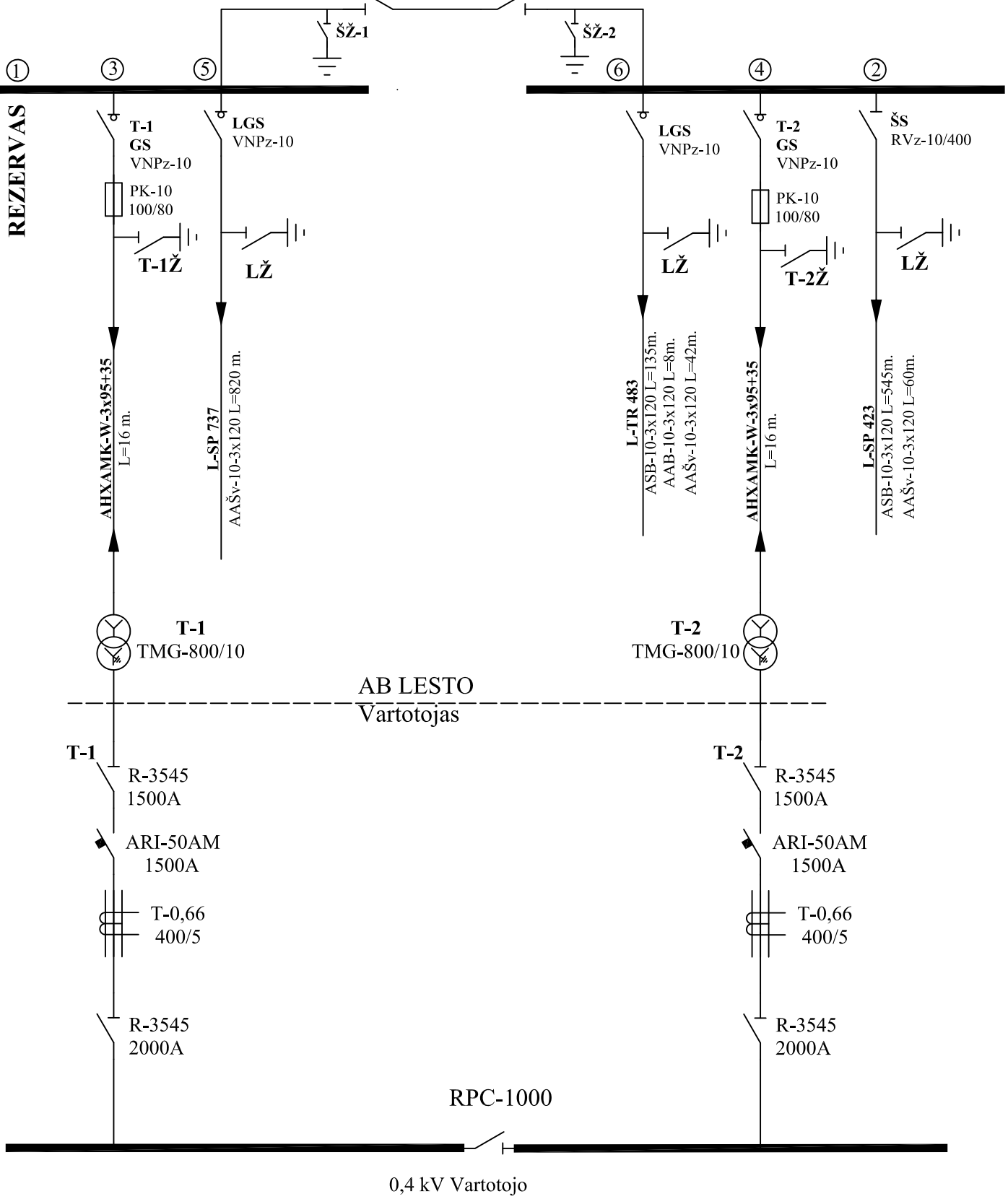


Ind.		Parašas		Data		1 PRIEDAS. Skirstomojo punkto SP - 423 schema		Lapas1	
Braižē		V. Kutka		2016-05-10				Lapu	
Tikrino		G. Svinkūnas		2016-05-10				sk.1	

10kV 1 sekcija
AT-40x5

SS-1 SS-2

2 sekcija



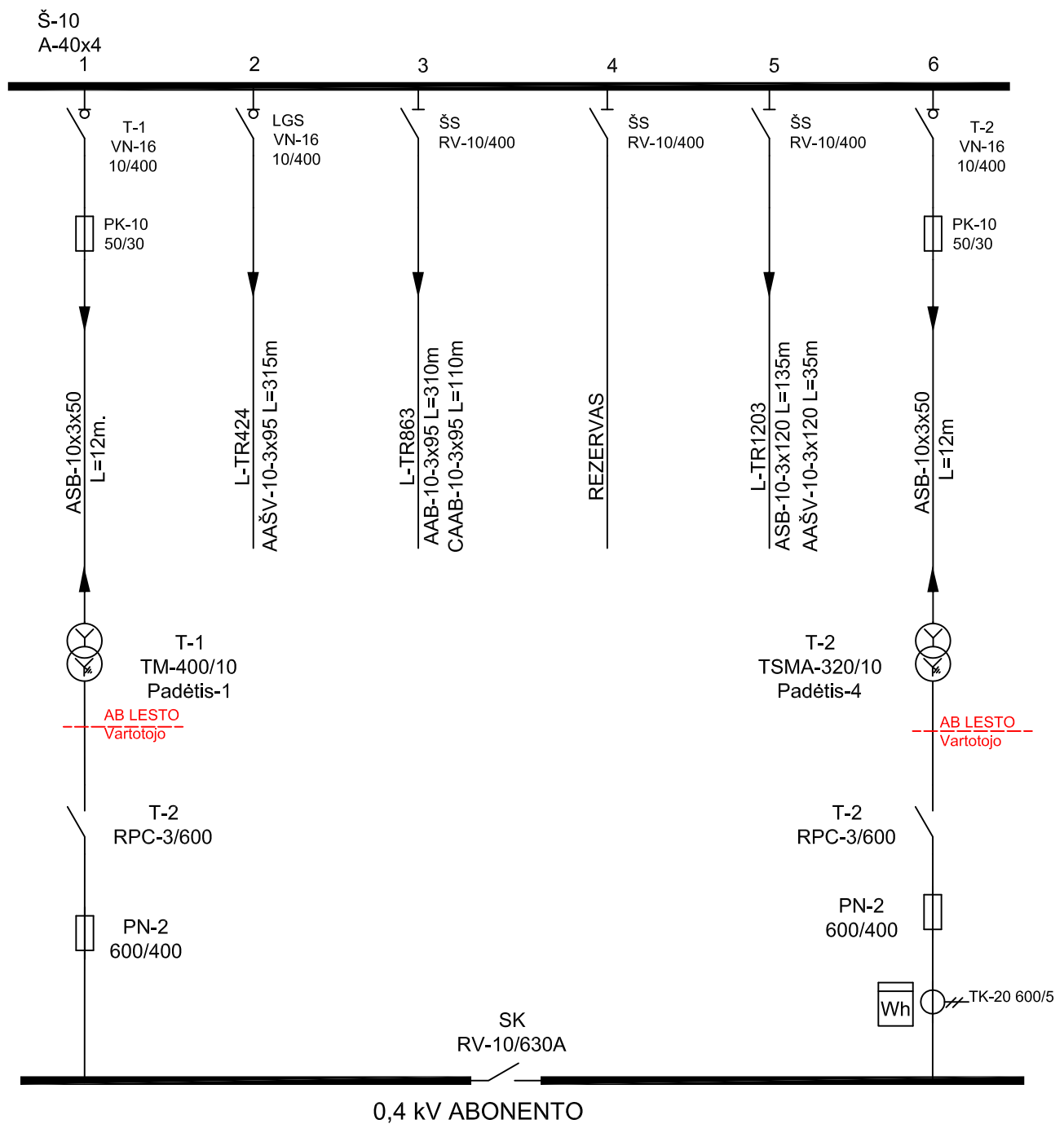
AB LESTO
Vartotojas

RPC-1000

0,4 kV Vartotojo

2 PRIEDAS.
Transformatorinė
TR - 1203
schema

Ind.	Keitimas	Parašas	Data		
Braižė	V. Kutka		2016-05-12		Lapas 1
Tikrino	G. Svinkūnas		2016-05-12		Lapų sk. 1



	TR	T1	T2
1. Tipas, Galia	Mūrinė	TM-400/10	TSMA-320/10
2. Gamyklinis Nr.	-----	707530	9229
3. Pastatymo metai	1964	2010	1969
4. Pagaminimo metai	1964	1978	1963
5. Inventorinis Nr.	-----	122099	103427

3 PRIEDAS. Transformatorinės TR-483 schema

Ind.	V. Pavardė	Parašas	Data	Studentų g. 48 Kaunas	Lapas 1
Braižė	V. Kutka		2016-05-02		Lapų
Tvirtino	G. Svinkūnas		2016-05-02		sk. 1