



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Išmaniosios elektros energijos apskaitos duomenų
panaudojimo matavimo paklaidų nustatymui tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Kasparas Burba

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Išmaniosios elektros energijos apskaitos duomenų panaudojimo matavimo paklaidų nustatymui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Kasparas Burba

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Doc. Tomas Deveikis

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Kasparas Burba

Išmaniosios elektros energijos apskaitos duomenų panaudojimo matavimo paklaidų nustatymui tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Kasparas Burba

Patvirtinta elektroniniu būdu

Burba, Kasparas. Išmaniosios elektros energijos apskaitos duomenų panaudojimo matavimo paklaidų nustatymui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Robertas Lukočius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): elektros inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: išmani apskaita, matavimų paklaidos, paklaidų nustatymas.

Kaunas, 2026. 46 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriamas išmaniosios elektros energijos apskaitos duomenų panaudojimas matavimo paklaidų, neteisėto elektros energijos vartojimo atvejams nustatyti. Vertinamas variantas, kuomet surinkti elektros energijos vartojimo duomenys bei parametrai yra priskiriami atitinkamo tinklo schemai, modeliavimo programoje. Po simuliacijos yra atliekami skaičiavimai, kuriais fiksuojamas skirtumas tarp apskaitytų ir apskaičiuotų elektros energijos skaitiklių matavimo duomenų.

Tyrimui atlikti buvo sudaryta žemos įtampos skirstomojo tinklo schema su įvairaus dydžio vartotojais, kontroline apskaita linijos pradžioje bei išmaniosiomis elektros energijos apskaitomis kiekvieno vartotojo taške. Buvo atliekami siūlomo metodo matavimo paklaidų nustatymo įvertinimai, lyginant su faktiniais duomenimis. Vertinti skirtingi galimi matavimo paklaidų atvejai: vienos, trijų fazių srovės matavimo paklaidos, keli skaitikliai tinkle su matavimo paklaidomis, įtampos matavimo paklaidos. Įvertintas ir nustatomos paklaidos neapibrėžtumas dėl skirtingo laidininkų išilimo skirstomajame tinkle.

Po tyrimo nustatyta, kad vertintas paklaidų nustatymo modelis, su maža paklaida, gali nustatyti skaitiklio matavimo paklaidos dydį ir vietą tinkle. Įvertinus galimą skirtingą laidininkų išilimą, matavimo paklaidos neapibrėžtumas didėja nežymiai.

Burba, Kasparas. Study on Use of Electricity Smart Meter Data for Measurement Error Detection. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Robertas Lukočius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): electrical engineering, engineering sciences.

Keywords: smart metering, measurement error, error detection.

Kaunas, 2026. 46.

Summary

This master's thesis examines the use of smart electricity metering data to detect measurement errors and cases of unauthorized electricity consumption. The study evaluates a scenario in which collected electricity consumption data and parameters are assigned to the corresponding network diagram in a simulation program. After the simulation is completed, calculations are performed to determine the difference between the recorded and simulated electricity meter readings and the electrical parameters of the grid.

To conduct the study, a low-voltage distribution network diagram was created, featuring consumers of various sizes, a control meter at the beginning of the line, and smart electricity meters at each consumer's points of connection. Assessments of measurement errors for the proposed method were performed by comparing the results with actual data. Cases evaluated, where network contains: single-phase or three-phase current measurement errors in a single meter, multiple meters with measurement errors, and voltage measurement errors. The uncertainty of the errors is also evaluated by taking into account the varying temperature of conductors in the distribution network.

The study found that the error detection model can determine the magnitude and location of meter measurement errors in the network with a small margin of error. When accounting for potential variations in conductor heating, the uncertainty of measurement errors increases, but only slightly.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga	12
1.1.1. Elektromechaniniai elektros energijos skaitikliai.....	12
1.1.2. Elektroniniai skaitikliai	13
1.1.3. Išmanieji elektros energijos skaitikliai	15
1.1.4. P1 sąsaja	17
1.1.5. Paklaidos.....	18
1.2. Veiksniai nuo kurių priklauso elektros tinklo parametrai	19
1.3. Tipiniai neteisėtos elektros energijos vartojimo metodai ir jų pažabojimo būdai.....	19
1.4. Duomenų analize grįsti paklaidų ir vagysčių aptikimo metodai	21
1.4.1. Gilaus mokymosi modeliai paklaidų nustatymui	21
1.4.2. Gilaus mokymosi modeliai vagysčių nustatymui.....	21
2. Metodologinė dalis.....	22
2.1. Programinė įranga	23
2.2. Modeliavimo metodai.....	24
2.3. Matematinis modelis	25
2.4. Paklaidų nustatymo algoritmas.....	29
3. Tiriamoji dalis.....	31
3.1. Vienos fazės srovės matavimo paklaida.....	31
3.1.1. Galios faktorius $\cos \varphi = 1$	31
3.1.2. Galios faktorius $\cos \varphi = 0,9$	34
3.2. Trijų fazių srovės matavimo paklaida	35
3.3. Kelių skaitiklių matavimo paklaida tinkle.....	36
3.4. Įtampos matavimo paklaida.....	38
3.5. Srovės ir įtampos matavimo paklaida.....	38
3.6. Temperatūros paklaidos įvertinimas.....	39
Išvados	43
Literatūros sąrašas	44

Lentelių sąrašas

1 lentelė. <i>Sagemcom</i> T211 išmanaus elektros energijos skaitiklio specifikacijos [12].....	17
2 lentelė. Maksimalios leistinos elektros energijos skaitiklių srovės matavimo paklaidos [14].....	18
3 lentelė. Tiriamojo tinklo linijų parametrai	22
4 lentelė. 0,4-35 kV neizoliuoti aliuminiai laidai (A) [25]	23
5 lentelė. Vartotojų maksimalios galimos apkrovos	23
6 lentelė. Linijos suminė išilginė kompleksinė varžos matrica.....	26
7 lentelė. Pradiniai apskaitų duomenys be paklaidų	31
8 lentelė. Pradiniai vienos fazės srovės matavimo paklaidos atvejo IEEEA apskaityti duomenys $\cos \varphi = 1$	31
9 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos simuliuoto tinklo parametrai pagal priskirtas apskaitytas galias $\cos \varphi = 1$	32
10 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų $\cos \varphi = 1$	32
11 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos įtampos sulyginimo simuliacijos rezultatai $\cos \varphi = 1$	32
12 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų $\cos \varphi = 1$	33
13 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė $\cos \varphi = 1$	33
14 lentelė. Pradiniai apskaitų duomenys be paklaidų $\cos \varphi = 0,9$	34
15 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų $\cos \varphi = 0,9$	34
16 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų $\cos \varphi = 0,9$	34
17 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų	35
18 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų.....	35
19 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė.....	36
20 lentelė. Kelių skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų	36
21 lentelė. Dviejų skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų (1)	36
22 lentelė. Dviejų skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų (2)	37
23 lentelė. Dviejų skaitiklių skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė IEEEA1	37
24 lentelė. Dviejų skaitiklių skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė IEEEA3	37
25 lentelė. Įtampos matavimo paklaidų nustatymo tikslumas	38
26 lentelė. Srovės ir įtampos matavimo paklaidų procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų.....	38
27 lentelė. Srovės ir įtampos matavimo paklaidų procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų	39

28 lentelė. Srovės ir įtampos skirtingų matavimo paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė.....	39
29 lentelė. Laidininkų skirtingo išilimo skaičiavimo parametrai.....	41
30 lentelė. Laidininkų varžų perskaičiavimas pagal galimus temperatūrinius skirtumus	42
31 lentelė. Atliktų tyrimų didžiausias neapibrėžtumo lygis įvertinus laidininkų išilimą.....	42

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Elektromechaninio elektros energijos skaitiklio konstrukcinė schema [6]	12
2 pav.	Rytų skirstomųjų tinklų elektros energijos skaitiklis Lietuvoje.....	14
3 pav.	Analoginio skaitiklio schema [4]	14
4 pav.	Skaitmeninio elektros energijos skaitiklio supaprastinta diagrama [4].....	15
5 pav.	<i>Sagemcom</i> išmaniojo elektros skaitiklio modelis, naudojamas Lietuvoje [11]	16
6 pav.	P1 prievadas išmanaus elektros energijos skaitiklio duomenims nuskaityti.....	17
7 pav.	Išmaniųjų elektros energijos skaitiklių fiksuojami duomenys ir įvykiai [18].....	20
8 pav.	Tiriamąo tinklo principinė schema	22
9 pav.	Vieno iš šaltinių modelių grupavimas [27]	24
10 pav.	π -sekcijų linijos modelio atstojamoji schema	25
11 pav.	Oro linijos laidininkų išdėstymas erdvėje	26
12 pav.	Sudarytas tiriamojo tinklo matematinis modelis.....	27
13 pav.	IEEEA sudarytas blokas matematiniam modelyje.....	28
14 pav.	Tiriamąo modelio pastovios apkrovos bloko A fazės dalis	28
15 pav.	Paklaidų nustatymo tinkle algoritmas	29

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

- CNN – konvoliucinis neuroninis tinklas (angl. *CNN – Convolutional Neural Networks*);
- EMT – elektromagnetinių pereinamųjų procesų (angl. *EMT – electromagnetic transient*);
- IEEA – išmani elektros energijos apskaita;
- KEEA – kontrolinė elektros energijos apskaita;
- LSTM – ilgos trumpalaikės atminties tinklas (angl. *LSTM – Long-Short term memory*);
- MLP – daugiasluoksnio perceptrono tinklas (angl. *MLP – Multi-Layer Perceptron*);
- MPE – maksimali leistina paklaida (angl. *MPE – Maximum Permissible Error*);
- NTN – netechniniai nuostoliai;
- OL – oro linija;
- RMS – kvadratinis vidurkis (angl. *RMS – root mean squared*);
- TN – techniniai nuostoliai.

Ivadas

Šiuo metu Lietuvoje sparčiai diegiami išmanieji elektros energijos skaitikliai. Šie skaitikliai nuotoliniu būdu perduoda įvairius tinklo ir vartojimo duomenis, kurie gali efektyvinti esamo elektros tinklo veikimą. Dabar jų jau įdiegta daugiau kaip 1,1 milijono [1].

Šiuolaikinės energetikos sistemos transformacija, grindžiama skaitmeninimu ir pažangių technologijų integracija, vienu metu sprendžia esamas, ir kuria naujas problemas esamai energetikos infrastruktūrai. Sparčiai diegiamos atsinaujinančios elektros energijos šaltinių elektrinės paskirsto generaciją po visą vartojimo infrastruktūrą, priešingai nei prieš tai buvusios nutolusios nuo vartotojų elektrinės. Vienas šios transformacijos komponentų – išmanieji elektros energijos skaitikliai skirstomajame tinkle. Šie prietaisai didele raiška fiksuoja elektros energijos vartojimo, tinklo parametrų duomenis, užtikrina skaidresnį apskaitos procesą bei sudaro galimybes efektyvesniam elektros energijos tiekimo valdymui.

Išmaniųjų skaitiklių apskaitomi duomenys tampa itin reikšmingi elektros energijos tiekėjams. Remiantis šiais duomenimis, galima kurti tikslesnes elektros energijos vartojimo prognozes, kurios yra būtinos planuojant elektros energijos tiekimą, taip pat siekiant išvengti neatitikimų tarp prognozuoto ir faktinio vartojimo. Toks tikslumas yra esminis norint išvengti disbalanso rinkoje ir su tuo susijusių baudų, kurios gali turėti neigiamą finansinį poveikį nepriklausomiems tiekėjams. Todėl išmanieji skaitikliai tampa ne tik technologiniu sprendimu, bet ir strateginiu įrankiu, padedančiu užtikrinti sistemos stabilumą, patikimumą ir ekonomiškumą. Prie disbalanso prisideda neteisėti elektros energijos vartotojai, skaitikliai su matavimo paklaidomis. Tai sukelia ne tik finansinius nuostolius vartotojams, bet taip pat gali iškraipyti perteikiamų duomenų statistiką, kuri yra labai svarbi sudarant prognozes. 2020 metais Lietuvoje nustatyti 109 elektros energijos vagysčių atvejai [2]. Skaičiuojama, kad pasaulyje kasmet patiriami 96 milijardai JAV dolerių nuostolių dėl elektros energijos vagysčių [3]. Šiame magistro darbe bus siekiama sudaryti matematinį modelį, kuris remdamasis išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenimis nustatytų galimus neteisėto elektros energijos vartojimo ar matavimo paklaidų atvejus.

Darbo tikslas – sudaryti ir ištirti matematinį modelį neteisėtam elektros energijos vartojimui ir matavimo paklaidoms nustatyti.

Darbo uždaviniai:

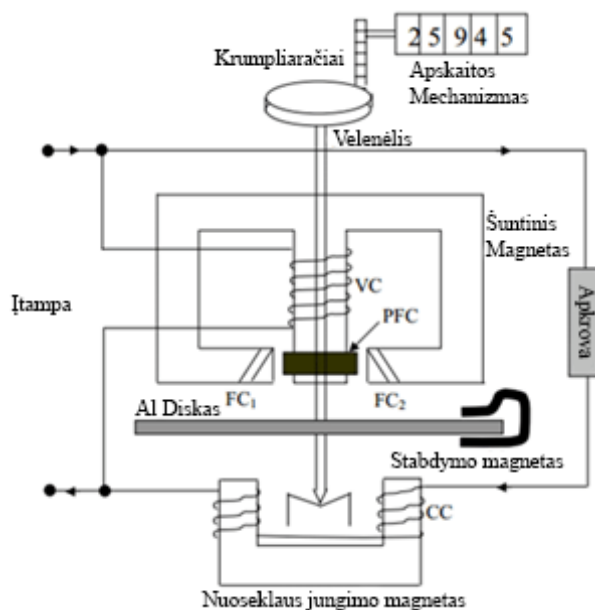
1. nustatyti elektros energijos skaitiklių matavimo paklaidų priežastis ir maksimalias leistinas vertes;
2. apžvelgti matavimo paklaidų įtaką tinklams, jų nustatymo būdus;
3. sudaryti tiriamojo tinklo schemą, parengti matematinį modelį ir paklaidų nustatymo algoritmą;
4. įvertinti sudaryto matematinio modelio paklaidą.

1. Literatūros apžvalga

Elektros energetikos infrastruktūra yra įvairialypė ir susideda iš labai daug elementų, kurie bendrai sudaro energetikos sistemą. Daugiausiai ši sistema susideda iš generacijos, perdavimo ir vartojimo blokų. Viena iš esminių šios sistemos dalių – elektros energijos suvartojimo apskaita. Elektros energijos skaitiklis – prietaisas naudojamas galutinių vartotojų suvartotai elektros energijai matuoti [4]. Naudodamiesi jais vartotojai gali atsiskaityti už suvartotą elektros energiją. Šiais laikais, jie įgauna didesnę prasmę judant efektyvesnio tinklo link – renka svarbius tinklo duomenis. Jais remiantis galima tiksliau prognozuoti elektros energijos poreikį, numatyti esamus arba galimus gedimus, nustatyti nesąžiningo vartojimo atvejus.

1.1.1. Elektromechaniniai elektros energijos skaitikliai

Indukcinio tipo elektromechaniniai elektros skaitikliai daugiau kaip šimtmetį buvo vienas pagrindinių įrenginių, naudotų elektros energijos apskaitai [3]. Nors šiais laikais sparčiai pereinama prie išmaniųjų skaitiklių, elektromechaninių dar galima rasti ne viename elektros ūkyje Lietuvoje. Šių elektros energijos skaitiklių veikimo būdas paremtas elektromagnetinės indukcijos principu, kada elektros energija paverčiama mechanine, sukančia apskaitos diską [5].



1 pav. Elektromechaninio elektros energijos skaitiklio konstrukcinė schema [6]

Konstrukcija susideda iš aliuminio disko, sumontuoto ant velenėlio tarp dviejų elektromagnetų [6]. Disko sukimosi greitis yra tiesiogiai proporcingas elektros energijos vartojimui.

Tokio tipo elektros energijos skaitikliai susideda iš keturių pagrindinių dalių [4]:

1. varomosios – magneto sukuriama srovė yra tiesiogiai proporcinga srovei, o šunto magneto – įtampai. Dėl indukcijos abu srautai atsilieka 90° . Dėl jų sąveikos diske susidaro sukurtinės srovės, kurios sukuria jėgą, proporcingą momentinei įtampai, srovei ir fazių kampui tarp jų;
2. judančiosios – sudarytas iš pavarų mechanizmo ir veleno, ant kurio sumontuotas aliuminis diskas;
3. stabdymo – nuolatinis magnetas, vadinamas stabdomuoju, kuris balansuoja aliuminį diską ir jį sustabdo kuomet neteka elektros energija;

4. apskaitos – velenas, sujungtas per įvairius krumpliaračius perteikia suvartotą elektros energijos kiekį.

Esminis šių skaitiklių trūkumas – sąlyginai paprasta atlikti nelegalias modifikacijas, siekiant nesąžiningai vartoti elektros energiją.

Elektromechaninių skaitiklių tikslumas

Elektromechaniniams elektros energijos skaitikliams taikomi tarptautiniai tikslumo standartai, tokie kaip *IEC 62053-11: Elektromechaniniai aktyviosios galios energijos skaitikliai*. Jame nustatoma, kad tokio tipo įrenginiai turi atitikti 0,5, 1, arba 2 tikslumo klases. Kas atitinka $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$, arba $\pm 2\%$ galimą paklaidą nuo realaus matuojamo dydžio [7]. Šie skaitikliai eksploataavimo pradžioje yra tikslūs, bet po tam tikro laiko jų tikslumas gali sumažėti.

Pagrindiniai faktoriai, lemiantys tikslumo sumažėjimą:

1. nusidėvėjimas – didžiausią įtaką tikslumui darantis faktorius, dėl kurio didėja mechaninis judančių dalių pasipriešinimas ir apskaitomas mažesnis elektros energijos kiekis;
2. disko slinkimas – esant perteklinei įtampai ritėse ar likutiniams magnetiniams laukams, galima energijos vartojimo fiksacija net nesant apkrovai;
3. temperatūros pokyčiai – sudedamųjų dalių varžos ar magnetų stiprio pokyčio sukelti netikslumai;
4. įtampos ir dažnio svyravimai;
5. išoriniai magnetiniai laukai;
6. vibracijos;
7. netiesinės apkrovos ir harmonikos;
8. perkrovos – pastovi perkrova gali pakeisti ričių varžą dėl nenominalios temperatūros, išmagnetizuoti stabdymo magnetą;
9. galios faktorius – gali sukelti nežymias tikslumo paklaidas.

Tokio tipo skaitikliai yra paprasti, pakankamai atsparūs aplinkos veiksniams, gan tikslūs ir gali atitikti keliamus tikslumo standartus. Tačiau reikia paminėti, kad po tam tikro laiko, dėl nusidėvėjimo tikslumas mažėja, sąlyginai lengva paveikti apskaitos mechanizmą, skaičiuoja tik suvartotą energiją. Duomenims nurašyti reikalingas žmogaus darbas, galimos nuskaitymo klaidos, o dėl modernių prietaisų elektros tinkluose sukeliama harmonikų gali sumažėti tikslumas.

1.1.2. Elektroniniai skaitikliai

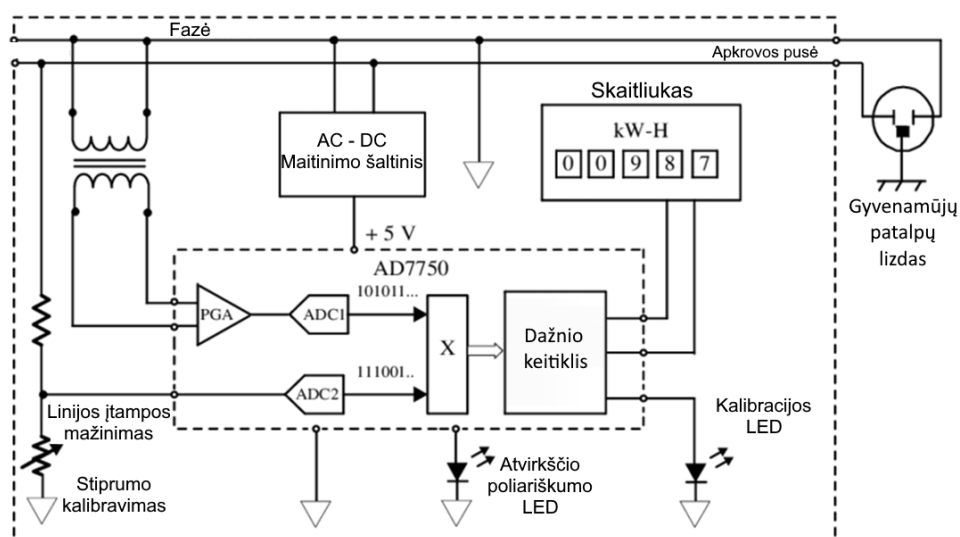
Elektroniniai elektros energijos skaitikliai yra pranašesni už kitus prieš tai paminėtus skaitiklius, renkami duomenys neapsiriboja sumine elektros energijos verte, bet ir nuskaito kitus tinklo parametrus. Įprastai atpažįstami iš skystųjų kristalų (angl. *Liquid Crystal Display*) ar šviesos diodų (angl. *Light Emitting Diode*) ekranų. Pasižymi didesniu ir ilgiau išliekančiu nuskaitomų duomenų tikslumu. Esminis skirtumas – saugomi ne tik suvartotos elektros energijos duomenys. Tokio tipo skaitikliai yra svarbi šiuolaikinės energetikos sistemos dalis.



2 pav. Rytų skirstomųjų tinklų elektros energijos skaitiklis Lietuvoje

Šie skaitikliai dažniausiai dar yra su jau nebeegzistuojančių įmonių logotipais: RST – rytų skirstomųjų tinklų, VST – vakarų skirstomųjų tinklų.

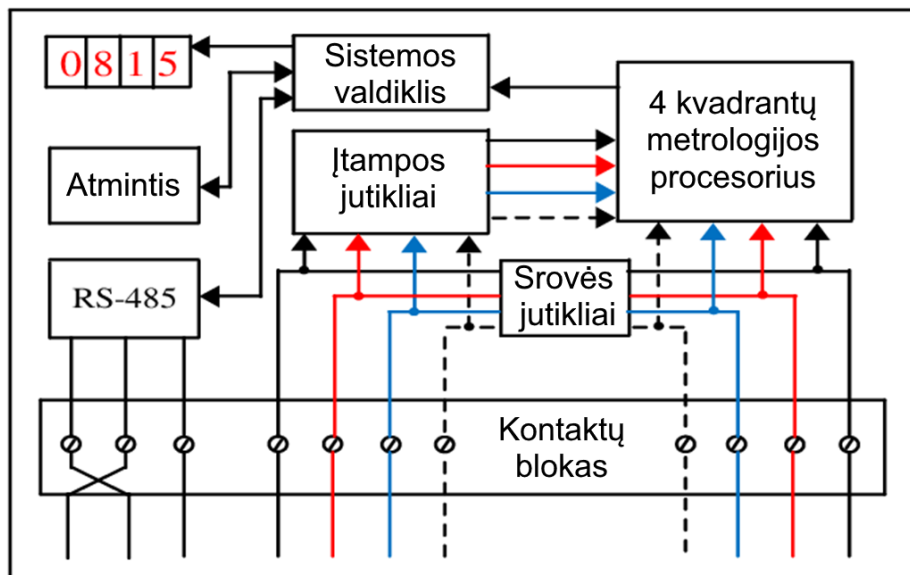
Elektroniniai skaitikliai jau yra lengvai integruojami į pažangią apskaitos infrastruktūrą (angl. *AMI – Advanced Metering Infrastructure*), kurie gali komunikuoti su skirstymo ar perdavimo operatoriais perduodant užfiksuotus duomenis [3].



3 pav. Analoginio skaitiklio schema [4]

Analoginiai elektros energijos skaitikliai vartojimą verčia į atitinkamą dažnį ar pulsus, kurie yra sumuojami ir atvaizduojami ekrane. Įtampos ir srovės matavimams naudojami įtampos dalikliai ir srovės transformatoriai [4]. Energijos suvartojimas apskaičiuojamas integruojant gautų signalų dažnį per tam tikrą nustatytą laiko periodą [4].

Skaitmeniniai elektroniniai elektros energijos skaitikliai užtikrina dar didesnę nuskaitymų duomenų tikslumą. Turi lokalią atmintį surinktiems duomenims saugoti, tipiška užtenkančios iki 2 metų istoriniams parametrų talpinti [8]. Tokio tipo skaitikliai neturi judančių dalių, tad yra atsparūs išoriniams mechaniniams trikdžiams bei neturi dalių, kurios galėtų po tam tikro laiko nusidėvėti.



4 pav. Skaitmeninio elektros energijos skaitiklio supaprastinta diagrama [4]

Įprastai tokio tipo skaitikliai susideda iš vietinės tik nuskaitytos atminties (angl. *electrically erasable programmable read-only memory*), komunikacinių, srovės ir įtampos apskaitos blokų. Visa ši informacija apskaitoma ir apdorojama vidiniame procesoriuje. Duomenys atvaizduojami ekrane.

Elektroninių skaitiklių esminiai pranašumai:

1. tikslesni – galima tikslumo klasė 0,2, lyginant su elektromechaninių 0,5;
2. patikimesni – neturi mechaninių, judančių dalių. Mažiau priklausomi nuo aplinkos įtakos, atsparesni drėgmei ir išorinėms vibracijoms. Ilgesnis galimas eksploataavimo periodas;
3. atsparesni – geresnis atsparumas prieš elektromagnetinius ir kitus išorinius tyčinius veiksnius.

1.1.3. Išmanieji elektros energijos skaitikliai

Šiuo metu Lietuvoje sparčiai diegiami / keičiami esami skaitikliai išmaniaisiais elektros energijos skaitikliais. Šiuo metu, skirstymo tinkle, sumontuota daugiau kaip 1 milijonas tokių įrenginių [1].

Lietuvoje dažniausiai naudojami *Sagemcom* gamintojo vienfaziai XS211 ir trifaziai T211, T310 skaitikliai [9]. Pasak energijos skirstymo operatorių, šie įrenginiai vartotojams turėtų būti patrauklūs dėl kelių priežasčių [1]:

- lengva vartojimo duomenų analizė;
- tikslios mokėjimo sumos ir duomenys perteikti sąskaitose;
- nuotolinis rodmenų nuskaitymas;
- operatyvesnis gedimų identifikavimas ir šalinimas.

Tarp šių priežasčių, vartotojams kaip papildomą galimą naudą būtų galima vertinti P1 sąsają, kurios privalumai aptarti 1.1.4 skyriuje.

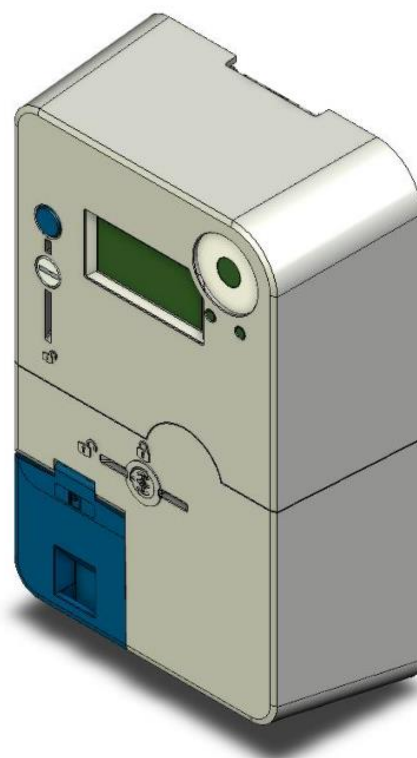
Pagal ESO, šie skaitikliai pranašesni ir automatizuotoje apskaitoje [10]:

1. palaikomas 15 minučių duomenų fiksavimas;
2. fiksuojami elektros energijos kokybės rodikliai;
3. galimas tarifų planų keitimas nuotoliu;
4. apskaitoma ir elektros energijos gamyba (dvikryptis skaitiklis);
5. apskaito reaktyviąją galią;
6. išmaniojo skaitiklio įrengimas – nemokamas.

Kadangi tokio tipo skaitikliai turi ryšio sąsają su skirstomuoju tinklu, pranešimai apie galimus gedimus anksčiau ir operatyviau pasiekia tinklo operatorių.

Pagrindiniai fiksuojami tinklo parametrai:

- aktyvioji galia (kW);
- reaktyvioji galia (kVar);
- galios faktorius.



5 pav. *Sagemcom* išmaniojo elektros skaitiklio modelis, naudojamas Lietuvoje [11]

Pirmoje lentelėje pateikiamos vieno iš Lietuvoje naudojamų išmaniųjų elektros energijos skaitiklių specifikacijos.

1 lentelė. Sagemcom T211 išmanaus elektros energijos skaitiklio specifikacijos [12]

Nominali įtampa (Įtampos diapazonas)	3x230/400 V
Nominalus dažnis (Įtampos diapazonas)	50 Hz
Minimali srovė	0,25 A
Atskaitos srovė	5 A
Maksimali srovė	100 A
Pastovumas	1000 imp/kWh
Tikslumo tipas (MPE)	Cl. B
Aplinka	
Klimato	[-40°C : +70°C]
Mechaninė	M2
Elektromagnetinė	E2
Sujungimo būdas (-ai)	3P4W
Skirtas montuoti viduje	

Šių skaitiklių reikalaujamas matavimo tikslumas grindžiami standartais, pavyzdžiui, *IEEE 1459-2010*. Juose apibrėžiami galios matavimai įvairiomis sąlygomis, įskaitant sinusinius, nesinusinius, subalansuotus ir nesubalansuotus scenarijus, taip užtikrinant šiuolaikinių elektroninių skaitiklių ir galios analizatorių tikslumą ir nuoseklumą [13].

Išmaniųjų skaitiklių savybė tiksliai matuoti galios koeficientą ir reaktyviają galią turi didelę ekonominę ir eksploatacinę reikšmę tinklo efektyvinimo sferoje. Dėl žemo galios faktoriaus tiesiogiai švaistoma energija, gali padidėti vartotojų sąnaudos, juridiniams klientams reaktyvioji elektros energija – apmokestinta. Tokie skaitikliai leidžia atlikti tikslus šių parametru matavimus, todėl galima imtis tikslingų intervencinių priemonių, pavyzdžiui, strategiškai prijungti galios koeficiento korekcijos kondensatorius, kurie pagerina energijos vartojimo efektyvumą, sumažina sistemos nuostolius ir atlaisvina vertingus tinklo pajėgumus. Ši galimybė teikia tiesioginę naudą didinant efektyvumą ir sumažina infrastruktūros apkrovą, padeda optimizuoti savo elektros energijos vartojimą.

1.1.4. P1 sąsaja

6 pav. P1 prievadas išmanaus elektros energijos skaitiklio duomenims nuskaityti

P1 prievadas yra standartizuota ryšio sąsaja, naudojama daugelyje išmaniųjų elektros energijos skaitiklių Europos šalyse, pagamintų pagal Olandijos išmaniųjų skaitiklių reikalavimus (angl. *Dutch Smart Meter Requirements*). Šis prievadas, įprastai RJ12 jungtis, yra išsamus namų energijos suvartojimo duomenų šaltinis, per kurį gali būti nuskaityti duomenys tiesiai iš skaitiklio. Išmanieji skaitikliai išmatuotus elektros tinklo parametrus perduoda per P1 prievadą standartizuotu formatu, vartotojo nustatyta greیتaveika. Prijungę suderinamą P1 skaitytuvą arba energijos valdymo sistemą, vartotojai gali stebėti išsamius statistinius duomenis, vartojimo tendencijas bei automatizuoti taupymo procedūras, pavyzdžiui, optimizuoti elektromobilių įkrovimą arba energijos kaupimą pagal dinamišką kainodarą, arba saulės energijos prieinamumą. Rinkoje siūlomas ir dinaminės galios valdiklis elektromobilių stotelėms, jungiamas per šią sąsają. Ši informacija gali būti labai naudinga vartotojams, siekiantiems kelti savo namų ūkio elektros energijos efektyvumą, susimąžinti elektros energijos sąnaudas.

1.1.5. Paklaidos

Paklaida – skirtumas tarp realios ir išmatuotos vertės. Beveik visi matavimo prietaisai turi paklaidas, esminis dalykas – kokia paklaida gali būti priimtina, įvertinant galimus nuostolius kilusius dėl jos ar prietaiso tikslumo klasės. Elektros energijos apskaitai naudojami skaitikliai turi atitikti keliamus reikalavimus – atitinkamą tikslumo klasę. Tai yra pagrindinė specifikacija, kuri nusako skaitiklio galimą paklaidą numatytomis sąlygomis [14]. Skaitiklio paklaida apskaičiuojama pagal formulę (1) ir pateikiama procentine išraiška [14]:

$$\delta = \frac{E_{aps} - E_{fakt}}{E_{fakt}} \cdot 100; \quad (1)$$

čia E_{aps} – skaitiklio apskaityta aktyvinė elektros energija; E_{fakt} – faktinė suvartota aktyvine elektros energija.

Elektroniniams kintamosios srovės elektros skaitikliams, apskaitantiems aktyviają elektros energiją, taikomas EN 50470-3 standartas [15]. Pagal šį standartą, skaitikliai yra skirstomi į tris klases: A, B ir C. Matuojamų verčių paklaidos negali viršyti procentinių verčių, pateiktų 2 lentelėje.

2 lentelė. Maksimalios leistinos elektros energijos skaitiklių srovės matavimo paklaidos [14]

Srovės vertė	Darbinė temperatūra											
	5 °C iki 30 °C			-10 °C iki 5 °C arba 30 °C iki 40 °C			-25 °C iki -10 °C arba 40 °C iki 55 °C			-40 °C iki -25 °C arba 55 °C iki 70 °C		
	Skaitiklio klasės indeksas											
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Vienos fazės skaitiklis, trifazis skaitiklis simetrine apkrova												
$I_{\min} \leq I \leq I_{tr}$	3,50	2,00	1,00	5,00	2,50	1,30	7,00	3,50	1,70	9,00	4,00	2,00
$I_{tr} \leq I \leq I_{\max}$	3,50	2,00	0,70	4,50	2,50	1,00	7,00	3,50	1,30	9,00	4,00	1,50
Trifazis skaitiklis vienfaže apkrova su balansuota įtampa atvaduose												
$I_{tr} \leq I \leq I_{\max}$	4,00	2,50	1,00	5,00	3,00	1,30	7,00	4,00	1,70	9,00	4,50	2,00

Pagal 1 lentelę, išmaniųjų elektros energijos skaitiklių maksimalios leistinos paklaidos klasė – B. Iš 2 lentelės, tai atitinka 2,5 % maksimalią paklaidą. Iš to paties standarto maksimali įtampos matavimo paklaida – 1 %.

1.2. Veiksniai nuo kurių priklauso elektros tinklo parametrai

Elektros energijos perdavimo ir skirstymo infrastruktūros parametrai yra pastoviai kintantys nuo aibės įvairių faktorių: oro sąlygų, vartojimo ir kt. Visi elektros energijos tinklo parametrai yra vienaip ar kitaip susiję. Tiekiamos elektros energijos kokybė ir stabilumas yra nuolat stebimi. Pagrindiniai parametrai: įtampa, srovė, aktyvioji, reaktyvioji ir pilnutinės galios.

Pagrindiniai veiksniai, darantys įtaką elektros tinklo parametrų:

- apkrovos pokyčiai – kintant apkrovai, kinta įtampa, srovė ir dažnis. Esant didesnei apkrovai nei generacijai, įtampa ir tinklo dažnis krenta, didesnės generacijos atveju įtampa ir tinklo dažnis kyla. Šiuos parametrus svarbu pastoviai reguliuoti ir išlaikyti balansą, stabilumą;
- perdavimo nuostoliai – vieni iš pagrindinių nuostolių, susidarantys dėl tinklų varžos ir elektros tinkluose naudojamų įrangos galios nuostolių. Naudojantis programine įranga, esant apibrėžtomis sąlygomis šios vertės gali būti atitinkamai įvertintos;
- reaktyviosios galios valdymas – užtikrina įtampos lygio reguliavimą tinkle. Į tinklą generuojant šią galią įtampa kyla, ją vartojant – mažėja. Kinta tinklo galios faktorius, įtampa, užtikrinamas įtampos lygis standartiniuose diapazonuose;
- įtampos reguliavimas – įtampa gali būti reguliuojama ne tik reguliuojant reaktyviąją galią. Tinkle tai atlieka transformatoriai ir autotransformatoriai;
- oro sąlygos – priklausomai nuo aplinkos temperatūros, kinta laidininkų varža, elektros tinklo įrangos efektyvumas. Priklausomai nuo pokyčio, elektros tinklo pralaidumas didėja, o nuostoliai mažėja. Elektros įrenginiuose kylant temperatūrai gali mažėti jų efektyvumas, lemiantis apkrovos padidėjimą.

Visi šie veiksniai dėsningai kinta, priklausomai nuo vienas kito. Jų kitimą galima fiksuoti įvairiose programinėse įrangose, dažniausiai taikant *Newton-o-Raphson-o* metodą.

1.3. Tipiniai neteisėtos elektros energijos vartojimo metodai ir jų pažabojimo būdai

Neteisėtas elektros energijos vartojimas yra priskiriamas netechniniams nuostoliams (angl. *non-technical losses*) ir yra didelė problema daranti didelę ekonominę žalą visame pasaulyje. Pasaulyje skaičiuojama, kad kasmet patiriami 96 milijardai JAV dolerių nuostolių [3]. Tai stabdo investicijas į esamą elektros energetikos infrastruktūrą, gali sukelti pavojų žmogaus gyvybei bei turtui. Įprasti vagysčių nustatymo metodai dažniausiai reikalauja daug darbo ir laiko, tačiau jie nėra efektyvūs.

Diegiant išmaniuosius elektros energijos skaitiklius su pažangia apskaitos infrastruktūra, NTN nustatymo procesas transformuojasi: fiziniai patikrinimai, reikalaujantys žmogiškųjų resursų, virsta analitiniais, nes naudojamosi surinktais duomenimis. Tokie skaitikliai renka didelės raiškos duomenis: elektros energijos suvartojimo, įtampos, srovės, galios faktorius. Registruojami įvairūs įvykiai, gedimai ar kt.

Tinkluose nuostoliai yra skirtumas tarp patiektos ir apskaitytos elektros energijos [16]. Nuostoliai susideda iš jau aptartų NTN ir techninių nuostolių (angl. *technical losses*), kurie susidaro perdavimo

tinkle, ir išsiskiria šiluma transformatoriuose ir kituose elektros energetikos infrastruktūros įrenginiuose.

$$E_{nuost} = E_{pat} - E_{ap} = E_{TN} + E_{NTN}; \quad (2)$$

čia E_{nuost} – tinklo nuostoliai; E_{pat} – pateikta elektros energija; E_{ap} – apskaityta elektros energija.

NTN gali atsirasti dėl įvairių priežasčių: skaitiklių paklaidos, prijungimo klaidos, neteisėto elektros energijos vartojimo, skaitiklių gedimo. Neteisėto elektros energijos vartojimo nuostoliai gausiausiai paplitę besivystančiose šalyse ir jie gali sudaryti iki 73 procentų pagamintos elektros energijos [17]. Esminis dalykas – ne visi NTN yra sukelti neteisėto elektros energijos vartojimo.

Tinkluose, kuriuose įdiegti išmanieji elektros energijos skaitikliai, vagystėms naudojamos fizinės atakos. Tačiau gali būti ir kibernetinės atakos, kurios paveiktų duomenų perdavimą ar perduotus duomenis duombazėse.

Išmaniuosius elektros energijos skaitiklius veikiantys veiksniai [16]:

- magnetinio lauko trikdžiai: šalia apskaitos įrenginio pastatomas stiprus magnetas, kurio sukuriamas laukas tiesiogiai veikia išmanaus skaitiklio apskaitomus duomenis. Esant pakankamai stipriam laukiui, apskaita gali visiškai sustoti;
- krypties apkeitimas: sukeičiama laidininkų kryptis, esant vienkrypčiam elektros energijos skaitikliui galimos nulinės arba neigiamos apskaitos vertės;
- šuntavimas: galimi du variantai – pilnas ir dalinis. Dalinio atveju, tarp skaitiklio įėjimo ir išėjimo laidininkų yra patalpinamas papildomas laidininkas per vidurį, kuriuo teka dalis elektros energijos srauto ir apskaitomas mažesnis sunaudotas elektros energijos kiekis. Pilno šuntavimo metu, skaitiklis pilnai apeinamas ir nebuskaitomi jokie duomenys. Galimas ir srovės transformatorių antrinės grandinės šuntavimas;
- tiesioginis prisijungimas prie linijos: galimai sunkiausiai aptinkamas vagystės būdas, kuomet yra tiesiogiai prisijungiama prie elektros linijos, neturint oficialaus įvado.

3 fazių skaitikliai	AMI lygio duomenys (duomenų rinkimo lygmenyje)	Energijos suvartojimas (Wh)	
		Vidutinė fazės srovė (A): Visų 3 fazių	
		Vidutinė neutralės srovė (A)	
		Vidutinė fazės įtampa (V): Visų 3 fazių	
		Galios koeficientas (be matavimo vienetų): Visų 3 fazių	
3 fazių skaitikliai	Momentiniai skaitiklio įvykiai	Srovės transformatoriaus apėjimo įvykis	Išorinio magneto įvykis
		Atidaryto dangtelio įvykis	Įtampos dingimo įvykis
		Srovės transformatoriaus atjungimo įvykis	Įtampos disbalansas
		Srovės disbalansas	Įžeminimo apkrovimas
		Mažas galios koeficientas	Neutralės trikdžiai

7 pav. Išmaniųjų elektros energijos skaitiklių fiksuojami duomenys ir įvykiai [18]

1.4. Duomenų analize grįsti paklaidų ir vagysčių aptikimo metodai

Yra daug literatūros, tyrinėjančios išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenis paklaidų ir neteisėto elektros energijos vartojimo nustatymui. Duomenų analize grįsti metodai naudoja mašininio mokymosi ir gilaus mokymosi metodus. Jais naudojantis apdorojami dideli sudėtingų duomenų kiekiai šiam tikslui siekti.

Tokiais analizės metodais siekiama užfiksuoti netipinius veikimo režimus – anomalijas. Įprastai tai apima nepastovumą, išskirtinumą ar nukrypimą nuo prieš tai nustatytų vartojimo tendencijų fiksavimu [19]. Dirbtinio intelekto anomalijų aptikimo modeliai yra tikslesni nustatant netipinius vartojimo reiškinius, lyginant su tradiciniais statistiniais modeliais [20].

1.4.1. Gilaus mokymosi modeliai paklaidų nustatymui

Gilaus mokymosi modeliai yra tinkami laiko eilučių duomenų iš išmaniųjų energijos skaitiklių apdorojimui, efektyviai galintys nustatyti skaitiklių paklaidas.

Ilgos trumpalaikės atminties tinklas (angl. *LSTM – Long-Short term memory*) pasižymi aukštu efektyvumu apdorojant nuoseklius duomenis. Šie tinklai naudojami nuspėti galima elektros energijos vartojimą, naudojantis istoriniais surinktais duomenimis [21]. Šis metodas gali nustatyti skaitiklius, kurių duomenys yra netikslūs. Tai užtikrina keitimą tik įrenginių su fiksuota paklaida, prailginant įprastai veikiančių skaitiklių eksploatavimo laikotarpį [21]. Tokio tipo tinklo naudojimas paklaidų nustatymui gali siekti 82 % tikslumą [21].

Konvoliucinių neuroninių tinklų (angl. *CNN – Convolutional Neural Networks*) naudojimas yra plačiai paplitęs klasifikavimo užduotyse. Naudojantis šiais tinklais, išmanieji skaitikliai, pasižymintys paklaidomis, yra atitinkamai klasifikuojami transformuojant laiko eilučių duomenis, kurie yra įvedami į CNN [22]. Taip pat naudojami autoenkoderiai. Naudojantis šiuo modeliu, anomalijos yra nustatomos lyginant įprastinio vartojimo tendencijas [19].

1.4.2. Gilaus mokymosi modeliai vagysčių nustatymui

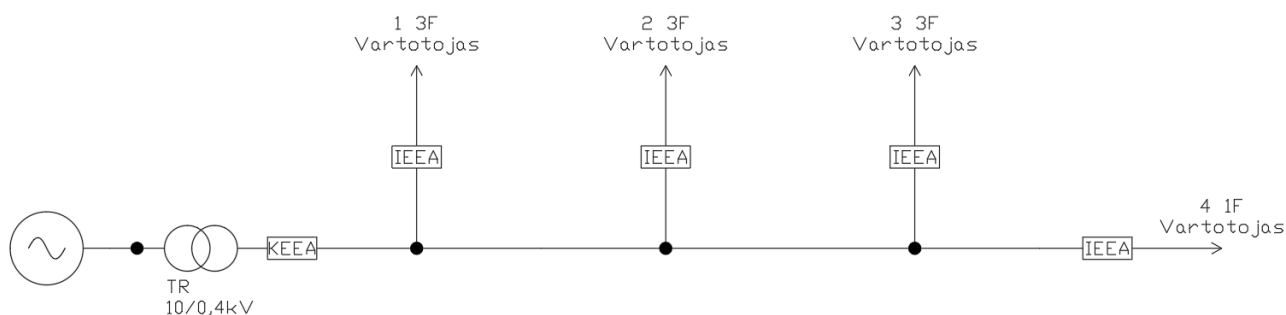
Vagysčių nustatymui mokslinėje literatūroje vyrauja MLP (angl. *Multi-Layer Perceptron*), GRU (angl. *Gated Recurrent Units*) bei hibridinių CNN architektūrų tinklai skaitiklių duomenų apdorojimui.

Apžvelgtos MLP ir GRU tinklų hibridinės sistemos. Šie tinklai sujungiami, kad tikslingiau įvertinti turimus duomenis, kurie sukelia iššūkių dėl skirtingų parametrų vienetų ir nebalansuoto elektros energijos vartojimo pasiskirstymo [23]. Tokio tipo sistemos susideda iš kelių lygių: duomenų apdorojimas (trūkstančių verčių, per stipriai išsiskiriančių verčių tvarkymas), duomenų balansavimas k-vidurkinimo metodais, GRU ir MLP modelių pritaikymas [23].

Hibridiniai CNN pagrindo modeliai taikomi ne tik įprastų anomalijų nustatymui, yra tikslingai taikomi vagysčių atvejų nustatymui: duomenų klastojimui bei kibernetinėms atakoms [24].

2. Metodologinė dalis

Tiriamasis objektas – 0,4 kV skirstomojo tinklo linija su vartotojais. Ji susideda iš išorinės sistemos, 10/0,4 kV transformatorinės, trijų trifazių ir vieno vienfazio vartotojo. Visi apskaitos prietaisai yra išmanūs, fiksuojantys elektrinius parametrus aukštu diskretizavimo dažniu. Transformatorinėje, už transformatoriaus, žemos įtampos pusėje yra kontrolinis elektros energijos apskaitos prietaisas (toliau KEEA), kuris yra metrologiškai tikslus ir jo duomenys yra naudojami kaip kontroliniai. Toliau kiekvienas atskiras vartotojas turi išmanų elektros energijos skaitiklį, arba išmanią elektros energijos apskaitą (toliau IEEA). Remiantis KEEA ir IEEA duomenimis atliekamas tyrimas dėl paklaidų ir jų vietų nustatymo.



8 pav. Tiriamojo tinklo principinė schema

Sistema sudaryta iš:

- transformatorinės, kurioje yra vienas 10/0,4 kV trikampis-žvaigždė transformatorius su įžeminta neutrale;
- 7 oro linijų;
- 3 trifazių vartotojų;
- 1 vienfazio vartotojo.

Tinklo linijų parametrai pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Tiriamojo tinklo linijų parametrai

Linija	Tipas	Laidininkas	Markė	Skerspjūvis, mm ²	Įtampa, V	Ilgis, m
L1	OL	Aliuminis	A	35	400	200
L1_1	OL	Aliuminis	A	25	400	100
L2	OL	Aliuminis	A	35	400	50
L2_1	OL	Aliuminis	A	25	400	50
L3	OL	Aliuminis	A	35	400	70
L3_1	OL	Aliuminis	A	25	400	40
L4	OL	Aliuminis	A	25	400	50

Toliau 4 ir 5 lentelėse yra pateikiami parinktų laidininkų techniniai parametrai bei vartotojų maksimalios galimos apkrovos.

4 lentelė. 0,4-35 kV neizoliuoti aliuminiai laidai (A) [25]

Skerspjūvis, mm ²	Aktyvioji varža +20°C, Ω/km	Leistinoji ilgalaikė srovė ore, A	Leistinoji TJ srovė, kA
25	1,18	136	2,5
35	0,85	170	3,4

5 lentelė. Vartotojų maksimalios galimos apkrovos

Vartotojas	Maksimali apkrova, kVA
1 trifazis vartotojas	50
2 trifazis vartotojas	30
3 trifazis vartotojas	9
4 vienfazis vartotojas	3

Tyrimui atlikti yra priimamos šios prielaidos:

- KEEA yra tiksli ir metrologiškai patikrinta;
- visų vartotojų tinkle vartojimas apskaitomas išmaniaisiais skaitikliais;
- tiriamas žemos įtampos 0,4 kV tinklas;
- visų laidininkų temperatūra yra 20°C;
- žemės varža 100 Ω·m;
- modeliujama apkrova yra pastovi.

2.1. Programinė įranga

Elektros energetikos sistemų modeliavimas yra atliekamas skirtingų simuliacijų tipo programų: elektromagnetinių pereinamųjų procesų (angl. *EMT – electromagnetic transient*) ir kvadratinio vidurkio (angl. *RMS – root mean squared*) [26].

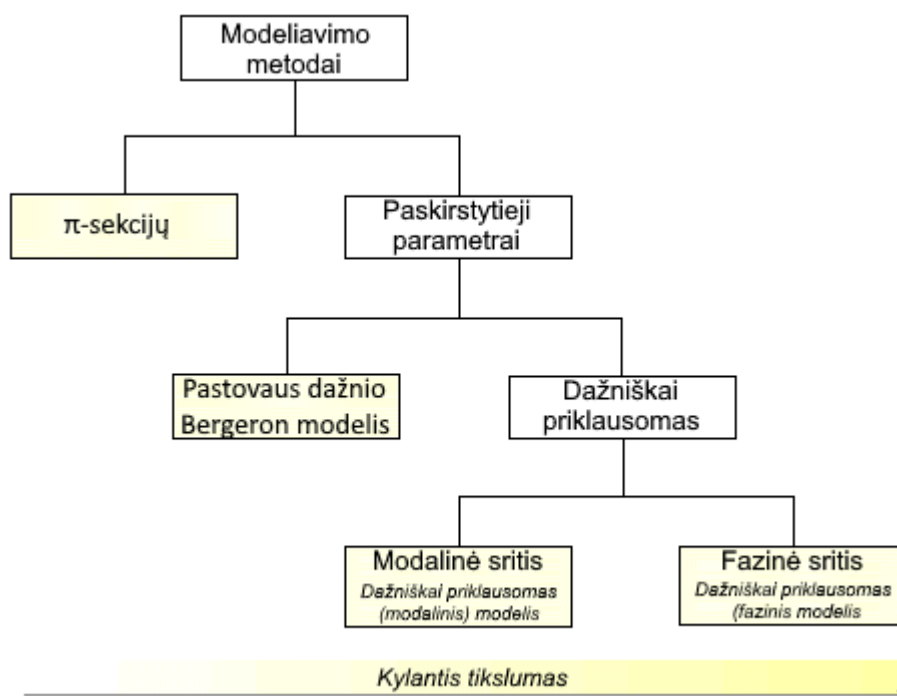
RMS modeliavimas yra skirtas galios srautų ir tinklo parametrų pastovios būsenos skaičiavimui. Vertinamas bendras sistemos pokytis, naudojamos efektinės vertės [26]. Taikomos modeliuojant didelio masto tinklus, siekiant apskaičiuoti galios srautų pasiskirstymą, srovės ir įtampos mazguose parametrus, trumpųjų jungimų sroves, tinklo atsistatymą po trumpojo jungimo.

EMT yra skirtas tinklo pokyčiams vertinti įvykus komutacijai, žaibo iškrovai ar kitiems gedimams. Modeliuojami jų galimi sukelti įtampos ar srovės šuoliai, švytavimas tinkluose [26]. Visi šie įvykiai gali turėti padarinių įrangos ilgaamžiškumui ar veikimui, galintys sumažinti sistemos stabilumą. Fiksuojamos momentinės vertės.

Simuliacijoms atlikti pasirinktas EMT programinis paketas *XTAP*, kartu su paprogramėms *XPLT* ir *XTLC*. Šia programine įranga gali būti atliekami galios srautų skaičiavimai ir elektros parametrų tyrimai didesniu tikslumu, nes sistema gali būti vertinama nestabiliaus, asimetrinės apkrovos režimais. Šis paketas yra Japonų sukurta elektros energijos sistemų analizės modeliavimo programa. Japonijoje plačiai naudojama atliekamiems tinklo skaičiavimams, pati programinė įranga yra nemokama ir lengvai prieinama. *XPLT* dalis naudojama gautų rezultatų grafiniam atvaizdavimui, *XTLC* tinklų linijų parametrų matricių apskaičiavimui, tikslesniems linijų nuostolių rezultatams gauti.

2.2. Modeliavimo metodai

Įprastai, elektromagnetinių pereinamųjų procesų simuliacijose naudojamos dvi pagrindinės modeliavimo technikos: pastovių ir nuo dažnio priklausomų parametru. Šiomis technikomis galima atlikti simuliacijas, kurių pagrindinis vertinamas objektas yra perdavimo linijos. Abu metodai gali būti taikomi naudojant EMT tipo programinę įrangą. Esminiai skirtumai tarp jų – dažninė priklausomybė. Šaltiniuose nėra bendro numatyto modeliavimo grupavimo ar hierarchijos, tarp jų vertinami metodai dažnai skiriasi, kaip ir jų klasifikavimas ar tipai. Vieno iš šaltinių modelių išskaidymas pateikiamas 9 pav.



9 pav. Vieno iš šaltinių modelių grupavimas [27]

Kadangi nagrinėtuose šaltiniuose nepastebėta vieno bendro metodų klasifikavimo ar specifinės struktūros modeliavimo technikose, šiame darbe buvo vertinami trys galimi modeliavimo metodai:

- π -sekcijos;
- pastovių parametru;
- dažninės priklausomybės.

π -sekcijos linijų modeliavimo būdas, kuomet linija yra apytiksliai aprašoma π -ekvivalente schema. Įprastai yra naudojamas vidutinių linijų (iki 250 kilometrų) parametru skaičiavimui [28]. Tinkamas oro perdavimo ir skirstomosioms, kabelinėms linijoms. Linijų parametrai trifazėje sistemoje aprašomi varžos, induktyvumo ir talpumo matricomis [28]. Kadangi šis modelis yra grupuotas apytikslis trumpų linijų modelis, labai komplikauta nustatyti bangų propagavimą [29]. Geriausia modeliuoti prie stabilaus, nekintančio tinklo dažnio, tuomet gaunami rezultatai yra tikslūs.

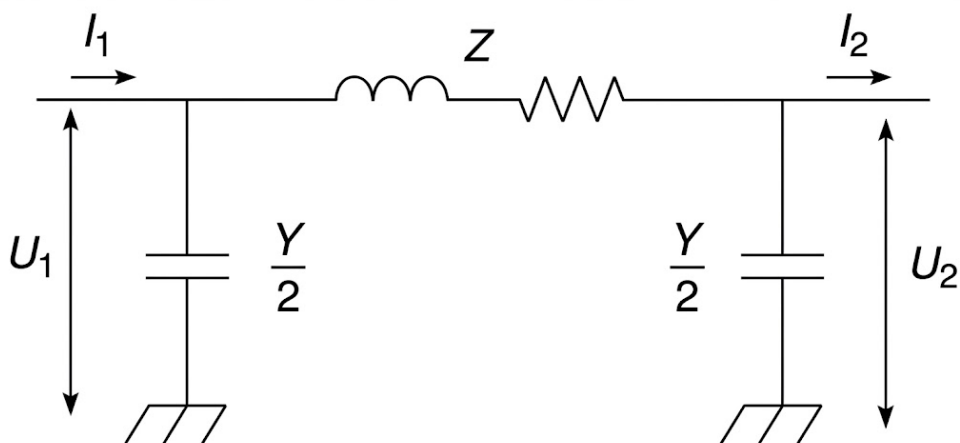
Pastovių parametru linijų simuliacijai yra naudojami fiksuoti parametrai prie skirtingų galimų dažnių. Pats skaičiavimas yra grįstas *Bergeronfs-o* metodu ir *Wedepohlfs-o* modaline teorija. Šiuo metodu neįmanoma įvertinti parametru, kurie priklauso nuo dažnio, susidarę dėl laidininkų paviršiaus efekto ar žemės įtakos.

Nuo dažnio priklausomi modeliai tiksliai apskaičiuoja linijų parametrus, priklausančius nuo dažnio [29]. Linijų parametrai nėra grupuoti, o paskirstyti per visą vertinamos linijos ilgį, priešingai nei π -sekcijų metodu. Tai įgyvendinama atliekant įvestų linijų parametru skaičiavimus prie aibės skirtingų galimų dažnio verčių. Dėl didesnių skaičiavimo kiekių šio tipo modeliai reikalauja daugiau kompiuterinių resursų simuliacijoms atlikti, bet išgaunamas didesnis tikslumas plačiame dažnių diapazone [29]. Įprastai, siekiant vertinti pereinamuosius procesus ar kitus tinklo banginius veiksnius simuliacijoms naudojamas būtent šis modeliavimo būdas ar jo atšaka.

2.3. Matematinis modelis

Modeliavimui pasirinkta aptarta EMT modeliavimo programa su jos paprogramėmis *XTAP*. Įvertinus skirtingas modeliavimo technikas, buvo pasirinktas π -sekcijų modeliavimo būdas, kuriame yra vertinamos trumpos linijos (iki 80 km) [28]. Banginiai reiškiniai tiriami nebus, simuliacijos atliekamos modeliuojant pastoviu tinklo dažniu. Šis modeliavimo būdas atitinka tyrimui reikalingus reikalavimus, išlaiko tikslų linijų parametru bei nuostolių įvertinimą.

Kadangi vertinamos linijos yra elektriškai trumpos, bangų propagacijos atsilikimai yra nykstantai maži. Taip pat banginiai reiškiniai linijose nėra aktualūs, todėl šis linijų modeliavimas pilnai atitinka tyrimo poreikius.



10 pav. π -sekcijų linijos modelio atstojamoji schema

Šiuo metodu skaičiavimai atliekami pagal formulę [30]:

$$U_1 = \left(U_2 \cdot \frac{Y}{2} + I_2 \right) \cdot Z + U_2; \quad (3)$$

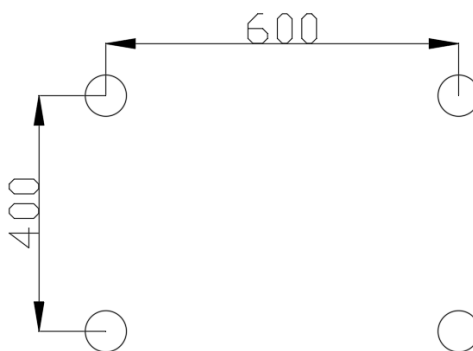
čia U_1 – įtampa linijos pradžioje; U_2 – įtampa linijos gale; I_2 – srovė linijos gale; Z – pilnutinė išilginė varža; Y – šuntuotas laidis, atitinkantis linijos talpumą.

Iš formulės išreiškiama I_1 , srovė linijos pradžioje [30]:

$$I_1 = U_S \cdot \frac{Y}{2} + U_2 \cdot \frac{Y}{2} + I_2. \quad (4)$$

Linijų parametru tiksliam skaičiavimui modelyje yra sudaromos matricos, kadangi modeliuojama trifazė sistema. Jos yra trys: varžos, induktyvumo ir talpos [28]. Pagal literatūrą, skaičiuojant skirstomųjų elektros tinklų režimus, įprastai, talpinės srovės yra nepaisomos [31]. Tačiau naudojama programinė įranga *XTLC* pagal laidininkų parametrus ir išsidėstymą erdvėje sudaro visų trijų

parametrų matricas. Vertinamos skirstomojo tinklo oro linijos laidininkų išsidėstymas erdvėje pateikiamas 11 pav.



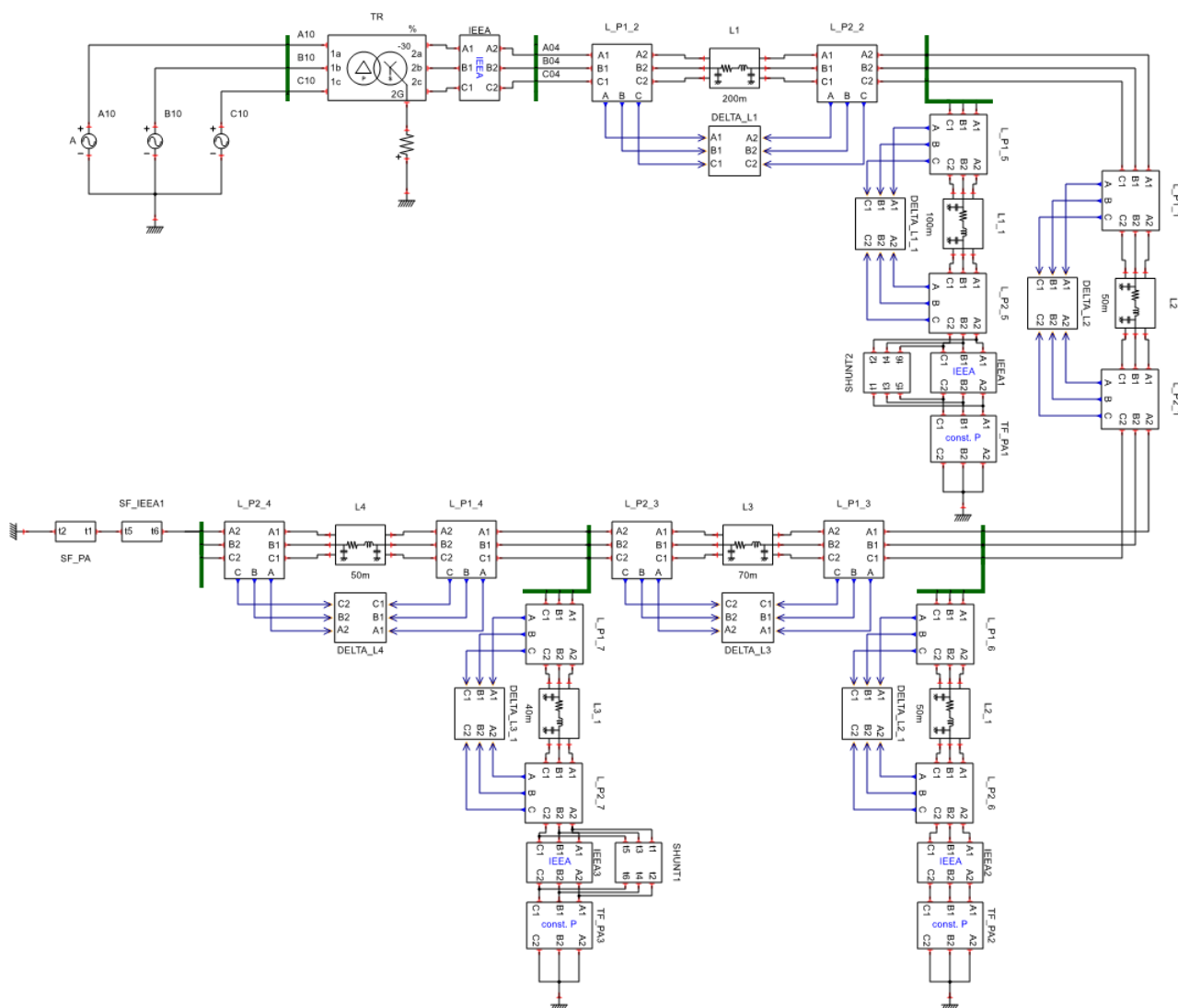
11 pav. Oro linijos laidininkų išdėstymas erdvėje

Apskaičiuota vienos iš linijų suiminės išilginės kompleksinės varžos matrica *XTLC* programine įranga pateikiama 6 lentelėje.

6 lentelė. Linijos suminė išilginė kompleksinė varžos matrica

Laidininkas	Suminė išilginė kompleksinė varža, Ω/m		
	A	B	C
Realioji dalis			
A	0,00100	0,00015	0,00016
B	0,00015	0,00100	0,00016
C	0,00016	0,00016	0,00102
Menamoji dalis			
A	0,00066	0,00035	0,00030
B	0,00035	0,00067	0,00031
C	0,00030	0,00031	0,00064

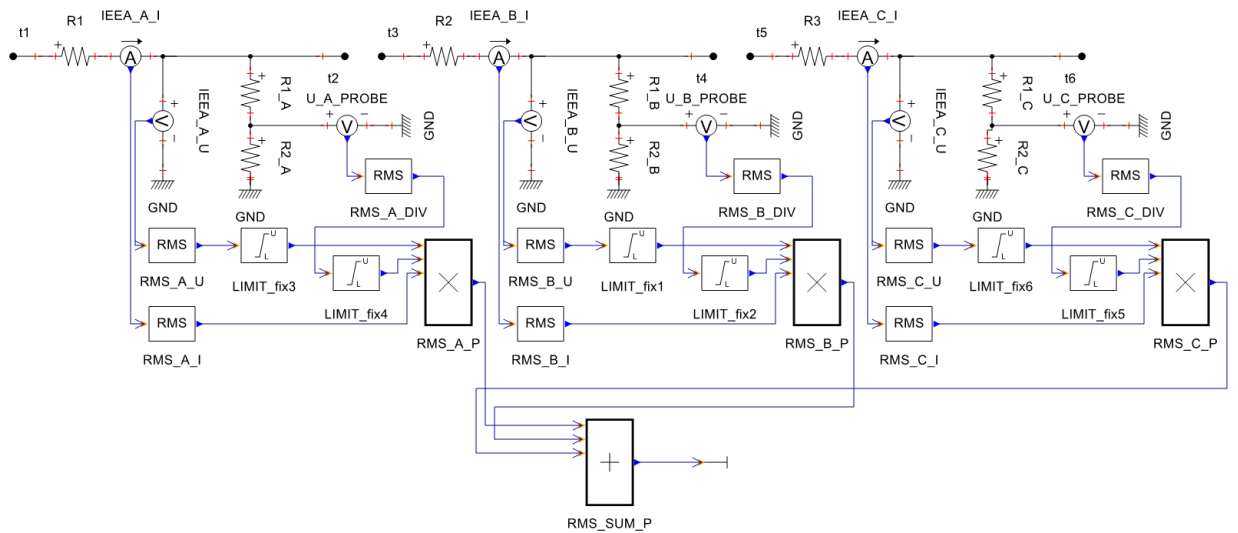
Remiantis priimtomis prielaidomis bei pasirinktais modeliavimo sprendimais programinėje įrangoje *XTAP* sudarytas matematinis modelis pagal principinę tinklo schemą pavaizduotas 12 pav.



12 pav. Sudarytas tiriamojo tinklo matematinis modelis

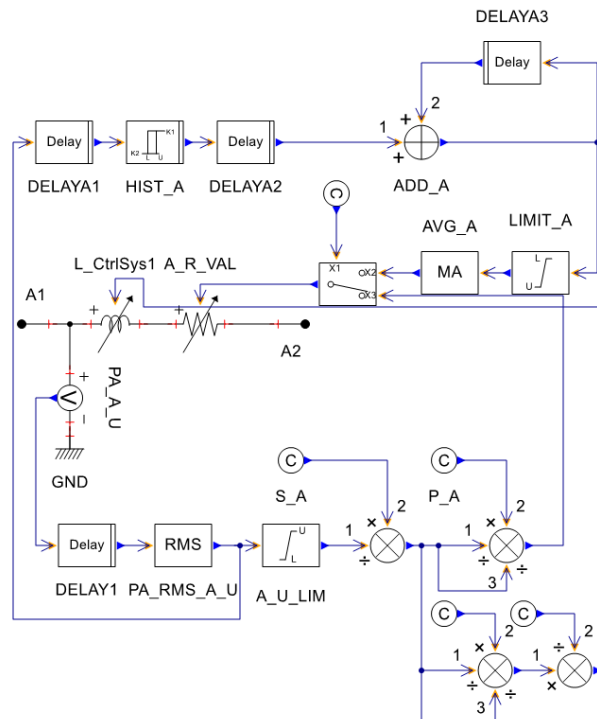
Modelis sudarytas iš išorinio tinklo maitinimo šaltinio, transformatoriaus, kontrolinės apskaitos, linijų modeliujamų π -sekcijos metodu bei apskaitos dalių. Papildomai naudojami linijų apskaitos blokai nuostolių fiksavimui. Linijų ilgiai bei parametrai pateikti 4 ir 5 lentelėse 2 skyriuje.

Apskaitos blokas yra sudarytas iš varžos, srovės ir įtampos matavimo dalių, įtampos daliklio bei daugiklių blokų kiekvienai atskirai fazei. Varža užtikrina, kad modelyje veiktų šuntavimas, kuris naudojamas srovės matavimo paklaidos įvedimui. Ampermetras bei voltmetras naudojami srovės ir įtampos fiksavimui, momentiniai matavimai perskaičiuojami į efektines vertes. Daugiklio bloke apskaičiuojama galia. Įtampos daliklis naudojamas įtampos matavimo paklaidos įvedimui. Trifazis IEEA blokas pavaizduotas 13 pav.



13 pav. IEEA sudarytas blokas matematiniam modelyje

Kaip numatyta prielaidose, tyrimui bus naudojamas pastovios apkrovos modelis. Tam sukurtas atskiras blokas, kuris palaikytų pastovią apkrovą. Jis sudarytas iš įtampos matavimo dalies, valdomo induktyvumo ir varžos. Priklausomai nuo matuojamos įtampos, apskaičiuojama srovė prie įvestos pilnutinės galios. Pagal apskaičiuotą srovę ir nustatytą aktyvią ir reaktyvią galias apskaičiuojamos varžos ir induktyvumo vertės. Papildomai yra sudaryta aktyviosios apkrovos valdymo dalis, naudojantis histerezės bloku, kad būtų pasiekama nustatyta įtampa. Šios dalies panaudojimas aptariamas plačiau 2.4 skyriuje.

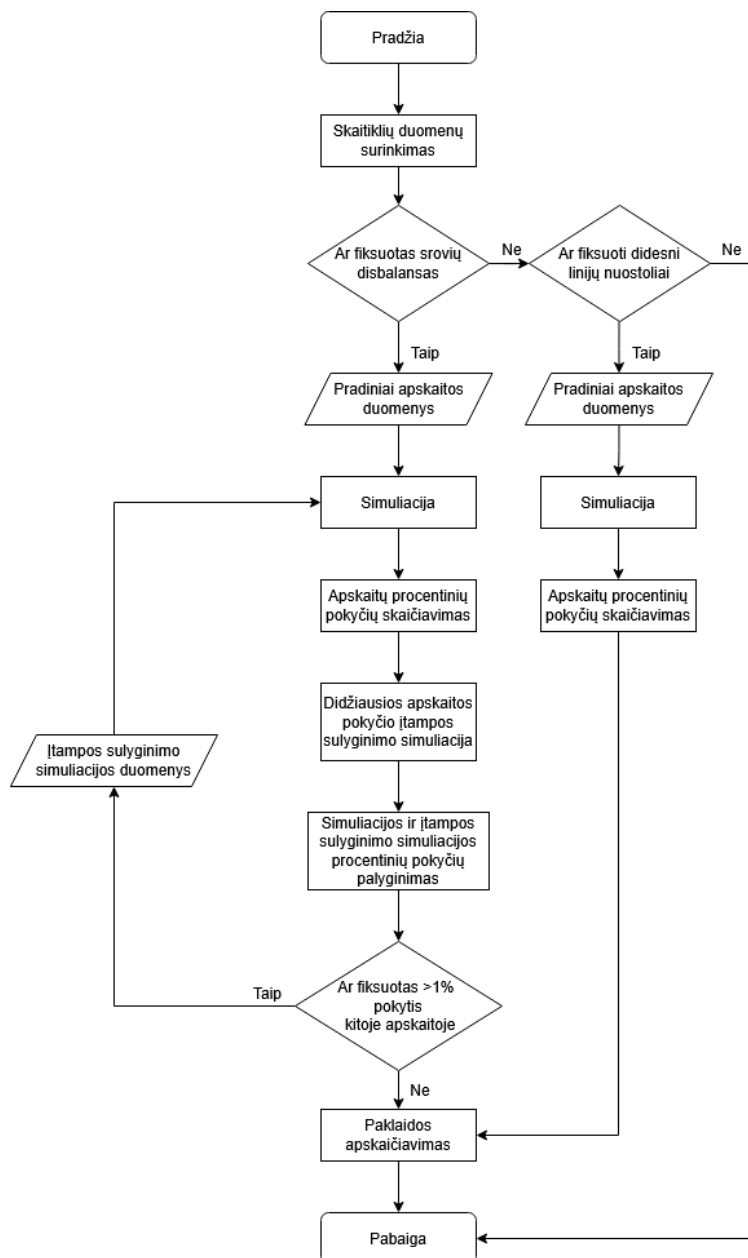


14 pav. Tiriamojo modelio pastovios apkrovos bloko A fazės dalis

Taip pat modelyje yra naudojamas valdomo šuntavimo blokas. Taip yra įvedama srovės matavimo paklaida. Priklausomai nuo šunto varžos yra keičiama srovės matavimo paklaida.

2.4. Paklaidų nustatymo algoritmas

Matavimo paklaidų dydžiui ir skaitiklio, turinčio paklaidą, nustatymui, remiamasi pagrindiniais tinklo parametrais: srovė ir įtampa bei galia matavimo taškuose. Tikslas – fiksuoti skirtumą tarp apskaitytų ir atliktos tinklo dalies simuliacijos apskaičiuotų duomenų. Tyrimo metu, siekiama išsiaiškinti ar naudojantis jais galima nustatyti matavimo paklaidą ir jos vietą. Pirmasis indikatorius, kuris lemia tolimesnį tinklo tyrimą – kontrolinės ir apskaitos srovių disbalansas arba didesni nei įprastai linijų nuostoliai. Šiame darbe siūlomas matavimo paklaidų nustatymo algoritmas pateikiamas 15 pav.



15 pav. Paklaidų nustatymo tinkle algoritmas

Paklaidų nustatymo algoritmo žingsnių platesnis aprašymas:

- skaitiklių duomenų surinkimas – skaitiklių fiksuojamų parametru: srovės, įtampos, laiko, galios (aktyvios, reaktyvios), galios faktoriaus duomenų surinkimas;

- srovių disbalanso fiksavimas – surinktų tinklo apskaitos duomenų srovių palyginimas su kontroline, ar nėra disbalanso;
- didesnių linijų nuostolių fiksavimas – jeigu fiksuojami didesni linijų nuostolių nei įprastai, be srovės disbalanso, ieškoma galima įtampos paklaida;
- atliekama tinklo simuliacija pagal skaitiklių apskaitytas galias;
- apskaitų procentinių pokyčių apskaičiavimas atliekamas tarp pradinių apskaitos bei atliktos simuliacijos duomenų;
- iš apskaitų procentinių pokyčių apskaičiavimo duomenų išrenkamas skaitiklis, kuriame nustatytas didžiausias skirtumas. Nustatytoje apskaitos vietoje, priklausomai keliose fazėse yra skirtumas, matematiname modelyje yra įgalinamas įtampos sulyginimo blokas ir atliekama papildoma simuliacija. Ši simuliacija yra reikalinga paklaidos dydžio nustatymui;
- fiksuojamas pirminės atliktos pagal apskaitytas galias ir įtampos sulyginimo simuliacijų procentinis pokytis. Jeigu dar bent vienoje iš kitų apskaitų matavimo taškų yra fiksuojama paklaida, toliau atliekami žingsniai pagal numatyta algoritmą;
- jeigu matavimų skirtumas nėra užfiksuotas, kitoje apskaitoje atliekamas paskutinis žingsnis – paklaidos apskaičiavimas.

Šis algoritmas gali būti taikomas kuomet yra srovės ar įtampos matavimo paklaida. Esant įtampos matavimo paklaidai šis algoritmas sustoja ties apskaitų procentinių skirtumų skaičiavimu, o tolimesni žingsniai yra neatliekami. Tai plačiau apžvelgta įtampos paklaidos tyrimo dalyje.

Algoritme nurodytas įtampos sulyginimo simuliacijos žingsnis yra esminis srovės matavimo paklaidos vertės nustatymui. Naudojamosi pastovios apkrovos bloke sudaryta apkrovos valdymo dalimi, kuri aprašyta 28 puslapyje. Šios dalies veikimas yra paremtas įtampos priklausomybe nuo galios srauto. Esant srovės matavimo paklaidai, įtampa neatitiks pagal apskaitytą galios srautą. Įprastai, jeigu apskaitytas vartojimas yra mažesnis, užfiksuota įtampa matavimo taške bus mažesnė, nei turėtų būti prie fiksuoto galios srauto. Todėl pagal apskaitytus duomenis atlikus tinklo skaičiavimus bei procentinių pokyčių fiksavimo žingsnius vykdoma įtampos sulyginimo skaičiavimo dalis. Galimai paklaidą turinčio skaitiklio vietoje yra nustatoma skaitiklio fiksuota įtampa. Šio žingsnio tinklo skaičiavimuose ši įtampa yra nustatoma histerezės bloke. Ji pasiekama valdant varžos dydį. Nusistovėjus apkrovai, yra fiksuojamos srovės, įtampos ir galios matavimų vertės. Priimama, kad pagal įtampą rasta srovės vertė yra artima faktinei ir skaičiuojama paklaida nuo apskaitytos vertės.

Tiriamajoje dalyje bus vertinami šie variantai:

- vienos fazės srovės matavimo paklaida;
 - galios faktorius $\cos \varphi = 1$;
 - galios faktorius $\cos \varphi = 0,9$;
- trijų fazių srovės matavimo paklaida;
- įtampos matavimo paklaida;
- srovės ir įtampos matavimo paklaida;
- kelių IEEEA tinkle matavimo paklaida.

3. Tiriemoji dalis

Tyrimai atliekami, kuomet tinklas yra apkrautas maksimaliai, linijų nuostoliai didžiausi. Visi vartotojai vartoja maksimalų elektros energijos kiekį prie galios faktoriaus $\cos \varphi = 1$. Pirmiausiai pasinaudojant sukurtu modeliu apskaičiuojami pradiniai faktiniai tinklo parametrai, kurie bus naudojami modelio tikslumo įvertinimui. Užfiksuoti apskaitų duomenys pateikiami 7 lentelėje.

7 lentelė. Pradiniai apskaitų duomenys be paklaidų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	137,95	118,89	120,85	242,40	242,53	242,54	33438,06	28832,86	29311,17
IIEEA1	62,06	59,79	60,72	209,47	217,44	214,11	13000,02	13000,03	13000,02
IIEEA2	47,45	45,54	46,31	210,74	219,61	215,93	10000,02	10000,03	10000,02
IIEEA3	14,22	13,56	13,82	211,03	221,18	217,01	3000,02	3000,03	3000,02
IIEEA4	14,22	-	-	211,03	-	-	3000,02	-	-
Skirtumas	0,00	0,00	0,00	-	-	-	4437,97	2832,77	3311,11

Srovės disbalanso pradinuose duomenyse nėra. Tyrimai skirtingais scenarijais bus atliekami pagal numatytą matavimo paklaidų nustatymo algoritmą 2.4 skyriuje. Visi atvejai yra tiriami pagal susimuliuotus skaitiklių duomenis. Faktiniai duomenys naudojami tik modelio tikslumo įvertinimui. Modelio įvertinimui naudojami sukurti pirminiai duomenys, nes bus vertinami keli skirtingi galimi paklaidų atvejai. Kiekvienam iš tiriamų atvejų surinkti realius duomenis yra sunku ir stipriai apsunkina modeliavimą bei paklaidos nustatymą, kuomet sąlygos yra kintančios.

3.1. Vienos fazės srovės matavimo paklaida

Šiame skyriuje bus tiriami atvejai, kuomet vienas iš skaitiklių tinkle turi srovės matavimo paklaidą vienoje iš fazių. Kaip pavyzdys pateikiamas atvejis, kuomet srovės matavimo paklaida yra 50 %, dėl kurios vienos fazės apskaitoma elektros energija yra dvigubai mažesnė.

3.1.1. Galios faktorius $\cos \varphi = 1$

Pradiniai skaitiklių apskaityti duomenys, su įvesta paklaida yra pateikiami 8 lentelėje.

8 lentelė. Pradiniai vienos fazės srovės matavimo paklaidos atvejo IIEEA apskaityti duomenys $\cos \varphi = 1$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	137,95	118,89	120,85	242,40	242,53	242,54	33438,06	28832,86	29311,17
IIEEA1	62,06	59,79	60,72	209,47	217,44	214,11	13000,02	13000,03	13000,02
IIEEA2	47,45	45,54	46,31	210,74	219,61	215,93	10000,02	10000,03	10000,02
IIEEA3	7,11	13,56	13,82	211,03	221,18	217,01	1500,01	3000,03	3000,02
IIEEA4	14,22	-	-	211,03	-	-	3000,02	-	-
Skirtumas	7,11	0,00	0,00	-	-	-	5937,98	2832,77	3311,11

Kadangi fiksuotas srovės disbalansas A fazėje, atliekama simuliacija pagal apskaitytas galias, jos įvedamos į sudaryto matematinio modelio apkrovos pastovios apkrovos blokus. Atliktos simuliacijos rezultatai pateikiami 9 lentelėje

9 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos simuliuto tinklo parametrai pagal priskirtas apskaitytas galias $\cos \varphi = 1$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	129,49	119,37	120,68	242,44	242,51	242,51	31394,38	28947,67	29265,16
IEEA1	61,50	60,00	60,64	211,37	216,66	214,38	13000,02	13000,03	13000,02
IEEA2	46,95	45,73	46,24	212,99	218,69	216,26	10000,02	10000,03	10000,02
IEEA3	7,00	13,64	13,79	214,16	219,96	217,48	1500,02	3000,03	3000,02
IEEA4	14,03	-	-	213,78	-	-	3000,02	-	-
Skirtumas	0,00	0,00	0,00	-	-	-	3894,30	2947,58	3265,10

Toliau atliekamas procentinio pokyčio skaičiavimas, siekiant išryškinti kuriuose taškuose yra didžiausias neatitikimas tarp apskaitytų ir simuliutų tinklo duomenų.

10 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliutų tinklo duomenų $\cos \varphi = 1$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	6,53%	-0,40%	0,15%	-0,02%	0,01%	0,01%	6,51%	-0,40%	0,16%
IEEA1	0,90%	-0,36%	0,13%	-0,90%	0,36%	-0,13%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA2	1,07%	-0,42%	0,15%	-1,06%	0,42%	-0,15%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA3	1,48%	-0,55%	0,22%	-1,46%	0,55%	-0,22%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA4	1,30%	-	-	-1,29%	-	-	0,00%	-	-

Pagal procentinių pokyčių rezultatus kiekviename taške būtų galima daryti prielaidą, jog paklaida yra IEEA3 apskaitos taške A fazėje, nes fiksuotas didžiausias skirtumas nuo apskaitos duomenų. Bet dėl to, kad tinklo parametrai yra vienas nuo kito priklausomi, pastebimas pokytis ir kitų apskaitų taškuose. Iš šių duomenų nėra aišku, kiek yra skaitiklių su paklaida ir kokia ji. Pagal pirminę prielaidą, jog paklaida yra IEEA3 A fazėje, yra atliekama įtampų sulyginimo simuliacija. Šiuo atveju matematiname modelyje yra nustatoma 211,03 V įtampos reikšmė, kuri turėtų būti pasiekta 3 vartotojo A fazėje.

11 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos įtampų sulyginimo simuliacijos rezultatai $\cos \varphi = 1$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	137,90	118,89	120,86	242,40	242,53	242,54	33427,92	28833,19	29311,72
IEEA1	62,05	59,79	60,72	209,48	217,44	214,11	12999,06	12999,78	13000,44
IEEA2	47,45	45,54	46,31	210,74	219,60	215,94	9998,97	9999,89	10000,38
IEEA3	14,19	13,56	13,82	211,04	221,17	217,01	2994,73	3000,04	3000,15

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IIEEA4	14,21	-	-	211,03	-	-	2999,56	-	-
Skirtumas	0,00	0,00	0,00	-	-	-	4435,61	2833,49	3310,76

Pasiekta įtampos vertė – 211,04 V. Toliau atliekamas dar vienas procentinių pokyčių skaičiavimas pagal pradinius apskaitos duomenis, rezultatai pateikiami 12 lentelėje.

12 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų $\cos \varphi = 1$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%
IIEEA1	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
IIEEA2	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
IIEEA3	-49,91%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-49,91%	0,00%	0,00%
IIEEA4	0,02%	-	-	0,00%	-	-	0,02%	-	-

Atlikus įtampos sulyginimo simuliaciją, apskaičiavus procentinį pokytį pastebima, kad paklaida fiksuota tik IIEEA3 A fazėje, kurios dydis 49,91 %. Palyginus su faktine paklaida, tai tik 0,09 procentinio punkto paklaida. Kadangi nėra kitų taškų, kuriuose pokytis būtų didesnis nei 1 procentas, daugiau simuliacijų neatliekama. Žinoma, modelyje yra neįvertinti galimi laidininkų temperatūrų skirtumai, kurie šią paklaidą iškreiptų. Tai bus įvertinta 3.6 skyriuje.

Toliau, remiantis tuo pačiu numatytu algoritmu atliekami skaičiavimai prie skirtingų paklaidos lygių, siekiant nustatyti mažiausią galimą nustatyti paklaidą. Pagal 2 lentelę 1.1.5 skyriuje, iš standartų maksimali leistina srovės matavimo paklaida yra 2,5 %. Todėl pasirinkta pradėti skaičiavimus nuo šios vertės.

13 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė $\cos \varphi = 1$

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Modelio paklaida
2,5%	2,33%	0,1748	0,1551	0,1790%
3,0%	2,83%	0,1739		
4,0%	3,83%	0,1722		
5,0%	4,83%	0,1704		
10,0%	9,84%	0,1614		
20,0%	19,86%	0,1435		
50,0%	49,91%	0,0897		

Nustatyta, kad vertinant tinklą kuomet vienas iš skaitiklių vienoje fazėje matuoja srovę klaidingai, galima nustatyti paklaidos vietą ir jos dydį su vidutine 0,1551 procentinio punkto paklaida, nevertinant skirtingų laidininkų įšilimų ir varžų. Faktinė srovės nustatymo paklaida 0,1790 %. Teoriškai mažiausia paklaida, kurią su esamu matematinio modeliu galima nustatyti įvertinus

maksimalią leistiną paklaidą be temperatūrinių skirtumų – 2,6790 %. Vidutinę nustatymo paklaidą nuo faktinės būtų galima sumažinti matematiname modelyje patobulinus įtampos valdymo dalį, kad su mažesne paklaida būtų pasiekama užduota įtampa.

3.1.2. Galios faktorius $\cos \varphi = 0,9$

Siekiant išsiaiškinti, ar sukurtas matematinis modelis ir metodika yra pritaikoma ne tik esant aktyvinei apkrovai, atlikti skaičiavimai tinkle $\cos \varphi = 0,9$. Nustatyta induktyvioji apkrova, kas įprastai būna skirstomuosiuose tinkluose. Skaičiavimai atliekami prie 50 % paklaidos. Kadangi keičiasi galios faktorius, tinkle keičiasi pradiniai faktiniai tinklo parametrai. Jie pateikiami 14 lentelėje.

14 lentelė. Pradiniai apskaitų duomenys be paklaidų $\cos \varphi = 0,9$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	139,57	119,88	121,54	242,40	242,50	242,56	33831,17	29071,23	29480,37
IIEEA1	62,75	60,28	61,08	207,16	215,66	212,83	12998,17	12999,95	12998,89
IIEEA2	48,02	45,92	46,57	208,23	217,76	214,70	9998,61	10000,10	9999,12
IIEEA3	14,40	13,68	13,89	208,34	219,32	215,93	2999,58	3000,09	2999,71
IIEEA4	14,41	-	-	208,22	-	-	2999,58	-	-
Skirtumas	0,00	0,00	0,00	-	-	-	4835,23	3071,09	3482,65

Pastebima, kad pradiniai faktiniai apskaitos duomenys skiriasi nuo pirminių, kuomet apkrova tik aktyvioji, toliau vykdomas visas tas pats paklaidos nustatymo algoritmas.

15 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų $\cos \varphi = 0,9$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	6,73%	-0,39%	0,03%	-0,02%	0,00%	0,01%	6,72%	-0,39%	0,04%
IIEEA1	1,06%	-0,35%	0,02%	-1,05%	0,35%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,00%
IIEEA2	1,26%	-0,40%	0,03%	-1,25%	0,41%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,00%
IIEEA3	1,77%	-0,53%	0,04%	-1,73%	0,54%	-0,04%	0,01%	0,00%	0,00%
IIEEA4	1,55%	-	-	-1,53%	-	-	0,00%	-	-

Atlikus pirminę simuliaciją ir apskaičiavus procentinius pokyčius kiekviename taške, pastebimas panašus pasiskirstymas kaip ir $\cos \varphi = 1$. Iš šių duomenų būtų galima daryti prielaidą kur yra paklaida, bet toliau atliekama įtampos suliginimo simuliacija.

16 lentelė. Vienos fazės srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos suliginimo simuliacijos duomenų $\cos \varphi = 0,9$

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%
IIEEA1	0,01%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IEEA2	0,01%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA3	-49,87%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	-49,87%	0,00%	0,00%
IEEA4	0,01%	-	-	-0,01%	-	-	0,00%	-	-

Po įtampos sulyginimo simuliacijos taip pat įmanoma nustatyti paklaidos vietą ir dydį, esant kitokiam galios faktoriui tinkle. Nuo pilnai aktyvinės apkrovos tyrimo simuliacijos nustatytos paklaidos apskaičiuotas 0,04 procentinio punkto skirtumas. Todėl galima teigti, kad matematinis modelis veikia prie įvairių galios faktorių su nedideliu skirtumu paklaidos nustatyme. Šiuo atveju nustatyta paklaida 0,13 procentinio punkto mažesnė nei faktinė. Tolimesni skaičiavimai atliekami esant aktyviajai tinklo apkrovai.

3.2. Trijų fazių srovės matavimo paklaida

Šio tyrimo metu buvo vertinamas modelio tikslumas aptikti paklaidas esant trijų fazių srovės matavimo paklaidai viename apskaitos taške. Kaip pavyzdys naudojamas 50 % paklaidos atvejis.

17 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	33,72%	37,54%	37,96%	0,00%	0,00%	0,00%	33,71%	37,55%	37,97%
IEEA1	4,95%	4,04%	4,46%	-4,72%	-3,89%	-4,27%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA2	3,11%	2,43%	2,74%	-3,02%	-2,37%	-2,67%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA3	3,11%	2,39%	2,71%	-3,01%	-2,34%	-2,64%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA4	1,30%	-	-	-1,29%	-	-	0,00%	-	-

Didžiausi pokyčiai tarp apskaitos ir simuliacijos duomenų fiksuoti IEEA1 visose fazėse. Kaip ir prieš tai tirtuose atvejuose, pastebimas tolygus procentinio pokyčio pasiskirstymas visame tinkle dėl kurio negalima nustatyti kiek yra skaitiklių su matavimo paklaida tinkle.

18 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	-0,10%	-0,45%	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,10%	-0,45%	0,03%
IEEA1	-50,24%	-50,42%	-49,95%	0,10%	0,10%	-0,07%	-50,19%	-50,38%	-49,98%
IEEA2	0,20%	-0,05%	-0,05%	0,04%	0,07%	-0,05%	0,24%	0,02%	-0,09%
IEEA3	0,20%	-0,05%	-0,05%	0,04%	0,07%	-0,05%	0,24%	0,02%	-0,09%
IEEA4	0,02%	-	-	0,00%	-	-	0,02%	-	-

Po įtampos sulyginimo simuliacijos pastebima paklaida išlieka tik IEEA1 skaitiklio matavimuose, kituose apskaitos taškuose pokytis neviršija 1 %, tolimesni skaičiavimai nėra atliekami.

19 lentelė. Trijų fazių srovės paklaidos skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Modelio paklaida
2,5%	2,90%	0,3976	0,3527	0,4766%
3,0%	3,40%	0,3955		
4,0%	4,39%	0,3915		
5,0%	5,39%	0,3874		
10,0%	10,37%	0,3670		
20,0%	20,33%	0,3262%		
50,0%	50,20%	0,2039%		

Atlikus skirtingų paklaidų nustatymo skaičiavimus nustatyta, kad esant trifazei srovės matavimo paklaidai vidutinė procentinė paklaida yra didesnė nei vienos fazės srovės matavimo paklaida. Paklaidos nustatymo modelis, priešingai negu vienos fazės paklaidos atveju aptiko didesnę paklaidą nei faktinė, vidutine 0,3527 procentinio punkto verte. Faktinė nustatymo paklaida irgi didesnė nei vienos fazės srovės paklaidos atveju – 0,4766 %. Didesnį paklaidos nustatymą gali lemti įtampos sulyginimo simuliacijos netikslumas, kuomet nepasiekama faktinė įtampa, o tik jai artima.

3.3. Kelių skaitiklių matavimo paklaida tinkle

Papildomai buvo atliekamas matematinio modelio tikslumo įvertinimas, kuomet tinkle yra keli skaitikliai su matavimo paklaidomis, siekiant nustatyti galimus pokyčius lyginant su kitais tirtais atvejais. Abiejuose apskaitos taškuose yra nustatomos vienodos paklaidos. Pavyzdinis skaičiavimas irgi pateikiamas prie 50 % srovės matavimo paklaidos.

20 lentelė. Kelių skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	45,53%	-2,18%	0,88%	-0,09%	0,04%	0,05%	45,40%	-2,14%	0,93%
IIEEA1	6,50%	-2,45%	1,03%	-6,11%	2,51%	-1,02%	0,00%	0,00%	0,00%
IIEEA2	4,67%	-1,88%	0,72%	-4,47%	1,92%	-0,71%	0,00%	0,00%	0,00%
IIEEA3	5,06%	-1,99%	0,78%	-4,82%	2,03%	-0,77%	0,00%	0,00%	0,00%
IIEEA4	4,89%	-	-	-4,66%	-	-	0,00%	-	-

Kaip ir prieš tai buvusiame skyriuje, didžiausios procentinės paklaidos tarp simuliacijos ir apskaitos duomenų fiksuojamos IIEEA1 matavimo vietose. Išlieka ta pati tendencija, kad procentinių pokyčių pasiskirstymas išlieka tolygus, fazėje, kurioje fiksuotas srovės disbalansas. Vien tik iš šių duomenų nepavyktų nustatyti kiek apskaitų turi paklaidas.

21 lentelė. Dviejų skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų (1)

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	6,67%	-0,41%	0,15%	-0,02%	0,01%	0,01%	6,65%	-0,41%	0,16%

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IEEA1	-49,41%	-0,37%	0,13%	-0,92%	0,37%	-0,13%	-49,88%	0,00%	0,00%
IEEA2	1,09%	-0,42%	0,16%	-1,08%	0,43%	-0,16%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA3	1,50%	-0,56%	0,22%	-1,48%	0,56%	-0,22%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA4	1,32%	-	-	-1,30%	-	-	0,00%	-	-

Atlikus įtampos sulyginimo simuliaciją bei apskaičiavus procentines paklaidas išryškėja gan didelis neatitikimas IEEA1 taške, bet ir kituose taškuose vis dar fiksuojamas didesnis nei 1 % pokytis tarp apskaitos ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų. Prilyginus apskaičiuotus duomenis kaip pradinius, atliekami tie patys matavimo paklaidų nustatymo algoritmo žingsniai.

22 lentelė. Dviejų skaitiklių paklaidos procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų (2)

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	0,09%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%	-0,01%	0,00%
IEEA1	-49,87%	-0,01%	0,00%	-0,02%	0,01%	0,00%	-49,88%	0,00%	0,00%
IEEA2	0,02%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
IEEA3	-50,17%	-0,01%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	-50,18%	0,00%	0,00%
IEEA4	0,02%	-	-	-0,01%	-	-	0,01%	-	-

Po papildomos įtampos sulyginimo simuliacijos pastebėta, kad paklaida yra ir IEEA3 taške, procentiniai pokyčiai kituose taškuose neviršija 1 %, galima teigti, kad atrasti visi klaidingai matuojantys prietaisai.

23 lentelė. Dviejų skaitiklių skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė IEEA1

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Modelio paklaida
2,5%	2,24%	0,2614	0,2319	0,2674%
3,0%	2,74%	0,2601		
4,0%	3,74%	0,2574		
5,0%	4,75%	0,2547		
10,0%	9,76%	0,2413		
20,0%	19,79%	0,2145		
50,0%	49,87%	0,1341		

24 lentelė. Dviejų skaitiklių skirtingų paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė IEEA3

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Modelio paklaida
2,5%	2,84%	0,3352	0,2974	0,3450%
3,0%	3,33%	0,3335		
4,0%	4,33%	0,3300		

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Modelio paklaida
5,0%	5,33%	0,3266		
10,0%	10,31%	0,3094		
20,0%	20,28%	0,2750		
50,0%	50,17%	0,1719		

Pagal 23 ir 24 lenteles, nustatytos didesnės procentinių punktų paklaidos nuo faktinių paklaidų, nei prieš tai tirtuose atvejuose. IEEA1 vidutinė paklaida 0,2319 procentinio punkto, o IEEA3 0,2974 procentinio punkto. Faktinės nustatymo paklaidos 0,2674 % ir 0,3450 %. Galima daryti prielaidą, jog tinkle didėjant skaitiklių kiekiui su matavimo paklaidomis, siūlomu metodu jų paklaidos nustatymo tikslumas mažėja.

3.4. Įtampos matavimo paklaida

Net ir nefiksavus srovių disbalanso tinkle, gali būti apskaitomas mažesnis suvartotas elektros energijos kiekis nei faktiškai. Tai gali įvykti, kuomet skaitiklis klaidingai matuoja įtampą. Tai būtų galima pastebėti, kuomet fiksuojami didesni linijų nuostoliai nei įprastai.

25 lentelė. Įtampos matavimo paklaidų nustatymo tikslumas

Paklaida	Vidutinė nustatyta paklaida	Paklaida nuo faktinės, p.p.	Vidutinė paklaida, p.p.	Nustatyta paklaida
1,0%	1,03%	0,0259	0,0874	0,0261%
2,0%	2,05%	0,0512		0,0523%
3,0%	3,08%	0,0760		0,0784%
4,0%	4,10%	0,1002		0,1045%
5,0%	5,12%	0,1239		0,1306%
6,0%	6,15%	0,1470		0,1567%

Atlikus skaičiavimus, nustatyta, kad esant vien įtampos paklaidai, modelis ją nustato vidutiniškai žema 0,0874 procentinio punkto paklaida nuo realios, nevertinant galimų paklaidų dėl laidininkų skirtingų įšilimo temperatūrų. Priešingai nei srovės paklaidų nustatymų atvejais, nustatymo paklaida didėja esant didesnei faktinei paklaidai. Nustatyta faktinė modelio vidutinė paklaida – 0,0914 %.

3.5. Srovės ir įtampos matavimo paklaida

Šiame skyriuje vertinamas atvejis, kuomet skaitiklis tinkle klaidingai matuoja ir srovę, ir įtampą.

26 lentelė. Srovės ir įtampos matavimo paklaidų procentinis pokytis tarp apskaitytų ir simuliuotų tinklo duomenų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	0,22%	7,15%	0,37%	0,01%	0,02%	0,01%	0,23%	7,13%	0,36%
IEEA1	0,18%	0,82%	0,33%	0,18%	0,82%	0,33%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA2	0,22%	0,97%	0,38%	0,22%	0,97%	0,38%	0,00%	0,00%	0,00%
IEEA3	0,31%	7,54%	0,51%	0,31%	7,54%	0,51%	0,00%	0,00%	0,00%

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
IIEEA4	1,30%	-	-	1,30%	-	-	0,00%	-	-

Pagal procentinio pokyčio skaičiavimo rezultatus, sulyginančius apskaitų ir simuliacijos duomenų skirtumus pastebimas didžiausias pokytis IIEEA3 B fazėje. Atliekama įtampos sulyginimo simuliacija, rezultatai pateikiami 27 lentelėje.

27 lentelė. Srovės ir įtampos matavimo paklaidų procentinis pokytis tarp apskaitytų ir įtampos sulyginimo simuliacijos duomenų

Skaitiklis	I, A			U, V			S, VA		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
KEEA	0,87%	26,06%	1,57%	0,04%	0,07%	0,03%	0,92%	25,99%	1,54%
IIEEA1	0,73%	3,71%	1,40%	0,73%	3,72%	1,40%	0,00%	0,01%	0,00%
IIEEA2	0,88%	4,39%	1,62%	0,88%	4,40%	1,62%	0,00%	0,01%	0,00%
IIEEA3	1,24%	147,50%	2,15%	1,24%	0,02%	2,16%	0,00%	147,51%	0,01%
IIEEA4	0,02%	-	-	0,00%	-	-	0,02%	-	-

Iš apskaičiuotų rezultatų galima teigti, kad tokiu atveju siūloma įtampos sulyginimo simuliacija yra naudinga skirtumo išryškavimo tikslais, bet paklaidų nustatymo atveju – ne. Pagal 27 lentelės duomenis, priimant prielaidą, jog didžiausią procentinį pokytį turinčiuose taškuose yra paklaida galima nustatyti skaitiklį turintį matavimo paklaidą. Įvairūs atvejai yra įvertinti 28 lentelėje.

28 lentelė. Srovės ir įtampos skirtingų matavimo paklaidų atvejų matematinio modelio tikslumo analizė

Srovės matavimo paklaida	Įtampos matavimo paklaida	Srovės procentinis pokytis	Įtampos procentinis pokytis
2,50%	1,00%	1,10%	1,10%
3,00%	2,00%	2,15%	2,15%
4,00%	3,00%	3,23%	3,23%
5,00%	4,00%	4,31%	4,31%
10,00%	5,00%	5,50%	5,50%
20,00%	6,00%	6,83%	6,83%
50,00%	6,00%	7,54%	7,54%

Tyrimo metu nustatyta, kad esamu matematinio modeliu nustatyti paklaidų dydžio, esant vienos apskaitos srovės ir įtampos matavimo paklaidai toje pačioje fazėje neįmanoma. Pagal apskaičiuotą procentinį pokytį tarp pirminių apskaitos duomenų ir simuliacijos pagal apskaitytas galias galima nustatyti, kuris skaitiklis turi matavimo paklaidą. Didėjant matavimų paklaidai, fiksuojamas didesnis srovės ir įtampos pokytis tarp apskaitos ir simuliacijos duomenų.

3.6. Temperatūros paklaidos įvertinimas

Svarbus kintamasis, kuris neįvertintas prieš tai buvusiose simuliacijose – skirtingas laidininkų įšilimas. Kintat laidininko temperatūrai – kinta jo varža. Dėl varžos pokyčio kinta įtampos ir srovės

vertės esant pastovios apkrovos modeliui. Todėl skirtingą galimą laidininkų įšilimą yra svarbu įvertinti, siekiant nustatyti mažiausią galimą modelio paklaidą.

Laidininkų galimi skirtingi įšilimai bus vertinami pagal *CIGRE* metodiką. Skaičiavimų tikslas – atrasti galimą temperatūrų variaciją tinkle ir tą paklaidą įterpti į visų prieš tai buvusių skaičiavimų rezultatus.

Vertinama stacionari laidininko temperatūros būseną. Laidininko temperatūrai rasti bus naudojamosi šilumos balanso lygtimi [32]:

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w; \quad (5)$$

čia P_J – Džiaulio šilimas; P_M – magnetinis šilimas; P_S – saulės šilimas; P_i – koronavimo šilimas; P_c – konvekcinis vėsinimas; P_r – spinduliuotės vėsinimas; P_w – garavimo vėsinimas.

Pagal pateiktą metodiką, įprastai magnetinis šilimas ir garavimo vėsinimas oro linijų skaičiavimuose nėra vertinami. Pasirinkta jų nevertinti ir šių skaičiavimų metu.

Džiaulio laidininko šilimas apskaičiuojamas pagal [32]:

$$P_J = I^2 \cdot R_{ac} [1 + \alpha(T_{av} - 20)]; \quad (6)$$

čia I – laidininku tekanti srovė; R_{ac} – laidininko kintamos srovės varža prie 20°C; α – temperatūrinis varžos koeficientas; T_{av} – vidutinė laidininko temperatūra.

Vertinama ir saulės spinduliuotės įtaka laidininko temperatūrai, pagal formulę [32]:

$$P_S = \alpha_S S D; \quad (7)$$

čia α_S – laidininko paviršiaus absorbcija; S – saulės apšvieta; D – išorinis laidininko diametras.

Kadangi lauko sąlygomis įprastai yra priverstinė konvekcija (oro judėjimo greitis didesnis nei nulis), vertinamas ir *Reinolds-o* skaičius [32]:

$$Re = \frac{\rho_r V D}{\nu_f}; \quad (8)$$

čia ρ_r – santykinis oro tankis; V – vėjo greitis; D – išorinis laidininko diametras; ν_f – kinematinė klampa.

Santykinio oro tankio priklausomybė, nuo aukščio virš jūros lygio [32]:

$$\rho_r = \exp(-1,16 \cdot 10^{-4} y); \quad (9)$$

čia y – aukštis virš jūros lygio.

Konvekcijos sukeltas laidininko aušinimas apskaičiuojamas [32]:

$$P_c = \pi \lambda_f (T_S - T_a) Nu; \quad (10)$$

čia λ_f – oro šiluminis laidumas; T_S – laidininko paviršiaus temperatūra; T_a – aplinkos temperatūra; Nu – *Nusselt-o* skaičius;

Skaičiavimams reikalingas ir *Nusselt-o* skaičius, jis apskaičiuojamas pagal pasirenkamas konstantas iš skaičiavimo šaltinių lentelių, formulė [32]:

$$Nu = B_1(Re)^n; \quad (11)$$

čia B_1 , n – konstantos, priklausomos nuo *Reinolds-o* skaičiaus bei paviršiaus šiurkštumo.

Taip pat įvertinamas ir laidininko spinduliavimo dedamosios vėsinimasis [32]:

$$P_r = \pi D \varepsilon \sigma_B [(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4]; \quad (12)$$

čia D – laidininko išorinis skersmuo; ε – spinduliavimo geba; σ_B – *Stefan-o-Boltzmann-o* konstanta; T_S – laidininko paviršiaus temperatūra; T_a – aplinkos temperatūra.

Pagal išdėstytą metodiką atliekami iteraciniai skaičiavimai iki kol yra patenkinama (5) lygybė. Iteraciniuose skaičiavimuose yra keičiama laidininko paviršiaus temperatūros vertė. Priimama, kad laidininko paviršiaus temperatūra yra lygi vidutinei laidininko temperatūrai ($T_S = T_{av}$).

Lentelėje yra pateikiami parametrai, naudojami iteraciniuose skaičiavimuose. Skaičiavimo tikslas – atrasti kiekvienos linijos temperatūros pokytį, vertinant, kad ne visos linijos dalys gali būti apipučiamos to pačio vėjo greičiu. Šiuo skaičiavimu bus apskaičiuojamas temperatūros pokytis tarp 5 m/s ir 1 m/s vėjo apipūtimo.

29 lentelė. Laidininkų skirtingo įšilimo skaičiavimo parametrai

Parametras	Vertė
Aplinkos temperatūra T_a , °C	10
Al temperatūrinis varžos koeficientas	0,004
Laidininko paviršiaus absorbcija	0,5
Saulės apšvieta S , W/m ²	125,81
Vėjo greitis, m/s	5 arba 1
Aukštis virš jūros lygio, m	0
Nusselt'o konstanta, B_1	0,641
Nusselt'o konstanta, n	0,471
Laidininko spinduliavimo geba	0,5

Įvertinus laidininko šilimo ir vėsinimo faktorius ir apskaičiavus temperatūrinius skirtumus, jie naudojami linijų varžų verčių perskaičiavimui. Pagal nustatytas linijų temperatūras, laidininkų varžų pokytis bus apskaičiuojamas pagal [31]:

$$R_t = R_{ac}(1 + \alpha(t - 20)); \quad (13)$$

čia R_{ac} – laidininko kintamos srovės varža prie 20°C; α – temperatūrinis varžos koeficientas; t – vidutinė laidininko temperatūra.

30 lentelė. Linijų varžų perskaičiavimas pagal galimus temperatūrinius skirtumus

Linija	I, A	Varža, Ω/km	Laidininko temperatūra prie $V=5m/s$, $^{\circ}C$	Laidininko temperatūra prie $V=1m/s$, $^{\circ}C$	Temperatūros pokytis, $^{\circ}C$	Perskaičiuota linijos varža, Ω/km
L1	118,89	0,85	16,12	22,99	6,87	0,87
L1_1	66,57	1,18	12,95	16,20	3,25	1,20
L2	65,88	0,85	11,99	14,16	2,17	0,86
L2_1	52,32	1,18	11,89	13,95	2,06	1,19
L3	13,56	0,85	10,29	10,59	0,30	0,85
L3_1	13,56	1,18	10,31	10,64	0,33	1,18

Su perskaičiuotomis varžų vertėmis atliktas naujas tinklo skaičiavimas ir palygintas su prieš tai buvusiomis vertėmis. Pirminėje simuliacijoje buvo priimta prielaida, jog visi laidininkai yra $20^{\circ}C$ temperatūros. Sulyginus rezultatus, nustatytas didžiausias srovės ir įtampos pokytis – 0,38 %.

Vertinant galimą paklaidų nustatymo tikslumą iš kiekvieno tirtu atveju, išrinktos didžiausios paklaidos. Tuomet prie jų buvo pridėta paklaida dėl galimų laidininkų temperatūrų pokyčių. Rezultatai pateikiami 31 lentelėje.

31 lentelė. Atliktų tyrimų didžiausias neapibrėžtumo lygis įvertinus laidininkų išilimą.

Skyrius	Maksimali fiksuota paklaida	Paklaida dėl skirtingų temperatūrų	Maksimali paklaida
3.1	0,1790%	0,3800%	0,5590%
3.2	0,4766%		0,8566%
3.3	0,3450%		0,7250%
3.4	0,1567%		0,5367%

Skirtingas laidininkų išilimas turi įtakos tinklo parametrui ir tai turi būti įvertinta. Matavimo paklaidų nustatymo skaičiavimuose būtų galima taikyti iteracinius skaičiavimus laidininkų temperatūroms įvertinti. Tiriamu atveju, kuomet linijomis tekančios srovės ir vėjo apipūtimas yra skirtingi, fiksuotas maksimalus parametru skirtumas – 0,38 %. Įvertinus galimą paklaidą dėl temperatūrinio skirtumo, apskaičiuotos tirtų atvejų maksimalios paklaidos. Srovės paklaidos nustatymo atveju, maksimali modelio paklaida kilo iki 0,8566 %, įtampos – 0,5367 %. Pagal vertinamų skaitiklių tikslumo klases, maksimali leistina srovės matavimo paklaida 2,5 %, įtampos 1 %. Sudėjus šias paklaidas, numatytomis sąlygomis, matematinis modelis gali nustatyti mažiausią 3,3566 % srovės paklaidą bei 1,5367 % įtampos paklaidą.

Išvados

1. Nustatyta, kad elektros energijos skaitiklių paklaidos gali susidaryti dėl eksploataavimo amžiaus bei išorinių ir neteisėtų veiksnių, skirtų nesąžiningai vartoti elektros energiją. Išoriniai faktoriai, galintys paveikti apskaitomų duomenų tikslumą: magnetino lauko trikdžiai, krypties sukeitimas, šuntavimas, tiesioginis prisijungimas prie linijos. Tirtų skaitiklių maksimalios leistinos paklaidos yra: srovės – 2,5 %, įtampos – 1 %.
2. Elektros energijos apskaitos matavimo paklaidos neigiamai veikia sąžiningus elektros energijos vartotojus finansiškai. Paklaidų pažabojimui yra naudojamos išmaniųjų skaitiklių integruotomis apsaugoms: magnetinio lauko trikdžių aptikimo sistema, apsauginio dangtelio atidarymo apsauga. Literatūroje labiausiai paplitę duomenų analize pagrįsti dirbtinio intelekto ar mašininio mokymosi prognozavimo modeliai matavimo paklaidų nustatymui.
3. Tinklo matematinis modelis sudarytas programine įranga *XTAP*. Modeliu galima sudaryti ir analizuoti skaitiklių matavimo duomenis ir nustatyti esamas paklaidas. Atlikus analizę, pasirinkta linijas simuliuoti π -sekcijų metodu, dėl elektriškai trumpų linijų numatytame tinkle. Priimtos pirminės sąlygos ir prielaidos: KEEA yra tiksli, visiems vartotojams įrengtas IEEA, laidininkų temperatūra 20 °C, žemės varža 100 $\Omega \cdot m$, apkrova pastovi. Paklaidų nustatymo algoritmas paremtas skaitiklių duomenų ir pagal juos sudarytos tinklo simuliacijos skaitiklių duomenų lyginimu.
4. Atlikus skirtingų atvejų analizę nustatyta didžiausia modelio paklaida – 0,4766 %, kuomet vienas skaitiklis turi visų trijų fazių srovės matavimo paklaidą. Visų tirtų srovės matavimo paklaidų atvejų didžiausių neatitikimų vidutinis paklaidos nustatymo tikslumas – 0,3335 %. Įtampos matavimo paklaida nustatoma mažiausiu 0,1567 % tikslumu.
5. Įvertinus netolygų laidininkų įšilimą tinkle, nustatyta papildoma galima paklaida apsibrėžtomis sąlygomis – 0,38 %. Mažiausios paklaidos, galimos nustatyti sudaryto modelio, vertinant blogiausią atvejį – srovės 3,3566 %, įtampos 1,5367 %. Vertės gautos įvertinus galimą paklaidą dėl skirtingo laidininko įšilimo ir maksimalių leistinų matavimo paklaidų skaitikliams pagal jų klasę.

Literatūros sąrašas

1. ESO | Išmanieji Skaitikliai. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą:<https://ismaniejiskaitikliai.lt/>.
2. *Elektros Vagystės Nustatomos Ir Dronų Pagalba | ESO - Energijos Skirstymo Operatorius*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą:<https://www.eso.lt/web/naujienos/elektros-vagystes-nustatomos-ir-dronu-pagalba/2341>.
3. DE OLIVEIRA VENTURA, L., et al. A New Way for Comparing Solutions to Non-Technical Electricity Losses in South America. *Utilities Policy*, 2020, vol. 67. pp. 101113. Prieiga per internetą:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178720301077> ISSN 0957-1787. DOI 10.1016/j.jup.2020.101113.
4. KHAN, S. and SAINI, M. A Comprehensive Study on Energy Meters and Power Tampering Attempts. *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)*, -12-01, 2021, vol. 10 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 315. Prieiga per internetą:https://www.researchgate.net/publication/357318973_A_comprehensive_study_on_energy_meters_and_power_tampering_attempts DOI 10.11591/ijape.v10.i4.pp315-325.
5. RAMALINGAM, G., MEIKANDASIVAM, S. and VIJAYAKUMAR, D. A Market Research on Current Energy Metering System and Future Opportunities. *International Journal of Economics and Business Research*, March 1, 2020, vol. 9 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 2226–8235. Prieiga per internetą:https://www.researchgate.net/publication/341009873_A_Market_Research_on_Current_Energy_Metering_System_and_Future_Opportunities.
6. RAMALINGAM, G., MEIKANDASIVAM, S. and VIJAYAKUMAR, D. A Market Research on Current Energy Metering System and Future Opportunities. *International Journal of Economics and Business Research*, March 1, 2020, vol. 9 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 2226–8235. Prieiga per internetą:https://www.researchgate.net/publication/341009873_A_Market_Research_on_Current_Energy_Metering_System_and_Future_Opportunities.
7. *BS EN 62053-11:2003+A1:2017: Electricity Metering Equipment (a.C.). Particular Requirements*. British Standards Institute, Jul 20, 2018 Prieiga per internetą:<https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000030375769>.
8. BAAH, B. and NWAGBO, C. A Comparative Study of Basic Types of Energy Meters and Metering. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, February 9, 2022, vol. 10 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 117–124. Prieiga per internetą:https://www.researchgate.net/publication/358479054_A_comparative_study_of_basic_types_of_energy_meters_and_metering DOI 10.30574/gjeta.2022.10.1.0028.
9. *Skaitikliai, Jų Priežiūra Ir Tikrinimas | ESO - Energijos Skirstymo Operatorius*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą:<https://www.eso.lt/web/namams/elektra/skaitikliai-ju-prieziura-ir-tikrinimas/3768>.
10. *Dažniausiai Užduodami Klausimai | ESO - Energijos Skirstymo Operatorius*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą:<https://www.eso.lt/web/duk/ismaniju-skaitikliu-keitimo-darbai-ir-veikimo-principai-148>.

11. *Xs211 Single Phase Residential Cellular Power Meter Datasheet*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą: https://support.sagemcom.com/sites/default/files/2022-01/SAG.ESB_XS211.DataSheet.pdf.
12. *T211 Es Tipo Tyrimo Sertifikatas*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą: <https://ismaniejiskaitikliai.lt/doclib/mvcsckz9kdzsvpu33t6ve273cq5c1tse>.
13. *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, Or Unbalanced Conditions*. IEEE, 2010 ISBN 9780738160580. DOI 10.1109/IEEESTD.2010.5439063.
14. WĘGIEREK, P. The Temperature Effect on Measurement Accuracy of the Smart Electricity Meter. *Przegląd Elektrotechniczny*, -08-05, 2016, vol. 1 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 150–152. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/327769370> The temperature effect on measurement accuracy of the smart electricity meter DOI 10.15199/48.2016.08.40.
15. *BS EN 50470-3:2022: Electricity Metering Equipment*. British Standards Institute, Apr 26, 2023 Prieiga per internetą: <https://bsol.bsigroup.com/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000030473097>.
16. CHUWA, M.G. and WANG, F. A Review of Non-Technical Loss Attack Models and Detection Methods in the Smart Grid. *Electric Power Systems Research*, 2021, vol. 199. pp. 107415. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621003965> ISSN 0378-7796. DOI 10.1016/j.epsr.2021.107415.
17. YADAV, R. and KUMAR, Y. The Detection of Non-Technical Losses and Electricity Theft by Smart Meter Data and Artificial Intelligence in the Context of Electric Distribution Utilities: A Comprehensive Review. *International Journal of Computing and Digital Systems*, -09-30, 2022, vol. 12 [žiūrėta 2025-06-01]. pp. 731–740. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/369906427> The detection of non-technical losses and electricity theft by smart meter data and Artificial Intelligence in the context of electric distribution utilities A comprehensive review DOI 10.12785/ijcds/120160.
18. *Energy Theft Detection Technical Brief*. [žiūrėta 2025-06-01]. Prieiga per internetą: <https://go.bidgely.com/rs/492-VKN-623/images/Bidgely-Energy-Theft-Detection-Technical-Brief.pdf>.
19. AFZAL, Z., GAGGERO, G. and ASPLUND, M. *Towards Privacy-Preserving Anomaly-Based Intrusion Detection in Energy Communities*. , -02-26, 2025 [žiūrėta 2025-06-15]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/389392418> Towards Privacy-Preserving Anomaly-Based Intrusion Detection in Energy Communities.
20. ŽARKOVIĆ, M. and DOBRIC, G. Artificial Intelligence for Energy Theft Detection in Distribution Networks. *Energies*, March 26, 2024, vol. 17 [žiūrėta 2025-06-15]. pp. 1580. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/379325906> Artificial Intelligence for Energy Theft Detection in Distribution Networks DOI 10.3390/en17071580.
21. M. Liu, et al. Deep Learning Detection of Inaccurate Smart Electricity Meters: A Case Study. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2020, vol. 14, no. 4. pp. 79–90 ISSN 1941-0115. DOI 10.1109/MIE.2020.3026197.

22. LIU, M., et al. Deep Learning Detection of Inaccurate Smart Electricity Meters: A Case Study, Jul 26, 2019. Prieiga per internetą: <https://arxiv.org/abs/1907.11377> DOI 10.48550/arxiv.1907.11377.
23. IFTIKHAR, H., et al. Electricity Theft Detection in Smart Grid using Machine Learning. *Frontiers in Energy Research*, March 20, 2024, vol. 12 [žiūrėta 2025-06-16]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/379184886> Electricity theft detection in smart grid using machine learning DOI 10.3389/fenrg.2024.1383090.
24. GÜNDÜZ, M. and DAS, R. Smart Grid Security: An Effective Hybrid CNN-Based Approach for Detecting Energy Theft using Consumption Patterns. *Sensors*, February 9, 2024, vol. 24 [žiūrėta 2025-06-16]. pp. 1148. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/378123060> Smart Grid Security An Effective Hybrid CNN-Based Approach for Detecting Energy Theft Using Consumption Patterns DOI 10.3390/s24041148.
25. ESO. *Reikalavimai Elektrinių Projektavimui*, 2019.
26. SHAHRIAR PRAMANIK, A., SEPASI, S., GRISWOLD, B. and ADEGBOYEGA, A. Assessing Dynamic Behaviors in Converter- Dominated Power Systems Via RMS and EMT Simulations: A Study of Hawaii's NELHA Microgrid. *IEEE Access*, Jan 1, 2025, vol. 13. pp. 83881–83896. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11000107> CrossRef. ISSN 2169-3536. DOI 10.1109/ACCESS.2025.3568782.
27. *PI-Section Equivalent Circuits*. [žiūrėta 2026-01-20]. Prieiga per internetą: https://www.pscad.com/webhelp-v502-01/EMTDC/Transmission_Lines/PI-Section_Equivalent_Circuits.htm.
28. TALEB, M., DITTO, M.J. and BOUTHIBA, T. *Performance of Short Transmission Lines Models*. IEEE, Mar 2006 Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5686249> DOI 10.1109/IEEEGCC.2006.5686249.
29. SCHOENE, J. and MCDERMOTT, T.E. *Modeling Large-Scale Power Systems with Frequency-Dependent Transmission Line Models*. IEEE, Apr 2008 Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4517264> ISBN 2160-8555. DOI 10.1109/TDC.2008.4517264.
30. GRAINGER, J.J. and STEVENSON, W.D. *Power System Analysis*. Internat. ed. ed. New York, NY u.a: McGraw-Hill, 1994 Prieiga per internetą: http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&local_base=BVB01&doc_number=006999529&sequence=000001&line_number=0001&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA CiNII Research of NDL. ISBN 0070612935.
31. Gytis Svinkūnas and Algimantas Navickas. *Elektros Energetikos Pagrindai*. Kaunas: KTU leidykla „Technologija“, 2013 Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.5755/e01.9786090210024> DOI 10.5755/e01.9786090210024.
32. CIGRE. *Technical Brochure 207: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors*, August, 2002.