



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Gedimų elektros tinkle identifikavimas naudojant išmaniųjų energijos skaitiklių duomenis

Baigiamasis magistro projektas

Martynas Urbonas

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Gedimų elektros tinkle identifikavimas naudojant išmaniųjų energijos skaitiklių duomenis

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Martynas Urbonas

Projekto autorius

Prof. Robertas Lukočius

Vadovas

Doc. Gytis Svinkūnas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Martynas Urbonas

Gedimų elektros tinkle identifikavimas naudojant išmaniųjų energijos skaitiklių duomenis

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.

Martynas Urbonas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Urbonas, Martynas. Gedimų elektros tinkle identifikavimas naudojant išmaniųjų energijos skaitiklių duomenis. 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: išmanieji skaitikliai, elektros tinklas, gedimų identifikavimas, realaus laiko duomenys, duomenų analizė

Kaunas, 2026. 40p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriamos elektros tinklo gedimų identifikavimo galimybės, naudojant išmaniųjų elektros energijos skaitiklių (SMART) duomenis. Didėjant elektros tinklų apkrovoms, decentralizuotos generacijos mastui ir išmaniųjų skaitiklių diegimui, ankstyvas tinklo sutrikimų identifikavimas tampa vis aktualesnis siekiant užtikrinti patikimą elektros energijos tiekimą ir sumažinti trikdžių poveikį vartotojams.

Tyrimo metu analizuoti realūs išmaniųjų skaitiklių duomenys, apimantys 92 861 matavimą iš 103 skirtingų skaitiklių. Analizuotas laikotarpis – 2025 m. spalio 19–25 d. Tyrime naudoti fazinių įtampų ir fazinių srovių duomenys, leidžiantys vertinti elektros tinklo darbo režimą, apkrovų pasiskirstymą ir galimus anomalinius nukrypimus.

Gedimų identifikavimui buvo sukurta duomenų analizės metodika, apjungianti fazinių dydžių disbalanso analizę, neprižiūravimo mokymosi algoritmą „Isolation Forest“ bei etaloninio panašumo analizę. Validacijai naudoti trys iš anksto identifikuoti probleminiai skaitikliai, kurių duomenys panaudoti probleminio darbo režimo etalonui formuoti. Toliau bendrame duomenų rinkinyje ieškoti skaitikliai, pasižymintys panašiais požymiais.

Tyrimo rezultatai parodė, kad taikyta metodika leidžia efektyviai identifikuoti anomalijas bei potencialiai probleminius skaitiklius net ir naudojant ribotą parametų rinkinį. Nustatyta, kad anomalijos bendrame duomenų rinkinyje pasiskirsto tarp tarpusavyje nesusijusių skaitiklių kaip individualūs darbo režimo nukrypimai, o žinomų probleminių skaitiklių analizė patvirtino metodo tinkamumą realių gediminių režimų identifikavimui.

Gauti rezultatai rodo, kad SMART skaitiklių duomenys gali būti naudojami ne tik elektros energijos apskaitai, bet ir pažangiai elektros tinklo diagnostikai bei ankstyvajam gedimų nustatymui.

Urbonas, Martynas. Fault Identification in Electrical Distribution Grid Using Smart Energy Meter Data. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Lukočius Robertas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: smart meters, power grid, fault detection, real-time data, data analytics

Kaunas, 2026. 40p.

Summary

This master's thesis investigates the possibilities of identifying faults in electrical distribution networks using smart electricity meter (SMART) data. With increasing electrical grid loading, the growth of decentralized generation, and the large-scale deployment of smart metering infrastructure, early fault detection has become increasingly important for ensuring reliable electricity supply and reducing the impact of disturbances on consumers.

The study is based on real smart meter measurement data comprising 92,861 measurements collected from 103 different meters during the period from 19 to 25 October 2025. The analysis focused on phase voltage and phase current measurements, which provide direct insight into grid operating conditions, load distribution, and potential abnormal behavior.

A fault identification methodology was developed by combining phase imbalance analysis, the unsupervised machine learning algorithm Isolation Forest, and a reference-based similarity analysis approach. Three previously identified problematic smart meters were used as validation cases to form a reference profile representing a faulty operating condition. The remaining meters were then evaluated for similarity to this reference profile.

The results demonstrated that the proposed methodology can effectively identify anomalies and potentially problematic meters even when only a limited set of parameters is available. While anomalies in the overall dataset were distributed among unrelated individual meters, the analysis of the known problematic cases confirmed the suitability of the approach for identifying real fault-related operating patterns.

The findings show that smart meter data can be used not only for energy metering purposes but also for advanced power network diagnostics and early fault detection.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Išmaniojo energijos skaitiklio sandara, duomenų perdavimas, naudojama programinė įranga duomenims apdoroti	11
1.1. Išmaniojo energijos skaitiklio sandara.....	11
1.2. Išmaniojo energijos skaitiklio duomenų perdavimas.....	12
1.3. Programinė įranga naudojama duomenų apdorojimui.....	12
2. Energijos parametrų kokybės stebėseną naudojant išmaniuosius skaitiklius	13
2.1. Gedimų identifikavimas naudojant realaus laiko (angl. real-time) parametrus.....	13
2.2. Gedimo vietos nustatymas naudojant įtampos ir srovės parametrus	13
2.3. Išmaniųjų skaitiklių galimybės identifikuojant tinklo gedimus pagal impedanso pokytį.....	13
2.3.1. Atviros fazės (nutrūkusios linijos).....	14
2.3.2. Žemės nuotėkiai ir aukštos varžos gedimai	14
2.3.3. Laikini arba pertraukiami kontaktai.....	14
2.3.4. Įtampos mirgėjimas (angl. flicker) ir apkrovos svyravimai.....	14
2.4. Literatūros apžvalga apie SMART skaitiklių duomenų taikymą gedimų aptikimui	15
3. Tyrimo rezultatai	16
3.1. Duomenų analizės metodika ir eiga.....	16
3.2. Aptiktos anomalijos ir jų interpretacija.....	18
4. Rezultatų analizė	23
4.1. Įtampos disbalanso analizė	24
4.2. Srovės disbalanso analizė	26
4.3. Prižiūravimo mokymosi algoritmo rezultatų analizė.....	28
4.4. Tyrimo statistikos.....	33
Išvados	36
Literatūros sąrašas	37
Priedai	38

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Analizuotų skaitiklių įtampos parametrai (min, max, viršįtampiai ir kritimai)	19
2 lentelė. Analizuotų skaitiklių srovės parametrai (min, max, standartinis nuokrypis)	20
3 lentelė. Skaitiklių panašumo į probleminį etaloną rezultatai (Euklido atstumas ir kosinusinis panašumas)	30
4 lentelė. Tyrimo bendrosios statistikos	34

Paveikslų sąrašas

1 pav. Trifazio išmaniojo skaitiklio brėžinys (visos vertės milimetrais).....	11
2 pav. Tyrimo metodikos blokinė schema.....	17
3 pav. Supaprastinta analizuoto elektros tinklo schema.....	18
4 pav. Pirmojo vartotojo įtampos pokyčiai laike.....	20
5 pav. Pirmojo vartotojo srovės pokyčiai laike	21
6 pav. Antrojo vartotojo įtampos pokyčiai laike	21
7 pav. Antrojo vartotojo srovės pokyčiai laike.....	22
8 pav. Trečiojo vartotojo įtampos pokyčiai laike	22
9 pav. Trečiojo vartotojo srovės pokyčiai laike.....	22
10 pav. Normalų veikimo režimą atitinkančio skaitiklio įtampos grafikas.....	23
11 pav. Normalų veikimo režimą atitinkančio skaitiklio srovės grafikas	24
12 pav. Fazinių įtampų disbalanso pasiskirstymas.....	25
13 pav. Fazinių įtampų matavimų pasiskirstymas laiko atžvilgiu.....	26
14 pav. Anomalių matavimų pasiskirstymas.....	27
15 pav. Labiausiai į probleminį etaloną panašaus skaitiklio įtampa	31
16 pav. Skaitiklių atstumas iki probleminio etalono	32
17 pav. Skaitiklių kosinusinis panašumas į probleminį etaloną	32
18 pav. Labiausiai į probleminį etaloną panašaus skaitiklio srovė	33

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ESO – Energijos skirstymo operatorius

Terminai:

Išmanusis energijos skaitiklis – Įrenginys kaupiantis ir perduodantis informaciją apie elektros parametrų kokybę bei suvartojimą.

Impedansas – tai bendrinis elektros grandinės elementų pasipriešinimo kintamajai srovei matas, apimantis tiek **aktyvinę (varžą)**, tiek **reaktyvinę (induktyvumą ir talpumą)** grandinės sudedamąją dalį.

Išvadas

Elektros tinklai yra viena svarbiausių modernios visuomenės infrastruktūros dalių, užtikrinanti stabilų energijos tiekimą ir namų ūkiams, ir verslui ir pramonei. Didėjant elektros vartojimui ir sudėtingėjant elektros tinklų struktūrai, vis labiau aktualėja pažangių technologijų integracija, leidžianti efektyviai valdyti energijos srautus, optimizuoti išteklius ir greitai identifikuoti tinklo sutrikimus.

Pastaraisiais metais išmaniosios technologijos vis labiau įsigali elektros energijos apskaitos ir tinklo valdymo srityse. SMART (angl. self-monitoring analysis and reporting technology) skaitikliai – tai inovatyvūs prietaisai, kurie ne tik tiksliai nuskaity elektros suvartojimą, bet ir renka duomenis apie įvairius tinklo parametrus, tokius kaip įtampos svyravimai, srovės pokyčiai, elektros tiekimo pertrūkiai ar net neteisėtas energijos naudojimas. Šie duomenys gali būti automatiškai perduodami centralizuotoms sistemoms analizei, leidžiant operatoriams greitai reaguoti į tinklo sutrikimus ir optimizuoti tinklo valdymą.

Lietuvoje SMART skaitikliai diegiami vis sparčiau – nuo 2022 m. iki 2024 m. AB „Energijos skirstymo operatorius“ (ESO) įdiegė daugiau nei 1 mln. šių prietaisų, o jų naudojimas tapo neatsiejama elektros tinklo modernizavimo dalimi. Naujos kartos skaitikliai leidžia ne tik palengvinti energijos apskaitą vartotojams, bet ir suteikia galimybę automatizuotai aptikti tinklo gedimus, taupyti specialistų laiką bei didinti energijos tiekimo patikimumą.

Šiame magistro darbe nagrinėjama, kaip SMART skaitiklių duomenys gali būti panaudoti gedimų diagnostikai ir prevencijai elektros tinkluose. Aptariama jų techninė sandara, veikimo principai bei privalumai gedimų nustatymo procese. Taip pat analizuojamos ateities perspektyvos bei iššūkiai, susiję su šių technologijų tobulinimu ir diegimu platesniu mastu.

Be to, vis dažniau kalbama apie kibernetinio saugumo svarbą, kai duomenys iš SMART skaitiklių yra perduodami per atvirus ryšio kanalus. Užtikrinti duomenų integralumą ir saugumą tampa vienu iš svarbiausių uždavinių elektros energijos skirstymo įmonėms. Dėl to vystomi papildomi šifravimo ir autentifikacijos sprendimai, kurie integruojami į skaitiklių programinę įrangą bei valdymo sistemas.

Kitas reikšmingas aspektas – didžiųjų duomenų (big data) analizė, kuri leidžia realiuoju laiku stebėti vartotojų įpročius, prognozuoti apkrovas ir gedimų riziką. Tai sudaro sąlygas kurti pažangias tinklo valdymo sistemas (angl. smart grid), kuriose automatizuotas atsakas į gedimus tampa kasdienybe.

Darbo uždaviniai:

1. Atlikti literatūros, darbo tema, apžvalgą ir analizę;
2. Surinkti fizinio eksperimento duomenis;
3. Sukurti anomalijų identifikavimo metodiką ir modelį;
4. Ištirti pasiūlytą modelį panaudojant skaitinius modeliavimo metodus ir fizinio eksperimento duomenis;
5. Apibendrinti gautus rezultatus ir suformuoti išvadas.

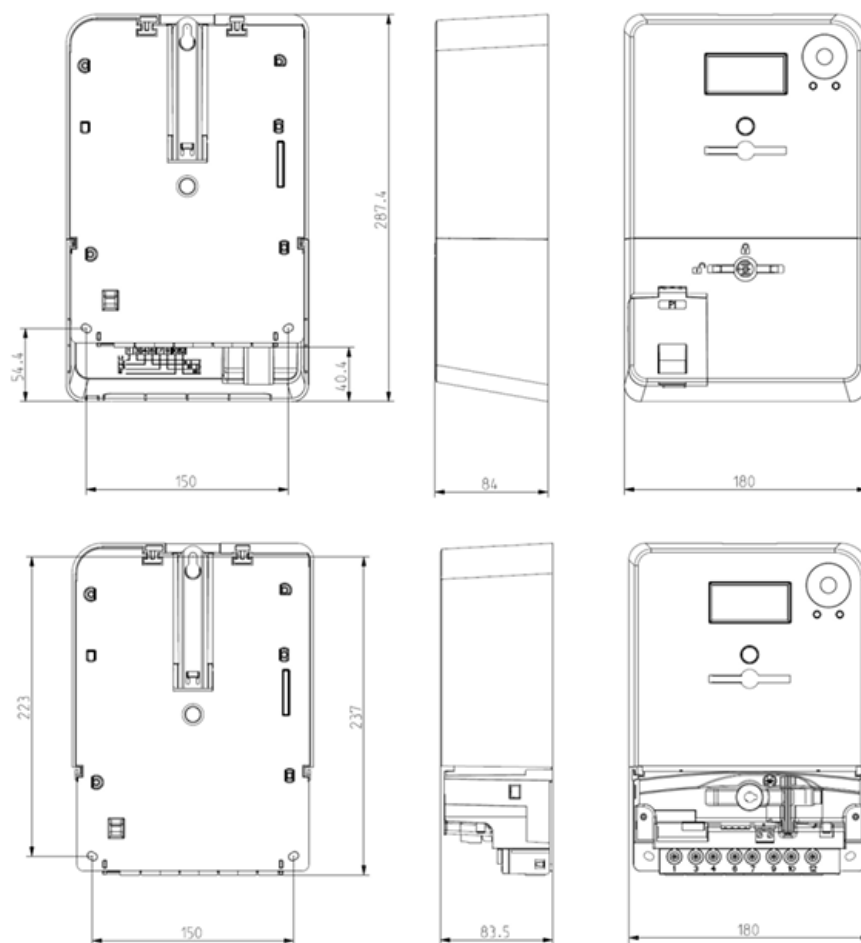
1. Išmaniojo energijos skaitiklio sandara, duomenų perdavimas, naudojama programinė įranga duomenims apdoroti

1.1. Išmaniojo energijos skaitiklio sandara

Prieš pradėdant analizuoti išmaniųjų (SMART) elektros energijos skaitiklių renkamus ir perduodamus duomenis, būtina įvertinti jų vidinę sandarą bei pagrindinius techninius parametrus. Toks supratimas leidžia tiksliau interpretuoti matavimo rezultatus ir įvertinti jų patikimumą elektros tinklo analizės kontekste. Šiame darbe nagrinėjamas trifazis „Sagemcom“ išmanusis skaitiklis, kuris plačiai taikomas Lietuvos skirstomajame elektros tinkle. Skaitiklio konstrukcijos ir veikimo principų analizė atlikta remiantis gamintojo pateikta technine dokumentacija.

Paveiksle (1 pav.) pateiktas skaitiklio gabaritinis brėžinys, leidžiantis įvertinti jo fizinius matmenis ir montavimo ypatumus. Tuo tarpu 1–3 prieduose pateikiamos svarbiausios techninės charakteristikos bei standartai, kuriuos šis skaitiklis atitinka. Šie standartai užtikrina matavimų tikslumą, patikimumą ir suderinamumą su elektros tinklo infrastruktūra.

Analizuojamas SMART skaitiklis geba matuoti ir registruoti įvairius elektros tinklo parametrus, įskaitant fazines srovės ir įtampos reikšmes, aktyviają, reaktyviają ir pilnutinę galią bei galios koeficientą. Be pagrindinių elektros dydžių, skaitiklis taip pat gali fiksuoti papildomus rodiklius, kurie leidžia identifikuoti galimus tinklo veikimo sutrikimus, apkrovos netolygumus ar neteisėto elektros energijos vartojimo atvejus. Tokios funkcijos yra ypač svarbios atliekant pažangią elektros tinklo stebėseną ir analizę.



1 pav. Trifazio išmaniojo skaitiklio brėžinys (visos vertės milimetrais)

Remiantis „Sagemcom“ techniniu aprašymu, skaitiklis tinklo parametrus apskaičiuoja taikydamas tam skirtas formules, kurios pateikiamos 5–10 prieduose.

1.2. Išmaniojo energijos skaitiklio duomenų perdavimas

Sagemcom išmanieji energijos skaitikliai, naudojami Lietuvoje, duomenis perduoda per mobilųjį ryšį (GSM/4G LTE) arba PLC (angl. power line communication) technologiją. Jie siunčia vartojimo informaciją operatoriui per saugų ir šifruotą ryšį, leidžiantį nuotoliniu būdu nuskaityti rodmenis, aptikti gedimus ir optimizuoti tinklo valdymą. Kai kurie modeliai palaiko DLMS/COSEM protokolą, užtikrinantį standartizuotą duomenų mainų formatą.

1.3. Programinė įranga naudojama duomenų apdorojimui

Duomenims apdoroti plačiai naudojamos tokios sistemos kaip „Meter Data Management System“ (MDMS), kurios užtikrina surinktų duomenų validavimą, agregavimą ir analizę. Lietuvoje ESO integravo „Siemens EnergyIP“ platformą, kuri leidžia realiuoju laiku analizuoti milijonų skaitiklių siunčiamus duomenis.

2. Energijos parametrų kokybės stebėseną naudojant išmaniuosius skaitiklius

2.1. Gedimų identifikavimas naudojant realaus laiko (angl. real-time) parametrus

Išmaniųjų energijos skaitiklių diegimas leidžia ne tik automatizuoti energijos apskaitą, bet ir suteikia galimybę realiuoju laiku stebėti elektros tinklo parametrus, tokius kaip įtampa, srovė, aktyvioji ir reaktyvioji galia bei galios koeficientas. Šie duomenys tampa ypač svarbūs, kai siekiama laiku identifikuoti tinklo gedimus ir sumažinti jų poveikį vartotojams.

Gedimų analizė remiasi konkrečių parametrų pokyčių stebėseną. Vienas pagrindinių indikatorinių parametrų yra momentiniai įtampos kritimai (angl. voltage sags), kurie dažnai pasireiškia staiga sumažėjus įtampai iki 40–60 % vardinės vertės per trumpą laiką. Tokie pokyčiai gali rodyti reikšmingą elektros sistemos sutrikimą.

Be to, galios koeficiento pokyčiai taip pat suteikia vertingos informacijos. Staigus galios koeficiento sumažėjimas gali rodyti padidėjusią reaktyviąją apkrovą, o ilgalaikiai svyravimai – galimus įžeminimo sistemos pažeidimus, transformatorių pažeidimus ar perkrovas ir pan.[3]

Gedimams nustatyti galima taikyti papildomas analitines metodikas, pavyzdžiui, koreliacinę analizę, kuri leidžia vertinti duomenų priklausomybę tarp kelių gretimų skaitiklių. Jei keliuose skaitikliuose vienu metu stebimi panašūs parametrų pokyčiai, galima tiksliau lokalizuoti galimą gedimo vietą. Taip pat taikomi statistiniai anomalijų aptikimo algoritmai, kurie automatiškai identifikuoja nukrypimus nuo normalaus tinko režimo.

Svarbu paminėti, kad išmaniųjų skaitiklių teikiami realaus laiko duomenys suteikia galimybę elektros skirstymo operatoriams ne tik greičiau aptikti gedimus, bet ir prognozuoti galimus trikdžius bei iš anksto imtis prevencinių veiksmų. Tai labai pagerina tinklo patikimumą, sumažina gedimų šalinimo laiką ir didina elektros tiekimo saugumą vartotojams.

2.2. Gedimo vietos nustatymas naudojant įtampos ir srovės parametrus

Šiuolaikiniai išmanieji energijos skaitikliai atlieka svarbų vaidmenį ne tik energijos vartojimo apskaitoje, bet ir tinklo būklės stebėsenos bei gedimų identifikavimo procesuose. Remiantis tyrimais, išmanieji skaitikliai, nuolat registruojantys tokius parametrus kaip įtampa, srovė ir galios koeficientas, leidžia identifikuoti įvairias nestandartines elektros tinklo būsenas, tokias kaip netinkamo įžeminimo gedimai, apkrovų disbalansas ar tinklo komponentų degradacija [15], [16]. Staigūs srovės pokyčiai, ilgalaikiai įtampos nuokrypiai bei galios koeficiento mažėjimas gali būti reikšmingi indikatoriai, signalizuojantys apie potencialius tinklo sutrikimus. Be to, išmanieji skaitikliai suteikia galimybę fiksuoti ir analizuoti mažo dažnio įvykius, kurie dažnai lieka nepastebėti tradicinėse matavimo sistemose, tačiau gali turėti ilgalaikį neigiamą poveikį tinklo stabilumui [17].

2.3. Išmaniųjų skaitiklių galimybės identifikuojant tinklo gedimus pagal impedanso pokytį

Išmanieji energijos skaitikliai tampa vis svarbesniu parametrų moderniose elektros energetikos sistemose, ypač dėl jų gebėjimo nuotoliniu būdu registruoti detalius parametrus. Nors tradiciniai išmanieji skaitikliai dažniausiai skirti energijos apskaitai ir momentinių parametrų stebėsenai, naujos kartos išmanieji skaitikliai, turintys didesnę matavimo tikslumą bei galimybę registruoti fazinius parametrus, gali būti naudojami ir tinklo sutrikimų, ypač impedanso pokyčių, identifikavimui. Literatūroje pabrėžiama, kad impedanso analizė yra vienas iš pagrindinių būdų gedimų vietai ir pobūdžiui nustatyti [11, 12].

2.3.1. Atviros fazės (nutrūkusios linijos)

Vienas iš dažniausių tinklo gedimų – atviros fazės sutrikimas, kuris gali būti sukeltas mechaninių pažeidimų (pvz., vėjo, ledo apkrovos, medžių kritimo) arba netinkamo jungimo ir kontaktinių mazgų gedimų. Tokiu atveju išmanusis skaitiklis gali registruoti šiuos požymius:

- staigų impedanso padidėjimą nutrūkusioje fazėje.
- galimus įtampos šuolius kitose fazėse dėl apkrovos persiskirstymo.

Tyrimai rodo, kad impedanso pokyčiai nutrūkus vienai fazei gali būti aiškiai matomi net naudojant vidutinės raiškos matavimo įrenginius, jei yra nuolat sekami įtampos ir srovės vektoriniai dydžiai [11].

2.3.2. Žemės nuotėkiai ir aukštos varžos gedimai

Aukštos varžos žemės gedimai ir nuotėkiai dažnai yra sunkiai detektuojami naudojant tradicines apsaugos sistemas, nes jų metu srovės pokytis būna minimalus. Tačiau tokie gedimai pasižymi palaipsniui mažėjančia impedanso verte, kurią galima stebėti išmaniaisiais skaitikliais, turinčiais aukštą matavimo tikslumą ir galinčiais registruoti fazės kampo pokyčius.

Anot literatūros, impedanso pokyčių analizė, paremta ilgalaikiu duomenų stebėjimu, leidžia aptikti šiuos aukštos varžos gedimus anksti [12, 13]. Tai ypač aktualu žemos įtampos tinkluose, kur klasikiniai diferencialiniai relės sprendimai dažnai yra nepakankamai jautrūs.

2.3.3. Laikini arba pertraukiami kontaktai

Kontaktų pažeidimai, atsirandantys dėl mechaninių vibracijų, korozijos ar šiluminių deformacijų, gali sukelti laikinus ar pertraukiamus ryšio praradimus tinkle. Tokie gedimai dažnai pasireiškia:

- periodiniais impedanso šuoliais.
- nestabiliais įtampos ir srovės dydžiais.
- trumpalaikiais įtampos kritimais ar svyravimais.

Remiantis naujausiais tyrimais, ilgalaikė išmaniųjų skaitiklių duomenų analizė leidžia identifikuoti tokio tipo sutrikimus net esant mažiems parametru pokyčiams, kurie nepatenka į tradicinių apsaugos sistemų detekcijos ribas [13].

2.3.4. Įtampos mirgėjimas (angl. flicker) ir apkrovos svyravimai

Įtampos mirgėjimas dažnai kyla dėl didelių apkrovų (pvz., variklių, suvirinimo aparatų) paleidimo. Nors šie reiškiniai nėra tiesioginis varžos pokytis, tačiau jie sukelia laikinus impedanso pokyčius tinkle dėl staiga besikeičiančios apkrovos.

Išmanieji skaitikliai gali užfiksuoti:

- laikinus impedanso svyravimus.
- įtampos kritimus ar mirgėjimą, ypač jei skaitikliai turi pakankamą laiko rezoliuciją.

Tyrimuose nurodoma, kad impedanso svyravimų stebėseną gali būti papildomas indikatorius pramoninėse zonose, kuriose dažnai veikia dinaminės apkrovos [14].

2.4. Literatūros apžvalga apie SMART skaitiklių duomenų taikymą gedimų aptikimui

Pastaraisiais metais išmaniųjų energijos skaitiklių duomenų analizė tapo svarbia elektros tinklo valdymo ir diagnostikos sritimi. Daugelis tyrimų pabrėžia, kad šie prietaisai ne tik tiksliai apskaito energijos vartojimą, bet ir suteikia vertingą informaciją apie tinklo būklę realiuoju laiku.

Mandal ir bendraautorai [1] pasiūlė realaus laiko gedimų identifikavimo metodą, pagrįstą duomenimis iš SMART skaitiklių. Tyrime pabrėžiama, kad šie duomenys leidžia pastebėti momentinius įtampos ir srovės pokyčius, kurie signalizuoja apie galimus tinklo pažeidimus. Panašią kryptį palaiko ir Ghosh bei Das [4], savo darbe parodę, kaip sinchronizuoti skaitiklių ir fiksuotų jutiklių duomenys gali padėti nustatyti tikslią gedimo vietą tinklo topologijoje.

Hasan et al. [2] atliko plataus masto apžvalgą apie išmaniosios apskaitos infrastruktūrą, pabrėždami jos potencialą ne tik vartojimo kontrolei, bet ir proaktyviai tinklo diagnostikai. Darbe išskirtos pagrindinės problemos, tokios kaip duomenų saugumas, perdavimo patikimumas ir duomenų kiekio apdorojimo iššūkiai. Šie aspektai tampa dar aktualesni, kai duomenys naudojami automatizuotam gedimų atpažinimui.

Wang ir bendraautorai [3] aptarė SMART skaitiklių duomenų analitiką plačiame kontekste – nuo energijos vartojimo prognozės iki sisteminių sutrikimų aptikimo. Jie išskyrė keletą duomenų apdorojimo metodų, tokių kaip anomalijų aptikimas, koreliacinė analizė, klasifikatoriai ir klasterizacija, kurie pritaikomi tinklo pobūdžių anomalijų ir trikdžių analizei.

Naujausi tyrimai vis dažniau taiko pažangius dirbtinio intelekto algoritmus. Pavyzdžiui, Yilmaz et al. [8] pasiūlė dvikryptį LSTM autoenkoderį, skirtą išmaniųjų skaitiklių duomenų anomalijų aptikimui, pasiekusį aukštą tikslumą aptinkant netipinius tinklo veikimo scenarijus. Lakićević et al. [6] pasiūlė naudoti skaitmeninį dvynį, kuris imituoja tinklo būklę remiantis skaitiklių duomenimis ir leidžia identifikuoti nukrypimus nuo įprasto veikimo modelio.

3. Tyrimo rezultatai

3.1. Duomenų analizės metodika ir eiga

Tyrimo metu buvo naudojami realūs išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenys, surinkti per duomenų valdymo sistemą (MDMS) ir eksportuoti į „Microsoft Excel“ aplinką tolimesnei analizei. Nors MDMS sistemoje gali būti prieinami įvairūs elektros parametrai, tokie kaip aktyvioji ir reaktyvioji galia ar galios koeficientas, šiame tyrime pagrindinis dėmesys buvo skiriamas įtampos ir srovės matavimams, nes būtent šie dydžiai tiesiogiai atspindi elektros tinklo būseną. Vizualizacijos, sukurtos naudojant „Python“ programavimo kalbą, leido išskirti laikotarpius ir atvejus, kuriuose buvo fiksuojamos nestandartinės arba anomalinės reikšmės. Analizės metu duomenys buvo filtruojami pagal datą, pasirinktus parametrus ir konkrečius skaitiklius, siekiant detaliau įvertinti jų elgseną.

Duomenų rinkinys buvo pateiktas „Excel“ formato faile ir suskirstytas į du atskirus, tačiau struktūriškai vienodus lapus: viename pateiktos fazių srovės, kitame – fazių įtampos reikšmės. Kiekvienas įrašas apėmė skaitiklio identifikatorių (meter serial number), matavimo datą, laiką bei atitinkamas fazių reikšmes. Srovės duomenyse buvo pateikiamos trijų fazių srovės (L1, L2 ir L3), o įtampos duomenyse – analogiškos fazių įtampos reikšmės. Bendras analizuotų duomenų kiekis siekė apie 92 861 matavimą ir apėmė 103 skirtingus skaitiklius. Pradiniame etape šie du duomenų rinkiniai buvo sujungti į vieną bendrą struktūrą pagal skaitiklio numerį, datą ir laiką, taip užtikrinant, kad kiekvienam laiko momentui būtų galima vienu metu vertinti tiek srovės, tiek įtampos parametrus.

Kadangi elektros skirstymo tinkle vienu metu veikia tiek vienfaziai, tiek trifaziai vartotojai, svarbi analizės dalis buvo skaitiklių klasifikavimas pagal jų tipą. Skaitiklis buvo laikomas trifaziu tuo atveju, jei duomenyse buvo pateikiamos visų trijų fazių reikšmės, o jei registruojama tik viena fazė arba kitos fazės turėjo tuščias ar nulines reikšmes, toks skaitiklis buvo priskiriamas vienfaziams vartotojams. Šis skirstymas leido taikyti skirtingus analizės metodus: trifaziams vartotojams vertinti fazių tarpusavio santykius ir disbalansus, o vienfaziams – įtampos bei srovės pokyčiai laike.

Trifaziams skaitikliams buvo apskaičiuoti fazių disbalanso rodikliai, leidžiantys įvertinti tinklo simetriškumą. Įtampos disbalansas buvo nustatomas kaip santykis tarp didžiausios ir mažiausios fazių įtampos skirtumo bei vidutinės įtampos, o analogišku principu apskaičiuotas ir srovės disbalansas. Padidėjusios šių rodiklių reikšmės gali rodyti netolygų apkrovų pasiskirstymą tarp fazių, galimas neutralės laidininko problemas ar bendrą tinklo asimetriją. Tokia analizė leidžia identifikuoti potencialias silpnąsias tinklo vietas dar iki atsirandant aiškiems gedimams.

Papildomai buvo atlikta apkrovos charakteristikų analizė, remiantis srovės reikšmių kitimu laike. Ši analizė leido nustatyti vartotojų apkrovos dinamiką, identifikuoti didžiausios apkrovos laikotarpius bei įvertinti vartojimo režimų pastovumą. Taip pat buvo išskirti skaitikliai, kuriuose srovės svyravimai buvo neįprastai dideli arba nepastovūs, kas gali būti susiję su specifiniais vartotojų įrenginiais ar galimais tinklo sutrikimais.

Anomalijų identifikavimui buvo pasitelktas neprižiūravimo mokymosi algoritmas – Isolation Forest. Šis metodas leidžia analizuoti daugiamates duomenų struktūras ir išskirti matavimus, kurie reikšmingai skiriasi nuo bendro duomenų pasiskirstymo. Modelyje buvo naudojamos tiek tiesioginės matavimo reikšmės (fazės įtampos ir srovės), tiek iš jų išvesti rodikliai (įtampos ir srovės disbalansas). Kiekvienam duomenų taškui algoritmas priskyrė klasifikaciją, nurodančią normalų arba anomalinį režimą, taip sudarant galimybę identifikuoti nestandartinius tinklo darbo atvejus.

Isolation Forest algoritmas yra neprižiūravimo mokymosi metodas, skirtas anomalijų aptikimui. Jo veikimo principas grindžiamas tuo, kad anomalūs duomenų taškai yra lengviau izoliuojami nei normalūs. Algoritmas generuoja atsitiktinių sprendimų medžių rinkinį, kuriuose duomenys skaidomi atsitiktiniais požymiais ir ribomis.

Isolation Forest algoritmo anomalijos balo skaičiavimai atliekami pagal (1) formulę:

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}}; (1)$$

Čia: $s(x, n)$ - anomalijos balas;

$E(h(x))$ - vidutinis kelio ilgis iki objekto sprendimų medyje;

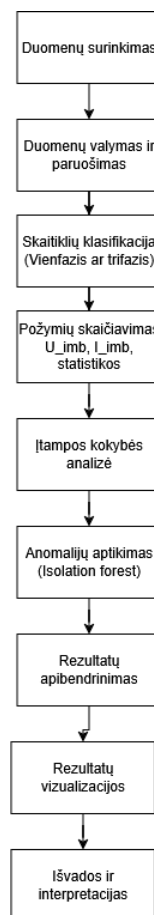
$c(n)$ - normalizavimo koeficientas;

n – duomenų imties dydis.

Kuo mažiau skaidymų reikia tam tikram duomenų taškui izoliuoti, tuo didesnė tikimybė, kad jis yra anomalija. Taip kiekvienam taškui apskaičiuojamas anomalijos įvertis, leidžiantis klasifikuoti jį kaip normalų arba nestandartinį.

Siekiant geriau interpretuoti gautus rezultatus, buvo taikyta grafinė duomenų analizė. Sudaryti įtampos ir srovės kitimo laiko grafikai, disbalanso pasiskirstymo histogramos bei anomalijų pasiskirstymo tarp skaitiklių diagramos. Tokia vizualizacija padeda aiškiau identifikuoti tendencijas, išskirti probleminius laikotarpius ir nustatyti galimus tinklo sutrikimus.

Aprašyta metodika leidžia praktiškai pritaikyti išmaniųjų skaitiklių duomenis gedimų identifikavimui elektros tinkle. Skaitikliai, kuriuose stebimas padidėjęs fazių disbalansas, nestabilūs įtampos ar srovės pokyčiai bei didesnis anomalijų skaičius, gali būti laikomi potencialiais probleminių tinklo vietų indikatoriais. Tokie atvejai gali būti toliau tiriama detaliau, siekiant nustatyti konkrečias sutrikimų priežastis ir imtis atitinkamų tinklo eksploatavimo ar modernizavimo priemonių.



2 pav. Tyrimo metodikos blokinė schema

3.2. Aptiktos anomalijos ir jų interpretacija

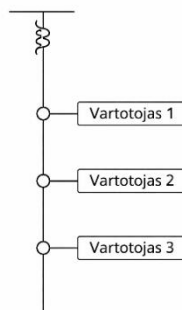
Analizės metu identifikuoti keli tipiniai gedimų požymiai:

- įtampos kritimas ar šuolis daugiau nei 10 % vardinės vertės
- didelis srovės standartinis nuokrypis.
- padidėjusi momentinė srovė vienoje fazėje (galimas neteisingas prijungimas)

Pradiniam tyrimui buvo pasirinkta linija, kurioje yra trys vartotojai – trys trifaziai skaitikliai. Bendradarbiaujant su ESO, hipotezės apgynimui, buvo pasirinkta linija kurioje jau buvo išaiškintas gedimo tipas – neteisingas prijungimas/susidevėjęs neutralės kontaktas. Visi trys vartotojai linijoje neturi generacijos šaltinių ir jų leistina vartoti galia - 7kW.

Tyrimo metu buvo naudojami išmaniųjų energijos skaitiklių registruojami fazinės įtampos ir fazinės srovės duomenys. Šie parametrai yra pirminiai elektros tinklo matavimo dydžiai, iš kurių apskaičiuojami kiti elektros parametrai, tokie kaip aktyvioji ir reaktyvioji galia bei energija. Kadangi elektros tinklo gedimai pirmiausia pasireiškia įtampos ir srovės pokyčiais, šių parametrų analizė leidžia efektyviai identifikuoti tinklo anomalijas ir galimus gedimus.

Analizės metu buvo pastebėta, jog visi trys vartotojai buvo įtakoti vartotojo, pas kurį buvo nustatytas defektas. Anomalijų vertinimo metu, buvo padaryta išvada, jog tiksliausia galimybė nustatyti tikslią gedimo vietą yra vertinant įtampos kryčių ir pikų kiekį. Nors ir tarp 1-ojo vartotojo ir 2-ojo vartotojo kryčių bei pikų kiekiai buvo panašūs, buvo remiamasi į grafinį įtampos pasiskirstymą ir srovės pikus bei standartinį nuokrypį.



3 pav. Supaprastinta analizuoto elektros tinklo schema

Išanalizuotų skaitiklių įtampos parametrai pateikiami lentelėje apačioje (matavimų kiekis 4237)

1 lentelė. Analizuotų skaitiklių įtampos parametrai (min, max, viršįtampiai ir kritimai)

SAG1030100050194				
Fazė	Min (V)	Max (V)	Pikai >253V	Kryčiai <207V
L1	0	254.54	1	53
L2	0	261.93	6	4
L3	0	245.76	0	21
SAG1030100131268				
Fazė	Min (V)	Max (V)	Pikai >253V	Kryčiai <207V
L1	0	251.45	0	5
L2	0	255.03	2	4
L3	0	244.46	0	5
SAG1030100131360				
Fazė	Min (V)	Max (V)	Pikai >253V	Kryčiai <207V
L1	113.27	250.97	0	24
L2	106.38	255.37	2	56
L3	118.62	259.51	6	6

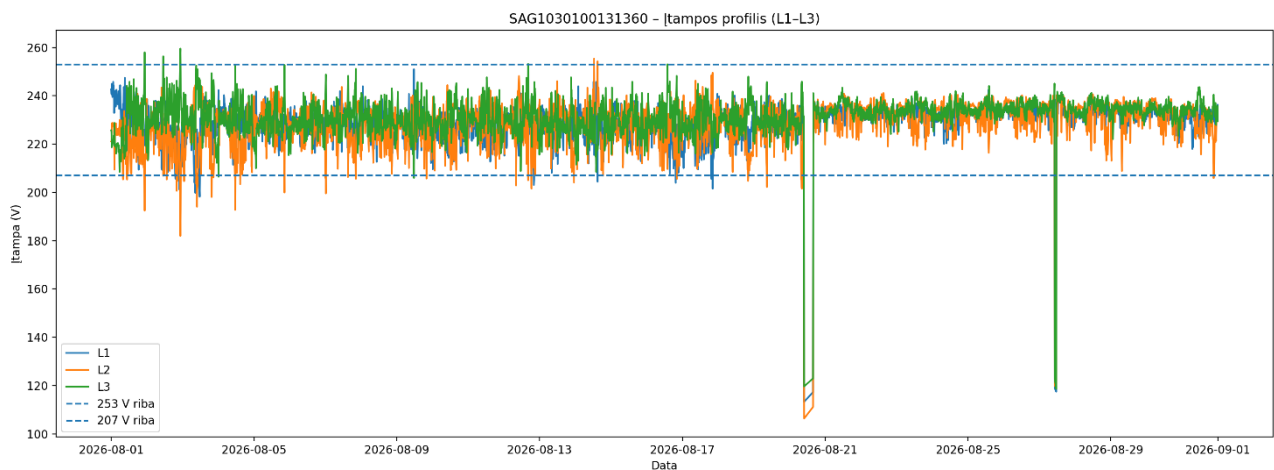
Išanalizuotų skaitiklių srovės parametrai pateikiami lentelėje apačioje: (matavimų kiekis 4237)

2 lentelė. Analizuotų skaitiklių srovės parametrai (min, max, standartinis nuokrypis)

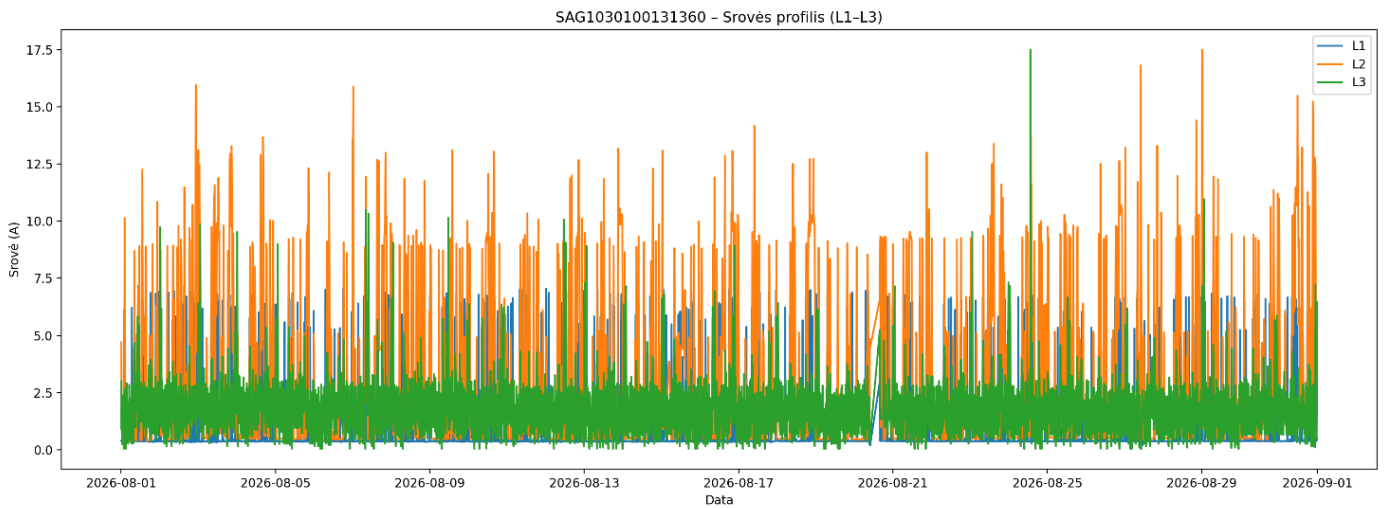
SAG1030100050194			
Fazė	Min (A)	Max (A)	Standartinis nuokrypis
L1	0	15.066	2.407
L2	0	6.024	0.346
L3	0	6.946	0.641
SAG1030100131268			
Fazė	Min (A)	Max (A)	Standartinis nuokrypis
L1	0	9.392	0.514
L2	0	9.542	1.976
L3	0	11.405	3.105
SAG1030100131360			
Fazė	Min (A)	Max (A)	Standartinis nuokrypis
L1	0.19	16.293	1.802
L2	0.4	17.496	3.303
L3	0.026	17.502	1.3

Toliau analizės metu buvo apdorojami vartotojų mėnesio srovės ir įtampos profiliai ir sukuriami grafikai, pagal kuriuos galima matyti įtampos bei srovės pokyčius laike:

Šiuose grafikuose galima matyti vartotojo (pirmas linijoje nuo galios transformatoriaus), pas kurį, buvo aptiktas neteisingas prijungimas/susidevėjęs neutralės kontaktas įtampos bei srovės pokyčius laike

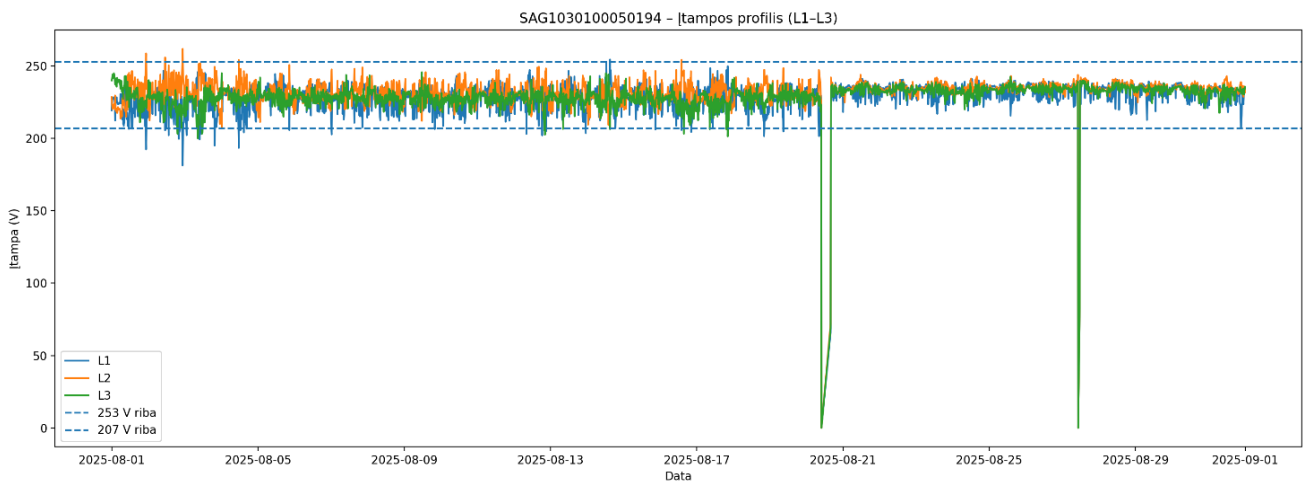


4 pav. Pirmojo vartotojo įtampos pokyčiai laike

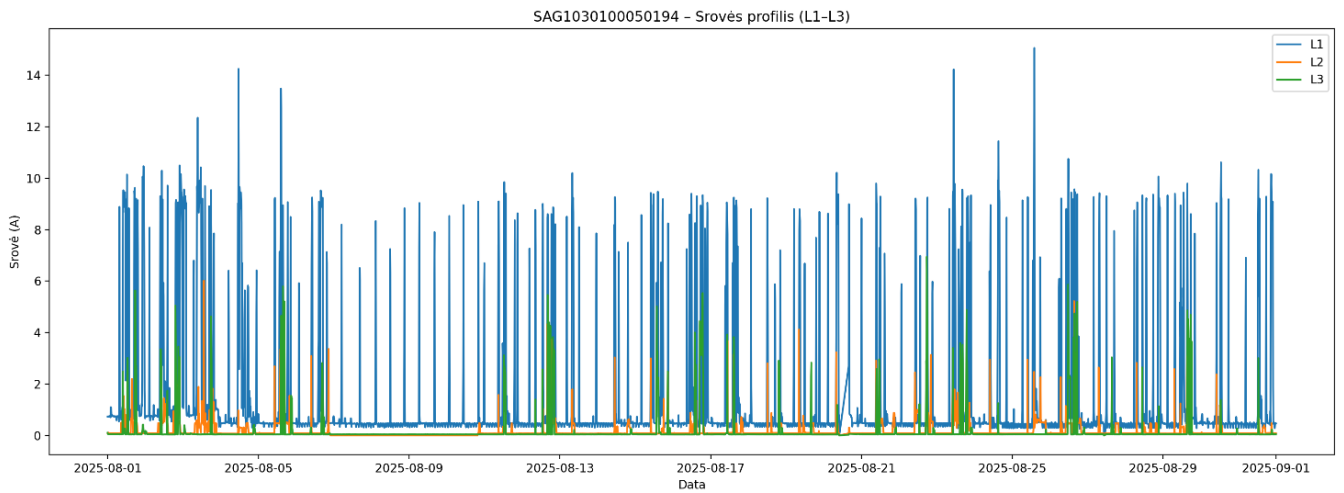


5 pav. Pirmojo vartotojo srovės pokyčiai laike

Šis vartotojas buvo antrasis linijoje (už SAG1030100131360 vartotojo), ir grafikuose galima matyti jo įtampas ir srovės pokyčius laike:

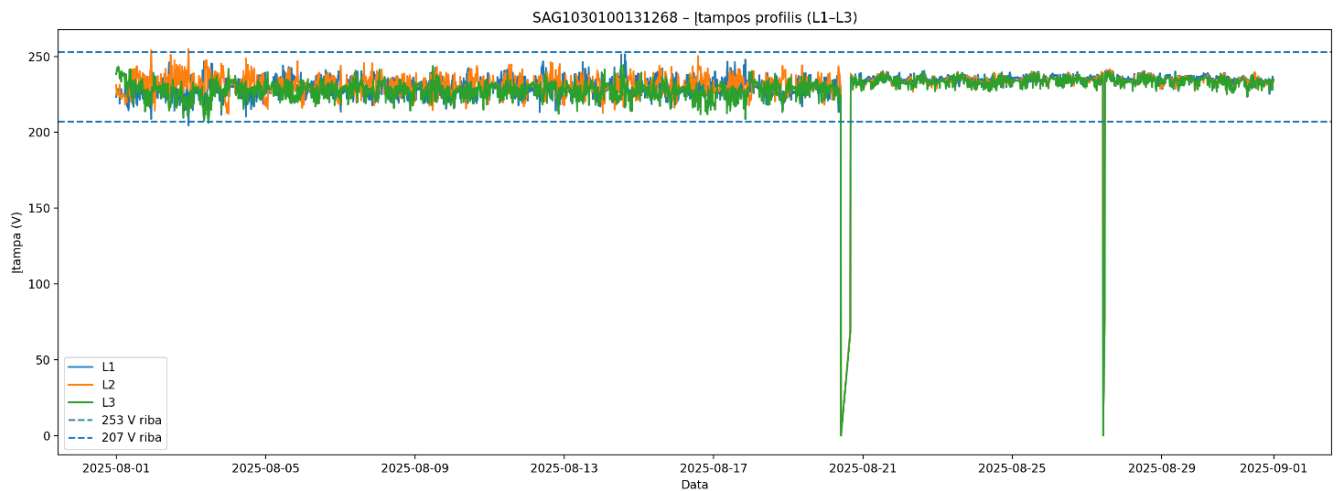


6 pav. Antrojo vartotojo įtampos pokyčiai laike

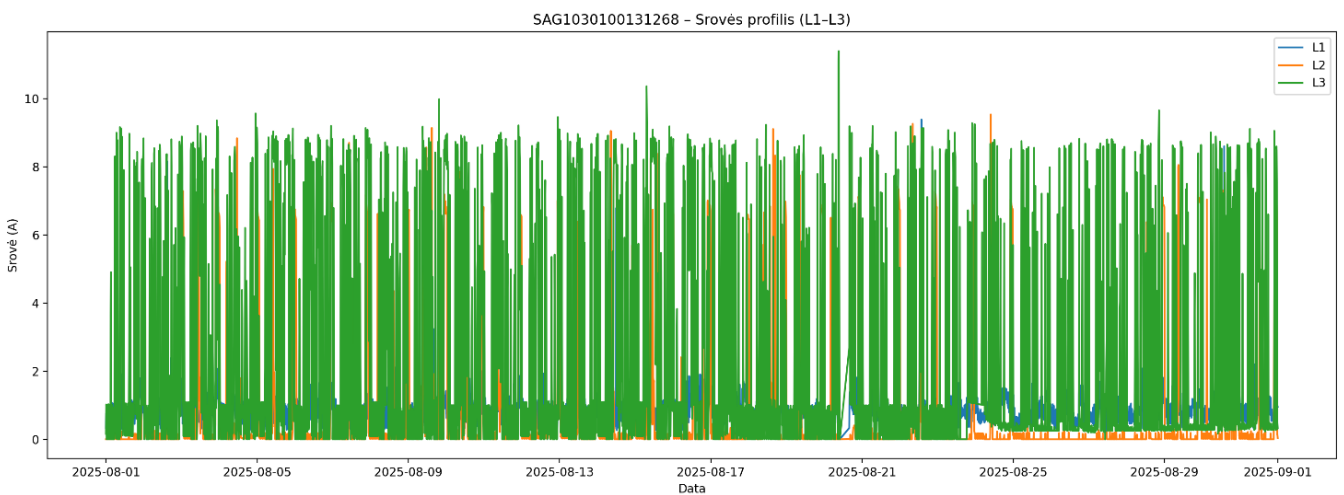


7 pav. Antrojo vartotojo srovės pokyčiai laike

Šis vartotojas buvo linijos gale, grafikuose galima matyti jo įtampas ir srovės pokyčius laike:



8 pav. Trečiojo vartotojo įtampos pokyčiai laike



9 pav. Trečiojo vartotojo srovės pokyčiai laike

4. Rezultatų analizė

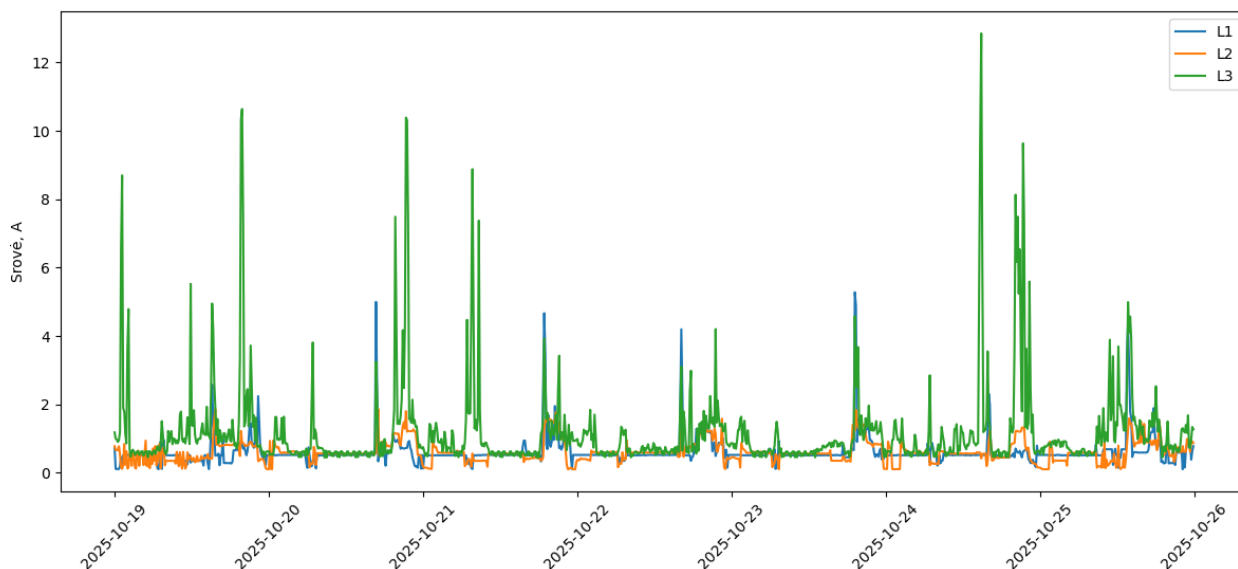
Tyrimo metu buvo analizuojami išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenys, apimantys apie 92 861 matavimą ir 103 skirtingi skaitikliai. Analizuojamas duomenų rinkinys sudarytas iš fazinių įtampos ir srovės reikšmių, registruotų skirtingais laiko momentais. Atlikta pirminė duomenų analizė parodė, kad tiriamasis rinkinys apima tiek vienfazius, tiek trifazius vartotojus, todėl analizės metu buvo taikomi skirtingi metodai, atsižvelgiant į skaitiklio tipą. Trifaziams vartotojams papildomai vertintas fazių disbalansas, o vienfaziams – įtampos ir srovės stabilumas laiko atžvilgiu. Tyrimo metu analizuojami duomenys apima laikotarpį nuo 2025 m. spalio 19 d. iki 2025 m. spalio 25 d. Matavimai registruoti reguliariais laiko intervalais, todėl sudaro nuoseklias laiko eilutes, leidžiančias analizuoti elektros tinklo darbo dinamiką.

Anomalijų identifikavimui buvo taikytas mašininio mokymosi metodas – Isolation Forest algoritmas. Analizės rezultatai parodė, kad anomalijos nėra tolygiai pasiskirsčiusios tarp visų skaitiklių. Nustatyta, jog didžioji dalis skaitiklių pasižymi nedideliu anomalijų skaičiumi, tuo tarpu nedidelė skaitiklių grupė išsiskiria žymiai didesniu anomalijų kiekiu. Tai leidžia daryti išvadą, kad tinklo sutrikimai ar nestandartiniai darbo režimai yra lokalūs, o ne sisteminiai visame tinkle. Tokie skaitikliai gali būti laikomi prioritetiniais tolesnei analizei, nes jie tikėtina susiję su kontaktų degradacija, netolygiu apkrovimu ar galimais tinklo defektais.

Normaliausią darbo režimą atitinkančio skaitiklio analizė parodė, kad elektros tinklo veikimas gali būti laikomas normaliu, kai įtampos reikšmės išlieka artimos nominalioms, srovės apkrova paskirstyta tarp kelių fazių, o disbalanso rodikliai yra nedideli. Šis pavyzdys patvirtina, kad anomalijų aptikimo metodas leidžia ne tik identifikuoti problemines vietas, bet ir išskirti tipinius, normalaus tinklo veikimo režimus, kurie gali būti naudojami kaip atskaitos taškas tolesnei analizei.



10 pav. Normalų veikimo režimą atitinkančio skaitiklio įtampos grafikas



11 pav. Normalų veikimo režimą atitinkančio skaitiklio srovės grafikas

4.1. Įtampos disbalanso analizė

Įtampos disbalansas yra vienas iš esminių elektros energijos kokybės rodiklių, apibūdinančių trifazio elektros tinklo simetriškumą. Pagal EN 50160 standartą žemosios įtampos tinkluose įtampos disbalansas, išreikštas neigiamos ir teigiamos sekos įtampos komponentų santykiu, neturi viršyti 2 %, 95 % vertinamo laikotarpio. Šiame darbe disbalanso vertinimui taikytas supaprastintas rodiklis, apskaičiuojamas pagal fazinių įtampų maksimalių ir minimalių reikšmių santykį su jų vidurkiu, todėl jis nėra tiesiogiai ekvivalentiškas standartizuotam apibrėžimui. Vis dėlto 2 % riba buvo naudojama kaip orientacinis kriterijus padidėjusio disbalanso identifikavimui. Padidėjęs įtampos disbalansas gali lemti neigiamas technines pasekmes, tokias kaip padidėję elektros nuostoliai, asimetrinis apkrovos pasiskirstymas, elektros įrenginių perkaitimas bei sumažėjęs jų darbo efektyvumas, todėl šio parametro analizė yra svarbi vertinant elektros tinklo būklę ir patikimumą. Žemiau pateikiama naudota įtampos disbalanso vertinimo formulė:

Įtampos disbalanso skaičiavimai atliekami pagal (2) formulę:

$$U_{imb} = (U_{max} - U_{min}) / U_{avg}; \quad (2)$$

Čia : U_{max} – didžiausia fazinė įtampa;

U_{min} - mažiausia fazinė įtampa;

U_{avg} - vidutinė fazinė įtampa.

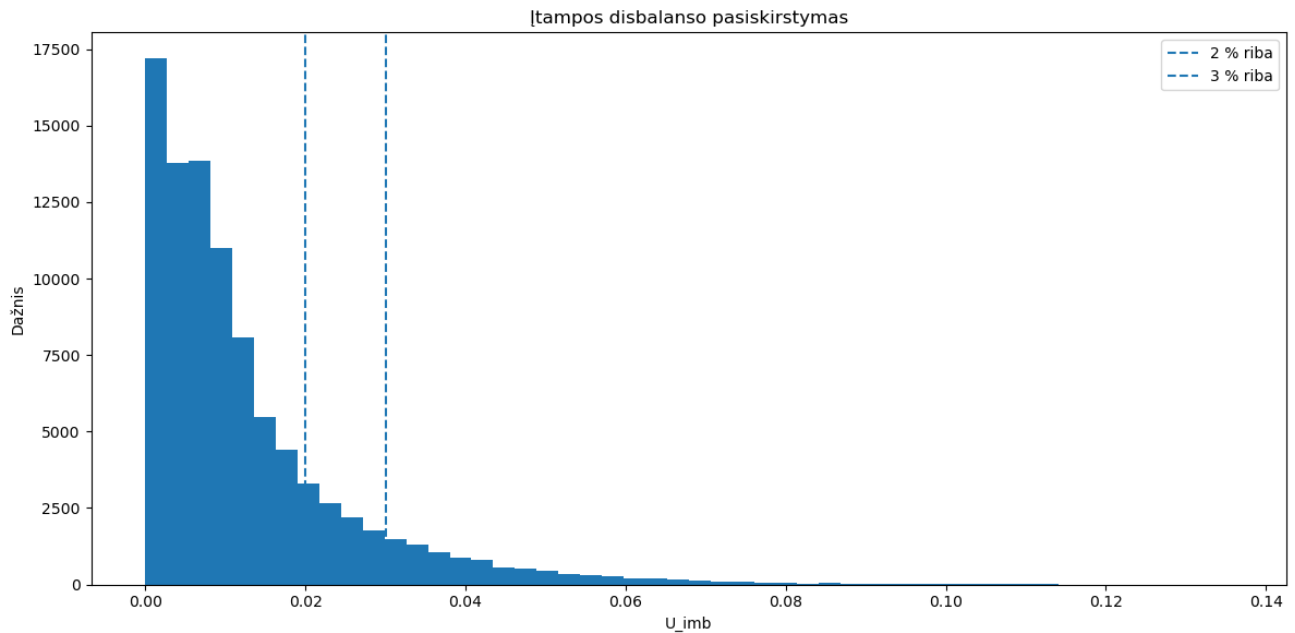
Fazinių įtampų ir srovių disbalansas šiame tyrime buvo apskaičiuotas taikant santykinį metodą, pagrįstą maksimalios ir minimalios fazinių reikšmių skirtumu, normalizuotu pagal vidutinę fazinių dydžių reikšmę. Toks metodas leidžia kiekybiškai įvertinti fazinių dydžių asimetriją, atspindinčią elektros tinklo darbo netolygumus.

Klasikinis fazinių įtampų disbalanso vertinimas paprastai grindžiamas simetrijos komponentų teorija, kai disbalansas išreiškiamas neigiamos sekos ir teigiamos sekos komponentų santykiu. Tačiau šio tyrimo metu naudotuose duomenyse nebuvo pateikta fazinių kampų informacija, todėl simetrijos komponentų metodas negalėjo būti taikomas. Dėl šios priežasties buvo pasirinktas supaprastintas santykinis disbalanso skaičiavimo

metodas. Šis metodas yra ypač tinkamas didelės apimties duomenų analizei, nes nereikalauja fazinių kampų informacijos ir leidžia greitai įvertinti fazinių dydžių skirtumus naudojant tik įtampos reikšmes.

Taikytas metodas leidžia efektyviai identifikuoti fazinių įtampų ir srovių skirtumus tarp atskirų fazių ir yra ypač tinkamas analizuojant didelės apimties išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenis. Nors šis metodas nepateikia pilnos informacijos apie elektros sistemos simetriškumą, jis leidžia patikimai nustatyti reikšmingus nukrypimus nuo normalaus darbo režimo.

Tokiu būdu apskaičiuoti fazinių dydžių disbalanso rodikliai buvo naudojami tiek anomalijų aptikimo algoritme, tiek tolesnėje rezultatų analizėje, leidžiant įvertinti galimus elektros tinklo darbo sutrikimus ir identifikuoti potencialiai probleminius skaitiklius.



12 pav. Fazinių įtampų disbalanso pasiskirstymas

4.2. Srovės disbalanso analizė

Srovės disbalanso analizė parodė didesnę reikšmių išsibarstymą nei įtampos disbalanso atveju, kas yra tikėtinas rezultatas realiame elektros tinkle. Nustatyta, kad kai kuriuose skaitikliuose viena fazė yra žymiai labiau apkrauta nei kitos, o kai kuriais atvejais srovės disbalansas yra reikšmingas. Tokie rezultatai gali rodyti vienfazės apkrovos dominavimą trifaziam tinkle, netinkamą apkrovų paskirstymą tarp fazių bei potencialias tinklo optimizavimo galimybes.

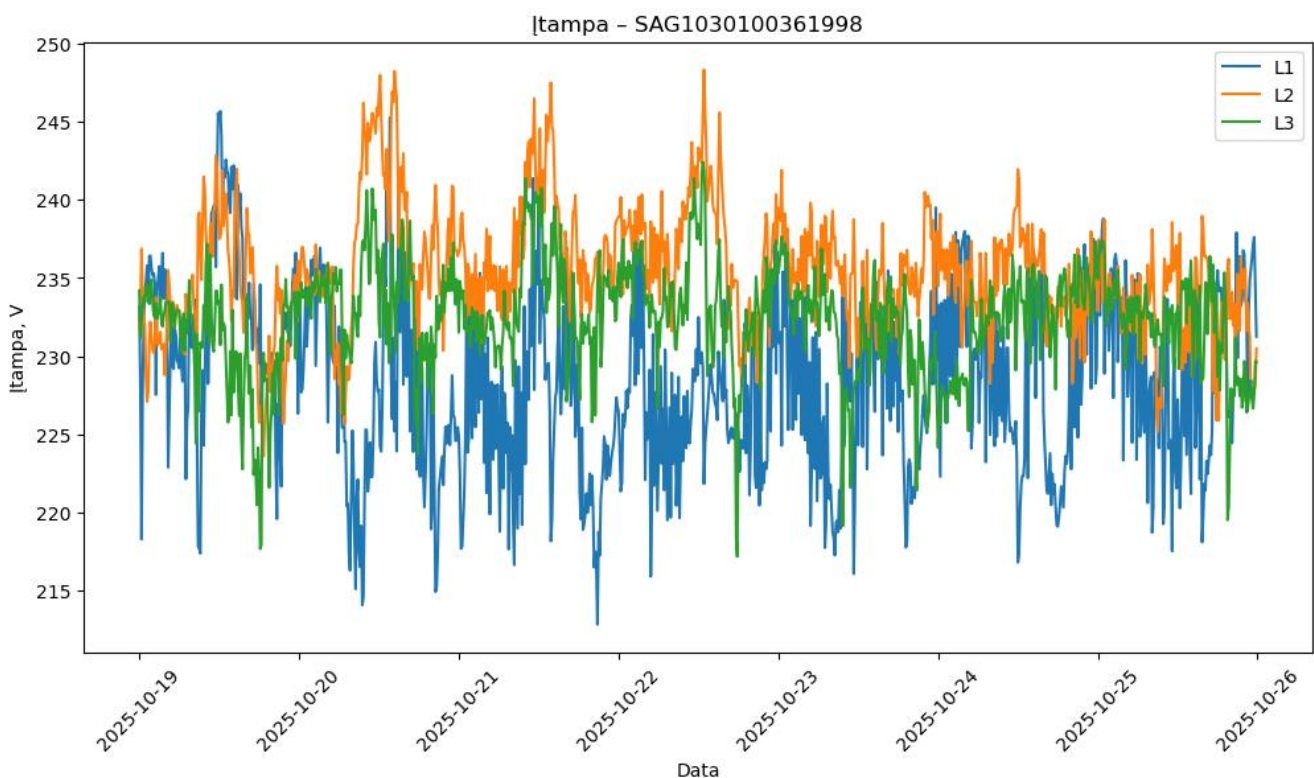
Fazinių srovių disbalanso skaičiavimas atliekamas pagal (3) formulę:

$$I_{disb} = \left(\frac{I_{max} - I_{avg}}{I_{avg}} \right) * 100; (3)$$

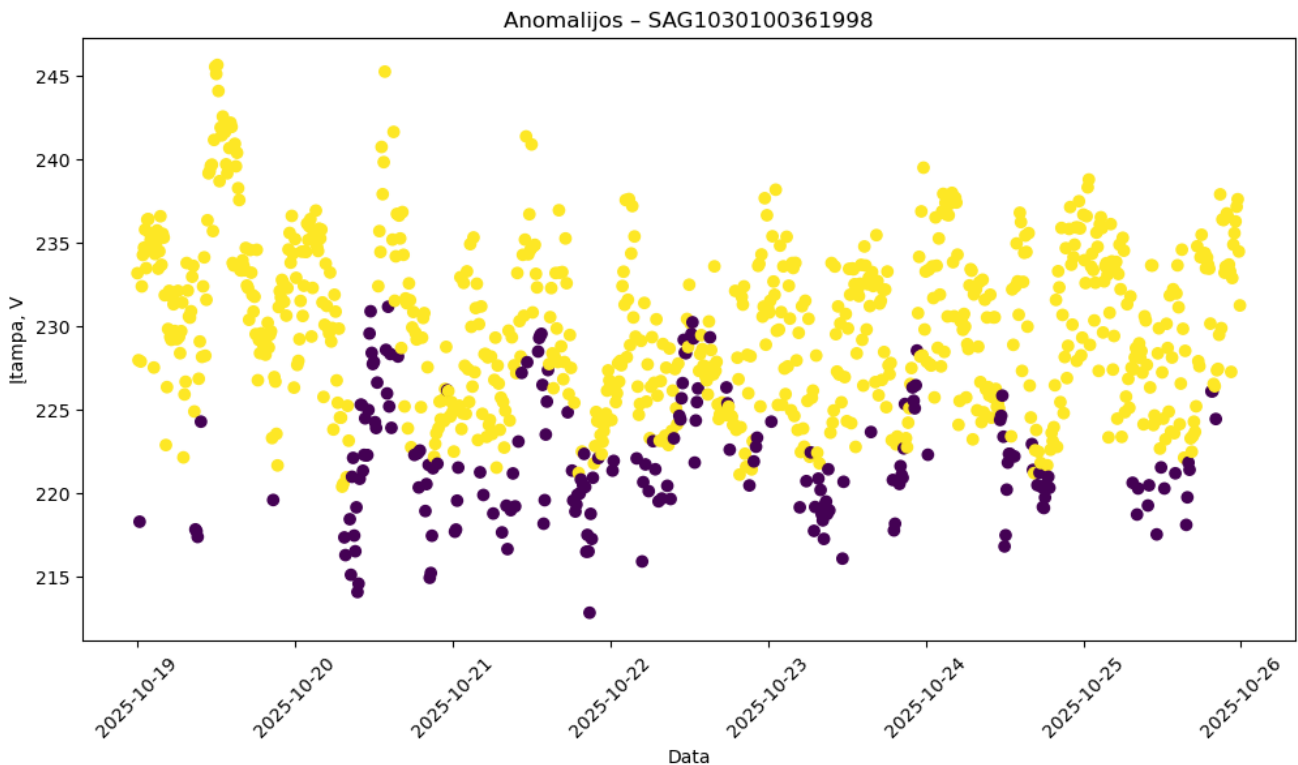
Čia: I_{max} – didžiausia fazinė srovė;

I_{avg} – Fazinės srovės vidurkis.

Analizuojant anomalijų ir disbalanso rodiklių tarpusavio ryšį nustatyta, kad skaitikliai, kuriuose aptiktas didesnis anomalijų skaičius, dažniausiai pasižymi ir padidėjusiu fazinių įtampų arba srovių disbalansu. Tai leidžia teigti, kad anomalijos dažnai yra susijusios su fazinių dydžių disbalansu, todėl disbalanso rodikliai gali būti naudojami kaip ankstyvieji tinklo sutrikimų indikatoriai. Remiantis anomalijų skaičiumi ir disbalanso rodikliais buvo sudarytas skaitiklių reitingas pagal tikėtiną problemos lygį. Skaitikliai, pasižymintys didžiausiu anomalijų skaičiumi ir disbalansu, identifikuoti kaip potencialios probleminės tinklo vietos, kurios gali būti susijusios su prastais elektros kontaktais, neteisingu prijungimu ar lokaliais tinklo sutrikimais.



13 pav. Fazinių įtampų matavimų pasiskirstymas laiko atžvilgiu



14 pav. Anomalių matavimų pasiskirstymas

Laiko eilučių analizė parodė, kad anomalijos pasireiškia tam tikrais laikotarpiais ir nėra atsitiktinės. Tai leidžia daryti išvadą, kad jos yra susijusios su apkrovos pokyčiais, vartotojų veiklos režimais ar tinklo darbo svyravimais. Tokia analizė yra ypač svarbi siekiant nustatyti dinامينius tinklo sutrikimus ir jų pasireiškimo sąlygas.

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti, kad net naudojant ribotą duomenų rinkinį, sudarytą tik iš įtampos ir srovės matavimų, galima efektyviai identifikuoti anomalijas, įvertinti tinklo simetriškumą ir nustatyti problemines vietas elektros tinkle. Taikytas metodas leidžia automatizuoti tinklo analizę, sumažinti rankinės diagnostikos poreikį ir pagerinti tinklo stebėseną. Gauti rezultatai patvirtina, kad didžioji dalis tinklo veikia normaliu režimu, tačiau egzistuoja lokalūs netolygaus veikimo atvejai, o anomalijos nėra atsitiktinės – jos koncentruojasi tam tikruose skaitikliuose. Taip pat nustatyta, kad fazinių dydžių disbalansas yra reikšmingas rodiklis identifikuojant tinklo problemas, o Isolation Forest algoritmas efektyviai aptinka nestandartinius tinklo darbo režimus. Be to, tyrimas parodė, kad net ir neturint aktyviosios ar reaktyviosios galios duomenų galima atlikti patikimą elektros tinklo analizę.

Papildomai modelio veikimo įvertinimui teoriniu lygmeniu gali būti taikoma ROC (Receiver Operating Characteristic) analizė, kuri leidžia įvertinti klasifikavimo modelio gebėjimą atskirti normalų ir anomalinį režimus. ROC kreivė parodo priklausomybę tarp teigiamų aptikimų tikimybės (True Positive Rate) ir klaidingų aptikimų tikimybės (False Positive Rate), o jos integralinis rodiklis AUC (Area Under Curve) naudojamas modelio kokybei įvertinti. Tačiau šiame tyrime, kadangi buvo taikytas neprižiūrimo mokymosi metodas ir nebuvo prieinami pažymėti duomenys apie realius gedimus, pilnas ROC analizės pritaikymas nebuvo galimas. Nepaisant to, ROC analizė išlieka svarbi teorinė priemonė ir gali būti taikoma ateities tyrimuose, turint papildomus pažymėtus duomenis.

Atliekant anomalijų analizę buvo išskirtas skaitiklis, kurio identifikatoriaus pabaiga yra „250“, pasižymėjęs reikšmingu nukrypimu nuo bendro duomenų pasiskirstymo. Detalesnė šio skaitiklio duomenų analizė parodė,

kad visose trijose fazėse buvo registruojamos įtampos reikšmės, tačiau srovė buvo fiksuojama tik vienoje fazėje, o kitose dviejose fazėse ji išliko lygi nuliui.

Toks rezultatų derinys rodo, kad trifazė įtampa iki skaitiklio yra prieinama, tačiau apkrova faktiškai naudojama tik vienoje fazėje. Ši situacija gali būti paaiškinta keliais būdais: vartotojas gali eksploatuoti trifazį įvadą vienfaziu režimu, gali būti netolygiai paskirstyta apkrova tarp fazių arba galimi srovės matavimo netikslumai atskirose fazėse. Nors toks atvejis gali būti interpretuojamas kaip nestandartinis tinklo veikimo režimas, jis nebūtinai rodo tiesioginį elektros tinklo gedimą.

Svarbu pažymėti, kad šis skaitiklis nebuvo pašalintas iš analizės, nes jis atspindi realias tinklo eksploatacijos sąlygas. Tačiau dėl specifinio veikimo pobūdžio jo rezultatai buvo vertinami atskirai nuo kitų skaitiklių. Šis atvejis parodo, kad anomalijų aptikimo metodai identifikuoja ne tik gedimus, bet ir netipiškus, tačiau techniškai galimus tinklo darbo režimus, todėl gauti rezultatai turi būti interpretuojami atsižvelgiant į inžinerinį kontekstą.

Tyrimo metu buvo svarstoma galimybė taikyti pažangesnius duomenų analizės metodus, tokius kaip prižiūravimo mokymosi algoritmai (pvz., konvoliuciniai neuroniniai tinklai – CNN) bei pažangesnis požymių formavimas (angl. feature engineering), siekiant identifikuoti anomalijas ne pavienių matavimų, o laiko intervalų („langų“) pagrindu. Toks metodas leistų modeliuoti laiko eilučių struktūrą ir tiksliau aptikti dinaminis elektros tinklo sutrikimus. Tačiau dėl duomenų stokos, konkrečiai – pažymėtų (angl. labeled) anomalijų trūkumo, šio metodo pritaikymas šiame tyrime nebuvo įgyvendintas. Nepaisant to, ši kryptis laikoma perspektyvia tolimesniems tyrimams, siekiant pagerinti anomalijų identifikavimo tikslumą ir automatizavimo galimybes.

4.3. Prižiūravimo mokymosi algoritmo rezultatų analizė

Siekiant identifikuoti potencialiai probleminius skaitiklius elektros tinkle, buvo taikytas etaloninio panašumo metodas, kurio metu trijų iš anksto identifikuočių probleminių skaitiklių duomenų pagrindu suformuotas apibendrintas probleminio režimo požymių profilis. Toliau kiekvienam bendro duomenų rinkinio skaitikliui buvo apskaičiuotas panašumas į šį etaloną, naudojant tiek Euklido atstumą, tiek kosinusinio panašumo metriką. Euklido atstumas leidžia įvertinti absoliutų skirtumą tarp požymių reikšmių, tuo tarpu kosinusinis panašumas leidžia įvertinti požymių pasiskirstymo formos panašumą nepriklausomai nuo jų mastelio.

Euklido atstumo skaičiavimas atliekamas pagal (4) formulę:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}; \quad (4)$$

Čia: x – etaloninio skaitiklio požymių vektorius;

y - analizuojamo skaitiklio požymių vektorius;

n - požymių skaičius.

Kosinusinio atstumo skaičiavimas atliekamas pagal (5) formulę:

$$d_{cos}(x, y) = 1 - \cos(\theta); \quad (5)$$

Čia: x – etaloninio skaitiklio požymių vektorius;

y - analizuojamo skaitiklio požymių vektorius.

Kosinusinio panašumo skaičiavimas atliekamas pagal (6) formulę:

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}; \quad (6)$$

Čia: $\cos(\theta)$ – kosinusinis panašumas;

x_i – etaloninio skaitiklio i -toji požymio reikšmė;

y_i – analizuojamo skaitiklio i -toji reikšmė;

n – požymių skaičius.

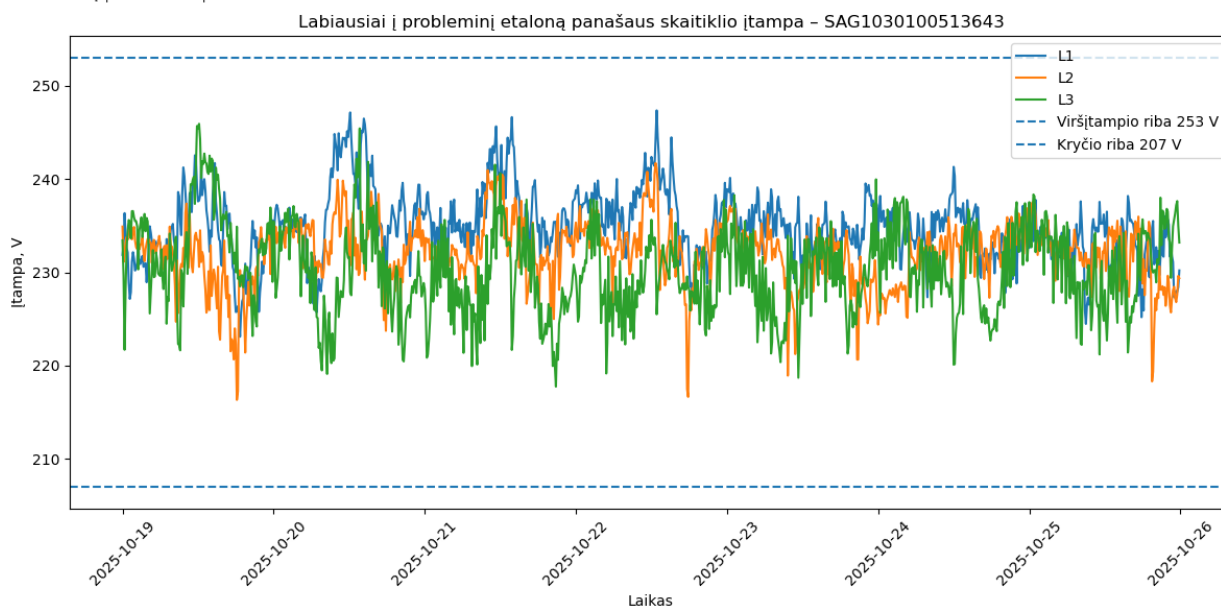
Šių dviejų metodų kombinacija leidžia tiksliau identifikuoti skaitiklius, kurių elgsena yra artima probleminiams atvejams, nes vertinamas tiek dydžių skirtumas, tiek jų tarpusavio santykis. Atlikus skaičiavimus buvo sudarytas skaitiklių sąrašas, surikiuotas pagal panašumą į probleminį etaloną. Gauti rezultatai rodo, kad mažiausią atstumą iki etalono turintys skaitikliai pasižymi labai panašiomis charakteristikomis į analizuotus probleminius atvejus. Pavyzdžiui, skaitiklis SAG1030100513643 turi mažiausią atstumą (apie 23,30), todėl laikomas labiausiai tikėtiniu probleminio režimo kandidatu.

3 lentelė. Skaitiklių panašumo į probleminį etaloną rezultatai (Euklido atstumas ir kosinusinis panašumas)

Skaitiklis	Atstumas	Panašumas	U disbalansas	I disbalansas
SAG1030100513643	23.30	0.145	0.032	1.40
SAG1030100459509	23.54	0.122	0.028	1.38
SAG1030100363344	23.55	0.078	0.026	1.68
SAG1030100346342	23.58	0.058	0.030	1.82
SAG1030100346335	23.68	0.035	0.023	2.89
SAG1030100360733	23.71	0.029	0.021	1.05
SAG1030100278234	23.75	0.105	0.028	1.07
SAG1030100345803	23.77	0.006	0.026	1.22
SAG1030100348655	23.78	0.005	0.028	1.57
SAG1030100544443	23.81	-0.028	0.022	—

Svarbu paminėti, kad visų 10 skaitiklių atstumo reikšmės yra gana artimos (intervale ~23.3–24.0), kas rodo, kad bendrame duomenų rinkinyje nėra itin ryškiai išsiskiriančių anomalijų, tačiau egzistuoja grupė skaitiklių, kurių elgsena yra artima probleminiam profiliui.

Papildomai buvo vertintas kosinusinis panašumas, kuris leidžia įvertinti ne absoliutų skirtumą tarp požymių, bet jų pasiskirstymo formos panašumą. Gauti rezultatai parodė, kad didžiausią panašumą turi tie patys skaitikliai, kurie pasižymi mažiausiu Euklido atstumu. Didžiausia panašumo reikšmė (~0.145) taip pat nustatyta skaitikliui **SAG1030100513643**, kas patvirtina šio skaitiklio panašumą į probleminius atvejus.



15 pav. Labiausiai į probleminį etaloną panašaus skaitiklio įtampa

Svarbu paminėti, kad kosinusinio panašumo reikšmės nėra labai didelės, todėl galima teigti, kad nors tam tikri skaitikliai yra panašesni į probleminius nei kiti, jų elgsena nėra identiška. Tai rodo, kad analizuojamas tinklas didžiąja dalimi veikia stabiliai, o nustatyti atvejai gali būti interpretuojami kaip ribiniai arba ankstyvos stadijos sutrikimai.

Analizuojant viršįtampių ir įtampos kritimų skaičių nustatyta, kad tarp top kandidatų šių reiškinų praktiškai nefiksuoja (reikšmės lygios nuliui). Tai rodo, kad identifikuoti skaitikliai nėra susiję su aiškiai išreikštais elektros kokybės pažeidimais, tokiais kaip norminių ribų viršijimas.

Todėl galima daryti išvadą, kad modelis identifikuoja ne tik ekstremalius atvejus (pvz., viršįtampius), bet ir subtilius požymių derinius, tokius kaip:

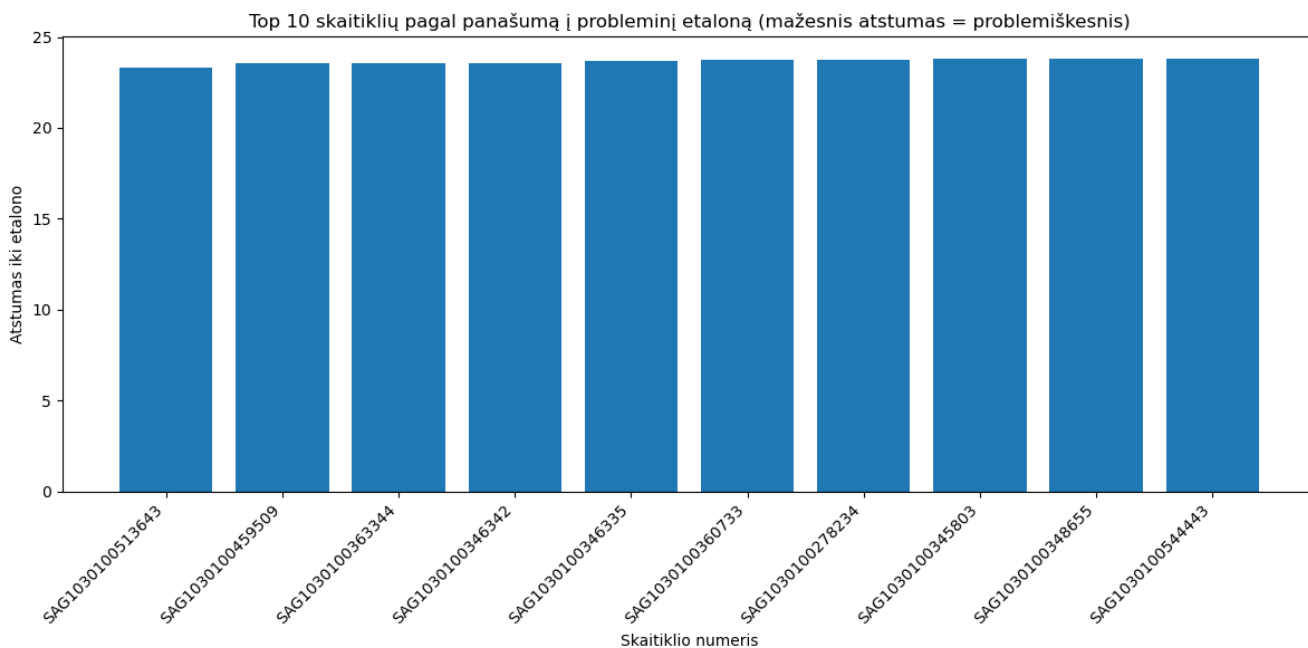
- fazių disbalansas,
- srovės pasiskirstymo netolygumas,
- padidėjęs parametrų kintamumas.

Papildomai išanalizavus įtampos ir srovės disbalanso rodiklius nustatyta, kad top kandidatų įtampos disbalanso reikšmės svyruoja apie 2–3 %, kas artima norminėms riboms. Tai rodo, kad šie skaitikliai gali veikti artėjant prie ribinio režimo.

Tuo tarpu srovės disbalanso reikšmės kai kuriais atvejais yra žymiai didesnės (pvz., viršijančios 1 ar net 2), kas rodo reikšmingą fazių apkrovos netolygumą. Tokia situacija dažniausiai būdinga:

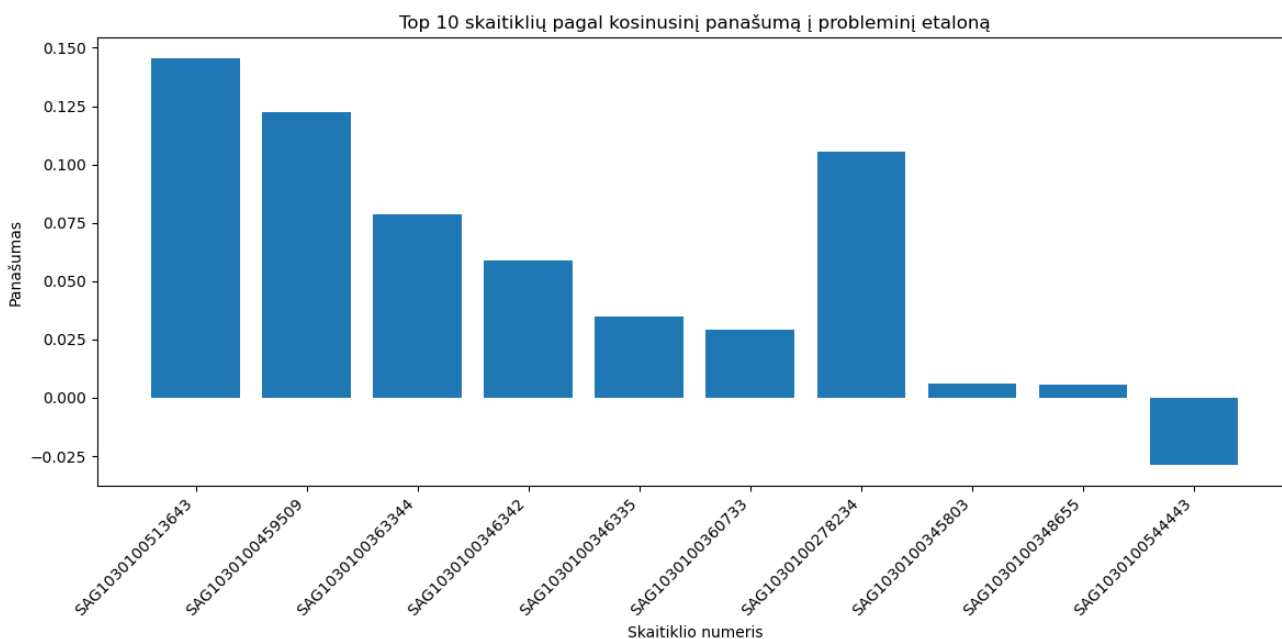
- vienfazių apkrovų dominavimui,
- netinkamam apkrovų paskirstymui,
- galimiems prijungimo netikslumams.

Stulpelinė diagrama, vaizduojanti atstumą iki probleminio etalono, leidžia vizualiai identifikuoti labiausiai probleminius skaitiklius. Šiame grafike mažesnė reikšmė reiškia didesnį panašumą, todėl pirmieji stulpeliai atitinka prioritetinius skaitiklius tolesnei analizei.



16 pav. Skaitiklių atstumas iki probleminio etalono

Kosinusinio panašumo grafikas papildo šią informaciją, nes leidžia įvertinti požymių struktūrinį panašumą. Nors abu metodai pateikia panašius rezultatus, jų kombinacija didina analizės patikimumą.

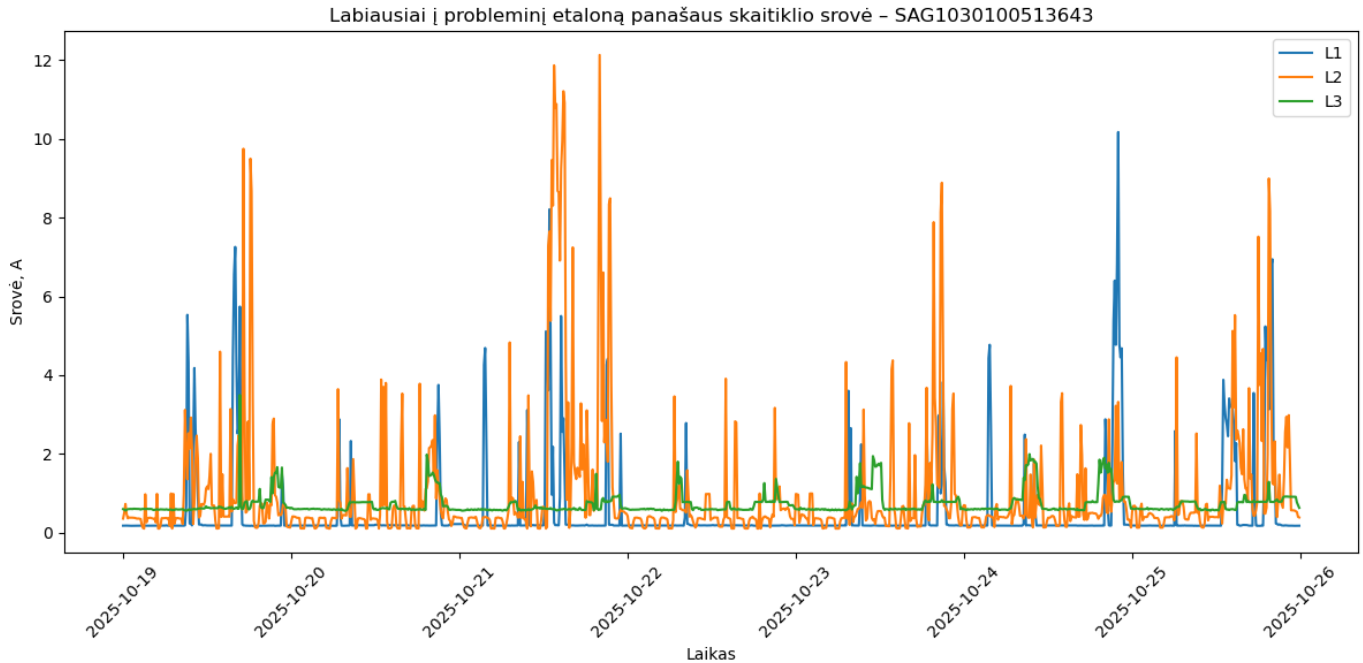


17 pav. Skaitiklių kosinusinis panašumas į probleminį etaloną

Kombinuotame grafike, kuriame pateikiamas panašumas kartu su viršįtampių ir kritimų skaičiumi, matyti, kad identifikuoti skaitikliai neturi aiškių ribinių pažeidimų. Tai leidžia daryti išvadą, kad modelis identifikuoja ne tik akivaizdžius gedimus, bet ir potencialiai probleminius darbo režimus.

Detaliai išanalizavus labiausiai į probleminę etaloną panašų skaitiklį **SAG1030100513643**, matyti, kad įtampos reikšmės visose fazėse išlieka norminėse ribose (tarp 207 V ir 253 V), tačiau pasižymi tam tikru svyravimu. Taip pat pastebimas fazinių dydžių skirtumas, kuris gali rodyti disbalansą.

Srovės grafike matomas netolygus fazių apkrovos pasiskirstymas, kas gali būti vienas iš pagrindinių veiksnių, lemiančių šio skaitiklio panašumą į probleminius atvejus.



18 pav. Labiausiai į probleminę etaloną panašaus skaitiklio srovė

Apibendrinant galima teigti, kad taikytas metodas leidžia efektyviai identifikuoti skaitiklius, kurių veikimo charakteristikos yra panašios į žinomus probleminius atvejus. Nors ne visi identifikuoti skaitikliai pasižymi aiškiais elektros kokybės pažeidimais, jų elgsena rodo galimus ankstyvus tinklo sutrikimų požymius.

Tokiu būdu sudarytas potencialiai probleminių skaitiklių sąrašas gali būti naudojamas:

- detalesnei analizei,
- tinklo diagnostikai,
- prevenciniams priežiūros veiksams planuoti.

4.4. Tyrimo statistikos

Siekiant apibendrinti analizuoto duomenų rinkinio struktūrą ir įvertinti tyrimo apimtį, buvo sudaryta pagrindinių skaitinių rodiklių suvestinė. Ši statistika apibūdina ne vieną konkrečią elektros liniją, o bendrą tiriamąjį išmaniųjų skaitiklių duomenų rinkinį, kuriame pateikti skirtingų vartotojų matavimai. Todėl šioje dalyje pateikiami rodikliai naudojami ne tiesioginiam visų skaitiklių tarpusavio ryšiui pagrįsti, o bendram duomenų mastui, parametru sklaidai ir anomalijų pasiskirstymui įvertinti.

4 lentelė. Tyrimo bendrosios statistikos

Rodiklis	Reikšmė
Bendras matavimų skaičius	92 861
Matvimų dažnio intervalas	15 minučių
Skirtingų skaitiklių skaičius	103
Analizuotas laikotarpis	2025-10-19 – 2025-10-25
Naudoti pagrindiniai parametrai	Fazinė įtampa ir fazinė srovė
Duomenų struktūra	Atskiri srovės ir įtampos duomenų lapai
Taikytas anomalijų aptikimo metodas	Isolation Forest
Vertinti papildomi rodikliai	Įtampos disbalansas, srovės disbalansas
Probleminių etalonų skaičius	3
Panašumo vertinimo metrikos	Euklido atstumas, kosinusinis panašumas

Ši suvestinė parodo, kad tyrime naudotas pakankamai didelis matavimo duomenų kiekis, leidžiantis taikyti automatizuotus duomenų analizės metodus. Kadangi skaitikliai nėra vertinami kaip vienos bendros linijos elementai, jų rezultatai interpretuojami kaip atskirų vartotojų arba skirtingų tinklo taškų matavimo duomenys. Dėl šios priežasties anomalijų pasiskirstymas tarp skaitiklių nėra naudojamas tiesioginiam gedimo plitimo tarp visų skaitiklių pagrindimui, o taikomas siekiant išskirti tuos skaitiklius, kurių matavimo duomenys statistiškai labiausiai skiriasi nuo bendro duomenų rinkinio.

Tokia analizė leidžia nustatyti ne konkrečią fizinę visų skaitiklių tarpusavio priklausomybę, o potencialiai probleminius arba netipinius matavimo profilius. Kitaip tariant, Isolation Forest algoritmas šiame etape naudojamas kaip atrankos priemonė, padedanti iš didesnio skaitiklių kiekio išskirti tuos atvejus, kuriems verta skirti daugiau dėmesio. Vėlesnė inžinerinė interpretacija turi būti atliekama kiekvienam skaitikliui individualiai, įvertinant jo prijungimo vietą, vartotojo apkrovos pobūdį ir tinklo eksploatacijos sąlygas.

Atskiras atvejis yra trijų žinomų probleminių skaitiklių analizė. Šie skaitikliai buvo vertinami kaip konkretus gedimo atvejis, susijęs su ta pačia analizuota tinklo atkarpa. Jų duomenys buvo naudojami kaip probleminio veikimo etalonas, pagal kurį vėliau buvo ieškoma panašių matavimo profilių bendrame duomenų rinkinyje. Tačiau panašumas į šį etaloną nereiškia, kad kiti atrinkti skaitikliai yra fiziškai susiję su ta pačia linija ar tuo pačiu gedimu. Tai reiškia tik tai, kad jų įtampos, srovės ir disbalanso charakteristikos yra panašios į anksčiau nustatytą probleminį režimą.

Todėl gauti rezultatai interpretuojami kaip identifikuotos anomalijų pasireiškimo vietos atskiruose skaitikliuose, o ne kaip atsitiktinių nukrypimų rinkinys. Taikytas metodas leido išskirti konkrečius skaitiklius, kurių matavimo duomenyse fiksuojami sistemingi nukrypimai nuo normalaus darbo režimo, pasireiškiantys padidėjusiu anomalijų skaičiumi, didesniu fazinių dydžių disbalansu ar įtampos ir srovės pokyčiais.

Svarbu paminėti, kad šie skaitikliai nėra vertinami kaip tarpusavyje susiję vienos tinklo atkarpos elementai, tačiau jų duomenys rodo analogiško pobūdžio darbo režimo nukrypimus. Tai leidžia teigti, kad taikytas metodas yra tinkamas ne tik bendram anomalijų aptikimui, bet ir konkrečių probleminių taškų identifikavimui skirtingose tinklo vietose.

Tokiu būdu analizė leidžia ne tik sumažinti duomenų kiekį tolimesniam vertinimui, bet ir tiesiogiai išskirti skaitiklius, kuriuose tikėtina pasireiškia elektros tinklo veikimo sutrikimai arba nestandartiniai eksploatacijos režimai.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad išmaniųjų elektros energijos skaitiklių duomenys gali būti efektyviai naudojami elektros tinklo gedimų identifikavimui, taikant tiek statistinius, tiek mašininio mokymosi metodus. Nustatyta, kad pagrindiniai gedimų indikatoriai yra įtampos ir srovės pokyčiai bei jų tarpusavio santykiai.
2. Tyrimo metu surinkti ir apdoroti realūs išmaniųjų skaitiklių duomenys, apimantys apie 92 861 matavimą iš 103 skirtingų skaitiklių. Duomenys buvo tinkamai paruošti analizei, sujungiant įtampos ir srovės matavimus į bendrą struktūrą bei suskirstant skaitiklius pagal tipą.
3. Sukurta anomalijų identifikavimo metodika, pagrįsta neprižiūravimo mokymosi algoritmu „Isolation Forest“ bei papildoma etaloninio panašumo analize, naudojant trijų žinomų probleminių skaitiklių duomenis. Metodika leidžia identifikuoti tiek bendras anomalijas, tiek konkrečius probleminius darbo režimus.
4. Atlikta analizė parodė, kad trijų tarpusavyje susijusių skaitiklių duomenyse anomalijos ir fazinių dydžių disbalansas pasireiškia nuosekliai, kas leidžia juos laikyti patikimu gediminio režimo etalonu. Tuo tarpu bendrame duomenų rinkinyje aptiktos anomalijos yra pasiskirsčiusios tarp tarpusavyje nesusijusių skaitiklių, todėl jos vertinamos kaip individualūs darbo režimo nukrypimai, o ne kaip vieno konkretaus tinklo elemento ar linijos gedimo požymiai.
5. Remiantis gautais rezultatais nustatyta, kad taikytas metodas leidžia efektyviai identifikuoti potencialiai probleminius skaitiklius, kurių darbo režimas yra panašus į žinomus gediminiuos atvejus. Tai patvirtina, kad išmaniųjų skaitiklių duomenys gali būti naudojami ne tik elektros energijos apskaitai, bet ir pažangiai elektros tinklo diagnostikai bei ankstyvajam sutrikimų nustatymui.

Literatūros sąrašas

1. **Mandal, P., et al. (2021).** *Real-Time Fault Detection in Smart Grids using Smart Meters Data*. IEEE Transactions on Smart Grid.
2. **Hasan, M. M., et al. (2020).** *A survey on smart metering infrastructure: Motivation, architecture, challenges, and solutions*. Computer Networks.
3. **Wang, W., et al. (2019).** *Smart Meter Data Analytics: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
4. **Ghosh, A., & Das, D. (2018).** *Detection and location of faults in smart grid using synchrophasor and smart meter data*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems.
5. **Chou, J. S., et al. (2022).** *Big Data Analytics for Smart Grid Fault Diagnosis Based on Machine Learning Techniques*. Energies.
6. **Lakićević, M., et al. (2023).** *Fault Detection and Localisation in LV Distribution Networks Using a Smart Meter Data-Driven Digital Twin*. Energies, 16(23), 7850. <https://doi.org/10.3390/en16237850>
7. **Maatug, F. (2021).** *Anomaly Detection of Smart Meter Data*. Master's Thesis, University of Stavanger. <https://uis.brage.unit.no/handle/11250/2825119>
8. **Yilmaz, S., et al. (2021).** *Smart Metering System Capable of Anomaly Detection by Bi-directional LSTM Autoencoder*. arXiv preprint arXiv:2112.03275. <https://arxiv.org/abs/2112.03275>
9. **Oliveira, D., et al. (2024).** *Anomaly Detection for Power Quality Analysis Using Smart Metering Systems*. Sensors, 24(17), 5807. <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/17/5807>
10. **Chen, X., et al. (2025).** *Research on anomaly detection and correction of power metering data based on machine learning algorithm*. Sciences et Technologies de l'Énergie Électrique (STET). https://www.stet-review.org/articles/stet/full_html/2025/01/stet20240325/stet20240325.html
11. **Vukovic, A., Terzija, V., Stanojevic, M., & Djordjevic, D. (2019).** Fault location estimation in distribution networks using smart meter measurements. *Electric Power Systems Research*, 170, 285–294.
12. **Yang, S., Li, J., & Yin, X. (2020).** Detection of High-Impedance Faults in Distribution Systems Using Voltage and Current Measurements from Smart Meters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(3), 2580–2589.
13. **Eissa, M. M. (2021).** Smart meters as a tool for real-time monitoring and fault detection in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 199, 107399.
14. **Kim, J., Park, J., & Lee, J. (2018).** Flicker detection and analysis in smart grids using smart meter data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(3), 1237–1246.
15. **Amin, S. M., Yan, Y., & Wang, L. (2020).** *Smart meter data analytics for outage management: A review*. IEEE Transactions on Smart Grid, 11(4), 3218–3228. <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2975275>
16. **Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., & Tipper, D. (2019).** *A survey on cyber security for smart grid communications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 14(4), 998–1010. <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.020912.00044>
17. **Lu, C., Wu, T., Wang, Z., & Zhang, Y. (2021).** *Smart meter deployment for power quality monitoring and anomaly detection in distribution networks*. IEEE Access, 9, 54684–54693. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071854>
18. **Zhou, K., Yang, S., & Shao, Z. (2022).** *Review on data-driven fault detection and diagnosis for smart grids using smart meter data*. Electric Power Systems Research, 203, 107659. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107659>
19. **Gao, J., Xiao, Y., Liu, J., Liang, W., & Chen, C. (2020).** *A survey of communication/networking in smart grids*. Future Generation Computer Systems, 91, 189–200. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.08.015>

Priedai

1. priedas. Techninės charakteristikos, I dalis

Technical Characteristics		
Electrical Characteristics		
Reference Voltage		
Type of network supported	Three-phase four-wire	
Three-phase electricity network	3 x 230/400 V	IEC 60038:1983
Bi-phase electricity network	2 x 230/400V	IEC 60038:1983
Single-phase electricity network	230V	IEC 60038:1983
Nominal value	230 V	IEC 60038:1983
Minimum value	195.5 V (15%)	
Maximum value	264.5 V (15%)	
Reference Currents		
Reference value	Iref = 5 A	IEC 62053-21
Maximum current	I _{max} = 100A	EN 50470-3
Minimum current	I _{min} = 250 mA	
Starting current	I _{start} = 20 mA	
Accuracy		
Active imported and exported energy	+/- 1%	IEC 62053-21 Class 1 EN 50470-3 Class B
Reactive energy	+/- 2%	IEC 62053-23 Class 2
RTC	<u>Standalone</u> <= 15 s/month at 23°C <u>System resync</u> <= 7s/month at 23°C	IEC 62054-21
Frequency		
Nominal value	50 Hz	IEC 62052 -11
Operational frequency range	47 Hz to 53 Hz (+/- 6%)	
Maximum frequency range	42.5 Hz to 57.5 Hz (+/- 15%)	
Self-consumption / Voltage circuits (Global consumption practically balanced between the active phases)		
Max, all interfaces fully loaded	Less than 6W / 10VA	
Average, P1 on	Less than 2.5W / 5VA	
Average, P1 off	Less than 2W / 4VA	
Self-consumption / Current circuits (Per phase)		
At I _{max} = 100A	Less than 5W / 5VA	

2. priedas, Techninės charakteristikos, II dalis

Technical Characteristics		
Operating reserve		
If Un is set to 230 Vac, the meter is not affected by power cuts lasting less than 300 ms.		
Mechanical Characteristics		
Weight	1.490 Kg	
Dimension	287,4x180x84 mm	Standard terminal cover
Mechanical requirements norm		IEC 62052-11
Environmental conditions		
Temperature Range		
Nominal	- 40°C to +70°C	
Maximum operating range	- 40°C to + 70°C	
Storage and transportation	- 40°C to + 70°C	
Humidity (non condensing)		
Nominal	≤ 95 % at +40 °C	
Maximum operating range	≤ 95 % at +40 °C	
Storage and transportation	≤ 95 % at +40 °C	
Meter protective class		
IP class	IP54 IK02	IEC 60529 EN 50102
Protective class	Class II	
Indoor usage	IEC 62052-11	
Fire protective class	5-VB	EN 62368-1 UL94 standard / 60695-11-20
Electromagnetic Environment		IEC 62053-21
Electromagnetic Environment: Radio meters: This equipment generates radio frequency signals in the 800MHz, 900MHz and 1800MHz bands. To reduce radio frequency exposure, a minimum distance of 25 cm between the product and the people is recommended.		

3. priedas, Techninės charakteristikos, III dalis

Technical Characteristics	
Immunity against	Voltage dips and short interruptions Electrostatic discharge Radiated RF electromagnetic fields Electrical fast transients / bursts Conducted disturbances, induced by RF fields Surges Continuous magnetic fields of external origin Power frequency magnetic fields of external origin Oscillatory waves
Other	Radio interference suppression
Certification	MID, RED
Marking	CE

4. **priedas**, Momentinės fazinės srovės skaičiavimo formulės

$$I_{\{a\}(t)} = \left\{ \sqrt{\{2\}} \cdot U_{\{a\}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{\{a\}}) \right\} / \{Z_{\{a\}}\}$$

$$I_{\{b\}(t)} = \left\{ \sqrt{\{2\}} \cdot U_{\{b\}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{\{b\}}) \right\} / \{Z_{\{b\}}\}$$

$$I_{\{c\}(t)} = \left\{ \sqrt{\{2\}} \cdot U_{\{c\}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{\{c\}}) \right\} / \{Z_{\{c\}}\}$$

5. **priedas**, Apgaulės srovės (vagystės atveju) skaičiavimo formulė

$$I_{\{apg\}} = |I_N - I_{\{N,sk\}}|$$

6. **priedas**, Momentinės aktyviosios galios skaičiavimo formulė

$$P = U_{\{a\}} \cdot I_{\{a\}} \cdot \cos(\varphi_{\{a\}}) + U_{\{b\}} \cdot I_{\{b\}} \cdot \cos(\varphi_{\{b\}}) + U_{\{c\}} \cdot I_{\{c\}} \cdot \cos(\varphi_{\{c\}})$$

7. **priedas**, Reaktyviosios galios skaičiavimo formulė

$$Q = U \cdot I_{\{a\}} \cdot \sin(\varphi_{\{a\}}) + U_{\{b\}} \cdot I_{\{b\}} \cdot \sin(\varphi_{\{b\}}) + U_{\{c\}} \cdot I_{\{c\}} \cdot \sin(\varphi_{\{c\}})$$

8. **priedas**, Pilnutinės galios skaičiavimo formulė

$$S = \sqrt{\{P^{\{2\}} + Q^{\{2\}}\}}$$

9. **priedas**, Galios koeficiento skaičiavimo formulė

$$\cos \varphi = \{P\} / \{S\}$$

10. **priedas**, Blokinė schema

