



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Paskirstytų matavimo sistemų taikymo išmaniųjų elektros skaitiklių būklės nuotolinei stebėsenai kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Kasparas Zulonas

Projekto autorius

prof. dr. Žilvinas Nakutis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Paskirstytų matavimo sistemų taikymo išmaniųjų elektros skaitiklių būklės nuotolinei stebėsenai kūrimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Kasparas Zulonas

Projekto autorius

prof. dr. Žilvinas Nakutis

Vadovas

dr. Šarūnas Kilius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Kasparas Zulonas

Paskirstytų matavimo sistemų taikymo išmaniųjų elektros skaitiklių būklės nuotolinei stebėsenai kūrimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis 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;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Kasparas Zulonas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Zulonas, Kasparas. Paskirstytų matavimo sistemų taikymo išmaniųjų elektros skaitiklių būklės nuotolinei stebėsenai kūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Žilvinas Nakutis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: daiktų internetas, pažangi apskaitos infrastruktūra, MQTT, CoAP, HTTP, išmanusis skaitiklis, duomenų paketavimas.

Kaunas, 2026. 64 p.

Santrauka

Išmanieji elektros skaitikliai žemos įtampos tinkluose gali būti naudojami ne tik energijos apskaitai automatizuoti, bet ir tinklo būklei stebėti, pavyzdžiui, anomalijoms aptikti, elektros kokybei vertinti ar diagnostikai atlikti. Vis dėlto daugelyje sistemų skaitiklių duomenys šiuo metu perduodami tik kas 10–15 min., o detalesnei tinklo analizei paprastai reikalingi dažnesni matavimai. Didinant matavimų dažnį, kartu didėja ir perduodamų duomenų kiekis, todėl duomenų perdavimas tampa vienu iš pagrindinių tokios sistemos apribojimų.

Šiame darbe analizuojama, kaip paskirstyta IoT komunikacijos sistema gali būti naudojama išmaniųjų skaitiklių sekundiniams duomenims perduoti. Darbo tikslas – pasiūlyti elektros tinklo stebėsenos duomenų surinkimo būdus ir įvertinti, kaip tokia sistema veikia skirtingais duomenų rinkimo scenarijais. Šiam tikslui pasiekti analizuojami taikymo uždaviniai ir perdavimo protokolai, parengiama tyrimo metodika, sukuriama sistemos prototipas ir atliekami eksperimentiniai bandymai. Sukurtą sistemą sudaro ESP32-C6 pagrindu sukurtas vietinis ryšio adapteris (VRA), nuskaitantis DSMR/P1 duomenis, Wi-Fi ryšio infrastruktūra ir duomenų surinkimo serveris su duomenų baze. Eksperimentuose vertinami taikomojo lygmens protokolai, duomenų paketavimo strategijos, perdavimo patikimumas esant paketų praradimams, įvykiais grįstas siuntimo modelis ir sistemos apkrovos pokytis didinant VRA skaičių.

Tyrimo metu nustatyta, kad HTTP protokolas nėra tinkamas nuolatiniam telemetrijos duomenų perdavimui dėl didelės protokolo pridėtinės apkrovos. CoAP mažiau apkrauna VRA, tačiau nestabiliomis ryšio sąlygomis praranda patikimumą. MQTT užtikrina geriausią kompromisą tarp perdavimo patikimumo ir išteklių naudojimo. Duomenų agregavimas sumažina tinklo apkrovą, tačiau agreguojant daugiau nei 10 matavimų pastebimai didėja atminties fragmentacija. Įvykiais grįstas siuntimas sumažina perduodamų duomenų kiekį, bet dėl riboto tikslumo negali visiškai pakeisti periodinio stebėjimo. Pastebėta, kad didėjant VRA skaičiui duomenų srautas auga tiesiškai, o serverio pusėje pagrindinis ribojantis veiksnys yra procesoriaus, o ne atminties, apkrova. Remiantis gautais rezultatais, rekomenduojama naudoti MQTT protokolą, paketuoti 5–10 matavimų, QoS lygį parinkti pagal duomenų svarbą, o įvykiais grįstą logiką taikyti kaip papildomą duomenų kiekio mažinimo mechanizmą.

Šiame darbe aprašytas duomenų surinkimo sprendimas buvo panaudotas rengiant du tarptautiniuose mokslo žurnaluose publikuotus straipsnius ir vieną tarptautiniam mokslo žurnalui pateiktą, šiuo metu recenzuojamą straipsnį [1, 2].

Zulonas, Kasparas. Development and Research of Distributed Measurement Systems for Smart Meters State Monitoring Applications. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Dr. Žilvinas Nakutis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Sciences.

Keywords: Internet of Things, Advanced Metering Infrastructure, MQTT, CoAP, HTTP, smart meters, data batching.

Kaunas, 2026. 64.

Summary

Smart electricity meters in low-voltage networks can be used not only to automate energy metering, but also to monitor the state of the network, for example, to detect anomalies, assess power quality, or perform diagnostics. However, in many systems, meter data are currently transmitted only every 10–15 minutes, while more detailed network analysis usually requires more frequent measurements. Increasing the measurement frequency also increases the amount of transmitted data, making data transmission one of the main limitations of such a system.

This work analyzes how a distributed IoT communication system can be used to transmit one-second-resolution data from smart meters. The aim of the work is to propose methods for collecting electricity network monitoring data and to evaluate how such a system performs in different data collection scenarios. To achieve this aim, application requirements and transmission protocols are analyzed, a research methodology is developed, a system prototype is implemented, and experimental tests are conducted. The developed system consists of an ESP32-C6 controller that reads DSMR/P1 data, Wi-Fi communication infrastructure, and a data collection server with a database. The experiments evaluate application-layer protocols, data packetization strategies, transmission reliability under packet-loss conditions, an event-based transmission model, and changes in system load as the number of controllers increases.

The study found that the HTTP protocol is not suitable for continuous telemetry data transmission due to its high protocol overhead. CoAP places less load on the controller, but provides lower reliability under unstable network conditions. MQTT provides the best compromise between transmission reliability and resource usage. Data aggregation reduces network load, but when more than 10 measurements are aggregated, memory fragmentation increases noticeably. Event-based transmission reduces the amount of transmitted data, but due to its limited accuracy, it cannot completely replace periodic monitoring. It was observed that as the number of controllers increases, data traffic increases linearly, and on the server side, the main limiting factor is CPU load rather than memory usage. Based on the obtained results, it is recommended to use the MQTT protocol, batch 5–10 measurements, select the QoS level based on the importance of the data, and apply event-based logic as an additional mechanism for reducing the amount of transmitted data.

The data collection solution described in this work was used in the preparation of two articles published in international scientific journals and one article submitted to an international scientific journal, which is currently under review [1, 2].

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1. Elektros tinklo stebėsenos ir duomenų perdavimo sprendimų analizė	13
1.1. Elektros tinklo stebėsenos poreikis ir tikslai	13
1.2. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikacija ir palyginimas	14
1.2.1. Elektros tinklo stebėsenos priemonės ir įranga	14
1.2.2. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikavimas pagal įtampos lygį.....	14
1.2.3. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikavimas pagal stebėsenos paskirtį...	15
1.2.4. Elektros tinklo stebėsenos priemonių klasifikavimas pagal atnaujinimo periodą.....	16
1.2.5. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos palyginimas	17
1.3. Išmanieji elektros skaitikliai ir jų teikiami duomenys.....	17
1.3.1. Skaitiklių nuskaitymo automatizavimo poreikis ir perėjimas nuo AMR prie AMI	17
1.3.2. AMI sistemų architektūra ir veikimo principai	18
1.3.3. Išmaniojo skaitiklio vietinės ir nuotolinės sąsajos	20
1.3.4. Išmaniųjų skaitiklių pateikiami duomenys ir jų formatai.....	22
1.4. Elektros tinklo stebėsenai naudojami duomenų perdavimo protokolai.....	23
1.4.1. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo protokolai ir jų taikymo scenarijai.....	23
1.4.2. Duomenų perdavimo patikimumo mechanizmai.....	24
1.5. Komerciniai išmaniųjų skaitiklių duomenų surinkimo sprendimai.....	25
1.6. Elektros tinklo stebėsenos duomenų surinkimo optimizacijos metodai.....	26
1.6.1. Duomenų paketavimas ir agregavimas.....	27
1.6.2. Įvykiais grįstas duomenų perdavimas	27
1.7. Apibendrinimas ir tyrimo krypties detalizavimas	29
2. Išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo alternatyvų vertinimo metodologija... 30	30
2.1. Duomenų perdavimo sistemos architektūra	30
2.2. Prototipo aparatinė ir programinė įranga.....	31
2.2.1. VRA aparatinė ir programinė įranga	31
2.2.2. Serverio programinė įranga	32
2.3. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo konfigūracijos	34
2.3.1. Taikomųjų protokolų parinkimas	34
2.3.2. Duomenų paketavimo strategijos	34
2.3.3. Duomenų perdavimo patikimumo užtikrinimo mechanizmai.....	35
2.3.4. Duomenų siuntimo modeliai	36
2.3.5. Paskirstytos sistemos dydžio įtaka duomenų perdavimui	37
2.4. Elektros tinklo stebėsenos sistemos duomenų perdavimo strategijų vertinimo kriterijai	38
2.5. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo eksperimento sistema.....	39
2.6. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo sistemos eksperimentų planas ir eiga.....	41
2.7. Tyrimo metodologijos apibendrinimas.....	42
3. Išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo alternatyvų vertinimo rezultatai..... 43	43
3.1. Taikomųjų protokolų bazinis vertinimas.....	43
3.2. Duomenų paketavimo strategijų vertinimas	46

3.3. Duomenų perdavimo patikimumo vertinimas esant paketų praradimui.....	49
3.4. Įvykiais grįsto duomenų siuntimo modelio vertinimas	52
3.5. Paskirstytos sistemos apkrovos vertinimas didėjant įrenginių skaičiui.....	54
3.6. Rezultatų aptarimas ir rekomendacijos elektros tinklo parametrų stebėsenai.....	56
Išvados	58
Literatūros sąrašas	60
Mokslinių publikacijų magistro tezių tema sąrašas	64

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skirtinguose elektros tinklo įtampos lygiuose naudojami tipiniai stebėsenos įrenginiai ..	15
2 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos įrankių skirstymas pagal paskirtį.....	16
3 lentelė. Elektros tinklo įrankių skirstymas pagal atnaujinimo periodą.....	16
4 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos palyginimas pagal skirtingas paskirtis...	17
5 lentelė. AMI sistemos komponentai jų aprašymas ir veikimo principai	18
6 lentelė. Elektros skaitiklių vietinių sąsajų parametrai ir paskirtis	20
7 lentelė. Elektros skaitiklio nuotolinių sąsajų palyginimas.....	21
8 lentelė. Dažniausiai AMI ir IoT sistemose naudojamų taikomojo lygmens protokolų palyginimas	24
9 lentelė. Komercinių išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo sprendimų palyginimas ..	26
10 lentelė. VRA programinėje įrangoje naudojami skirtingi komponentai ir jų reikšmės.....	32
11 lentelė. Serverio dalyje naudojami komponentai ir bibliotekos	33
12 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo sistemos vertinimo kriterijai ir jų aprašymas	38
13 lentelė. Duomenų perdavimo sistemos apibendrintas eksperimento planas.....	41
14 lentelė. Skirtingų protokolų naudojamas papildomas pridėtinis srautas, skirtas perduoti tuos pačius duomenis.....	44
15 lentelė. Pridėtinio ir naudingo duomenų kiekio palyginimas naudojant skirtingus paketavimo lygius	47
16 lentelė. Duomenų perdavimo naudingų ir pridėtinio srauto palyginimas naudojant įvykiais grįstą logiką	52

Paveikslų sąrašas

1 pav. Tradicinė AMI sistemos architektūra ir standartiniai komponentai	19
2 pav. Aktyviosios galios šuoliui nustatyti naudojami kintamieji [35]	28
3 pav. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo schema ir pagrindiniai komponentai	30
4 pav. Sukurto P1 sąsajos nuskaitymo įrenginio principinė schema (kairėje) ir realizuotas įrenginys (dešinėje)	31
5 pav. Duomenų surinkimo serverio paslaugos ir jų atliekamos funkcijos	33
6 pav. Taikomųjų protokolų pasirinkimo konfigūracija vaizduojama UML sekų diagrama	34
7 pav. Duomenų paketavimo konfigūracija vaizduojama UML diagrama	35
8 pav. UML sekų diagrama, vaizduojanti duomenų perdavimo konfigūraciją simuliuojant paketų praradimą	36
9 pav. Duomenų siuntimo konfigūracija, kai duomenys perduodami įvykiais grįsta logika	37
10 pav. UML sekų diagrama vaizduojanti kelių skaitiklių duomenų perdavimo scenarijų	37
11 pav. Eksperimentų metu naudojama duomenų surinkimo sistema ir jos pagrindiniai komponentai	40
12 pav. Vidutinis išsiųstų ir gautų duomenų kiekis naudojant skirtingus protokolus siųsti elektros skaitiklio fiksuojamus duomenis	43
13 pav. Elektros skaitiklio duomenų perdavimo greitis iš VRA į serverį	44
14 pav. VRA apkrovos palyginimas naudojant skirtingus taikomuosius protokolus	44
15 pav. Serverio įvertinimas pagal tiekiamas paslaugas ir protokolą	45
16 pav. VRA naudojama perdavimo srovė duomenų perdavimo metu naudojant skirtingus protokolus	46
17 pav. VRA išsiunčiamų ir gaunamų duomenų kiekis atliekant elektros skaitiklio duomenų paketavimą	47
18 pav. VRA apkrova, kai naudojami skirtingi duomenų paketavimo lygiai	48
19 pav. Vidutinis serverio paslaugų apkrovimas atliekant paketuotų duomenų perdavimą	48
20 pav. VRA naudojama srovė atliekant paketuotų duomenų perdavimą	49
21 pav. VRA išsiųstų ir gautų duomenų kiekis naudojant skirtingus duomenų praradimo lygius ...	49
22 pav. Pristatytų žinučių santykis simuliuojant paketų praradimą	50
23 pav. Maksimalus operatyviosios atminties naudojimas esant simuliuojamam paketų praradimui	50
24 pav. VRA maksimali atminties fragmentacija (kairėje) ir procesoriaus apkrova (dešinėje) atliekant paketų praradimo simuliaciją	51
25 pav. Serverio apkrovimas esant paketų praradimui	51
26 pav. Išsiųstų ir gautų duomenų dalys naudojant įvykiais grįstą logiką perduoti duomenis	52
27 pav. VRA apkrovos rezultatai, kai duomenys yra perduodami įvykiais grįsta logika	53
28 pav. Serverio apkrovos rezultatai lyginant nepertraukiamą ir įvykiais grįstą perdavimą	53
29 pav. VRA naudojama srovė perduodant duomenis įvykiais grįstu ir nepertraukiamu režimu	54
30 pav. Duomenų srauto pokytis didėjant VRA skaičiui	54
31 pav. Elektros skaitiklio duomenų pristatymo laikas naudojant skirtingus protokolus ir VRA kiekį	55
32 pav. Serverio procesoriaus apkrovos pokytis didėjant VRA skaičiui	55
33 pav. Serverio atminties apkrovimas pagal didėjantį VRA skaičių	56

Santrumpų ir terminų sąrašas

Terminai:

AMI – (angl. *Advanced Metering Infrastructure*) pažangi apskaitos sistema, naudojama elektros, vandens ir kitų tiekiamų paslaugų stebėsenai ir analizei, užtikrinanti dvikryptį ryšį.

AMR – (angl. *Automatic meter reading*) technologinis sprendimas, leidžiantis automatiškai surinkti skaitiklių (elektros, vandens ir kt.) suvartojimo bei būsenos duomenis ir perduoti juos į centralizuotą sistemą.

DRAM – (angl. *Dynamic random access memory*) dinaminė operatyvioji atmintis, kurioje laikinai saugoma operacinės sistemos ir kitų vykdomų programų duomenys.

IoT – (angl. *Internet of Things*) elektroninių prietaisų visuma, komunikacijai naudojanti interneto paslaugas.

IRAM – (angl. *Instruction random access memory*) operatyviosios atminties dalis, skirta programos instrukcijoms laikyti ir vykdyti.

QoS – (angl. *Quality of Service*) paslaugos kokybės lygis, apibrėžiantis pristatymo patikimumo lygį ryšio sistemoje.

Vietinis ryšio adapteris (VRA) – įrenginys, kuris nuskaito išmaniojo skaitiklio vietinės sąsajos duomenis ir juos ryšio tinklu perduoda į tolimesnę duomenų surinkimo sistemą.

Įvadas

Pastaraisiais dešimtmečiais elektros tinklo struktūra ir apkrovų pobūdis nuolat kinta, daugėja elektros įrenginių ir plečiasi jų panaudojimo galimybės. Vis dažniau diegiami didelės galios prietaisai, tokie kaip elektromobilių įkrovimo stotelės, energijos kaupikliai, integruojami atsinaujinantys energijos šaltiniai [3]. Elektros vartotojai įgyja galimybę ne tik vartoti elektros energiją, bet ir ją gaminti bei tiekti į bendrą elektros tinklą. Dėl šių priežasčių elektros tinklo valdymas tampa vis sudėtingesnis, o pats tinklas – labiau decentralizuotu ir dvikrypčiu. Tokie pokyčiai sukelia papildomų iššūkių elektros tinklo valdymui ir infrastruktūrai, todėl vis aktualesnė tampa elektros tinklo stebėseną [4, 5]. Nors aukštesniuose įtampos lygiuose taikomi įvairūs stebėsenos sprendimai, žemos įtampos tinkluose duomenų laiko raiška ir prieinamumas išlieka riboti [6]. Siekiant įgalinti platesnę ir nuoseklesnę stebėjimą, elektros tinklo operatoriai pereina nuo įprastų automatinų skaitiklių nuskaitymo sistemų (AMR) prie pažangesnių nuskaitymo sistemų (AMI). Vienas iš svarbiausių šių naujų AMI sistemų elementų yra išmanieji skaitikliai. Šie skaitikliai leidžia stebėti ne tik suvartotos ir į tinklą grąžintos energijos informaciją, bet ir kitus tinklo parametrus (pvz., įtampą, srovę, galią, elektros tinklo kokybės rodiklius). Praktikoje šie elektros energijos skaitikliai jau išsprendžia daugelį egzistuojančių apskaitos ir stebėsenos problemų, kai duomenys perduodami 10–15 minučių intervalais [7]. Tačiau dėl duomenų perdavimo kanalų pralaidumo ir didelio prijungtų įrenginių skaičiaus perduodama tik svarbiausia suvartotos elektros energijos informacija, dalis parametrų yra neperduodami arba perduodami ribotai ir agreguoti [5]. Tokiu atveju skaitiklių galimybės išnaudojamos tik iš dalies. Dažnesnis skaitiklių parametrų pateikimas leistų fiksuoti tinkle vykstančius įvykius ir išplėstų anomalijų tyrimo galimybes, tačiau praktikoje tai riboja dabartiniai duomenų perdavimo sprendimai. Atsižvelgiant į ribotą duomenų perdavimo dažnį ir duomenų agregavimą, tampa aktualu įvertinti, kokios duomenų perdavimo strategijos yra tinkamiausios centralizuotose išmaniųjų skaitiklių tinklo stebėsenos sistemose. Tad šiame darbe kuriama sistema, leidžianti neinvaziniu būdu analizuoti, kokie duomenų perdavimo sprendimai yra optimaliausi paskirstytoje sistemoje. Tyrimo metu nagrinėjama, kaip taikomųjų protokolų parinkimas, duomenų paketavimo strategijos ir patikimumo mechanizmai veikia įrenginių resursų poreikį bei duomenų perdavimo rodiklius, tokius kaip vėlinimą, paketų praradimą ir pralaidumo poreikį. Tokiu būdu siekiama nustatyti, kaip skirtingos perdavimo strategijos gali pagerinti centralizuotą tinklo būsenos stebėseną esant realiems ryšio kanalų ir infrastruktūros apribojimams ir padidinti tinklo analizės potencialą.

Darbo tikslas – pasiūlyti elektros tinklo stebėsenos duomenų, generuojamų išmaniaisiais skaitikliais, surinkimo būdus, panaudojant paskirstytą daiktų interneto komunikacijų sistemą, bei įvertinti jos charakteristikas ir reikiamus mazgų resursus, priklausomai nuo duomenų rinkimo scenarijaus.

Norint įgyvendinti šį darbo tikslą, suformuluoti **uždaviniai**:

1. atlikti taikymo uždavinių reikalavimų apžvalgą;
2. išanalizuoti elektros tinklo ir įrangos stebėsenai taikomas bei alternatyvias duomenų perdavimo technologijas bei protokolus;
3. parengti tyrimo metodologiją, apibrėžiant tiriamus taikomuosius protokolus, duomenų paketavimo strategijas ir patikimumo užtikrinimo mechanizmus;
4. sukurti elektros tinklo parametrų stebėjimo ir duomenų perdavimo sistemos prototipą, atsižvelgiant į paskirstytų matavimų sinchronizavimo poreikius;
5. atlikti eksperimentinius bandymus, naudojant sukurtą prototipą, ir įvertinti skirtingų duomenų perdavimo konfigūracijų, resursų poreikį, poveikį duomenų perdavimo tinklui.

Rezultatų aprobavimas. Šiame darbe sukurta išmaniųjų skaitiklių duomenų surinkimo sistema panaudota rengiant tris mokslinius straipsnius tarptautiniams mokslo žurnalams. Pirmajame straipsnyje, paskelbtame žurnale *IEEE Access*, pristatytas neinvazinis skaitiklio paklaidos vertinimo metodas, paremtas vartotojo galios šuolių analize [1]. Metodas taikomas vartotojo galios profilio pokyčiams aptikti ir palyginti su suminio skaitiklio duomenimis [1]. Antrajame straipsnyje, paskelbtame žurnale *Applied Sciences*, pasiūlyti du išmaniojo skaitiklio paklaidos vertinimo metodai, skirti nuotoliniu būdu įvertinti aktyviosios galios matavimo paklaidą, naudojant vartotojo pusėje užfiksuotus galios įvykius [2]. Trečiajame, šiuo metu recenzuojamame, straipsnyje šie metodai eksperimentiškai tikrinami naudojant surinktus 1 s raiškos išmaniųjų elektros skaitiklių duomenis, taip pat aptariamos jų įgyvendinimo galimybės MQTT pagrindu veikiančioje duomenų surinkimo sistemoje. Pirmuose publikuotuose straipsniuose remiamasi aprašomos duomenų surinkimo sistemos rezultatais, o trečiajame straipsnyje detaliau aprašoma pati sistema ir jos taikymo galimybės.

1. Elektros tinklo stebėsenos ir duomenų perdavimo sprendimų analizė

Šiame skyriuje aptariamas elektros tinklo stebėsenos poreikis, apžvelgiamos taikomos stebėsenos priemonės ir šiuolaikinėse sistemose naudojami sprendimai. Taip pat nagrinėjamos duomenų perdavimo technologijos ir protokolai. Pateikiama nagrinėjamų sprendimų analizė ir palyginimas.

1.1. Elektros tinklo stebėsenos poreikis ir tikslai

Tobulėjant elektros paskirstymo ir perdavimo tinklams ir didėjant decentralizuotų energijos gamintojų bei vartotojų skaičiui, elektros tinklo valdymas tampa vis sudėtingesnis [6]. Ilgą laiką elektros tinklas funkcionavo kaip vienkryptė sistema – nuo didžiųjų gamintojų iki vartotojų, todėl stebėsenos uždaviniai dažniausiai buvo orientuoti į apskaitą ir srautų prognozavimą [8]. Papildomos problemos (pvz., įtampos kritimai, fazių nestabilumas) dažniausiai buvo nustatomos rankiniu būdu [8]. Šiuolaikinis elektros tinklas funkcionuoja kaip dinaminė sistema, kurioje energija perduodama dviem kryptimis. Apkrovos ir elektros generavimas tampa nepastovūs, tad tinklo tinkamam valdymui reikalinga detali stebėseną. Dėl to didėja poreikis ne tik įprastoms apskaitos ir prognozavimo sistemoms, bet ir automatiniam detalesnei analizei bei valdymo sprendimams, taikomiems paskirstymo ir perdavimo sistemose bei galutinių vartotojų aplinkoje.

Pagrindinę elektros tinklo stebėsenos paskirtį galima įvardyti kaip tinklo būsenos informacijos rinkimą ir vertinimą, kad operatoriai ar automatinės sistemos galėtų priimti tinkamus sprendimus ir būtų užtikrintas kokybiškas elektros energijos tiekimas. Tačiau stebėsenos tikslai gali būti kur kas įvairesni, todėl juos galima suskirstyti į tris kategorijas: eksploatacinius, kokybės ir stabilumo užtikrinimo, bei analitinius [9]. Eksploataciniai tikslai iš esmės yra orientuoti į gedimų aptikimą, nustatymą ir tiekimo atstatymo proceso pagreitinimą [10]. Kokybės ir stabilumo tikslai apima tinklo asimetrijos problemas, harmoninius iškraipymus, dažnio / įtampos svyravimus [11]. Analitiniai tikslai apima: anomalijų nustatymą, neteisėtą vartojimą, topologijos nustatymą, įrenginių būklės įvertinimą [2, 10, 12]. Svarbu paminėti, kad siekiant skirtingų tikslų reikia skirtingų stebėjimo priemonių, duomenų detalumo ir laiko tikslumo.

Projektuojant tinklo stebėsenos sistemas tenka ieškoti kompromiso tarp duomenų informatyvumo ir jų perdavimo dažnio. Tinklo stebėsenos metu naudojami ryšio kanalai yra riboto pralaidumo, todėl persiųsti visų matavimo duomenų maksimalia raiška tiesiog neįmanoma. Verta paminėti, kad tokių stebėsenos įrenginių skaičius gali būti didelis, todėl ryšio kanalų apkrova gali proporcingai didėti. Remiantis Lietuvoje veikiančio elektros tinklo operatoriaus viešai prieinamais duomenimis, tinklo būsenos parametrai, tokie kaip įtampa, srovė ir galia, yra fiksuojami tik kas 10 minučių, o sunaudotos elektros energijos duomenys – kas 15 minučių [13]. Taip pat nurodoma, kad skaitikliai gali užfiksuoti įtampos kritimo faktą ir laiko žymą, kurie yra perduodami į centrinę duomenų sistemą [7]. Apžvalginiuose literatūros šaltiniuose patvirtinama, kad tokie 10–15 minučių agreguoti matavimai yra tinkami energijos apskaitai ir vartotojų profilių analizei, tačiau tokia laiko skiriamoji geba riboja trumpalaikių įvykių ir anomalijų aptikimo galimybes [6, 14, 15].

Dėl jau minėtų, ribojančių veiksnių, tokių kaip ryšio kanalų pralaidumas, didelis prijungtų įrenginių skaičius, infrastruktūros apribojimai, ne visada įmanoma perduoti duomenis reikiamu detalumu ir dažniu. Todėl praktikoje ši problema sprendžiama keliais būdais, tai gali būti modernesnių duomenų perdavimo technologijų pasirinkimas, duomenų atrankos sprendimai, kraštinės kompiuterijos (angl. *edge computing*) sprendimai. Šie sprendimai gali skirtingai paveikti tinklo apkrovą, duomenų perdavimo vėlinimą, paketų praradimą, jiems gali reikėti skirtingų įrenginių resursų. Todėl toliau

šiuo darbe apžvelgiamos taikomos stebėsenos priemonės, ryšio technologijos ir protokolai, moksliniai darbai, aptariantys šias temas.

1.2. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikacija ir palyginimas

Elektros tinklo stebėseną apima įvairius procesus ir metodus, skirtus įvertinti tinklo būseną. Šiame skyrelyje pateikiama stebėsenos priemonių klasifikacija ir palyginimas, o įrenginiai šiame darbe grupuojami pagal tris kriterijus: tinklo įtampos lygį, stebėsenos paskirtį ir duomenų atnaujinimo periodą.

1.2.1. Elektros tinklo stebėsenos priemonės ir įranga

Elektros tinklo stebėsenai naudojamos priemonės ir įranga skiriasi pagal taikymo vietą, matuojamus parametrus ir duomenų atnaujinimo dažnį. Praktikoje galima išskirti kelias skirtingas priemonių grupes, dažniausiai taikomas skirtingose elektros tinklo vietose.

Toliau pateikiama dažniausiai naudojama įranga ir priemonės, kurios šiame darbe bus klasifikuojamos ir lyginamos pagal įtampos lygį, stebėsenos paskirtį ir duomenų atnaujinimo periodą:

- išmanieji elektros skaitikliai ir jų duomenų surinkimo sistemos AMI – sprendimai skirti energijos apskaitai, apkrovų profiliams ir daliai kokybės rodiklių fiksuoti;
- elektros energijos kokybės matuokliai (angl. *power quality analyser, PQ/PQA*) – įrenginiai skirti įtampos ir srovės kokybės parametrų (pvz. harmonikoms, įtampos svyravimams, viršįtampiams) fiksuoti;
- apsaugos ir automatikos įrenginiai su fiksavimo funkcijomis (angl. *intelligent electronic device, IED*) – naudojami viršsrovėms, trumpiesiems jungimams, apsaugos logikoms ir įvykiams fiksuoti;
- nuotolinės telemetrijos ir valdymo įrenginiai (angl. *remote terminal unit, RTU*) bei pastočių valdikliai – skirti būsenoms, matavimų ir valdymo komandų mainams;
- trumpojo jungimo indikatoriai (angl. *fault passage indicator, FPI*), skirti nustatyti gedimo zoną paskirstymo tinkle;
- fazorių matavimų įrenginiai (angl. *phasor measurement unit, PMU*) – skirti fazorių, dažnio ir dinaminių procesų stebėsenai bei sinchronizuotam įvykių palyginimui skirtingose tinklo vietose;
- trikdžių registratoriai (angl. *disturbance recorders*) – skirti trumpalaikiams pereinamiesiems procesams ir įvykių bangos formoms fiksuoti;
- įrenginių būklės stebėsenos sistemos – skirtos ilgalaikiai įrenginių senėjimo ir gedimų rizikos vertinimui.

Nors įvardyti įrenginiai dažnai gali būti naudojami kelioms funkcijoms vienu metu, jų klasifikavimas pagal įtampos lygį, stebėsenos paskirtį ir duomenų atnaujinimo periodą leidžia objektyviai įvertinti jų vaidmenį bendroje elektros tinklo stebėsenos sistemoje.

1.2.2. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikavimas pagal įtampos lygį

Pirmasis kriterijus – tinklo įtampos lygis. Paprastai elektros tinklas skirstomas į aukštos įtampos ($U \geq 110$ kV) perdavimo tinklus, vidutinės įtampos ($1 \text{ kV} < U \leq 35$ kV) paskirstymo tinklus ir žemos įtampos ($U < 1$ kV) galutinių vartotojų tinklus [16]. Dėl skirtingų įtampos lygių, tinklo struktūros ir techninių uždavinių skiriasi ir taikomi stebėsenos sprendimai [17]. Žemos įtampos tinkluose

dažniausiai dėmesys skiriamas vartotojų apskaitai, apkrovų analizei ir elektros energijos kokybei vertinti [17]. Šiame lygyje dažniausiai aktualūs ilgalaikiai duomenys, leidžiantys sudaryti apkrovų profilius, vertinti nuostolius ir planuoti tinklo plėtrą. Vidutinės įtampos tinkluose labai svarbu operatyvus tinklo būsenos pasikeitimų stebėjimas bei greitas gedimų aptikimas ir lokalizavimas. Dėl didelio vartotojų skaičiaus didelę reikšmę turi sprendimai, leidžiantys sumažinti tiekimo nutraukimo trukmę ir izoliuoti pažeistas tinklo dalis [18]. Aukštos įtampos perdavimo tinkluose stebėseną orientuota į sistemos stabilumo užtikrinimą ir būsenų valdymą. Tuo metu svarbu analizuoti dinaminčius procesus, stebėti didelės galios srautus ir užtikrinti patikimą visos sistemos veikimą. Įvykus gedimui, surinkta tinklo informacija gali būti naudojama automatiniam tinklo persikonfigūravimui ir normalaus veikimo atkūrimui. Aptarti stebėsenos lygiai ir naudojami įrenginiai glaustai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Skirtinguose elektros tinklo įtampos lygiuose naudojami tipiniai stebėsenos įrenginiai

Įtampos lygis	Tinklo tipas	Tipiniai stebėsenos įrenginiai
Žema įtampa ($U < 1 \text{ kV}$)	Galutinių vartotojų tinklai	Išmanieji elektros skaitikliai (AMI), įtampos kokybės analizatoriai (PQ)
Vidutinė įtampa ($1 \text{ kV} < U \leq 35 \text{ kV}$)	Paskirstymo tinklai	Išmaniosios apsaugos relės (IED) su įvykių registravimu, RTU telemetrijos/valdymo įrenginiai, trumpo jungimo indikatoriai (FPI)
Aukšta įtampa ($U \geq 110 \text{ kV}$)	Perdavimo tinklai	Linijų ir transformatorių apsaugos IED; transformatorių būklės stebėsenos sistemos (pvz., DGA), fazorių matavimo įrenginiai (PMU/ μ PMU)

Taigi, didėjant įtampos lygiui didėja stebėsenos sudėtingumas ir operatyvumo reikalavimai, o žemesnės įtampos tinkluose daugiau dėmesio skiriama apskaitai ir vartojimo analizei.

1.2.3. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos klasifikavimas pagal stebėsenos paskirtį

Įrenginiai pagal elektros tinklo stebėsenos paskirtį dažniausiai skirstomi į šias kategorijas: apskaitos ir energijos srautų stebėseną, elektros energijos kokybės stebėseną, gedimų aptikimą ir lokalizavimą, apsaugą ir automatiką bei sisteminę stebėseną ir valdymą [19, 20]. Apskaitos ir energijos srautų stebėseną apima tokie matavimai kaip suvartotą energiją, įtampą, srovę, aktyviąją ir reaktyviąją galią. Vienas iš pavyzdžių – išmanieji skaitikliai. Remiantis jų pateikiamais duomenimis galima tinkamai apmokestinti tinklo vartotoją, atlikti elektros tinklo nuostolių įvertinimą, sudaryti apkrovų profilius. Elektros energijos kokybės stebėseną skirta įtampos svyravimams, harmonikoms, viršįtampiams ir kitiems parametrams fiksuoti. Remiantis šiais duomenimis galima nustatyti trikdžių šaltinius ir planuoti tinklo kompensavimo ir stiprinimo priemones. Gedimams nustatyti ir lokalizuoti gali būti naudojamos paskirstytos sinchronizuotos matavimo sistemos, kurios leidžia operatyviai nustatyti įvykio vietą ir laiką [21]. Tokiose sistemose naudojami PMU ar μ PMU įrenginiai, leidžiantys analizuoti fazorių kampus [21]. Apsaugos ir automatikos sprendimai užtikrina, kad įvykus netikėtam įvykiui būtų automatiškai atliekamas tinklo atjungimas ar atkūrimas. Tai apsauga nuo viršsrovių ir trumpųjų jungimų. Šiai kategorijai dažniausiai priskiriami tokie įrenginiai kaip IED apsaugos relės. Galiausiai sistemos stebėsenos ir valdymo įrenginiai atlieka centralizuotą duomenų surinkimą, būsenų stebėjimą ir kontrolę. Tai atliekama naudojant tokias sistemas kaip SCADA ar ADMS. Šiame lygyje apjungiami skirtingų tipų duomenys,

todėl galima optimizuoti tinklo veikimą, valdyti apkrovas ir užtikrinti patikimą energijos tiekimą. Stebėsenos paskirčių palyginimas pateikiamas 2 lentelėje.

2 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos įrankių skirstymas pagal paskirtį

Kategorija	Matuojami parametrai	Tipiniai įrenginiai ar sistemos
Apskaitos ir energijos srautų stebėseną	Energija, įtampa, srovė, aktyvioji ir reaktyvioji galia	Išmanieji skaitikliai (AMI), skaitiklių duomenų surinkimo sistemos
Elektros energijos kokybės stebėseną	Įtampos svyravimai, harmonikos, viršįtampiai, kokybės rodikliai	Elektros energijos kokybės analizatoriai (PQ), kokybės monitoriai
Gedimų aptikimas ir lokalizavimas	Įvykių laikas, vieta, fazorių kampai / būsenos pokyčiai	Sinchronizuotos matavimo sistemos, PMU/μPMU, trumpo jungimo indikatoriai (FPI)
Apsauga ir automatika	Viršsrovės, trumpųjų jungimų būsenos, apsaugos logikos signalai	IED apsaugos relės, automatinio atjungimo/atkūrimo schemas
Sisteminė stebėseną ir valdymas	Centralizuoti būsenų ir matavimų duomenys, įvykių informacija	SCADA, ADMS, RTU, pastočių valdikliai

Apibendrinant galima pasakyti, kad kiekviena elektros tinklo stebėsenos kategorija renka skirtingus parametrus, tačiau kartu jos leidžia tiksliau įvertinti bendrą tinklo būklę, nustatyti gedimus ir užtikrinti patikimesnę elektros tinklo veikimą.

1.2.4. Elektros tinklo stebėsenos priemonių klasifikavimas pagal atnaujinimo periodą

Pagal duomenų atnaujinimo periodą elektros tinklo stebėsenos įrenginiai gali būti skirstomi į subsekundinius (kai matavimai pateikiami dažniau nei kartą per sekundę), sekundinio intervalo (apie 1 s) ir lėtesnius (kai matavimo rezultatai pateikiami rečiau nei kartą per sekundę). Šis kriterijus svarbus, nes nuo duomenų atnaujinimo spartos ir diskretizavimo dažnio priklauso, kokius reiškinius įrenginys gali aptikti ar užfiksuoti. Subsekundiniai įrenginiai dažniausiai taikomi tada, kai reikia fiksuoti labai greitus, pereinamuosius procesus [22]. Tipiniai pavyzdžiai – PMU, μPMU, trikdžių registratoriai [22]. Sekundinio intervalo įrenginiai dažniausiai naudojami vietose, kur svarbu beveik realiuoju laiku stebėti ir sekti tinklo būseną bei įvykius. Į tokią grupę įtraukiami telemetrijos ir valdymo įrenginiai, tokie kaip RTU, pastočių valdikliai ir kiti į SCADA/ADMS sistemas integruojami įrenginiai. Lėtesni duomenų surinkimo įrenginiai yra orientuoti į ilgalaikę analizę, apskaitą ar apkrovų profilių sudarymą. Tai gali būti tokie įrenginiai kaip išmanieji skaitikliai ar dalis elektros energijos kokybės matuoklių, kai duomenys agreguojami per ilgesnį laiką. Verta paminėti, kad kai kuriuos įrenginius, pavyzdžiui, išmaniuosius skaitiklius, galima priskirti prie dviejų kategorijų, sekundinių ir lėtesnių. Išmanieji skaitikliai įprastai perduoda duomenis ilgesniais nei 1 sekundės intervalais, nors jų aparatinės galimybės leidžia fiksuoti ir 1 sekundės matavimus. Vis dėlto šio funkcionalumo taikymą paprastai riboja elektros tinklo operatorius. Apibendrintas skirstymas pagal duomenų atnaujinimo periodą pateikiamas 3 lentelėje.

3 lentelė. Elektros tinklo įrankių skirstymas pagal atnaujinimo periodą

Atnaujinimo periodas	Ką leidžia fiksuoti	Pavyzdžiai
Subsekundiniai (< 1 s)	Labai greitus reiškinius, pereinamuosius procesus	PMU, μPMU, trikdžių registratoriai

Sekundinio intervalo (~ 1 s)	Tinklo būseną ir įvykius beveik realiuoju laiku	RTU, pastočių valdikliai, SCADA/ADMS integruojami įrenginiai
Lėtesni (> 1 s)	Ilgalaikius pokyčius, tendencijas, agreguotus rodiklius	Išmanieji skaitikliai, dalis energijos kokybės matuoklių (su agregavimu)

1.2.5. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos palyginimas

Apibendrinant ankstesniuose poskyriuose aptartus klasifikavimo kriterijus, galima pastebėti, kad kiekvienas elektros tinklo stebėsenos įrenginys ir priemonė atlieka savitą funkciją. Įrenginiai palyginami pagal įtampos lygį, stebėsenos paskirtį ir duomenų atnaujinimo periodą. Apibendrintas visų aptartų įrenginių ir sistemų palyginimas pateikiamas 4 lentelėje.

4 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos priemonių ir įrangos palyginimas pagal skirtingas paskirtis

Įrenginys	Įtampos lygis	Stebėsenos paskirtis	Atnaujinimo periodas
Išmanieji skaitikliai (AMI)	Žema	Apskaita ir energijos srautai	Lėtas (> 1 s) / sekundinis
Kokybės analizatoriai (PQ/PQA)	Žema / vidutinė	Elektros energijos kokybė	Sekundinis / subsekundinis
Apsaugos relės (IED)	Vidutinė / aukšta	Apsauga ir automatika	Sekundinis / subsekundinis
Telemetrijos įrenginiai (RTU)	Vidutinė / aukšta	Sisteminė stebėseną ir valdymas	Sekundinis
Gedimo indikatoriai (FPI)	Vidutinė	Gedimų aptikimas	Įvykio registracija (subsekundinis)
Fazorių matavimo įrenginiai (PMU)	Aukšta	Sisteminė stebėseną ir gedimų lokalizavimas	Subsekundinis
Trikdžių registratoriai	Vidutinė / aukšta	Gedimų aptikimas	Subsekundinis
Įrenginių būklės stebėsenos sistemos	Vidutinė / aukšta	Būklės stebėseną	Lėtas (> 1 s)

Pagal lentelės duomenis galima matyti, kad dauguma įrenginių yra specializuoti – jų taikymo sritis, paskirtis ir duomenų atnaujinimo periodas dažniausiai atitinka vieną konkrečią stebėsenos funkciją. Atskirai verta paminėti išmaniuosius skaitiklius, tai viena plačiausiai naudojamų žemos įtampos lygio stebėsenos priemonių, kurių galimybės dažnai nėra pilnai išnaudojamos. Esant sekundiniam duomenų atnaujinimo periodui, tokie išmanieji skaitikliai turi didelį potencialą prisidėti prie gedimų aptikimo, sistemos būsenos ir elektros energijos kokybės stebėsenos.

1.3. Išmanieji elektros skaitikliai ir jų teikiami duomenys

Šiame skyriuje apžvelgiami išmanieji elektros skaitikliai ir jų veikimas AMI sistemoje. Aptariama, kokius elektros parametrus skaitikliai fiksuoja, kaip dažnai šie duomenys atnaujinami ir kokių formatu pateikiami.

1.3.1. Skaitiklių nuskaitymo automatizavimo poreikis ir perėjimas nuo AMR prie AMI

Mechaninis (indukcinis) elektros skaitiklis yra vienas seniausių ir ilgiausiai istoriškai naudotų elektros skaitiklių. Mechaniniai skaitikliai dėl savo ilgaamžiškumo, konstrukcinio paprastumo ir patikimumo, ilgą laiką buvo plačiai naudojami tiek buityje, tiek pramonėje, iki elektroninių skaitiklių atsiradimo. Elektroniniai skaitikliai pakeitė mechaninius matavimo elementus elektroniniais, todėl

padidėjo matavimo ir duomenų surinkimo patikimumas, tačiau rodmenų nuskaitymas ilgą laiką vis tiek išliko rankinis. Tačiau ilgainiui buvo pastebėta, kad rankinis duomenų nuskaitymas reikalauja daug žmogiškųjų resursų, yra lėtas ir didina klaidų tikimybę. Didėjant vartotojų skaičiui, atsiradus skirtingiems dienos ir nakties tarifams, šie trūkumai tapo dar labiau pastebimi. Todėl, vystantis technologijoms ir augant automatinio nuskaitymo poreikiui, į skaitiklius buvo pradėti integruoti duomenų perdavimo sprendimai. Tai sudarė prielaidas atsirasti AMR sistemoms, kurios įgalino vienkryptį automatinį skaitiklio nuskaitymą be vartotojo įsikišimo. Visgi ilgainiui paaiškėjo, kad AMR sprendimai turi ribotas galimybes, kai reikalinga dvikryptė komunikacija ir procesų valdymas. Toliau vystantis technologijoms atsirado poreikis nuotoliniam konfigūravimui, įvykių fiksavimui ir diagnostikai, todėl pradėta diegti AMI infrastruktūra. AMI įgalina dvikryptę komunikaciją, leidžia automatizuotai valdyti skaitiklius ir efektyviau vykdyti apskaitą bei susijusius tinklo procesus.

1.3.2. AMI sistemų architektūra ir veikimo principai

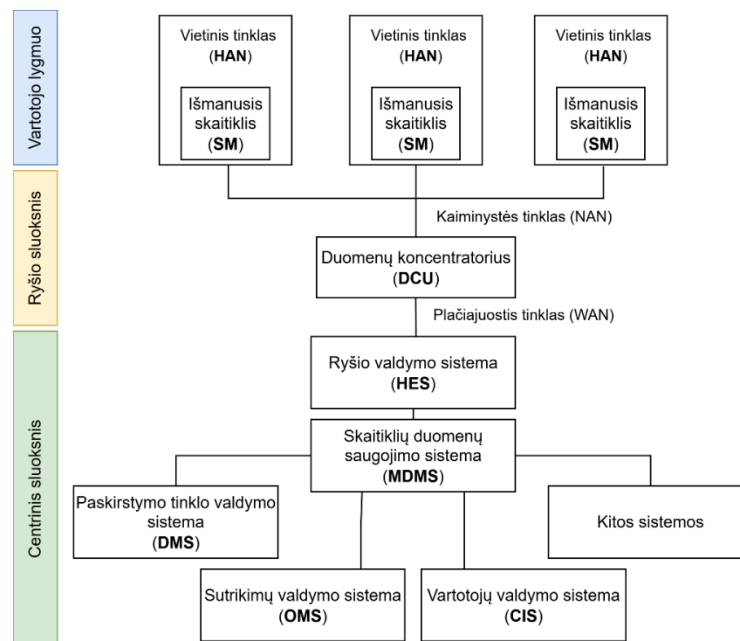
AMI – moderni duomenų perdavimo sistema, susidedanti ne tik iš išmaniųjų elektros skaitiklių, bet ir iš įvairių kitų įrenginių bei priemonių – tinklo, ryšio, duomenų valdymo komponentų, įskaitant ir ryšio infrastruktūrą, centrinius ir tarpinius valdymo serverius. Sistema užtikrina dvikryptį duomenų srautą tarp vartotojo ir elektros tiekėjo, leisdama automatiškai nuskaityti suvartojimo duomenis, stebėti tinklą realiuoju laiku ir efektyviau valdyti energijos paskirstymą. Toliau detalesnis kiekvieno sistemos komponento aprašymas ir veikimo principas pateikiamas 5 lentelėje.

5 lentelė. AMI sistemos komponentai jų aprašymas ir veikimo principai

Komponentas	Santrumpa ir jos paaiškinimas	Aprašymas ir veikimo principas
Išmanusis skaitiklis	SM (angl. <i>Smart Meter</i>)	Elektros suvartojimą ir kitus elektros tinklo parametrus stebintis įrenginys. Stebimi elektros tinklo parametrai kaupiami atmintyje ir reguliariai siunčiami į duomenų serverį. Skaitiklis dažniausiai duomenis perduoda PLC, RF ar mobiliuoju ryšiu, o vietinei komunikacijai gali naudoti P1, RS-485 ar kitas sąsajas bei protokolus.
Vietinis tinklas	HAN (angl. <i>home area network</i>)	Vietinis tinklas naudojamas įgalinti komunikaciją tarp išmaniųjų skaitiklių ir kitų vartotojo pusės duomenų perdavimo ar valdymo įrenginių. Dažniausiai šis tinklas yra naudojamas kartu su Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi ar kitais protokolais. Vietinis tinklas gali būti nenaudojamas, kai skaitiklis neturi vartotojui skirtų sąsajų arba ši funkcija išjungta tinklo operatoriaus.
Kaimynystės tinklas	NAN (angl. <i>neighborhood area network</i>)	Prieigos tinklas sujungia daugelį skaitiklių DCU ir užtikrina tinkamą duomenų surinkimą ir perdavimą iš daugelio įrenginių. Dažniausiai naudojamos RF, PLC ir panašios technologijos.
Duomenų koncentradorius	DCU (angl. <i>data concentrator unit</i>)	Tarpinis duomenų perdavimo mazgas, dažniausiai įrengiamas paskirstymo pastotėse. Šis įrenginys renka informaciją, gaunamą iš kaimynystės tinklo įrenginių, kurių skaičius gali svyruoti nuo dešimčių iki kelių šimtų. Koncentradorius duomenis gali agreguoti, buferizuoti ir valdyti ryšio sesijas, taip sumažindamas apkrovą centrinėms elektros tiekėjo sistemoms. Šis komponentas gali būti nebūtinai, jeigu įrenginiai jungiasi tiesiai į WAN.
Plačiajuostis tinklas	WAN (angl. <i>wide area network</i>)	Plačiajuostis tinklas yra komunikacijos tinklas, skirtas apsikeisti duomenimis tarp skirtingų įrenginių, paskirstytų per didelę teritoriją. Jis dažniausiai yra bendros paskirties ir turi didelį perdavimo greitį. WAN gali būti tiek mobilusis operatoriaus tinklas, tiek privatus elektros tiekėjo tinklas, todėl jis nebūtinai sutampa su viešuoju internetu. Konkrečiai AMI sistemoje jis naudojamas perduoti duomenis iš ir į centrinės sistemas.
Ryšio valdymo sistema	HES (angl. <i>head end system</i>)	Ryšio valdymo sistema yra atsakinga už ryšio palaikymą su skaitikliais ar duomenų koncentratoriais. Šis sistemos komponentas vykdo komandų

		siuntimą, stebi ryšio būseną ir esant klaidoms inicijuoja pakartotinius nuskaitymus arba pakartotinį perdavimą.
Skaitiklių duomenų saugojimo sistema	MDMS (angl. <i>meter data management system</i>)	Skaitiklių duomenų saugojimo sistema yra atsakinga už duomenų priėmimą iš HES, jų saugojimą ir perdavimą kitoms verslo sistemoms. Sistema taip pat atlieka duomenų validavimą, vertinimą ir formatų suvienodinimą.
Paskirstymo tinklo valdymo sistema	DMS (angl. <i>distribution management system</i>)	Paskirstymo tinklo valdymo sistema leidžia realiu ar beveik realiu laiku stebėti paskirstymo tinklą ir jį valdyti. Sistema naudoja SCADA sistemos pateikiamais duomenimis apie transformatorius, jungiklius ir kitus tinklo komponentus. DMS taip pat integruojasi su MDMS ir HES sistemomis, siekiant tiksliau modeliuoti tinklo apkrovas ir greičiau reaguoti į sutrikimus.
Sutrikimų valdymo sistema	OMS (angl. <i>Outage Management System</i>)	Sutrikimų sistema yra naudojama sutrikimams aptikti, lokalizuoti ir šalinti. Ji naudoja iš sistemos surinktais duomenimis, įskaitant elektros skaitiklių pateikiamus duomenis, kad nustatytų gedimo vietą. Tai leidžia tiksliai koordinuoti gedimo šalinimą.
Vartotojų valdymo sistema	CIS (angl. <i>Customer Information System</i>)	Vartotojų informacinė sistema yra centrinė duomenų bazė, kurioje saugoma informacija apie vartotoją, jo skaitiklius ir tarifus. Ši sistema integruojasi su MDMS ir naudojama sąskaitų formavimui bei klientų informavimui.
Kitos sistemos	-	Papildomos verslo sistemos gali būti naudojamos siekiant įgalinti saugumo paslaugas, atlikti papildomą duomenų analizę ar kitas tinklo administratoriui reikalingas paslaugas.

AMI komponentų pavyzdinis architektūros planas pateikiamas 1 pav. Čia galima matyti skirtingus tinklo sluoksnius – vartotojo lygio, ryšio lygio ir centrinio lygio. Vartotojo lygio sluoksnį sudaro įrenginiai, kurie įprastai matomi vartotojui – išmanieji skaitikliai ir vietinis tinklas [23, 24]. Toliau išskiriamas ryšio lygis, apimantis įrenginius ir komponentus, skirtus duomenims perduoti į centrinį sluoksnį: kaimynystės tinklas, duomenų koncentratorius ir plačiajuostis tinklas. Galiausiai apibrėžiamas centrinis sluoksnis, kuriame veikia stebėjimo ir valdymo sistemos, įskaitant HES, MDMS, DMS ir kitas sistemas. Verta paminėti, kad priklausomai nuo tinklo operatoriaus poreikių, tinklo architektūra gali būti modifikuojama. Pavyzdžiui, elektros skaitikliai su integruotu mobiliojo ryšio modemu gali tiesiogiai komunikuoti su HES per WAN, taip supaprastindami tinklo schemą.



1 pav. Tradicinė AMI sistemos architektūra ir standartiniai komponentai

1.3.3. Išmaniojo skaitiklio vietinės ir nuotolinės sąsajos

Išmanieji skaitikliai komunikacijai ir valdymui dažniausiai naudoja dviejų tipų sąsajas – vietinės prieigos ir nuotolinės komunikacijos. Vietinės prieigos sąsaja naudojama matavimo duomenims nuskaityti, trečiųjų šalių įrenginiams integruoti, taip pat diagnostikai ir konfigūracijai. Prie vietinės prieigos sąsajų galima priskirti optinį prievadą (D0) ir P1 vartotojo sąsają, o kai kuriuose sprendimuose laidinį M-Bus, RS-485 Modbus RTU ir RS-485 DLMS principais veikiančius sprendimus [25]. Toliau 6 lentelėje pateikiamas šių sąsajų detalesnis palyginimas.

6 lentelė. Elektros skaitiklių vietinių sąsajų parametrai ir paskirtis

Sąsajos pavadinimas	Fizinė sąsaja	Protokolas	Duomenų modelis	Paskirtis
Optinis prievadas (D0)	IEC 62056-21	IEC 62056-21	COSEM/OBIS	D0 optinis prievadas naudojamas valdymo informacijos nuskaitymui ir skaitiklio konfigūracijai. Prieiga prie šios sąsajos dažniausiai turi tik tinklo operatoriai arba gamintojai [25]. Kai kuriais atvejais prieiga suteikiama ir vartotojui [25]. Duomenys perduodami ASCII formatu.
P1 (Dutch smart meter requirements - DSMR)	RS-232, RJ12	IEC 62056-21	COSEM/OBIS	P1 sąsaja yra plačiai naudojama elektros skaitiklio duomenims nuskaityti. Ji periodiškai (kas 1 sekundę ar rečiau) pateikia elektros skaitiklio užfiksuotus tinklo ir suvartojimo parametrus ASCII formatu [26, 27]. Prie šios sąsajos dažnai būna prijungiami trečiųjų šalių įrenginiai, kurie leidžia duomenis perduoti į debesijos ar išmaniųjų namų sprendimus [26].
M-Bus (laidinis)	M-Bus 2 laidai	EN 13757-2	M-Bus specifinis TLV	Laidinė M-Bus sąsaja yra naudojama matavimo duomenų nuskaitymui iš apskaitos prietaisų, tokių kaip elektros ir vandens skaitikliai. M-Bus naudoja valdančiojo ir pavaldžiojo architektūrą (angl. <i>master-slave</i>), kai centrinis įrenginys surenka daugelio skaitiklių registruose sukauptus duomenis. Ši sąsaja dažniausiai taikoma nuotolinio duomenų surinkimo sistemose [27]. Duomenų apsikeitimui naudojamas dvejetainis formatas.
RS-485 Modbus RTU	RS-485	Modbus RTU	Gamintojo specifinis	Modbus RTU yra užklausomis pagrįstas komunikacijos protokolas, dažniausiai naudojamas su RS-485. Komunikaciją inicijuoja valdiklis, o kiti įrenginiai pateikia atsakymus, todėl duomenys perduodami tik esant užklausiai. Protokolas naudoja dvejetainį formatą, tačiau duomenys nėra standartizuoti, registrų reikšmės priklauso nuo gamintojo. Dėl paprastumo ir plačios integracijos Modbus RTU išlieka plačiai naudojamas pramoninėse sistemose [26].
RS-485 DLMS	RS-485	DLMS / HDLC	COSEM/OBIS	DLMS/COSEM per RS-485 yra dvikryptė komunikacija, dažniausiai realizuojama užklausų–atsakymų principu. Duomenų perdavimui naudojamas HDLC kadravimas, kuris užtikrina patikimą ryšį, o DLMS/COSEM apibrėžia duomenų struktūrą ir semantiką per COSEM objektų modelį ir OBIS kodus.

Be vietinių duomenų perdavimo sąsajų, išmanieji skaitikliai dažnu atveju turi ir integruotas ar papildomai integruojamas nuotolinio duomenų perdavimo sąsajas ar modulius. Šie sprendimai palaiko ryšį elektros tinklo operatoriaus infrastruktūra, tokia kaip DCU ar HES. Vartotojo prieiga prie tokių sąsajų dažniausiai yra apribota, o jas administruoti paprastai gali tik elektros tinklo operatorius. Tokiose sąsajose gali būti naudojamas laidinis PLC (angl. *Power Line Communication*) ryšys arba radijo ryšio moduliai, pavyzdžiui, LoRa, ZigBee, Wi-Fi, GSM/GPRS, NB-IoT ar LTE-M [28]. Šie sprendimai leidžia elektros tinklų operatoriams ne tik nuotoliniu būdu nuskaityti skaitiklio rodmenis, bet ir kai kuriais atvejais užtikrinti dvikryptį ryšį. Nuotolinio duomenų perdavimo ryšio technologijų palyginimas pateikiamas 7 lentelėje.

7 lentelė. Elektros skaitiklio nuotolinių sąsajų palyginimas

Ryšio technologija	Tipas	Perdavimo terpė	Taikomojo lygio protokolas	Paskirtis
PLC	Laidinis ryšys	Elektros linija	DLMS/COSEM, IEC 62056	PLC technologija leidžia duomenis perduoti žemos įtampos tinklu. Tai leidžia išnaudoti esamą infrastruktūrą, nenaudojant papildomos ryšio linijos. Vis dėlto perdavimo ryšio kokybę gali paveikti įvairūs triukšmai, kylantys tinkle.
LoRa/LoRa WAN	Radijo ryšys	Nelicencijuotas sub-GHz dažnis	DLMS/COSEM ar gamintojo specifinis	LoRa/LoRaWAN technologija leidžia perduoti duomenis ilgesniais nuotoliais, naudojant mažus duomenų paketus. Tai aktualu tais atvejais, kai nereikia perduoti didelio kiekio duomenų. Ši technologija taip pat aktuali, kai svarbus energetinis efektyvumas.
ZigBee		2,4 GHz	SEP	ZigBee technologija dažniausiai taikoma vietiniuose HAN tinkluose, kuriuose keli įrenginiai keičiasi nedidelės apimties duomenimis. Ji pasižymi mažu energijos suvartojimu ir gali perduoti duomenis per kitus tinklo (angl. <i>mesh</i>) įrenginius. Dėl to ši technologija tinka tais atvejais, kai svarbus stabilus ryšys tarp įrenginių.
Wi-Fi		2,4/5/6 GHz	IP (TCP/UDP) ar gamintojo specifinis	Wi-Fi technologija taip pat naudojama duomenų perdavimui belaidžiu ryšiu vietiniuose HAN tinkluose. Ji leidžia perduoti didesnę duomenų kiekį didesniu greičiu, palyginti su kitomis technologijomis. Wi-Fi dažniausiai taikoma ten, kur jau yra prieinama tinklo infrastruktūra ir nereikia labai mažo energijos suvartojimo.
GSM/GPRS	Mobilusis ryšys	mobiliojo operatoriaus tinklas	IP (TCP/UDP), DLMS/COSEM ar gamintojo specifinis	GSM/GPRS naudojama duomenų perdavimui per mobiliojo ryšio tinklus. Ji leidžia užtikrinti ryšį didesniais atstumais, naudojant esamą infrastruktūrą. Tačiau tai yra senesnė technologija, kurios naudojimas mažėja, nes mobiliojo ryšio operatoriai palaipsniui atsisako 2G tinklų.
NB-IoT				NB-IoT naudojama duomenų perdavimui per mobiliojo ryšio tinklus, siauresniais nei įprasta kanalais. Ji skirta mažos apimties duomenų perdavimui ir leidžia užtikrinti ryšį didesniais atstumais bei vietose, kur ryšio sąlygos yra sudėtingesnės, pavyzdžiui, rūsyje. Ši technologija pasižymi mažu energijos suvartojimu, todėl įrenginiai gali veikti ilgą laiką.

				Dėl to NB-IoT vis dažniau naudojama vietoje GSM/GPRS sprendimų.
LTE-M				LTE-M naudojama duomenų perdavimui per mobiliojo ryšio tinklus. Ji leidžia perduoti daugiau duomenų ir pasižymi mažesne delsa nei NB-IoT. Dėl to tinka tais atvejais, kai duomenys perduodami dažniau arba įrenginiai juda. Tačiau ši technologija sunaudoja daugiau energijos.

Taigi galima apibendrinti, kad išmanieji skaitikliai dažniausiai turi kelias sąsajas, kurios leidžia tiek perduoti duomenis į operatoriaus tinklą, tiek vietoje nuskaityti duomenis, atlikti diagnostiką ar prijungti trečiųjų šalių įrenginius.

1.3.4. Išmaniųjų skaitiklių pateikiami duomenys ir jų formatai

Išmanusis skaitiklis nuskaityti ir pateikia duomenis, reikalingus energijos apskaitai, tinklo būsenos stebėsenai ir įvykių analizei. Priklausomai nuo skaitiklio galimybių, naudojamo protokolo ir gamintojo konfigūracijos, skaitikliai gali pateikti skirtingus parametrus. Vis dėlto jų pateikiama informacija dažniausiai galima suskirstyti į kelias pagrindines kategorijas:

1. Įrenginio identifikacinė informacija. Šiai kategorijai galima priskirti serijinį numerį, aparatinės įrangos reviziją, programinės įrangos versiją ir kitą bendro pobūdžio informaciją apie įrenginį.
2. Kaupiamųjų registrų duomenys. Tai duomenys apie suvartotą arba į tinklą eksportuotą elektros energiją, kuri nuolatos kaupiama skaitiklio registruose.
3. Momentinių reikšmių duomenys. Čia patenka momentinės reikšmės, tokios kaip skirtingų fazių įtampa, aktyvioji ir reaktyvioji galia, dažnis ir kiti parametrai.
4. Elektros energijos kokybės informacija. Tai duomenys apie įtampos kryčius, galios koeficiento nuokrypius, fazių disbalansą ir kitus tinklo kokybės rodiklius.
5. Įvykių įrašai. Šioje kategorijoje pateikiama informacija apie užfiksuotus įvykius, pavyzdžiui, įtampos šuolius, jų skaičių ir fiksavimo laiką.
6. Papildoma informacija. Tai gali būti duomenys apie galimus skaitiklio pažeidimus, išplėstinę registrų informaciją ar kitus specifiniams taikymo atvejams reikalingus parametrus.

Kad šie duomenys būtų tinkamai integruoti į bendrą elektros tinklo stebėsenos sistemą, svarbu, kad jų formatai būtų aiškiai apibrėžti ir tinkamai interpretuojami. Tai ypač aktualu todėl, kad skirtingi skaitikliai ir kiti elektros įrenginiai gali naudoti nevienodus duomenų formatus.

Standartiškai skaitiklių pateikiami duomenų formatai gali būti dvejetainiai arba tekstiniai. Naudojamą formatą dažniausiai apibrėžia pats komunikacijos protokolas, pavyzdžiui, Modbus, DLMS/COSEM ar IEC 62056 standartų šeima. Tekstiniai formatai dažniausiai yra paprastesni ir lengviau interpretuojami žmogaus, o dvejetainiai leidžia efektyviau perduoti duomenis ir sumažinti perduodamų duomenų kiekį. Vienas iš dažniausiai Lietuvoje ir Europoje sutinkamų tekstinių formatų yra P1/DSMR. Šiame formate naudojamas COSEM/OBIS duomenų modelis, kurio pavyzdys yra pateiktas 1 išėties kodo laukelyje. Tokiu formatu daugelis išmaniųjų skaitiklių pateikia duomenis per vartotojo P1 sąsają kas 1, 10 ar daugiau sekundžių.

1 išėties kodas. GAMA150 išmaniojo elektros skaitiklio pateikiami P1/DSMR formato duomenys - telegrama

/EGM5SM110
0-0:1.0.0(240908212148W)

```
1-0:1.8.0(000021.028*kWh)
1-0:2.8.0(000000.003*kWh)
1-0:1.7.0(00.006*kW)
1-0:2.7.0(00.000*kW)
0-0:96.1.0(3034393839353535)
1-0:3.7.0(00.000*kvar)
1-0:4.7.0(00.007*kvar)
1-0:12.7.0(235.7*V)
1-0:31.7.0(000*A)
!35EF
```

Kaip galima pastebėti 1 išeities kodo pavyzdyje, duomenys dažniausiai žymimi pagal unikalų OBIS (angl. *Object Identification System*) kodą, kuris sudarytas pagal tokią struktūrą: A-B:C.D.E*F (dalis laukų yra neprivalomi). Tai yra vienas iš dažniausiai naudojamų būdų žymėti išmaniųjų elektros ir dujų skaitiklių duomenis. Vis dėlto tai gali priklausyti ir nuo naudojamo duomenų modelio. Taip pat galima paminėti, kad paketuose papildomai pateikiamas skaitiklio ar gamintojo modelis, o dažnu atveju pateikiama ir kontrolinė suma, kuri leidžia patikrinti paketo teisingumą.

1.4. Elektros tinklo stebėsenai naudojami duomenų perdavimo protokolai

Elektros tinklo stebėsenai naudojamos fizinės ryšio priemonės buvo apžvelgtos 1.3.3 skyriuje, tad šiame poskyryje bus papildomai analizuojami taikomojo lygmens protokolai. Šie protokolai apibrėžia, kaip duomenys perduodami tarp įrenginių, t. y. skaitiklių ir duomenų surinkimo sistemos, nepriklausomai nuo fizinio perdavimo lygmens.

1.4.1. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo protokolai ir jų taikymo scenarijai

Projektuojant elektros energijos stebėsenos sistemas, taikomojo lygmens ryšio protokolai parenkami atsižvelgiant į įrangos resursų apribojimus, ryšio kanalo savybes, duomenų perdavimo dažnį ir patikimumo reikalavimus. AMI ir AMR sistemose DLMS/COSEM laikomas vienu iš pagrindinių išmaniosios apskaitos protokolų, o MQTT, CoAP, HTTP dažniau taikomi IoT architektūrose, duomenų perdavimui, įrenginių valdymui arba integracijai su duomenų surinkimo sistemomis [29, 30]. Šiame skyrelyje analizuojamos ir lyginamos šių protokolų savybės ir pritaikomumas elektros energijos stebėsenos sistemoms.

MQTT (angl. *Message Queuing Telemetry Transport*) yra prenumeratos principu veikiantis ypač lengvas protokolas, paremtas TCP protokolu. Jis optimizuotas ribotų resursų įrenginiams ir nestabiliems ryšio kanalams, dėl to yra plačiai taikomas IoT sprendimuose. Duomenų apsikeitimui yra naudojamas centralizuotas brokeris, kuris priima žinutes iš skelbėjo (angl. *publisher*) ir perduoda prenumeratoriams (angl. *subscriber*). Protokolas palaiko tris patikimumo lygius (QoS 0, 1, 2), kurie leidžia pasirinkti pristatymo užtikrinimo lygį. Elektros skaitiklių duomenų perdavimo kontekste MQTT yra aktualus dėl mažo pridėtinio srauto ir lankstaus patikimumo mechanizmo.

CoAP (angl. *Constrained Application Protocol*) yra užklausų ir atsakymų modeliu paremtas taikomojo lygio protokolas, skirtas ribotų resursų įrenginiams. Jis remiasi UDP transporto protokolu, todėl jo ryšio sąnaudos ir resursų poreikis yra gerokai mažesnis, nei kitų TCP principais pagrįstų protokolų. CoAP veikimo modelis (dėl užklausų modelio) yra panašus į HTTP, tačiau CoAP paketai yra ženkliai mažesni. Protokolas palaiko patvirtintus (CON) ir nepatvirtintus (NON) pranešimus, taip suteikdamas tam tikrą perdavimo patikimumo kontrolę. Vis dėlto, esant dideliems paketų praradimams, šis protokolas dėl UDP principų yra mažiau tinkamas nestabiliems tinklams [31].

HTTP (angl. *Hypertext Transfer Protocol*) yra vienas iš plačiausiai naudojamų taikomojo lygmens protokolų. Protokolas realizuotas remiantis TCP transporto protokolu, užklausų ir atsakymų modeliui. HTTP turi ilgą istoriją ir yra labai plačiai naudojamas žiniatinklio paslaugoms, tad jo pagrindu realizuotos bibliotekos yra labai stabilios. Taip pat HTTP pasižymi puikiu suderinamumu su esama infrastruktūra, tačiau jo realizacija yra ganėtinai reikli resursams. Kiekviena užklausa reikalauja atskiro TCP ryšio užmezgimo, o protokolo antraštės yra žymiai didesnės. Dėl šios priežasties HTTP sukuria didesnę srautą, tačiau šio protokolo naudojimas gali būti naudingas siekiant suderinamumo su egzistuojančiais sprendimais.

DLMS/COSEM (angl. *Device Language Message Specification / Companion Specification for Energy Metering*) yra standartizuotas taikomojo lygmens protokolas, skirtas išmaniųjų skaitiklių duomenų nuskaitymui, konfigūravimui ir valdymui AMI sistemose. Protokolas apibrėžia duomenų modelį naudojant OBIS kodus ir COSEM objektų struktūrą, ryšio sesiją bei prieigos mechanizmus, dažniausiai realizuojamus per PLC, RS-485 ar optines sąsajas. Vis dėlto praktinis DLMS/COSEM taikymas paprastai reikalauja autentifikacijos ir šifravimo raktų, kuriuos administruoja elektros tinklo operatorius ir kurie trečiosioms šalims nėra prieinami [32]. Verta paminėti, kad dažniausiai skaitiklių gamintojai realizuoja tik dalį DLMS/COSEM funkcionalumo arba naudoja gamintojo specifinius plėtinius, kas apsunkina integravimą su kitomis sistemomis [32]. Tad nors šis protokolas yra standartizuotas, jo realizacija ir praktinis naudojimas iš esmės yra apsunkintas.

Toliau šie protokolai yra lyginami pagal šias savybes: transporto protokolą, ryšio modelį; pridėtinį srautą, patikimumo mechanizmą, paskirtį, bei prieigos apribojimus. Apibendrintas palyginimas pateikiamas 8 lentelėje.

8 lentelė. Dažniausiai AMI ir IoT sistemose naudojamų taikomojo lygmens protokolų palyginimas

Savybė \ Protokolas	MQTT	CoAP	HTTP	DLMS/COSEM
Transporto protokolas	TCP	UDP	TCP	TCP/RS-485/PLC
Ryšio modelis	Skelbėjo / Prenumeratoriaus	Užklausa / Atsakymas	Užklausa / Atsakymas	Užklausa / Atsakymas
Pridėtinis srautas	Mažas	Labai mažas	Didelis	Vidutinis
Patikimumo mechanizmas	QoS 0/1/2	CON/NON	TCP lygmeniu	Sesijos lygmeniu
Paskirtis	Bendros paskirties	Bendros paskirties	Bendros paskirties	Apskaitos infrastruktūra
Prieigos apribojimai	Nėra	Nėra	Nėra	Operatoriaus kontrolė

Iš palyginimo matyti, kad MQTT, CoAP ir HTTP suteikia daugiau lankstumo kuriant elektros energijos stebėsenos sprendimus, o DLMS/COSEM dažniau siejamas su standartizuota, operatoriaus valdoma apskaitos infrastruktūra.

1.4.2. Duomenų perdavimo patikimumo mechanizmai

Duomenų perdavimo patikimumo mechanizmai leidžia užtikrinti, kad siunčiami duomenys pasiektų gavėją, net ir esant nestabiliam ryšiui. Skirtingi duomenų perdavimo protokolai šią problemą sprendžia skirtingais mechanizmais [30]. Šiame skyriuje analizuojami 1.4.1 skyriuje apžvelgtų duomenų perdavimo protokolų patikimumo mechanizmai ir kaip jie gali prisidėti prie stabilaus perdavimo užtikrinimo.

TCP transporto protokolas, naudojamas MQTT, HTTP ir DLMS/COSEM protokolų, patikimumą realizuoja naudodamas patvirtinimų (angl. ACK – *acknowledgment*) mechanizmą. Kiekvienas perduotas duomenų segmentas turi būti patvirtintas gavėjo, jeigu šis patvirtinimas nėra sulaukiamas per nustatytą laiką, segmentas automatiškai siunčiamas iš naujo. Toks mechanizmas iš esmės garantuoja, kad duomenys bus pristatyti jeigu tinklo trukdžiai yra nedideli. Tačiau tai sukelia papildomą delsą ir tinklo apkrovą, ypač kai ryšys yra nestabilus ir pakartotinai išsiųstų duomenų skaičius auga.

MQTT protokolas papildomus patikimumo užtikrinimo būdus realizuoja taikomojo lygio dalyje, t. y. apibrėžiant tris kokybės lygius - QoS. Toks mechanizmas užtikrina, kad duomenys ne tik pasiektų žinučių apsikeitimo brokerį, bet ir reikalingus gavėjus. QoS 0 lygiu duomenų pranešimas siunčiamas vieną kartą be jokio patvirtinimo – tai greičiausias, tačiau mažiausiai patikimas režimas. QoS 1 užtikrina, kad pranešimas bus pristatytas bent vieną kartą, tačiau dėl pakartojimų galimas dubliavimas. QoS 2 naudoja keturių etapų rankos paspaudimo mechanizmą (angl. *four-way handshake*), garantuojantį lygiai vieną pristatymą, tačiau tai reikalauja daugiausia laiko ir papildomų apsikeitimų pranešimais.

CoAP protokolas, naudojantis UDP transporto protokolą, palaiko kelis pranešimų siuntimo tipus, kuriuose taikomi skirtingi patikimumo užtikrinimo mechanizmai. Vienas iš jų yra patvirtinamasis pranešimų siuntimas (angl. CON – *Confirmable*). Šiuo atveju gavėjas, gavęs pranešimą turi išsiųsti ACK atsakymą, o jo negavęs siuntėjas pranešimą po tam tikro laiko pakartoja. Kitas būdas remiasi nepatvirtinamaisiais pranešimais (angl. NON – *Non-Confirmable*), kurie siunčiami nereikalaujant ACK patvirtinimo. Vis dėlto verta paminėti, kad CoAP protokolas naudoja užklausų ir atsakymų modelį. Tai reiškia, kad net siunčiant pranešimą NON lygmeniu, negavus atsakymo į užklausą, pranešimas vis tiek gali būti pakartotas. Šie mechanizmai leidžia CoAP neperkrauti tinklo ir įrenginių resursų, tačiau šio protokolo klaidų kompensavimo galimybės yra prastesnės nei kitų protokolų, veikiančių TCP pagrindu.

AMI kontekste duomenų perdavimo patikimumas yra labai svarbus, nes išmaniųjų skaitiklių duomenys yra pagrindas HES, MDMS ir OMS sistemoms [33]. Taip pat periodinis duomenų siuntimas yra būtinas apskaitos tikslams užtikrinti, kur svarbūs tikslūs ir nuoseklūs duomenys. Papildomi tinklo stebėsenos duomenys suteikia vertingos informacijos apie tinklo būklę, tačiau jų trumpalaikiai perdavimo praradimai, nors ir nepageidaujami, paprastai nekelia didelių problemų. Vis dėlto nuolatinis ar sisteminis duomenų praradimas gali neigiamai paveikti energijos suvartojimo apskaitą, apsunkinti anomalijų aptikimą ir sumažinti bendros sistemos duomenų kokybę. Todėl patikimumo mechanizmų pasirinkimas išlieka aktualus kriterijus vertinant protokolų tinkamumą elektros tinklo duomenų stebėsenos sistemoms.

1.5. Komeraciniai išmaniųjų skaitiklių duomenų surinkimo sprendimai

Augant išmaniųjų skaitiklių įdiegimų skaičiui Lietuvoje ir Europoje, rinkoje atsiranda nemažai komercinių sprendimų, kurie leidžia nepriklausomai nuo elektros tiekėjo nuskaityti skaitiklio pateikiamus duomenis. Duomenų nuskaitymas dažniausiai vyksta naudojant standartizuotą P1/DSMR sąsają, aprašytą 1.3.3 ir 1.3.4 skyriuose. Nuskaitytus sąsajos duomenis galima integruoti į namų automatikos ar elektros energijos stebėsenos sistemas. Verta paminėti, kad egzistuojantys komerciniai sprendimai skiriasi savo techninėmis savybėmis, naudojamais komunikacijos

protokolais ir atvirumo lygiu. Detalesnė populiariausių ar lengvai prieinamų komercinių sprendimų palyginimo informacija analizuojama 9 lentelėje.

9 lentelė. Komercinių išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo sprendimų palyginimas

Sprendimas	Duomenų pateikimo sąsaja	Ryšio sąsaja	Duomenų paskirties vieta	Atviro kodo sprendimas	Integravimo galimybės	Potenciali auditorija	Kaina
HomeWizard Energy	Mobili aplikacija, HTTP API	Wi-Fi	Gamintojo serveris, vietinis serveris	Ne	Home assistant	Vartotojai	24,95€
SlimmeLezer+	MQTT, HTTP	Wi-Fi	Vietinis serveris	Dalinis	Home Assistant, Domoticz, Homey	Vartotojai	18,00€
Smart Meter WiFi Gateway	MQTT, HTTP	Wi-Fi	Vietinis serveris, gamintojo serveris	Ne	Home Assistant, Domoticz, MQTT brokeris	Vartotojai	29,95€
Homey Energy Dongle	Mobili aplikacija	Wi-Fi	Gamintojo serveris	Ne	Homey ekosistema	Vartotojai	39€
Navitus P1 AMR	Įvairus (AMR)	PLC, RF, GSM/LTE	AMR serveris	Ne	AMR sistemos, MDMS	Profesionalai	Neskelbiama
Solarman P1-2W	HTTP API, Mobilinė aplikacija	Wi-Fi, Bluetooth	Gamintojo serveris, vietinis serveris	Ne	Solarman Smart app, HEMS, saulės inverteriai	Vartotojai	29€

Remiantis atliktu palyginimu galima pastebėti, kad rinkoje dominuoja uždaro kodo produktai. Tarp apžvelgtų sprendimų nėra tokio, kuris leistų visiškai valdyti duomenų nuskaitymo ir perdavimo procesus. Iš dalies atviras yra SlimmeLezer+ sprendimas, kurio programinė įranga grindžiama ESPHome platforma, tačiau išeities kodas pateikiamas tik dalinai. Vartotojams skirti sprendimai dažniausiai yra orientuoti į gamintojo debesijos infrastruktūrą, kas palengvina integraciją, tačiau kelia duomenų privatumo ir ilgalaikio palaikymo klausimus. Ryšio protokolų požiūriu vartotojų segmente dominuoja MQTT ir HTTP protokoliai, o profesionaliuose sprendimuose naudojami specializuoti AMR protokoliai. Taip pat pastebimas aiškus kainų skirtumas, vartotojų sprendimai kainuoja nuo 18 iki 39 eurų, o profesionalių sprendimų kainos neskelbiamos, kas leidžia spėti apie žymiai aukštesnę kainą. Verta paminėti, kad nėra komercinių sprendimų skelbiančių apie galimybę įgalinti optimizuotą (agreguotą, įvykiais grįstą ar panašų) perdavimą. Apibendrinant galima pasakyti, kad nors komercinių sprendimų prieinamų rinkoje yra nemažai, nė vienas iš aptartų sprendimų nėra skirtas komunikacijos protokolų eksperimentiniam tyrimui ar palyginimui.

1.6. Elektros tinklo stebėsenos duomenų surinkimo optimizacijos metodai

Daugelis 1.5 skyriuje aprašytų sprendimų duomenų perdavimą atlieka realiuoju laiku arba naudojant decimaciją ir perduodant tik 5, 10 ar 30 minučių reikšmes. Nors tokie sprendimai yra pakankami suvartojimo stebėsenai, išsamesnei duomenų analizei reikalingas didesnis perdavimo dažnis. Vieno

P1/DSMR neapdoroto pranešimo dydis gali siekti nuo 100 B iki 2 kB, o tai vidutiniškai sudaro nuo 8 iki 172,8 MB duomenų per dieną. Tokia apimtis gali gerokai apkrauti sistemą, todėl verta apsvarstyti papildomus optimizuotus sprendimus. Šiame poskyryje pateikiami ir aprašomi metodai, galintys sumažinti perduodamų duomenų kiekį neprarandant svarbių duomenų.

1.6.1. Duomenų paketavimas ir agregavimas

Duomenų paketavimas ir agregavimas siūlo keletą būdų, kaip galima sumažinti perduodamų duomenų kiekį. Agregavimas tai būdas apibendrinti duomenų imtį, pateikiant tokius rodiklius kaip vidurkis, mediana, suma, maksimali ir minimali vertė ir kitus statistinius įverčius. Duomenų paketavimas, dažniausiai naudojamas komunikacijoje, gali reikšti kelių paketų sujungimą į vieną didesnę vienetą. Kas gali sumažinti pridėtinių išlaidų (angl. *overhead*) kiekį, kurį sukelia kiekvienas atskirai išsiunčiamas paketas, srautas ar sąsaja.

Elektros tinklo stebėsenos kontekste abu paminėti būdai gali būti pritaikomi praktiškai. Duomenų agregavimas gali būti naudojamas tada, kai centrinei sistemai nėra būtina gauti kiekvieno elektros skaitiklio pateikiamo pranešimo, tačiau būtina išlaikyti pagrindines tinklo būsenos stebėsenos funkcijas. Pavyzdžiui, bendram elektros suvartojimo kiekio stebėjimui pakanka periodinių suvartotos energijos reikšmių, kurias skaitikliai gali pateikti kas 10–30 minučių. Tokiu atveju duomenys siunčiami ne kas sekundę, nors skaitiklis techniškai gali tai atlikti, bet pateikiant tik per 10–30 minučių susidariusį reikšmių skirtumą. Didžiausias šio metodo trūkumas yra tai, kad gali būti prarandama svarbi informacija apie trumpus įtampos kritimus, galios šuolius ar kitus tinklo būsenos pokyčius. Dėl šios priežasties svarbu, kad agregavimo langas ir agreguojami parametrai būtų parenkami pagal konkrečią užduotį, o ne vien pagal norimą duomenų sumažinimo santykį.

Duomenų paketavimas į vientisą struktūrą gali būti naudingas tais atvejais, kai skaitiklio pateikiamo paketo dydis yra mažas ir nereikia labai greitos sistemos reakcijos. Šis sprendimas remiasi principu, kad duomenys yra kaupiami buferyje, iki tol kol buferis užsipildo. Užsipildžius buferiui visi sukaupti duomenys yra supakuojami į vieną paketą ir išsiunčiami į duomenų serverį. Tokiu būdu duomenų paketas turi tik vieną antraštę, vietoj to, kad kiekvienam paketui būtų sukuriama atskira antraštė. Tai leidžia sumažinti antraščių informacijos kiekį ir efektyviau išnaudoti tinklo resursus, ypač tada, kai perduodami labai maži paketai. Literatūroje minima, kad duomenų paketavimas gali padidinti pralaidumą, sumažinti antraščių sukuriamą papildomą apkrovą ir pagerinti tinklo išteklių panaudojimą, tačiau kartu gali padidinti perdavimo delsą, todėl toks sprendimas nėra tinkamas realaus laiko ar labai mažos delsos reikalaujančioms sistemoms [34]. Taip pat svarbu paminėti, kad paketavimo efektyvumas priklauso nuo buferio dydžio, duomenų generavimo dažnio ir leistinos delsos, nes mažo srauto atveju buferis gali būti užpildomas lėtai, o tai papildomai atitolina duomenų išsiuntimą. Verta paminėti, kad taikant šią metodiką vieno duomenų paketo pametimas gali sukelti didesnius nuostolius, nes didelė dalis matavimų bus pamesta lyginant su įprastu transliavimu. Dėl šios priežasties paketavimas turėtų būti taikomas tada, kai svarbiau sumažinti tinklo apkrovą negu užtikrinti patikimumą.

1.6.2. Įvykiais grįstas duomenų perdavimas

Taikant įvykiais grįstą perdavimą, elektros tinklo stebėsenos duomenys perduodami ne periodiškai (transliavimo principu), o tik tada, kai užfiksuojamas reikšmingas stebimų parametrų pokytis. Išmaniųjų elektros skaitiklių atveju toks veikimo mechanizmas ypač naudingas, kadangi didžiąją laiko dalį vartojimo profilis kinta nežymiai. Reikšmingas aktyviosios galios, įtampos ar kitų

parametrų pasikeitimas gali rodyti įvykius, į kuriuos reikėtų reaguoti [35]. Kadangi elektros skaitiklis arba jo duomenis apdorojantis priedas analizę atlieka vartotojo pusėje, tokios sistemos dažniausiai priskiriamos kraštinėms sistemoms (angl. *edge*). Jų taikymas leidžia dalį sprendimų priimti vietoje, nepriklausant nuo centralizuoto serverio. Vis dėlto tam reikia patikimų algoritmų, gebančių tiksliai aptikti reikšmingus įvykius. Vienas iš tokių algoritmų siūlomas remiantis skaitiklio pateikiama aktyviosios galios informacija [35]. Šis metodas fiksuoja aktyviosios galios šuolius vartotojo skaitiklyje, o vėliau juos palygina su suminiu skaitikliu [35]. Kadangi šiame darbe šuolio palyginimas nėra pagrindinis analizės objektas, toliau trumpai aprašomas straipsnyje taikomas aktyviosios galios šuolio aptikimo metodas. Šį procesą sudaro penki atskiri etapai, pateikiami 1–5 formulėmis.

$$|\Delta P(t_i, t_e)| \geq \Delta P_{min} \quad (1)$$

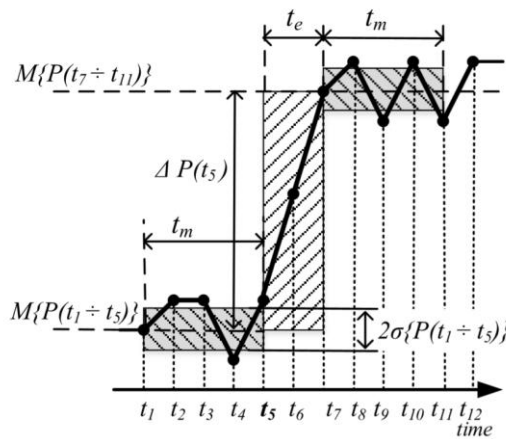
$$\sigma\{P((t_i - t_m) \div t_i)\} \leq \sigma_{P_{max}} \quad (2)$$

$$\sigma\{P((t_i + t_e) \div (t_i + t_m + t_e))\} \leq \sigma_{P_{max}} \quad (3)$$

$$t_e \leq t_{e_{max}} \quad (4)$$

$$|P(t_{j+1}) - P(t_j)| \geq p_{min}, \text{ kai } t_i \leq t_j \leq t_i + t_e \quad (5)$$

čia t_i - šuolio aptikimo momento laikas; t_e - šuolio briaunos trukmė (laikas, per kurį vyksta perėjimas tarp dviejų galios lygių); t_m - stebėjimo langas prieš ir po šuolio, naudojamas vidurkiui skaičiuoti; ΔP - šuolio dydis, apskaičiuotas kaip vidurkių skirtumas po ir prieš šuolį; ΔP_{min} - minimali riba, žemiau kurios šuolis atmetamas kaip triukšmas; $\sigma_{P_{max}}$ - maksimalus leistinas galios svyravimas prieš ir po šuolio; $t_{e_{max}}$ - maksimali leistina briaunos trukmė; $P(t_j)$ - galios reikšmė j -uoju laiko momentu šuolio briaunos metu; p_{min} - minimalus leistinas galios pokytis tarp gretimų mėginių briaunos metu; t_j - konkretus laiko momentas šuolio briaunos intervale. Apžvelgti kintamieji vizualiai pateikiami 2 pav.



2 pav. Aktyviosios galios šuoliui nustatyti naudojami kintamieji [35]

Pateiktos formulės aprašo sąlygas, pagal kurias nustatomas aktyviosios galios šuolis. 1 formulė nurodo, kad šuolis turi būti pakankamai didelis, nedideli pokyčiai atmetami kaip triukšmas. 2 ir 3 formulės nurodo, kad prieš šuolį ir po jo galia turi būti stabili. 4 formulė nurodo, kad šuolis turi vykti greitai, per ilgai trunkantis šuolis yra atmetamas. 5 formulė nurodo, kad galios kitimas šuolio metu turi būti nuoseklus, t. y. nuosekliai didėti arba mažėti. Apibendrinant skyrelį galima teigti, kad toks ar panašus šuolio aptikimo mechanizmas gali būti praktiškai naudojamas siekiant nustatyti aktyvias tinklo vietas ir siųsti duomenis tik tada, kai reikia.

1.7. Apibendrinimas ir tyrimo krypties detalizavimas

Šiame skyriuje atlikta literatūros analizė parodė, kad elektros tinklo stebėseną tampa vis aktualesnė dėl decentralizuotos energijos gamybos ir kintančio apkrovų pobūdžio. Atliktas stebėsenos priemonių palyginimas atskleidė, kad išmaniųjų skaitiklių galimybės viršija įprastą suvartojimo stebėseną, jie gali pateikti informaciją apie įtampos šuolius, dažnį, harmonikas ir kitus elektros tinklo parametrus. Šie parametrai gali būti panaudoti platesnei analizei, pavyzdžiui, anomalijų aptikimui, tinklo diagnostikai ar elektros energijos kokybės vertinimui. Vis dėlto, nors skaitikliai geba atlikti sekundinius matavimus, praktikoje jų duomenys vis dar perduodami 10–15 minučių intervalais, o tai riboja trumpalaikių įvykių aptikimą.

AMI architektūros analizė parodė, kad operatoriaus naudojama infrastruktūra yra sudėtinga ir daugiapakopė, tačiau vietinė išmaniųjų elektros skaitiklių P1/DSMR sąsaja suteikia galimybę nuskaityti duomenis neinvaziniu, nuo operatoriaus nepriklausomu būdu. Naudojant šią vietinę sąsają duomenis galima nuskaityti sekundine raiška. Taikomojo lygmens protokolų palyginimas atskleidė, kad MQTT, CoAP ir HTTP yra plačiausiai taikomi IoT sprendimuose, o DLMS/COSEM, nors ir standartizuotas ir optimizuotas skaitikliams, praktikoje yra apribotas operatoriaus administruojamais raktais ir gamintojų specifiniais plėtiniais.

Komercinių sprendimų apžvalga parodė, kad rinkoje daugiausia siūlomi uždaro kodo sprendimai. Dėl to jų veikimą ar duomenų perdavimo būdus sunku įvertinti eksperimentiškai. Norint sumažinti perduodamų duomenų kiekį, apžvelgiami keli mažinimo būdai, pavyzdžiui, duomenų paketavimas ir siuntimas tik įvykus reikšmingam pokyčiui.

Apibendrinant galima teigti, kad literatūroje trūksta kompleksinio palyginimo, kaip taikomieji protokolai, paketavimo lygiai, patikimumo mechanizmai ir siuntimo modeliai veikia išmaniojo skaitiklio duomenų perdavimo sistemos charakteristikas. Remiantis šia problema, pasirinkta kurti nepriklausomą stebėsenos sistemą, kuri nuskaitytų duomenis per P1/DSMR sąsają ir perduoda juos į serverį per Wi-Fi tinklą, leidžiant detaliau iširti minėtų optimizacijos sprendimų poveikį.

Naudojamo ESP32-C6 valdiklio (VRA) programinė įranga susideda iš skirtingų kompiliavimo komponentų ir bibliotekų. Dalis komponentų reikalingi programinės įrangos kūrimo aplinkai (angl. *build system*). Šie komponentai yra *ESP-IDF* karkasas, suteikiantis pagrindinius operacinės sistemos komponentus, ir *PlatformIO*, naudojamas projekto aplinkai paruošti. Kitą dalį sudaro bibliotekos, reikalingos naudojamo įrenginio veikimui realizuoti. *coap* biblioteka buvo importuota iš *Espressif* siūlomų komponentų sąrašo, o DSMR paketų nuskaitymo biblioteka *p1-reader* buvo sukurta atskirai, nes nebuvo rasta tinkamų alternatyvų. Detalesnis naudojamų programinių komponentų aprašymas pateikiamas 10 lentelėje.

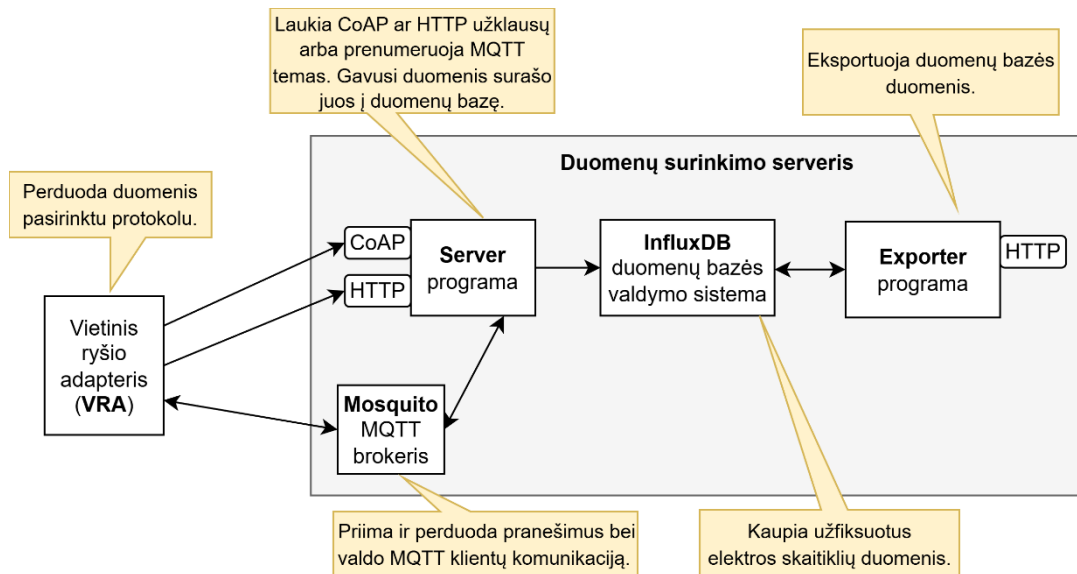
10 lentelė. VRA programinėje įrangoje naudojami skirtingi komponentai ir jų reikšmės

Komponentas	Aprašymas	Nuoroda į projektą / išities kodą
<i>PlatformIO</i>	Programavimo aplinka, skirta įterptinių sistemų, tokių kaip ESP32, programinei įrangai kurti ir konfigūruoti. Ji leidžia valdyti projekto nustatymus ir integruoti išorines bibliotekas. Taip pat <i>PlatformIO</i> užtikrina, kad projektą būtų galima kurti skirtingose operacinėse sistemose.	https://github.com/platformio/platformio-core
<i>ESP-IDF</i>	Oficialus kompanijos <i>Espressif Systems</i> programavimo karkasas, skirtas ESP32 valdiklių programinei įrangai kurti. Šis karkasas yra visavertis programavimo įrankių rinkinys (SDK), turintis dažniausiai naudojamas bibliotekas, tvarkykles ir <i>RTOS</i> integraciją.	https://github.com/espressif/esp-idf
<i>coap</i>	<i>coap</i> yra C kalba realizuota <i>libcoap</i> bibliotekos versija, pritaikyta ESP32 valdikliams. Ši biblioteka leidžia įgyvendinti tiek CoAP kliento, tiek serverio funkcionalumą. Biblioteka pasižymi nedideliu dydžiu ir operavimo reikalavimais.	https://components.espressif.com/components/espressif/coap
<i>p1-reader</i>	DSMR pranešimų skaitymo biblioteka, realizuota C kalba. Naudojant šią biblioteką galima nuskaityti DSMR protokolu perduodamų pranešimų turinį.	https://github.com/KTU-ANODETEL/p1-reader

Darbe taip pat naudotos SNMP, JSON, HTTP ir Wi-Fi funkcijoms įgyvendinti skirtos bibliotekos. Kadangi šios bibliotekos jau integruotos į *ESP-IDF* karkasą, jų papildomai diegti ar integruoti nereikia, todėl šiame darbe jos plačiau neapžvelgiamos.

2.2.2. Serverio programinė įranga

Siekiant, kad duomenų surinkimo sistema tinkamai funkcionuotų, reikalinga specializuota programinė įranga ir bibliotekos. Kadangi ši sistema kuriama eksperimentiniais tikslais, kuriems reikalingas didelis lankstumas ir išplėčiamumas, o optimali veikimo sparta nėra esminis reikalavimas, serverio dalį pasirinkta realizuoti *Python* programavimo kalba. Siekiant mobilumo ir bendrų konfigūravimo galimybių, serveryje naudojami komponentai konteinerizuojami naudojant *Docker* technologiją. Serverį sudaro keturios pagrindinės paslaugos, kurių veikimas gali kisti priklausomai nuo konfigūracijos: *Server*, *Mosquitto*, *InfluxDB* ir *Exporter*. *Server* paslauga yra viena iš esminių sistemos dalių, gebanti priimti duomenis naudojant HTTP, CoAP ar MQTT protokolus. Gavus ir apdorojus duomenis, jie perduodami į *InfluxDB* duomenų bazės valdymo sistemą, kur duomenys saugomi ilgesnį laiką. Duomenims iš duomenų bazės išgauti naudojama *Exporter* paslauga, kuri leidžia atsisiųsti pasirinkto laikotarpio duomenis tolesnei analizei esant poreikiui. Verta paminėti, kad serveris gali būti konfigūruojamas priimti tik vieną pasirinktą protokolą vienu metu. Jei pasirenkamas MQTT protokolas, papildomai paleidžiama MQTT brokerio paslauga, koordinuojanti klientų komunikaciją. Bendras duomenų surinkimo serverio paslaugų vaizdas pateikiamas 5 pav.



5 pav. Duomenų surinkimo serverio paslaugos ir jų atliekamos funkcijos

Taip pat verta aptarti svarbiausius programinės įrangos komponentus ir bibliotekas bei jų paskirtį aptariamoje sistemoje. Toliau 11 lentelėje pateikiami šių komponentų aprašymai.

11 lentelė. Serverio dalyje naudojami komponentai ir bibliotekos

Komponentas	Aprašymas	Nuoroda į projektą / išeities kodą
<i>Docker</i> ir <i>Docker Compose</i>	<i>Docker</i> ir <i>Docker Compose</i> naudojami paslaugų paleidimui, izoliavimui ir valdymui. Kiekviena paslauga vykdoma atskirame konteineryje, o jų bendra konfigūracija aprašoma vienu tekstiniu failu. Tai palengvina sistemos paleidimą ir diegimą kitoje aplinkoje.	https://www.docker.com/
<i>Mosquitto</i> MQTT brokeris	<i>Mosquitto</i> brokeris, naudojamas MQTT žinučių apsikeitimui tarp įrenginių ir sistemos komponentų. Jis priima MQTT žinutes ir perduoda jas prenumeruojantiems klientams. Naudojamas tada, kai duomenų perdavimui pasirinktas MQTT protokolas.	https://mosquitto.org/
<i>Paho</i> biblioteka	<i>Paho</i> biblioteka suteikia MQTT funkcionalumą <i>Python</i> aplinkoje. Naudojant ją galima prenumeruoti temas ir publikuoti žinutes skirtingomis temomis. Ši biblioteka yra viena iš plačiausiai naudojamų MQTT <i>Python</i> bibliotekų.	https://eclipse.dev/paho/
<i>Flask</i> biblioteka	Biblioteka, naudojama HTTP užklausų priėmimui ir apdorojimui serverio pusėje. Naudojant <i>Flask</i> biblioteką galima aprašyti užklausų maršrutus (angl. <i>API endpoints</i>), priimti duomenis ir grąžinti atsakymus klientui.	https://flask.palletsprojects.com/en/stable/
<i>aiocoap</i>	Biblioteka, skirta CoAP serverio realizacijai <i>Python</i> aplinkoje. Ji naudojama CoAP užklausoms priimti, apdoroti ir atsakymams grąžinti.	https://aiocoap.readthedocs.io/en/latest/
<i>InfluxDB 2</i>	Laiko eilučių (angl. <i>Time-series</i>) duomenų bazės valdymo sistema, naudojama istoriniams duomenims kaupti ir saugoti. Ji tinka duomenims, kurie keičiasi laiko atžvilgiu, pavyzdžiui, matavimams ar įvykių įrašams.	https://www.influxdata.com/

Visi paminėti komponentai reikalingi stabiliam serverio programinės įrangos veikimui kuriamoje elektros skaitiklių duomenų surinkimo sistemoje užtikrinti.

2.3. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo konfigūracijos

Šiame skyrelyje aptariamos skirtingos elektros skaitiklių duomenų perdavimo konfigūracijos, pagal kurias bus toliau atliekamas duomenų perdavimo sistemos vertinimas. Analizuojamas taikomųjų protokolų pasirinkimas, paketavimo strategijos, patikimumo užtikrinimo mechanizmai, duomenų siuntimas pagal įvykius bei sistemos išplėčiamumo galimybės.

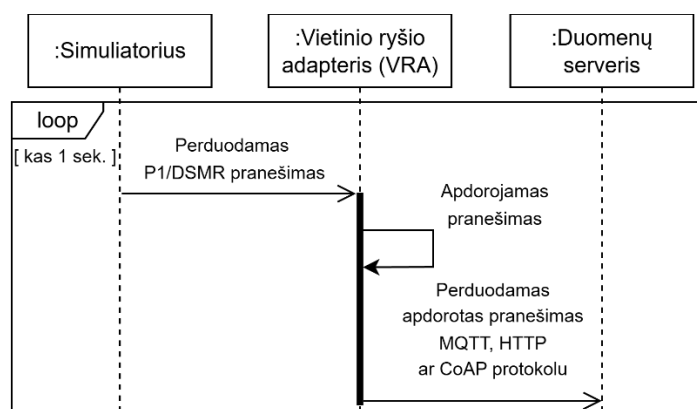
2.3.1. Taikomųjų protokolų parinkimas

Vienas iš svarbių duomenų perdavimo sistemos komponentų yra taikomojo lygmens duomenų apsikeitimo protokolas. Protokolas apibrėžia, kaip duomenys perduodami tarp nutolusių įrenginių – VRA ir centrinio duomenų serverio. Remiantis atlikta analize (1.4.1 skyriuje), galima teigti, kad protokolai turi reikšmingą įtaką perduodamų duomenų kiekiui ir skaičiavimo išteklių poreikiui. Todėl šiame darbe vertinama, kaip skirtingų protokolų taikymas veikia to paties tipo stebėsenos duomenų perdavimą.

Šiame darbe pasirinkta duomenų perdavimo sistemą vertinti naudojant šiuos tris taikomuosius protokolus:

1. MQTT – pasirinktas dėl plataus taikymo IoT sprendimuose, nedidelio išteklių poreikio ir patikimumo lygio (QoS) mechanizmo;
2. HTTP – pasirinktas dėl plataus taikymo ir suderinamumo su įvairiomis informacinėmis sistemomis;
3. CoAP – pasirinktas dėl mažo papildomų duomenų kiekio ir nedidelio skaičiavimo išteklių poreikio.

Taikomųjų protokolų pasirinkimo perdavimo konfigūracija vaizduojama vizualiai sekų diagrama 6 pav.



6 pav. Taikomųjų protokolų pasirinkimo konfigūracija vaizduojama UML sekų diagrama

Šiame darbe kiekvienas iš pasirinktų protokolų laikomas atskiru elektros skaitiklio duomenų perdavimo konfigūracijos variantu. Toks skirstymas suteikia pagrindą tolesnei jų analizei ir vertinimui.

2.3.2. Duomenų paketavimo strategijos

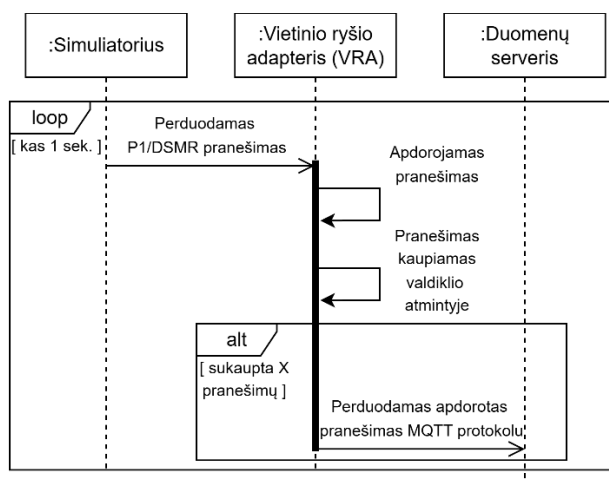
Šiame darbe taip pat analizuojama, kaip skirtingos paketavimo konfigūracijos veikia duomenų perdavimo sistemą. Įprastu atveju į bendrą duomenų surinkimo serverį siunčiamas vienas paketas

kaskart, kai elektros skaitiklis pateikia informaciją, t. y. kas sekundę. Tačiau svarbu įvertinti, kaip keičiasi sistemos veikimas, kai į vieną paketą sudedami ne vieno nuskaitymo duomenys, o per kelias iteracijas sukauptos reikšmės. Taip galima nustatyti, kaip duomenų paketavimas veikia bendrą perduodamų duomenų kiekį ir tinklo, VRA bei serverio apkrovą.

Šiame darbe pasirinkta vertinti šias paketavimo konfigūracijas:

1. kai siunčiamas 1 paketas kas 1 sekundę – bazinė konfigūracija;
2. kai 5 nuskaitytos reikšmės kaupiamos į 1 paketą, siunčiamą kas 5 sekundes;
3. kai 10 nuskaitytų reikšmių kaupiamos į 1 paketą, siunčiamą kas 10 sekundžių;
4. kai 30 nuskaitytų reikšmių kaupiamos į 1 paketą, siunčiamą kas 30 sekundžių.

Duomenų paketavimo konfigūracijos scenarijus vaizduojamas 7 pav.



7 pav. Duomenų paketavimo konfigūracija vaizduojama UML diagrama

Remiantis perdavimo konfigūracijomis, bus vertinama, ar duomenų perdavimo sistema tiesiškai reaguoja į kintantį duomenų kiekį siunčiamame pakete, ir ar didėjant paketavimo lygiui atsiranda nukrypimų, galinčių turėti įtakos sistemos efektyvumui.

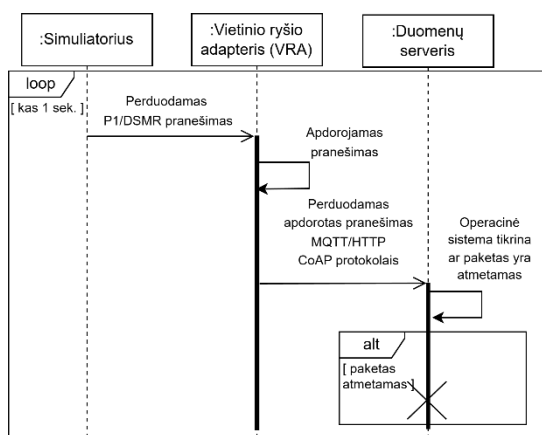
2.3.3. Duomenų perdavimo patikimumo užtikrinimo mechanizmai

Kita svarbi duomenų perdavimo sistemos savybė yra gebėjimas užtikrinti duomenų pristatymą esant nestabilioms ryšio sąlygoms. Dažnu atveju elektros skaitikliai gali būti įdiegiami vietose, kur ryšys gali būti silpnas ar nestabilus, todėl duomenų perdavimo užtikrinimas tampa labai aktualus. Todėl svarbu įvertinti, kaip skirtingi duomenų perdavimo mechanizmai sugeba toleruoti perduodamų paketų praradimus. Siekiant įvertinti šią savybę, šio darbo metu bus atliekamas duomenų perdavimo vertinimas esant simuliuiotam atsiktiktiniam paketų praradimui.

Duomenų perdavimo sistemos veikimas bus analizuojamas simuliuiuojant praradimus tiek išsiunčiamam (angl. *egress*) ir gaunamam (angl. *ingress*) srautui, pagal šias konfigūracijas:

1. 0 % paketų praradimas – bazinė konfigūracija;
2. 5 % paketų praradimas – nedidelis paketų praradimo lygis;
3. 20 % paketų praradimas – padidintas paketų praradimo lygis;

Duomenų perdavimo sistemos veikimo scenarijus, kai simuliuiuojamas paketų praradimas vaizduojamas UML sekų diagrama pateikiamas 8 pav.



8 pav. UML sekų diagrama, vaizduojanti duomenų perdavimo konfigūraciją simuliuojant paketų praradimą

Paketų praradimo lygiai parinkti taip, kad apimtų skirtingas ryšio sąlygas, nuo standartinės optimalios būsenos iki pablogėjusios ryšio kokybės. Tai leidžia įvertinti, kaip didėjantis paketų praradimas veikia duomenų perdavimo patikimumą ir nuo kurio lygio taikomi patikimumo mechanizmai tampa nebepakankami.

Verta pažymėti, kad paketų praradimas galimas tiek išsiunčiamame, tiek gaunamame duomenų sraute. Todėl vertinant dvikryptę komunikaciją nestabiliomis ryšio sąlygomis, daroma prielaida, kad abiejose kryptyse paketų praradimas yra vienodas ir statistiškai nepriklausomas. Tad remiantis nepriklausomų įvykių tikimybių daugybos taisykle, bendras praradimo lygis gali būti didesnis. Jis apskaičiuojamas pagal 6 formulę.

$$L = 1 - (1 - p)^2; \tag{6}$$

čia L – bendras galimas dvikryptės komunikacijos praradimo lygis, p – vienai komunikacijos kryptčiai taikomas paketų praradimo lygis.

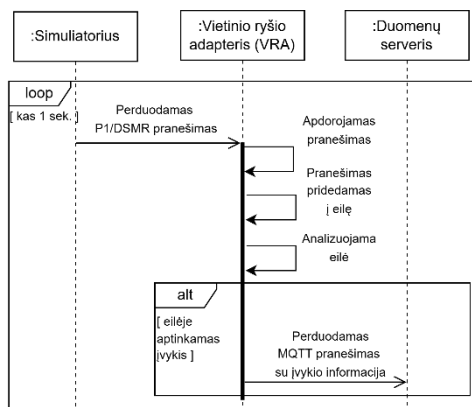
2.3.4. Duomenų siuntimo modeliai

Papildomas sprendimas, galintis sumažinti perduodamų duomenų kiekį yra elektros skaitiklių duomenų analizė kraštinėse (angl. *edge*) sistemose ir duomenų siuntimas pagal poreikį [37]. Įprastai duomenų perdavimo sistemos atlieka periodinį duomenų perdavimą, tačiau didelė dalis duomenų gali rodyti stabilias ir iš anksto nuspėjamas tendencijas. Todėl galima optimizuoti duomenų surinkimą ir siuntimą, siunčiant duomenis tik tada, kai įvyksta reikšmingas įvykis tinkle. Tokie įvykiai dažniausiai siejami su galios ar įtampos šuoliais ir kritimais. Šiame darbe bus vertinama, ar toks įvykiais grįstas įvykių aptikimo metodas leidžia sumažinti siunčiamų duomenų kiekį ir perdavimo sistemos apkrovą. Įvykių aptikimas bus realizuojamas remiantis 1.6.2 skyriuje aprašytu algoritmu.

Šiame darbe aprašomoje sistemoje bus vertinami šie duomenų nuskaitymo ir perdavimo modeliai:

1. periodinis – bazinis modelis, kai duomenys siunčiami iš karto juos gavus;
2. įvykiais grįstas – duomenys siunčiami tik tada, kai pastebimas reikšmingas galios pokytis.

Duomenų siuntimo konfigūracija, kai duomenys perduodami įvykiais grįsta logika, pateikiama UML sekų diagrama 9 pav.



9 pav. Duomenų siuntimo konfigūracija, kai duomenys perduodami įvykiais grįšta logika

Konfigūracija vertinama naudojant kelis duomenų rinkinius: aktyvaus tinklo ir mažesnio aktyvumo tinklo. Tikėtina, kad toks įvykiais grįstas modelis gali sumažinti siunčiamų duomenų kiekį ir duomenų perdavimo sistemos apkrovą.

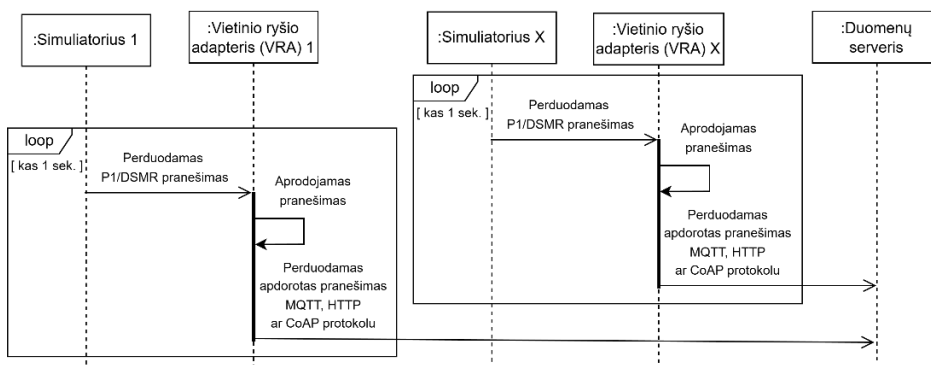
2.3.5. Paskirstytos sistemos dydžio įtaka duomenų perdavimui

Kita svarbi duomenų surinkimo sistemos savybė yra gebėjimas išlaikyti stabilų duomenų perdavimą paskirstytai sistemai plečiantis. Realiose apskaitos infrastruktūrose AMI/AMR (aprašytose 1.3.2 skyriuje) vienu metu duomenis perduoda ne keletas, o daugybė elektros stebėsenos įrenginių. Todėl esamu atveju svarbu įvertinti sistemos elgseną, kai duomenis perduoda ne vienas, o keletas įrenginių vienu metu. Toks vertinimas pasako, ar duomenų perdavimo sistemos apkrova auga tiesiškai pridėjus papildomų VRA, ar atsiranda nukrypimų, galinčių turėti įtakos serverio bei tinklo veikimui.

Šiame darbe pasirinkta vertinti šias paskirstytos sistemos konfigūracijas:

1. kai duomenis perduoda 1 VRA – bazinė konfigūracija;
2. kai duomenis perduoda 2 VRA vienu metu;
3. kai duomenis perduoda 3 VRA vienu metu.

Duomenų perdavimo konfigūracija, kai perduodami kelių skaitiklių duomenys pateikiama 10 pav.



10 pav. UML sekų diagrama vaizduojanti kelių skaitiklių duomenų perdavimo scenarijų

Remiantis šiomis konfigūracijomis, bus vertinama, kaip kinta bendra duomenų perdavimo sistemos apkrova didėjant prijungtų VRA skaičiui. Taip pat vertinama, ar pastebimi nukrypimai nuo tiesinės priklausomybės, galintys rodyti sistemos išplečiamumo (angl. *scalability*) galimybes.

2.4. Elektros tinklo stebėsenos sistemos duomenų perdavimo strategijų vertinimo kriterijai

Norint įvertinti kiekvieną galimą konfigūraciją, apibrėžtą 2.3 poskyryje, svarbu nustatyti tinkamus vertinimo kriterijus, pagal kuriuos būtų galima atlikti skirtingų sprendimų palyginimą. Toliau 12 lentelėje pateikiamas vertinamų kriterijų sąrašas. Kriterijai suskirstyti į kelias kategorijas, apimančias skirtingas sistemos dalis: tinklo apkrovą, perdavimo patikimumą, valdiklio apkrovą, serverio apkrovą ir energijos sąnaudas. Tokiu būdu galima palyginti, kaip skirtingos konfigūracijos veikia tinklo apkrovą, perdavimo patikimumą, sistemos resursų naudojimą ir energijos sąnaudas.

12 lentelė. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo sistemos vertinimo kriterijai ir jų aprašymas

Kategorija	Parametrai	Vienetai	Aprašymas ir paaiškinimas, kodėl šis kriterijus reikalingas
Tinklo apkrova	Išsiųstų duomenų kiekis	kB	Bendras iš įrenginio išsiųstų duomenų kiekis. Reikšmė apskaičiuojama sumuojant visus paketus, kurių antraštėje šaltinio adresas (angl. <i>source address</i>) nurodytas VRA MAC adresas. Į šį parametą įtraukiami visi protokolų duomenys, įskaitant ir SNMP, DHCP, DNS ir kitus protokolus. Šis parametras parodo, kiek vieno įrenginio išsiunčiami duomenys apkrauna tinklą skirtingose konfigūracijose.
	Gautų duomenų kiekis	kB	Bendras VRA gaunamų duomenų kiekis. Sumuojami visi paketai, kurių antraštėje paskirties adresas (angl. <i>destination address</i>) nurodytas VRA MAC adresas. Į šį kiekį įtraukiami visi protokolų duomenys. Parametras naudojamas įvertinti tinklo apkrovą skirtingose konfigūracijose, kai analizuojamas VRA siunčiamas srautas.
	Santykinės tinklo išlaidos (angl. <i>overhead</i>)	%	Papildomų antraščių ir paketų duomenų kiekis, reikalingas perduoti informaciją. Parametras leidžia įvertinti, kokią papildomą apkrovą tinklui sukelia pasirinktas duomenų perdavimo protokolai. Įskaičiuojant visus išsiunčiamus ir gaunamus paketus.
Perdavimo patikimumas	Pristatymo koeficientas	%	Santykis tarp sėkmingai pristatytų ir išsiųstų paketų. Paketai atpažįstami naudojant papildomai pridėtą paketų sekos numerį. Parametras apibūdina kiek duomenų buvo pristatyta, lyginant pagal tai kiek buvo išsiųsta.
	E2E (angl. <i>end to end</i>) pristatymo laikas	ms	Laikas nuo duomenų priėmimo VRA iki jų gavimo serveryje. Rodiklis naudojamas bendram sistemos reakcijos laikui palyginti tarp skirtingų konfigūracijų. Šis parametras nėra sistemos našumo rodiklis, bet pateikia papildomos informacijos apie skirtingų protokolų galimybes perduoti duomenis realiuoju laiku.
Valdiklio apkrova	Operatyviosios atminties naudojimas	kB	VRA operatyviosios atminties naudojimas. Šis rodiklis leidžia įvertinti, kaip duomenų perdavimas veikia VRA atminties išteklius. Šis parametras įvertina ir statinę, ir dinaminę atminties dalis.
	Dinaminės atminties fragmentacija	%	Operatyviosios atminties susiskaidymo lygis, nusakantis didžiausio galimo paskirstyti atminties bloko sumažėjimą. Didelė fragmentacija rodo didesnę VRA operatyviosios atminties apkrovą ir gali lemti sistemos nestabilumą.
	Procesoriaus apkrovimas	%	VRA procesoriaus apkrova, apskaičiuojama kaip aktyvaus darbo laiko ir bendro darbo laiko santykis. Rodiklis parodo, kaip duomenų perdavimas apkrauna VRA procesorių.
Serverio apkrova	Procesoriaus apkrovimas	%	Serverio procesoriaus apkrova duomenų priėmimo metu. Vertinamas tik duomenų perdavimo sistemos konteinerių procesoriaus naudojimas. Rodiklis leidžia įvertinti, kaip skirtingos konfigūracijos apkrauna serverio skaičiavimo išteklius.
	Operatyviosios atminties naudojimas	%	Duomenų perdavimo sistemos konteinerių operatyviosios atminties naudojimo lygis duomenų priėmimo metu. Rodiklis leidžia įvertinti, kaip skirtingos konfigūracijos veikia sistemos atminties išteklių naudojimą.

Elektros sąnaudos	Srovė	mA	Valdiklio vartojama elektros srovė, pagal kurią galima įvertinti energijos sąnaudas. Tai ypač svarbu, nes P1 duomenų sąsajos tiekiamą srovė yra ribota [27].
-------------------	-------	----	--

Nors didžioji dalis vertinamų kriterijų yra aiškiai apibrėžti, kitų apskaičiuojamų parametrų reikšmės reikėtų patikslinti. Tokie kriterijai yra tinklo išlaidos, VRA operatyviosios atminties naudojimas, pristatymo koeficientas ir E2E pristatymo laikas. Santykinių tinklo išlaidų apskaičiavimo formulė pateikiama 7 formule:

$$O = \frac{\sum_{i=1}^K P_i - \sum_{j=1}^N D_j}{\sum_{j=1}^N D_j} \cdot 100 \%;$$
 (7)

čia O - santykinės tinklo išlaidos; P_i – i -ojo analizuojamo tinklo paketo dydis; D_j – j -ojo išsiųsto duomenų (aplikacijos) paketo dydis; K – perduotų tinklo paketų skaičius; N – įrenginio išsiųstų duomenų paketų skaičius.

VRA (ESP32-C6) operatyviosios atminties naudojimo vertinimas atliekamas remiantis tiek statinės, tiek dinaminės atminties naudojimu, kuris išreiškiamas 8 formule:

$$M = M_{IRAM} + M_{DRAM} + (M_{HT} - M_{HF});$$
 (8)

čia M – bendras SRAM naudojimas, M_{IRAM} – procesoriaus instrukcijoms naudojama atminties dalis, M_{DRAM} – atminties dalis naudojama statiniams kintamiesiems, M_{HT} – bendras dinaminės atminties dydis (angl. *heap*), M_{HF} – laisvas dinaminės atminties dydis.

Pristatymo koeficiento apskaičiavimas pateikiamas 9 formulėje:

$$P = \frac{N_g}{N_i} \cdot 100 \%;$$
 (9)

čia P – pristatymo koeficientas, N_g – serverio duomenų bazėje išsaugotų paketų skaičius, N_i – VRA išsiųstų paketų skaičius.

E2E pristatymo laikas apskaičiuojamas remiantis 10 formule:

$$T_i = t_{s,i} - t_{v,i};$$
 (10)

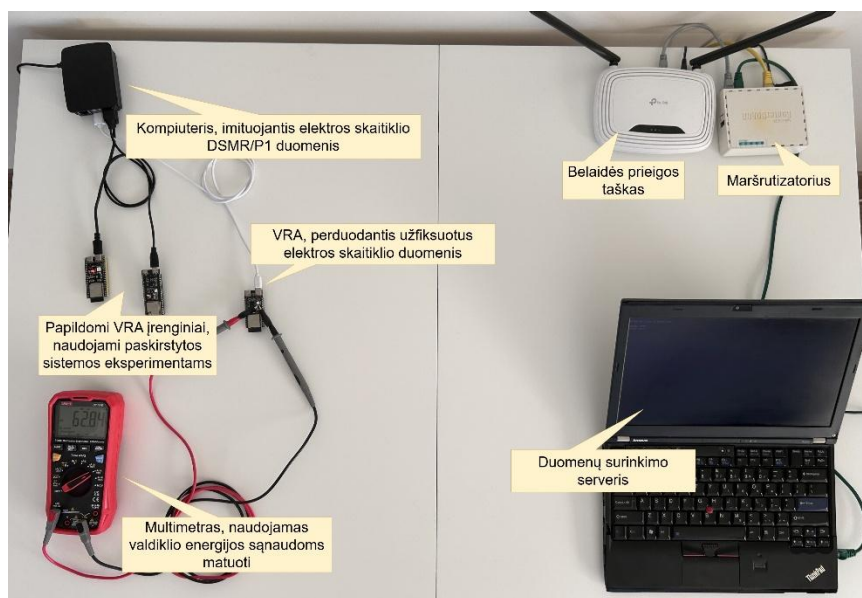
čia T_i – i -ojo pranešimo perdavimo laikas; $t_{s,i}$ – i -ojo pranešimo gavimo laikas serverio pusėje, $t_{v,i}$ – i -ojo pranešimo gavimo laikas VRA iš elektros skaitiklio ar alternatyvaus šaltinio.

Kadangi dalis vertinamų kriterijų apibūdina panašius sistemos veikimo aspektus, lyginant skirtingas konfigūracijas kai kurie jų nėra vertinami atskirai. Taip siekiama išvengti perteklinio sistemos vertinimo. Taip pat verta paminėti, kad vertinant laike kintančius rodiklius, priklausomai nuo poreikio gali būti analizuojamos maksimalios, vidutinės reikšmės.

2.5. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo eksperimento sistema

Eksperimentams atlikti naudojama duomenų surinkimo ir perdavimo sistema, realizuota pagal 2.1 skyrelyje aprašytą duomenų perdavimo sistemos architektūrą. Tokia sistema leidžia įvertinti duomenų perdavimo procesą nuo duomenų šaltinio iki serverio, keičiant perdavimo protokolą ir kitas aprašytas konfigūracijas. Ją sudaro DSMR/P1 duomenų šaltinis – *Raspberry Pi 3 Model B* kompiuteris, kuris periodiškai, kas sekundę, siunčia simuliuotus paketus pagal duomenų rinkinį. Šiuos duomenis priima ir apdoroja ESP32-C6 pagrindu sukurtas VRA, naudodamas programuojamą

USB sąsaja. VRA taip pat yra prisijungęs prie belaidės prieigos taško ir naudodamas belaidį Wi-Fi ryšį, pasirinktu protokolu perduoda duomenis į serverį. VRA duomenų perdavimo protokolas ir konfigūracija nustatomi perrašant VRA programinę įrangą. Belaidės prieigos taškas *TP-Link TL-WR841N* yra prijungtas prie maršrutizatoriaus *Mikrotik hEX*, kuris sukuria atskirą potinklį visam duomenų perdavimo tinklui. Maršrutizatorius taip pat atlieka ugniasienės funkciją, kad pašaliniai paketai neapkrautų tinklo ir analizės metu būtų vertinami tik tyrimui reikalingi paketai. Be to, maršrutizatorius naudojamas fiksuoti perduodamų paketų informaciją ir įrašyti ją į .pcap failus naudojantis *Packet Sniffer*¹ funkcionalumu. Serverio funkciją atlieka nešiojamasis kompiuteris *Lenovo ThinkPad X220* turintis 8 GB operatyviosios atminties ir *Intel(R) Core(TM) i5-2520M* procesorių. Šiame kompiuteryje talpinama programinė įranga, teikianti eksperimentui reikalingas paslaugas. Papildomai šioje sistemoje yra naudojamas multimetras UT161E, galintis nuskaityti VRA valdiklio naudojamą srovę. Pagal specifikaciją multimetromu nuolatinės srovės matavimo tikslumą sudaro 0,5 % rodmenų paklaida ir 10 mažiausio rodomo skaitmens vienetų paklaida. Matuojant apie 31 mA srovę 0,01 mA skiriamosios gebos mA diapazone, bendra matavimo paklaida yra apie 0,26 mA. Eksperimentų metu multimetromu duomenys nuskaityti kas 0,1 sekundės per USB sąsają. Pagrindiniai tokios duomenų surinkimo ir perdavimo sistemos komponentai pavaizduoti 11 pav.



11 pav. Eksperimentų metu naudojama duomenų surinkimo sistema ir jos pagrindiniai komponentai

Kadangi darbe naudojami ne realiuoju laiku stebimi elektros tinklo duomenys, o simuliuoti duomenys, svarbu, kad jie kuo labiau atspindėtų realią situaciją. Todėl buvo pasirinkta naudoti laisvai prieinamą duomenų rinkinį *ANODOTEL Part 1 Dataset No. 1: Experimental Power Event Measurements*². Šiame duomenų rinkinyje stebėjimai buvo atlikti universiteto aplinkoje, siekiant įrašyti pavyzdinius elektros tinklo naudojimo modelius. Šio darbo metu šie duomenys bus simuliuojami ir perduodami VRA, gebančiam juos apdoroti ir išsiųsti į duomenų serverį.

Siekiant atlikti duomenų perdavimo sutrikimo simuliaciją, buvo pasirinkta naudoti Linux aplinkoje realizuotą tinklo valdymo įrankio iproute2 funkciją *tc* (angl. *traffic control*) ir *iptables*. Šis įrankis leidžia atlikti srauto valdymo ir kontrolės (angl. *traffic shaping*) veiksmus, tokius kaip paketų

¹ *Packet sniffer* naudojimo instrukcija <https://help.mikrotik.com/docs/spaces/ROS/pages/8323088/Packet+Sniffer>

² Duomenų rinkinys prieinamas GitHub platformoje: https://github.com/KTU-ANODOTEL/Anodotel_part1_dataset_no1

praradimo simuliacija, papildomos delšos pridėjimas [38]. Šiame darbe bus naudojamas tik tolygus atsitiktinis paketų praradimas, kai kiekvieno perduodamo paketo praradimo tikimybė yra lygi nustatytam procentui. Paketų praradimo simuliacija bus atliekama serverio tinklo įvesties sąsajoje.

2.6. Elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo sistemos eksperimentų planas ir eiga

Šiame skyrelyje pateikiamas eksperimentų planas, skirtas įvertinti 2.3 skyrelyje apibrėžtas duomenų perdavimo konfigūracijas pagal 2.4 skyrelyje nustatytus vertinimo kriterijus. Eksperimento metu bus keičiamos duomenų perdavimo konfigūracijos: bandomi skirtingi taikomojo lygmens protokolai (MQTT, HTTP, CoAP), duomenų paketavimo dydžiai (1, 5, 10 ir 30 nuskaitymų viename pakete), nustatomi paketų praradimo lygiai (0 %, 5 %, 20 %), duomenų siuntimo modeliai (periodinis ir įvykiais grįstas), bei vertinamos sistemos išplėčiamumo galimybės (naudojant 1, 2, 3 VRA). Šios konfigūracijos bus vertinamos pagal perduotų ir gautų duomenų kiekį, santykinę tinklo pridėtines išlaidas, paketų pristatymo koeficientą, E2E pristatymo laiką, valdiklio dinaminės atminties fragmentaciją, valdiklio ir serverio procesoriaus apkrovą, serverio operatyviosios atminties naudojimą bei valdiklio srovės sąnaudas. Siekiant objektyvaus palyginimo visuose bandymuose bus išlaikomos vienodos testavimo sąlygos: bandymuose naudojamas vienodas įvesties dažnis (1 Hz), bandymo trukmė (10 min., t. y. 600 nuskaitymų), vienoda duomenų seka ir ta pati belaidžio tinklo aplinka, detaliau aprašyta 2.5 skyriuje.

Eksperimentai suskirstyti į penkias pagrindines grupes. Toks skirstymas leidžia atskirai įvertinti pagrindinių parametru įtaką ir padeda išvengti perteklinių bandymų. Apibendrintas eksperimentų planas pateikiamas 13 lentelėje.

13 lentelė. Duomenų perdavimo sistemos apibendrintas eksperimento planas

Grupė	Tikslas	Keičiami parametrai	Pastovūs parametrai
A	Palyginti protokolus	Taikomojo lygmens protokolas: MQTT, HTTP, CoAP	Vieno skaitiklio nuskaitymo duomenys viename pakete, periodinis siuntimas, 0 % paketų praradimas
B	Įvertinti paketavimo poveikį	Paketavimo dydis: 1, 5, 10 ir 30 nuskaitymų viename pakete	MQTT, periodinis siuntimas, 0 % paketų praradimas
C	Įvertinti protokolų patikimumą esant paketų praradimui	Taikomojo lygmens protokolas (MQTT, HTTP, CoAP) ir paketų praradimo lygis (0 %, 5 %, 20 %) ir patikimumo užtikrinimo mechanizmų naudojimas.	Vieno skaitiklio nuskaitymo duomenys viename pakete, periodinis siuntimas
D	Palyginti duomenų siuntimo modelius	Duomenų siuntimo modelis: periodinis, įvykiais grįstas.	MQTT protokolas, vieno skaitiklio nuskaitymo duomenys viename pakete, 0 % paketų praradimas
E	Palyginti sistemos veikimą gaunant duomenis iš keleto VRA	Keičiamas aktyvių naudojamų VRA kiekis.	Vieno skaitiklio nuskaitymo duomenys viename pakete, periodinis siuntimas, 0 % paketų praradimas

Eksperimentai atliekami nuosekliai, pradedant nuo A grupės. Ši grupė naudojama baziniams protokolų įverčiams gauti ir jų skirtumams nustatyti. Šios grupės bandymams atlikti nereikia papildomų tinklo trikdžių ar specialios siuntimo logikos. B grupė skirta įvertinti, kaip paketavimo dydis keičia tinklo apkrovą ir sistemos komponentų išteklių naudojimą, kai vietoje vieno nuskaitymo perduodami keli nuskaitymai viename pakete. Kadangi šiame scenarijuje pagrindinis tiriamasis veiksnys yra paketavimo dydis, bandymai atliekami naudojant vieną pasirinktą bazinį protokolą –

MQTT, vietoj trijų atskirų protokolų. C grupė skirta įvertinti, kaip skirtingi protokolai elgiasi esant blogesnėms ryšio sąlygoms ir didėjant paketų praradimui. Šioje grupėje taip pat analizuojama, ar protokolų patikimumo užtikrinimo mechanizmai, pavyzdžiui, MQTT QoS, gali sumažinti paketų praradimo poveikį. D grupėje lyginami duomenų siuntimo modeliai, siekiant nustatyti, ar įvykiais grįstas modelis, kai duomenys perduodami pagal įvykį ir periodiškai fiksuojant būseną, gali reikšmingai sumažinti tinklo apkrovą ir energijos sąnaudas, palyginti su periodiniu siuntimu. Galiausiai E grupė vertina sistemos išplėčiamumo galimybes, kaip sistema elgiasi integruojant daugiau VRA įrenginių, kurie pastoviai siunčia elektros skaitiklio duomenis.

Kiekviena eksperimento konfigūracija kartojama tris kartus. Rezultatai pateikiami naudojant vidutines, maksimalias reikšmes arba parodant pasiskirstymą. Rezultatų analizėje skirtingos konfigūracijos lyginamos siekiant nustatyti, kuri duomenų perdavimo strategija užtikrina geriausią kompromisą tarp duomenų kiekio, patikimumo ir informatyvumo.

2.7. Tyrimo metodologijos apibendrinimas

Šiame skyriuje pateikta metodologija, kuria remiantis atliekama paskirstyto žemosios įtampos elektros tinklo matavimo duomenų perdavimo analizė ir vykdomi eksperimentiniai bandymai. Metodologijoje apibrėžiama sistemos architektūra, aprašomi naudojami aparatinės ir programinės įrangos sprendimai, duomenų perdavimo konfigūracijos, vertinimo kriterijai. Taip pat numatoma eksperimentų eiga, leidžianti palyginti skirtingas duomenų perdavimo konfigūracijas ir įvertinti jų poveikį sistemos veikimui bei apkrovai.

Pirmiausiai aprašomas žemosios įtampos elektros tinklo stebėsenos duomenų perdavimo modelis, imituojantis AMI tinkle vykstančius duomenų mainus. Tokia sistema yra neinvazinė ir nepriklausoma nuo elektros tinklo operatoriaus infrastruktūros. Naudojamas aparatinis sprendimas, paremtas ESP32 valdikliu (VRA), leidžia bandymus atlikti tiek su realiu elektros skaitikliu, tiek su iš anksto įrašytais duomenimis. Taip pat aprašomi pagrindiniai programinės įrangos komponentai ir bibliotekos, naudojamos VRA programuoti: *PlatformIO*, *ESP-IDF*, *coap*, *p1-reader*. Taip pat pateikiama serverio daliai reikalinga programinė įranga: *Docker*, *Mosquitto*, *Paho*, *Flask*, *Aiocoap*, *InfluxDB 2*. Šios priemonės užtikrina kontroliuojamas bandymų sąlygas ir leidžia analizuoti, kaip skirtingos konfigūracijos keičia duomenų perdavimo procesą.

Metodologijoje taip pat išskirtos pagrindinės tiriamos duomenų perdavimo konfigūracijos: taikomojo lygmens protokolai (*HTTP*, *MQTT*, *CoAP*), duomenų paketavimo strategijos (1, 5, 10 ir 30 nuskaitymų viename pakete), duomenų perdavimas esant skirtingiems paketų praradimo lygiams (0 %, 5 %, 20 % praradimo lygiai), duomenų siuntimo modeliai (periodinis ir įvykiais grįstas) bei sistemos išplėčiamumo galimybės (naudojant 1, 2, 3 VRA). Šios konfigūracijos vertinamos pagal tai, kaip jos veikia perduodamų duomenų kiekį, tinklo apkrovą, duomenų pristatymo patikimumą, VRA ir serverio išteklių naudojimą bei energijos sąnaudas.

Pabaigoje aprašomas testavimo stendas ir eksperimentų planas. Pagrindiniai eksperimente naudojami komponentai yra kompiuteris, simuliuojantis duomenų srautą, VRA, galintis nuskaityti ir perduoti duomenis, prieigos taškas, maršrutizatorius ir duomenų surinkimo serveris. Tyrime taikomas laisvai prieinamas duomenų rinkinys *ANODOTEL Part 1 Dataset No. 1: Experimental Power Event Measurements*. Eksperimentų plane pateikiama bandymų seka: nuo bazinių bandymų pereinama prie paketavimo vertinimo, protokolų patikimumo analizės esant tinklo sutrikimams ir pasirinktų duomenų siuntimo modelių vertinimo.

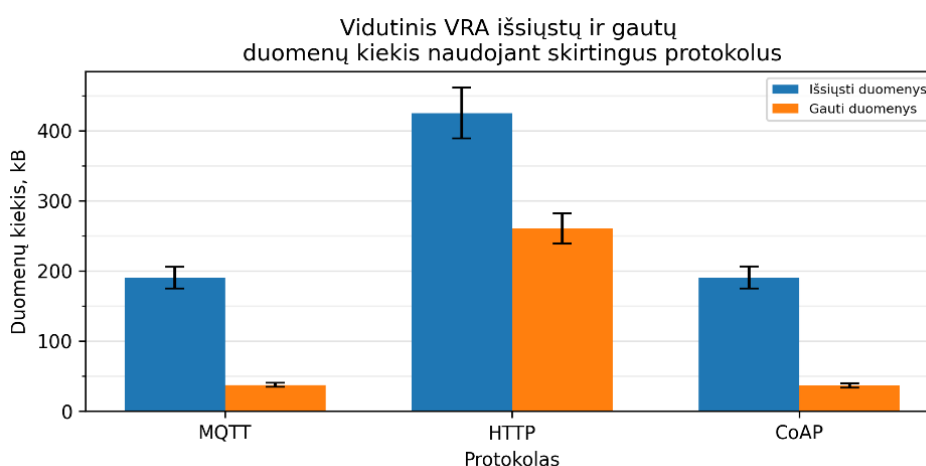
3. Išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo alternatyvų vertinimo rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami ir aptariami eksperimentų rezultatai, gauti vertinant skirtingas išmaniųjų elektros skaitiklių duomenų surinkimo alternatyvas. Pirmiausia aptariami taikomųjų protokolų rezultatai, toliau analizuojami duomenų paketavimo strategijų rezultatai, duomenų perdavimo patikimumas esant paketų praradimui, įvykiais grįstas duomenų siuntimo modelis ir išplečiamumo galimybių analizė. Šio skyriaus pabaigoje apibendrinami rezultatai ir pateikiamos rekomendacijos.

3.1. Taikomųjų protokolų bazinis vertinimas

Šiame poskyryje pateikiama informacija, vertinanti skirtingų protokolų elgseną, standartinėmis perdavimo sąlygomis, siunčiant kiekvieną elektros skaitiklio užfiksuotą rodmenį kas sekundę. Šiuo atveju atliekamas vertinimas pagal: duomenų kiekį, perteklines išlaidas, pristatymo laiką, VRA operatyviosios atminties naudojimą, fragmentaciją, procesoriaus apkrovimą, serverio apkrovą ir elektros sąnaudas. Kiti parametrai nėra vertinami, nes jų reikšmėms ši konfigūracija įtakos nedaro.

Atlikus taikomųjų protokolų MQTT, HTTP ir CoAP bazinį vertinimą, buvo pastebėti pirmieji skirtumai. Užfiksuoti išsiųstų ir gautų duomenų kiekio rezultatai pateikiami stulpeline diagrama 12 pav.



12 pav. Vidutinis išsiųstų ir gautų duomenų kiekis naudojant skirtingus protokolus siųsti elektros skaitiklio fiksuojamus duomenis

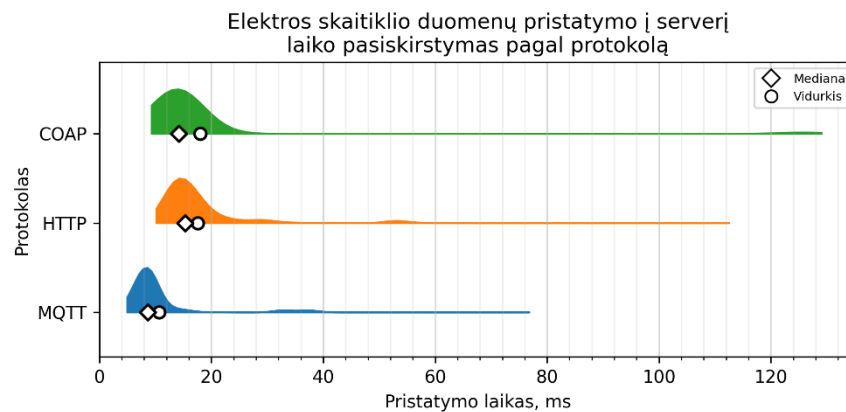
Šie gauti rezultatai atspindi 1.4.1 skyriuje aprašytus protokolų palyginimus, pagal kuriuos HTTP našumas stipriai skiriasi. Pastebima, kad HTTP protokolas sugeneravo 2,2 kartus didesnę išsiųstų ir 7 kartus didesnę gautų duomenų kiekį. Remiantis užfiksuotais duomenimis didžiausia duomenų kiekio priežastis yra papildomi paketai TCP ryšio užmezgimui, ACK paketai, bei papildomos antraštės. Tuo tarpu MQTT ir CoAP duomenų perdavimo rezultatai buvo labai panašūs pagal bendrą perduotų duomenų kiekį, todėl šiame eksperimente aiškaus vieno protokolo pranašumo nenustatyta.

Išsiųstų ir gautų duomenų kiekio informacija (14 lentelė) papildoma informacija apie bendrą srautą ir naudinguosius duomenis. Šiuo atveju naudingųjų VRA duomenų kiekis yra visais atvejais vienodas 137,59 kB dėl nekintančių simuliuojamų duomenų tipo, tačiau papildomų duomenų kiekis tarp skirtingų protokolų ryškiai skiriasi. HTTP pridėtinis srautas buvo 6 kartus didesnis, tad jis šiame eksperimente buvo mažiausiai efektyvus. MQTT ir CoAP perduodamų duomenų kiekiai iš tiesų atrodo panašūs.

14 lentelė. Skirtingų protokolų naudojamas papildomas pridėtinis srautas, skirtas perduoti tuos pačius duomenis

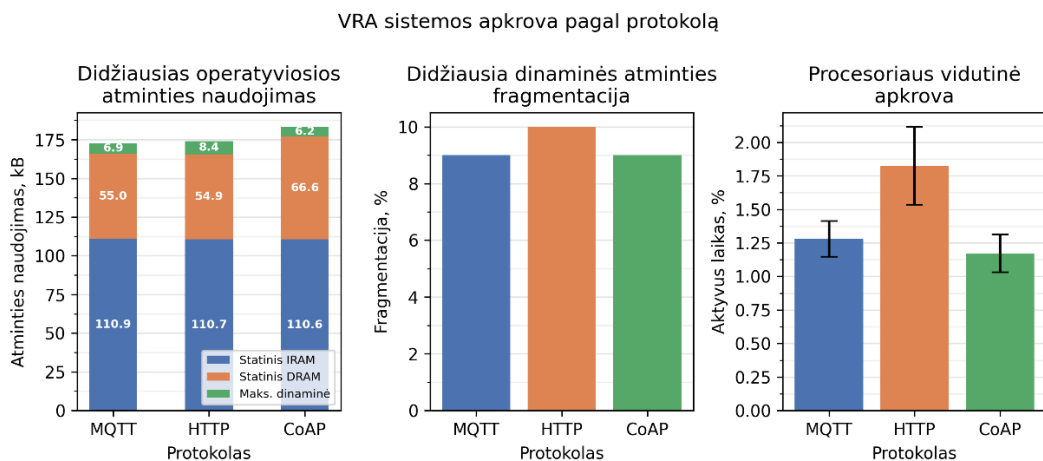
Protokolas	Naudingi duomenys	Protokolo pridėtinis srautas	Pridėtinis srautas nuo naudingųjų duomenų
MQTT	137,59 kB	90,30 kB	+ 65,63 %
HTTP		547,72 kB	+ 398,08 %
CoAP		89,75 kB	+ 65 %

13 pav. pateikiami elektros skaitiklio duomenų pristatymo laikai rodo, kad visų analizuotų protokolų vėlinimas sąlyginai mažas. Mažiausiu pristatymo laiku pasižymi MQTT protokolas, kurį naudojant duomenų pristatymo laiko mediana siekia apie 8-9 ms. Kiti protokolų pristatymo laikai yra kiek didesni, CoAP apie 13–14 ms, HTTP apie 15–17 ms. Vis dėlto grafike matomos ir išskirtinai nukrypusios reikšmės, rodančios, kad kai kuriais atvejais pristatymo laikas gali ir ženkliai išaugti. Nepaisant to galima teigti, kad visi protokolai užtikrina gerą duomenų perdavimo greitį daugumai duomenų transliavimo (angl. *streaming*) scenarijų, tačiau griežtų realaus laiko reikalavimų turinčiose sistemose tokio sprendimo gali nepakakti.



13 pav. Elektros skaitiklio duomenų perdavimo greitis iš VRA į serverį

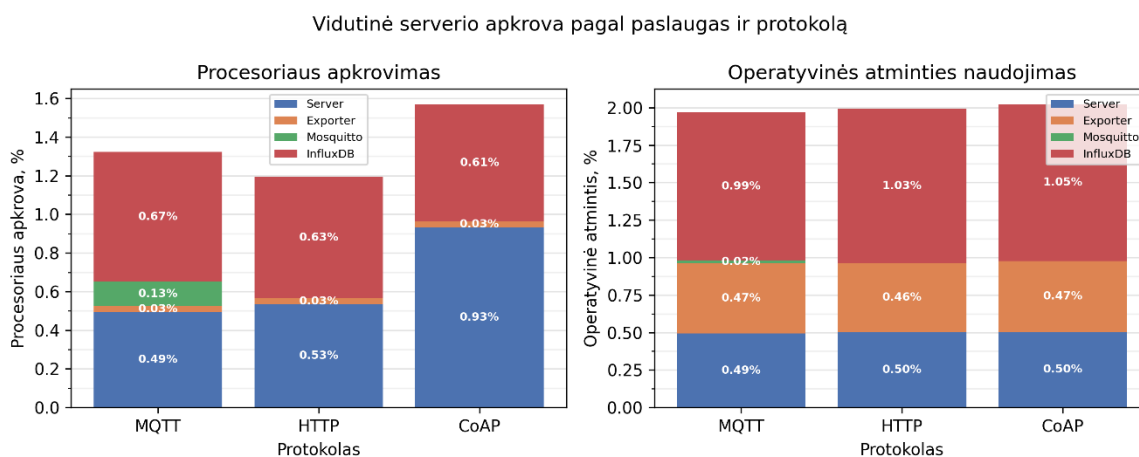
Atlikus VRA apkrovos analizę buvo užfiksuoti maksimalūs operatyviosios atminties naudojimo, fragmentacijos lygio bei vidutinės procesoriaus apkrovos įverčiai. Šie rezultatai pateikiami 14 pav.



14 pav. VRA apkrovos palyginimas naudojant skirtingus taikomojus protokolus

Remiantis 14 pav. galima pastebėti, kad maksimalus suvartojamos operatyviosios atminties kiekis, naudojant skirtingus duomenų perdavimo protokolus, išlieka panašus, apie 170–180 kB. Šiek tiek didesnis atminties suvartojimas matomas tik naudojant CoAP protokolą. Tikėtina, kad taip yra dėl to, kad CoAP protokolui realizuoti naudojama išorinė biblioteka – *libcoap*. Panašius, tarpusavyje reikšmingai nesiskiriančius rezultatus parodo ir dinaminės atminties fragmentacijos įvertinimas. Mažas fragmentacijos lygis visais atvejais gali būti susijęs su tuo, kad VRA realizuota programinė įranga dažniausiai naudoja dėklo (angl. *stack*) tipo atmintį, kurioje fragmentacijos problemos nesutinkamos. Galiausiai procesoriaus vidutinė apkrova parodo, kokią laiko dalį procesorius buvo užimtas atlikdamas naudingą darbą. Pagal rezultatus mažiausią procesoriaus apkrovą sukelia CoAP protokolą – 1,17 %, šiek tiek didesnę – MQTT (1,28 %), o didžiausią apkrovą sukelia HTTP. CoAP pranašumai išryškėja dėl naudojamo UDP protokolo, kuris neapkrauna VRA tiek, kiek TCP, nes neturi ryšio palaikymo ir pakartotinio paketų siuntimo mechanizmų.

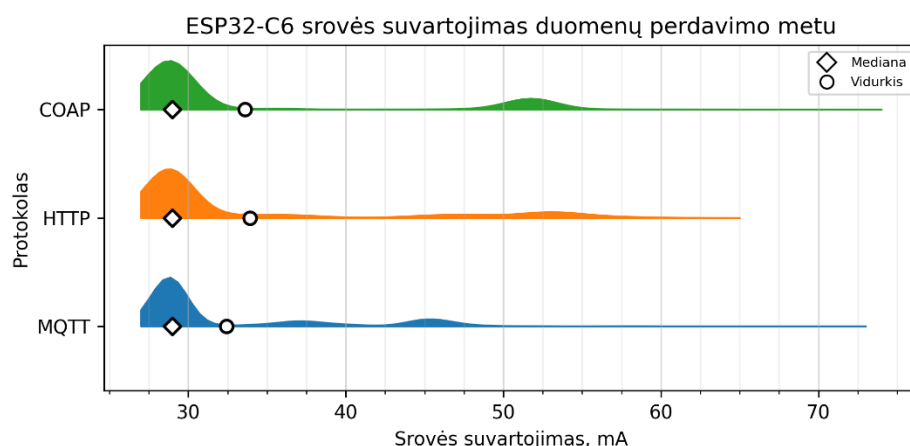
Serverio apkrovimas buvo įvertintas pagal procesoriaus vidutinę apkrovą ir operatyviosios atminties naudojimą. Eksperimento metu surinkti duomenys yra vaizduojami stulpelinėmis diagramomis 15 pav. Remiantis rezultatais, galima teigti, kad didžiausi skirtumai tarp protokolų pasireiškė serverio procesoriaus apkrovoje, o operatyviosios atminties naudojimas išliko beveik nepakitęs. Mažiausiai procesorių apkrovė HTTP protokolas – vidutiniškai apie 1,2 %, tuo tarpu kiti protokolai kiek daugiau, atitinkamai MQTT – 1,32 % ir CoAP – 1,55 %. Galima daryti prielaidą, kad HTTP protokolas pasirodė geriausiai dėl to, kad jam skirta programinė įranga yra gerai optimizuota. CoAP pasirodė prasčiausiai – potencialiai dėl to, kad naudojamas UDP komunikacijos lygmuo reikalauja papildomo komunikacijos valdymo (pranešimų žymėjimo, retransliacijų ir kt.), o TCP atveju šį darbą paprastai atlieka operacinė sistema. Operatyviosios atminties naudojimas tarp skirtingų konfigūracijų reikšmingai nesiskyrė. Visas paslaugas sudėjus, jos naudoja tik apie 2 % operatyviosios atminties, kas yra apytiksliai 150 MB. Daugiausia atminties sunaudojo InfluxDB duomenų bazės paslauga, apie 50 % visos bendrai naudotos atminties.



15 pav. Serverio įvertinimas pagal tiekiamas paslaugas ir protokolą

Galiausiai buvo atlikta elektros energijos naudojimo analizė, kai buvo stebima VRA naudojama elektros srovė naudojant skirtingus protokolus. Surinkti duomenys pateikiami 16 pav. daline smuikine diagrama. Gauti duomenys rodo, kad tipinės srovės suvartojimo reikšmės visiems trimis duomenų perdavimo protokolams yra panašios, tačiau matavimų sklaida skiriasi. Matavimai buvo

atliekami periodiškai ir apėmė tiek mažesnio suvartojimo laukimo būsenas, tiek aktyvius apdorojimo ir siuntimo periodus.



16 pav. VRA naudojama perdavimo srovė duomenų perdavimo metu naudojant skirtingus protokolus

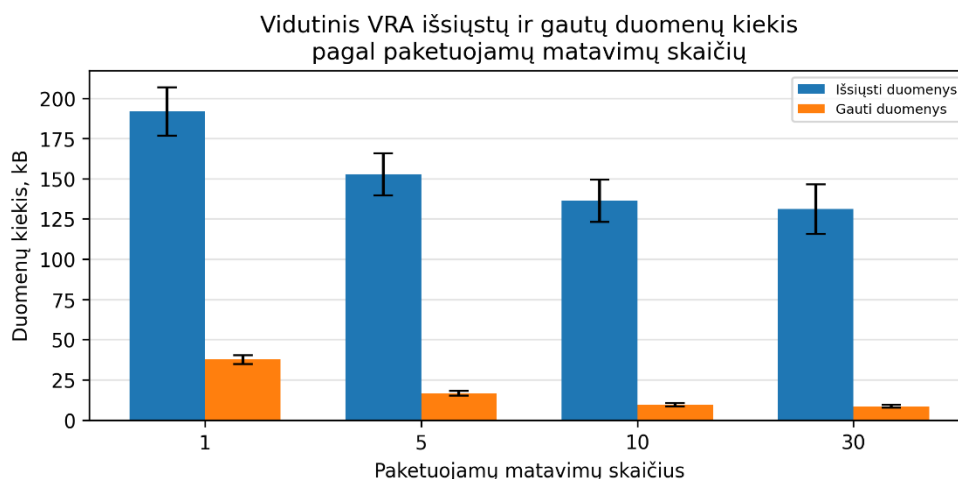
Pagal tai dalinėje smuikinėje diagramoje potencialiai galima klasifikuoti keletą būsenų: kai VRA neatlieka naudingo darbo ties ~28 mA ir kai atlieka duomenų siuntimą >40 mA. Lyginant pačius protokolus mažiausia centrinė sklaida buvo pastebėta CoAP protokolui, nes jo medianą supantys kvartiliai yra siauriausi. Toks reiškinys galėjo atsitikti dėl naudojamo UDP duomenų perdavimo protokolo, o tai taip pat koreliuoja su procesoriaus apkrovimo tendencijomis (14 pav.). MQTT ir HTTP protokolų atvejais centrinė sklaida yra didesnė. Bendru atveju buvo naudojama apie 33 mA srovė naudojant 3,3 V įtampą, kas potencialiai būtų apie 0,11 W.

3.2. Duomenų paketavimo strategijų vertinimas

Duomenų paketavimo strategijų rezultatai yra vertinami konfigūracijoje, kai keli elektros skaitiklio nuskaitymai yra talpinami į vieną paketą. Šiame poskyryje pateikiami rezultatai, kai atliekamas 1 (bazinė konfigūracija), 5, 10 ir 30 elektros skaitiklių duomenų paketavimas. Verta paminėti, kad perduodant duomenis su kiekvienu paketu ($n + 1$) pridedamas papildomas baitas, naudojamas duomenų paketams atskirti. Nors tai nesudaro didelio pokyčio, ši duomenų perdavimo konfigūracija neženkliai skirsis nuo taikomųjų protokolų palyginimo. Šiame poskyryje bus analizuojami šie parametrai: tinklo apkrova, operatyviosios atminties apkrova ir fragmentacija, procesoriaus naudojimas VRA, serverio apkrova ir elektros sąnaudos. Vertinimas atliekamas tik MQTT protokolui, kadangi šiuo atveju protokolo pasirinkimas neturi reikšmingos įtakos.

Atlikus tinklo duomenų analizę buvo pastebėta, kad elektros skaitiklio duomenų paketavimas gali reikšmingai sumažinti perduodamų duomenų kiekį. Išsiunčiamų ir gautų duomenų kiekio informacija pateikiama 17 pav. Remiantis stulpelinės diagramos duomenimis pastebima, kad didėjant paketuojamų matavimų skaičiui perduodamų duomenų kiekis mažėja nuosekliai, tačiau nevienodu tempu. Atliekant 5 nuskaitymų paketavimą išsiunčiamų duomenų kiekis sumažėja apie 20 %, 10 – apie 29 %, o 30 – apie 32 %. Didinant matavimų skaičių viename pakete, gaunamų duomenų kiekis mažėja vis labiau. Palyginti su 1 matavimo atveju, 5 matavimų pakete jis sumažėja 56 %, 10 matavimų pakete – apie 75 %, o 30 matavimų pakete – apie 77 %. Tai rodo, kad didžiausias sumažėjimas pasiekiamas kai pereinama nuo kelių paketų prie keliolikos. Toliau didinant paketavimo

lygi, duomenų kiekis mažėja, tačiau pokytis tampa mažesnis. Ryškus duomenų sumažėjimas leidžia teigti, kad reikšmingą duomenų dalį sudaro papildoma valdymo informacija tokia kaip antraštės.



17 pav. VRA išsiunčiamų ir gaunamų duomenų kiekis atliekant elektros skaitiklio duomenų paketavimą

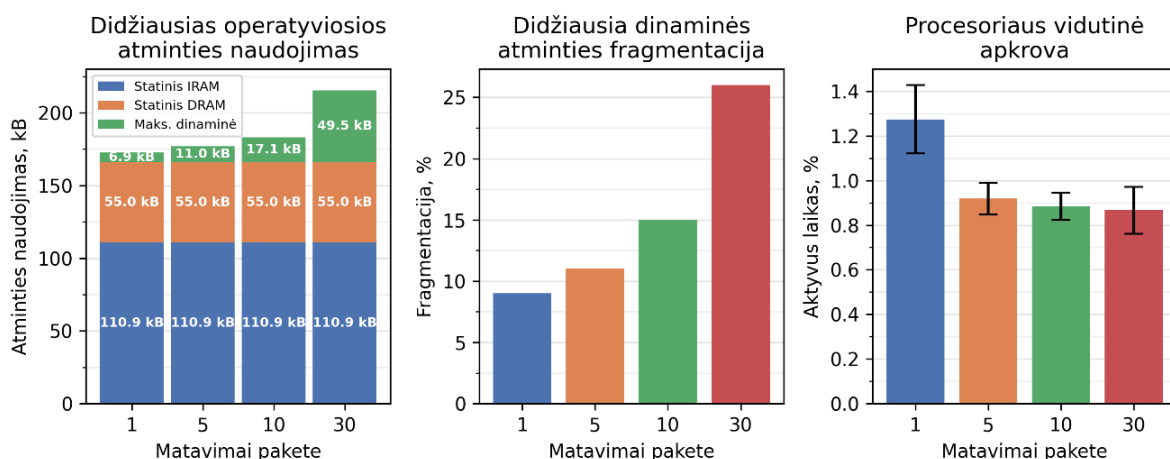
15 lentelėje pateikiamas naudingo ir pridėtinio duomenų kiekio palyginimas, kai siunčiamas skirtingas kiekis elektros skaitiklio paketuotų duomenų. Rezultatuose pastebima, kad pridėtinis vieno paketo srautas sudaro didelį kiekį duomenų ir paketuojant duomenis galima sumažinti apie 64 procentiniais punktais (atliekant 30 matavimo duomenų paketavimą). Tokiu atveju pridėtinis srautas sudaro tik 1,40 kB duomenų perduodant 10 minučių elektros skaitiklio duomenis. Pagal tai galima teigti, kad duomenų paketavimas yra efektyvi priemonė mažinti perdavimo pridėtinės sąnaudas, nes tai leidžia išlaikyti tą patį naudingo turinio kiekį, tačiau ženkliai sumažina papildomo srauto kiekį.

15 lentelė. Pridėtinio ir naudingo duomenų kiekio palyginimas naudojant skirtingus paketavimo lygius

Skaitiklio nuskaitymų skaičius viename pakete	Naudingi duomenys	Pridėtinis srautas	Pridėtinis srautas nuo naudingųjų duomenų, %
1	138,76 kB	90,68 kB	+ 65,3 %
5	138,29 kB	31,13 kB	+ 22,5 %
10	138,23 kB	7,59 kB	+ 5,5 %
30	138,19 kB	1,40 kB	+ 1,01 %

VRA apkrovos rezultatai atliekant paketuotų duomenų perdavimą yra pateikiami 18 pav. Kaupiant duomenis operatyviojoje atmintyje, naudojamos dinaminės atminties kiekis proporcingai didėja. Nuo 6,9 kB ties 1 matavimu pakete iki 49,5 kB ties 30 matavimų pakete. Kartu didėja ir dinaminės atminties fragmentacija - nuo 9 % iki 26 %, kas rodo, kad didesnis paketavimo lygis reikalauja daugiau atminties ir didina atminties valdymo sudėtingumą. Didėjantis dinaminės atminties fragmentacijos lygis didina potencialių problemų galimybę ir gali priversti VRA veikti neprognozuojamai. Kita vertus atliekant duomenų paketavimą, sumažėja ir procesoriaus vidutinė apkrova nuo 1,27 % iki 0,87 %. Tikėtina, kad tai nutinka dėl retesnio duomenų paruošimo ir siuntimo operacijų kiekio. Vis dėlto procesoriaus apkrovos mažėjimas, viršijus 5 paketų paketavimą tampa nedidelis, o atminties fragmentacija auga gana ryškiai. Dėl to galima daryti išvadą, kad didesnis duomenų paketavimas gali sumažinti VRA procesoriaus apkrovą, tačiau jis pasiekiamas augančios dinaminės atminties ir fragmentacijos kaina.

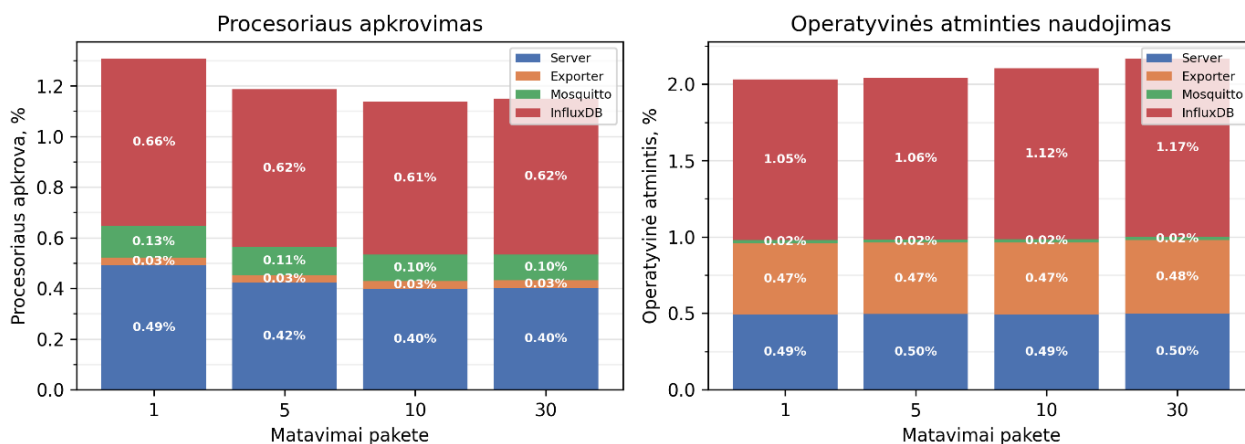
VRA apkrova pagal paketuojamų matavimų skaičių



18 pav. VRA apkrova, kai naudojami skirtingi duomenų paketavimo lygiai

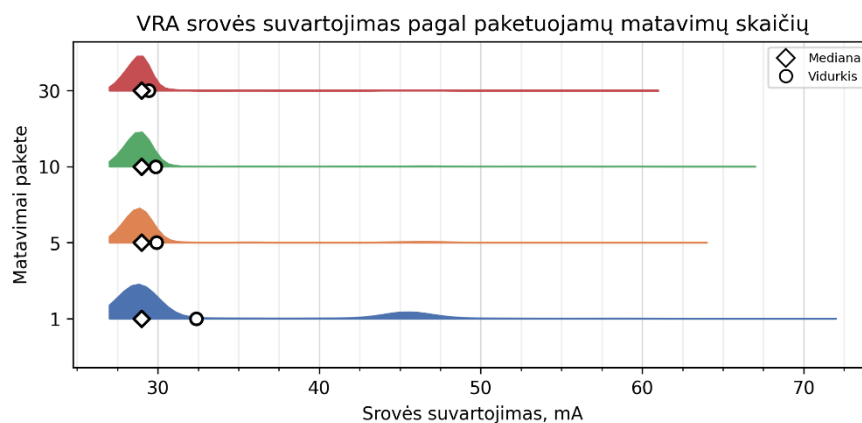
Serverio apkrovimo rezultatai yra pateikiami 19 pav. Duomenys rodo, kad didėjant elektros skaitiklio paketuojamų matavimų skaičiui, procesoriaus apkrova mažėja. Didžiausias sumažėjimas pastebimas *server* paslaugoje (nuo 0,49 % iki 0,40 %), kuri atsakinga už duomenų apdorojimą ir įrašymą į duomenų bazę. Kitų naudojamų paslaugų apkrovimas keičiasi neženkliai, *Mosquitto* nuo 0,13 % iki 0,10 %, *InfluxDB* nuo 0,66 % iki 0,61–0,62 %. Operatyviosios atminties naudojimo rezultatai rodo dar silpnesnę priklausomybę nuo paketavimo. Visų paslaugų bendra naudojama atmintis kinta minimaliai. Didžiausią dalį naudojamos atminties sudaro duomenų bazės paslauga *InfluxDB*, kurios atminties sąnaudos kinta nedideliu greičiu: nuo 1,05 iki 1,17 %, didinant talpinamų matavimų kiekį pakete. Tai potencialiai gali vykti dėl to, kad vienu metu duomenų bazei reikia atlikti daug skaitymo / rašymo operacijų, kas gali reikalauti papildomo operatyviosios atminties kiekio.

Vidutinis serverio apkrovimas pagal paslaugas atliekant paketuojamų matavimų perdavimą



19 pav. Vidutinis serverio paslaugų apkrovimas atliekant paketuotų duomenų perdavimą

Toliau buvo atlikta srovės sunaudojimo analizė 20 pav., kurioje buvo išanalizuota kaip keičiasi VRA srovės naudojimas esamoje konfigūracijoje, kai keičiamas paketavimo lygis. Visose aptartose konfigūracijose srovės mediana išlieka panaši ir telkiasi apie 28–30 mA.



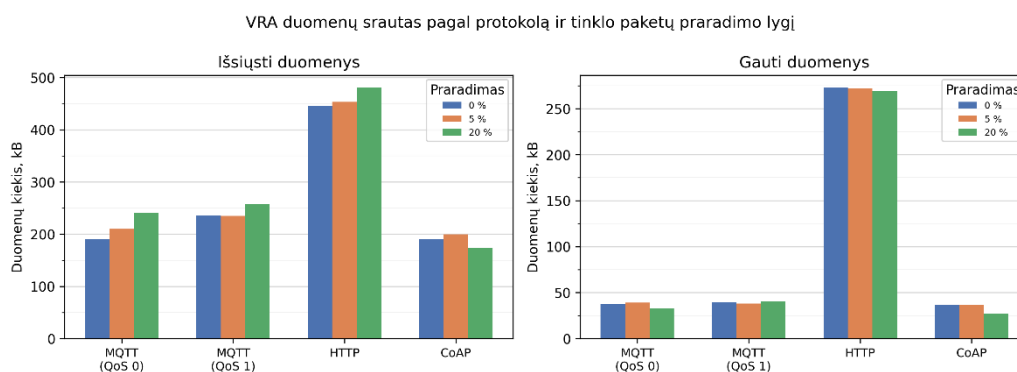
20 pav. VRA naudojama srovė atliekant paketuotų duomenų perdavimą

Vis dėlto skirtumai aiškiau matomi vertinant reikšmių pasiskirstymą. Kai pakete perduodamas tik vienas matavimas, reikšmės labiau išsibarsto, o vidurkis yra didesnis. Tai rodo, kad tokiu atveju dažniau pasitaiko trumpalaikių didesnių srovės suvartojimo epizodų. Didinant matavimų skaičių pakete, sklaida mažėja, kartu mažėja ir vidutinis srovės suvartojimas.

3.3. Duomenų perdavimo patikimumo vertinimas esant paketų praradimui

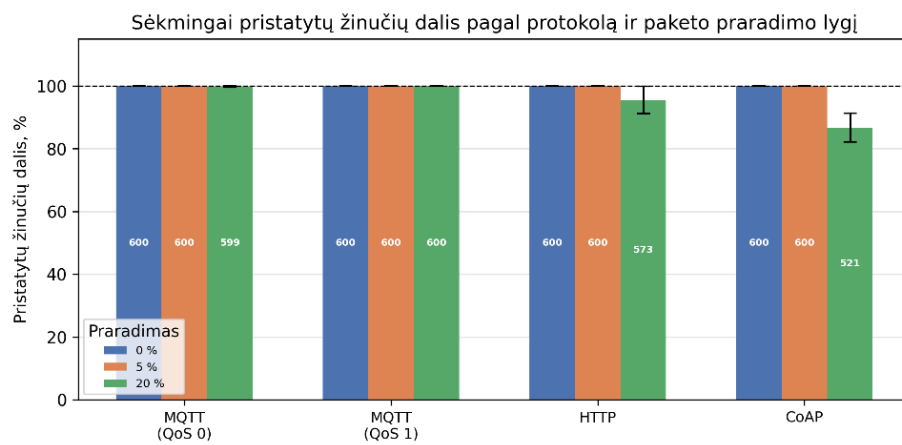
Trečioji analizuojama duomenų perdavimo konfigūracija yra duomenų perdavimas esant paketų praradimui. Tokiu atveju atliekamas paketų praradimo simuliacija ir stebima, kaip skirtingi protokolai susitvarko su nestabilia ryšio terpe. Šiame poskyryje vertinami skirtingi duomenų protokolai esant nestabiliai tinklo terpei pagal išsiųstų ir gautų duomenų kiekį, pristatymo koeficientą, VRA ir serverio apkrovą.

Atlikus išsiųstų ir gautų duomenų analizę 21 pav. prie skirtingų simuliuojamų paketų praradimo lygių, buvo pastebėta, kad protokolai į tinklo nestabilumą reaguoja nevienodai. Didėjant paketų praradimo lygiui, TCP pagrindu veikiantys protokolai rodo išaugusį perduodamų duomenų kiekį, tačiau gautų duomenų kiekis mažėja dėl suprastėjusio perdavimo efektyvumo ir dažnesnių pakartotinių siuntimų. Tuo tarpu CoAP protokolas, veikiantis UDP pagrindu, esant didesniai praradimui pasižymi aiškiau tiek išsiųstų, tiek ypač gautų duomenų kiekio sumažėjimu. Vis dėlto, esant nedideliui, 5 % paketų praradimo lygiui, galima pastebėti, kad CoAP dar geba iš dalies kompensuoti nuostolius retransliavimo mechanizmu. Jei serveris per nustatytą laiką neatsako, VRA pakartotinai siunčia užklausą, todėl nedidelis praradimas dar neturi tokio ryškaus neigiamo poveikio.



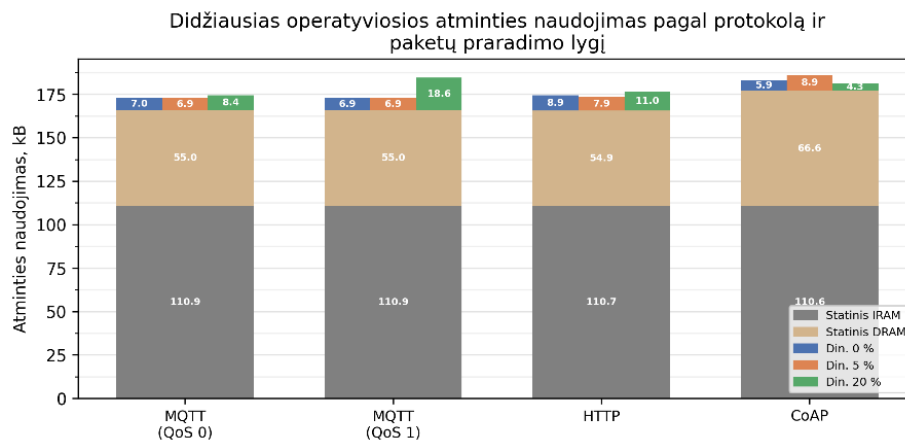
21 pav. VRA išsiųstų ir gautų duomenų kiekis naudojant skirtingus duomenų praradimo lygius

Toliau buvo atlikta pristatytų žinučių analizė 22 pav., vertinant pagal tai, kiek žinučių buvo išsiųsta ir kiek pristatyta. Tai parodo, kaip gerai algoritmai sugeba užtikrinti žinučių pristatymą esant paketų praradimams. Šio eksperimento rezultatai parodė, kad standartiniu atveju esant 0 % paketų praradimui, užtikrinamas 100 % sėkmingas pranešimų pristatymas, todėl kitose konfigūracijose šis pristatymo scenarijus nėra vertinamas. Esant 5 % praradimui, pristatymo rodikliai taip pat išliko nepakitę visiems protokolams. Pagal tai galima teigti, kad 5 % lygio praradimas šiame eksperimente neturėjo pastebimo poveikio bendram patikimumui. Tai potencialiai gali lemti protokolų savybės, tokios kaip TCP ar kitų lygių paketų pakartojimai, kurie sugeba kompensuoti praradimus. Vis dėlto, padidinus paketų praradimą iki 20 %, išryškėjo aiškūs skirtumai tarp protokolų: MQTT QoS1 išlaikė 100 % pristatymą, MQTT QoS0 pasiekė 99,8 %, HTTP - 95,5 %, o CoAP - 86,8 %. Tai rodo, kad didesnio paketų praradimo sąlygomis patikimesni perdavimo mechanizmai leidžia geriau išlaikyti pranešimų pristatymo stabilumą, o mažiausiai atsparus šiuo atveju buvo CoAP protokolas dėl naudojamo UDP protokolo.



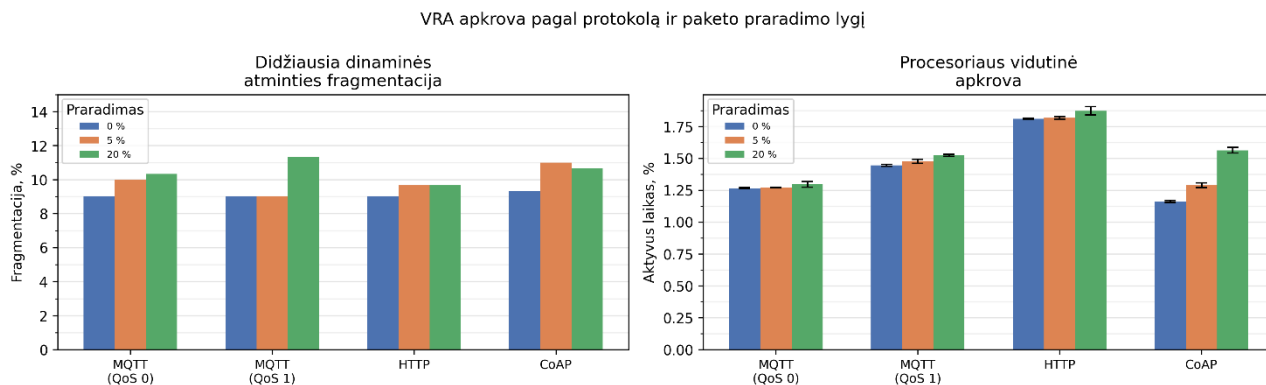
22 pav. Pristatytų žinučių santykis simuliuojant paketų praradimą

Šios duomenų perdavimo konfigūracijos testavimo metu buvo užfiksuoti didžiausi operatyviosios atminties naudojimo įverčiai 23 pav., taip pat didžiausias dinaminės atminties fragmentacijos lygis ir procesoriaus vidutinis apkrovos lygis 24 pav. Gauti rezultatai rodo, kad simuliuojamas paketų praradimas paveikia dinaminis sistemos veikimo rodiklius: didėja dinaminės atminties naudojimas, jos fragmentacija ir procesoriaus apkrova.



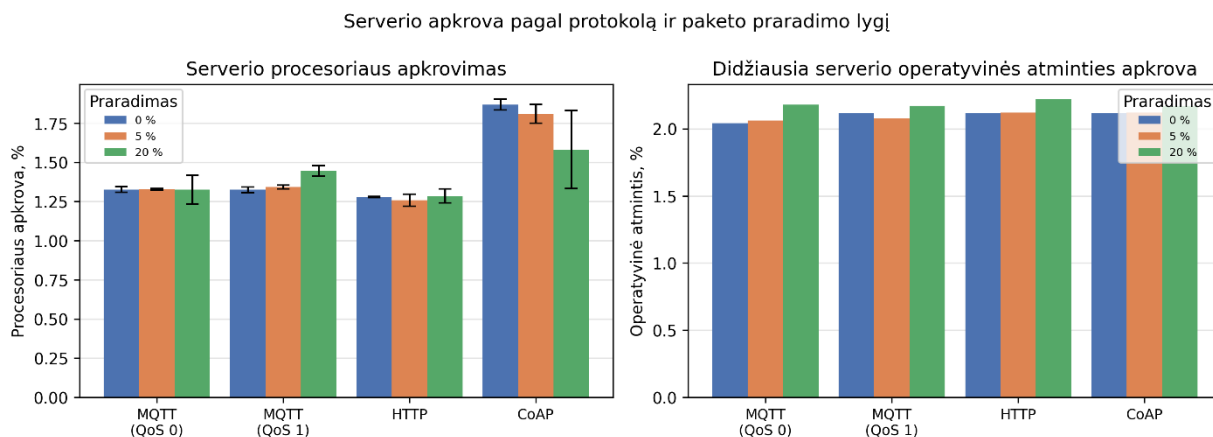
23 pav. Maksimalus operatyviosios atminties naudojimas esant simuliuojamam paketų praradimui

Geriausiai tai matoma MQTT (QoS 1) atveju 24 pav. Perdavimo mechanizmas tampa ženkliai reiklesnis pablogėjus ryšio sąlygoms, nes tikėtina, kad tokiu atveju reikia daugiau pakartotinių siuntimų, apdorojimo patvirtinimų ir tarpinių duomenų saugojimo. Tačiau MQTT (QoS 1) protokolas buvo vienintelis, kuris perdavė visą reikalingą informaciją, kaip buvo pastebėta 22 pav. HTTP protokolas visais atvejais pasižymėjo didžiausia vidutine procesoriaus apkrova ir jo parametrai reikšmingai nekito. CoAP atveju, didėjant paketų praradimui, dinaminės atminties fragmentacija netgi sumažėjo, tačiau naudojant šį protokolą buvo prarasta daugiausia paketų. Apibendrinant galima teigti, kad paketų praradimas labiausiai veikia ne bazinį atminties paskirstymą, bet papildomas vykdymo sąnaudas, kurios atsiranda protokolams bandant užtikrinti duomenų perdavimą prastesnėmis ryšio sąlygomis.



24 pav. VRA maksimali atminties fragmentacija (kairėje) ir procesoriaus apkrova (dešinėje) atliekant paketų praradimo simuliaciją

Galiausiai buvo išanalizuoti serverio apkrovos rezultatai, pateikiami 25 pav.



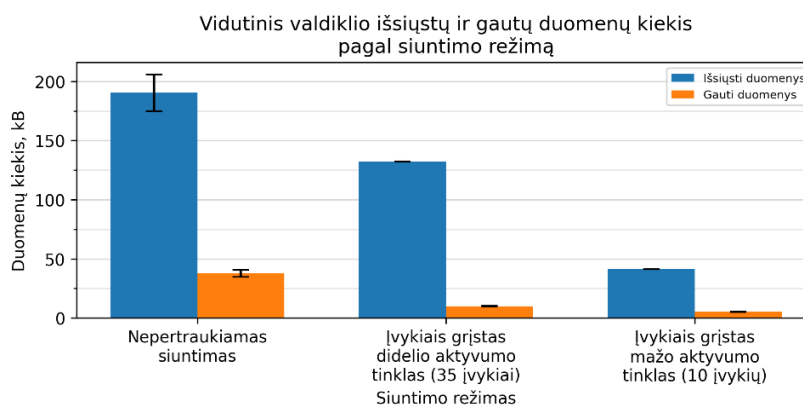
25 pav. Serverio apkrovimas esant paketų praradimui

Rezultatai rodo, kad nestabilaus ryšio simuliacija serverio resursų naudojimą veikia nežymiai. Ties 20 % paketų praradimu serverio procesoriaus apkrova labiausiai padidėjo MQTT (QoS 1) atveju – apie 9,0 %. CoAP atveju, esant 20 % paketų praradimui, serverio apkrova netgi sumažėjo; tai buvo pastebėta ir VRA pusėje. Serverio operatyviosios atminties naudojimas visais atvejais išlieka panašus, todėl galima teigti, kad paketų praradimas šiam rodikliui reikšmingos įtakos neturi.

3.4. Įvykiais grįsto duomenų siuntimo modelio vertinimas

Šiame poskyryje pateikiami duomenų perdavimo konfigūracijos rezultatai, kai duomenų perdavimas atliekamas įvykiais grįsta logika. Tam įgyvendinti naudojamas 1.6.2 skyrelyje aprašytas algoritmas, kuris aktyvuoja duomenų perdavimą kai aptinkamas aktyviosios galios pokytis. Tokiu atveju tik aplink šuolį esantys duomenys (15 įverčių) yra išsiunčiami į centrinį duomenų serverį. Ši konfigūracija testuojama su dviem duomenų rinkiniais: pirmasis atspindi didelio aktyvumo tinklą (36 šuoliai per 10 minučių), antrasis – mažo aktyvumo tinklas (12 šuolių per 10 minučių). Verta paminėti, kad šis algoritmas aptinka šuolius ne 100 % tikslumu – atlikus empirinį bandymą valdomoje aplinkoje, pirmuoju atveju buvo aptinkami 35 šuoliai, antruoju – 10 šuolių. Remiantis šia informacija, šis algoritmas lyginamas su bazine konfigūracija, kai duomenys perduodami pastoviai (kas sekundę). Šios konfigūracijos atveju pateikiama informacija apie tinklo apkrovą, VRA apkrovą, serverio apkrovą ir VRA elektros sąnaudas.

Atlikus perduotų ir gautų duomenų analizę nustatyta (26 pav.), kad įvykiais grįstas duomenų perdavimas leidžia reikšmingai sumažinti perduodamų duomenų kiekį. Lyginant su nepertraukiamu siuntimu, esant didelio aktyvumo tinklui, išsiųstų duomenų kiekis sumažėjo apie 30,4 %, o gautų – apie 73,0 %. Mažo aktyvumo tinkle užfiksuotas sumažėjimas dar ryškesnis: išsiųstų duomenų kiekis sumažėjo apie 79,2 %, o gautų – apie 87,3 %. Toks skirtumas paaiškinamas tuo, kad nepertraukiamo siuntimo režimu buvo perduota 600 įrašų, didelio aktyvumo įvykiais grįsto siuntimo režimu – 525, o mažo aktyvumo režimu – 150 įrašų.



26 pav. Išsiųstų ir gautų duomenų dalys naudojant įvykiais grįstą logiką perduoti duomenis

Verta pastebėti, kad taikant įvykiais grįstą siuntimo logiką bendras perduodamų duomenų kiekis sumažėja, tačiau toliau mažėjant įvykių skaičiui santykinė pridėtinio srauto dalis vėl pradeda didėti. Tai rodo, kad dalis perduodamo srauto nepriklauso tiesiogiai nuo naudingųjų duomenų kiekio. Toks srautas gali būti siejamas su protokolo palaikymui reikalingais pridėtiniais duomenimis ir antraštėmis, šiuo atveju – MQTT mechanizmais. Vis dėlto verta atkreipti dėmesį, kad net ir mažo aktyvumo tinkle įvykiais grįstas siuntimas išlieka efektyvesnis už nepertraukiamą siuntimą. Šiuos konfigūracijos rezultatus galima matyti 16 lentelėje.

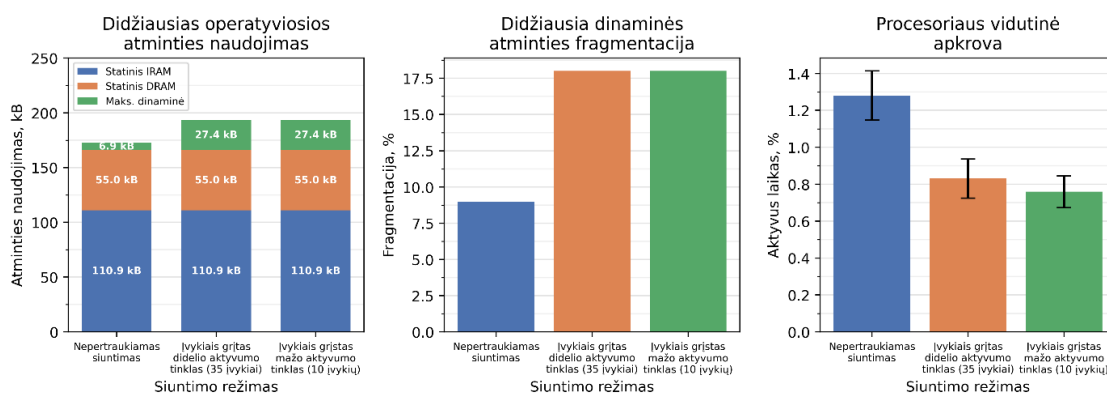
16 lentelė. Duomenų perdavimo naudingų ir pridėtinio srauto palyginimas naudojant įvykiais grįstą logiką

Siuntimo režimas	Naudingieji duomenys	Pridėtinis srautas	Pridėtinis srautas nuo naudingųjų duomenų, %
Nepertraukiamas (600 įrašų)	137,59 kB	90,30 kB	+ 65,6 %

Įvykiais grįstas (didelio aktyvumo, 35 šuoliai, 525 įrašų)	120,95 kB	21,31 kB	+ 17,8 %
Įvykiais grįstas (mažo aktyvumo, 10 šuolių, 150 įrašų)	34,75 kB	11,78 kB	+ 33,9 %

Gauti VRA apkrovos rezultatai 27 pav. rodo, kad įvykiais grįsto duomenų perdavimo režimas keičia sistemos apkrovos pasiskirstymą. Įgalinus įvykiais grįstą logiką operatyviosios atminties sąnaudos padidėja apie 12 %, o atminties fragmentacija padvigubėja, nes atsiranda papildomas buferis, kuriame analizuojamos perduodamos reikšmės. Tuo tarpu vidutinė procesoriaus aktyvaus laiko dalis sumažėjo nuo 1,28 % nepertraukiamo siuntimo režimu iki 0,83 % didelio aktyvumo tinkle ir iki 0,76 % mažo aktyvumo tinkle. Tai rodo, kad pagrindinė įvykiais grįsto siuntimo nauda pasireiškia mažesne procesoriaus apkrova. Tai leidžia teigti, kad didžiausią procesoriaus apkrovos dalį sudaro pats duomenų siuntimas, o ne jų analizė.

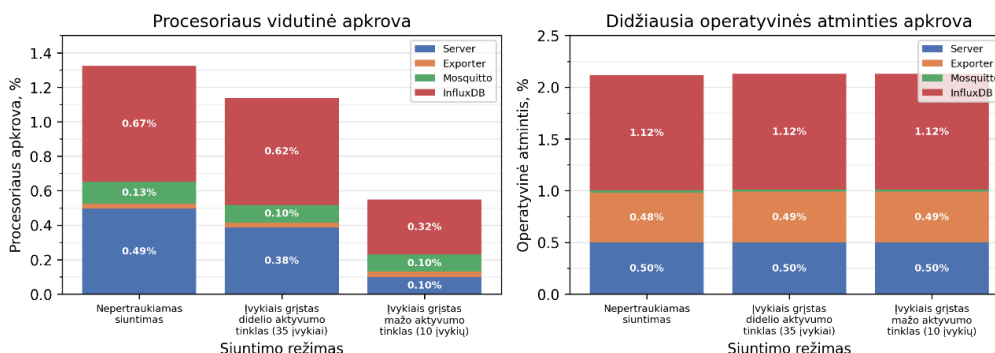
VRA apkrova pagal siuntimo režimą



27 pav. VRA apkrovos rezultatai, kai duomenys yra perduodami įvykiais grįsta logika

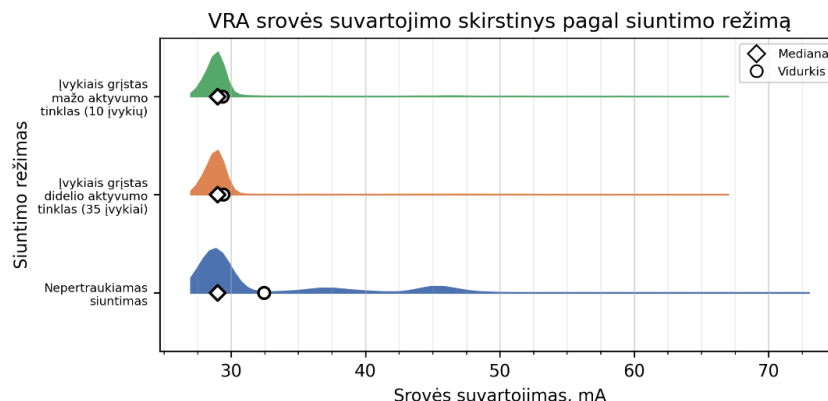
Serverio apkrovos rezultatai 28 pav. rodo, kad įvykiais grįstos logikos naudojimas didžiausią įtaką daro procesoriaus apkrovai. Lyginant su nepertraukiamu siuntimu, bendra procesoriaus apkrova didelio aktyvumo tinkle sumažėjo nuo 1,32 % iki 1,08 %, o mažo aktyvumo tinkle – iki 0,62 %, tai yra atitinkamai apie 18 % ir 53 %. Šie rezultatai rodo, kad serverio procesoriaus apkrova iš esmės priklauso nuo gaunamų įrašų kiekio, kuris daro įtaką *InfluxDB* duomenų bazės ir *server* paslaugoms. Operatyviosios atminties naudojimas, taikant įvykiais grįstą ir nepertraukiamą duomenų perdavimą, iš esmės nepakito.

Serverio apkrova pagal siuntimo režimą



28 pav. Serverio apkrovos rezultatai lyginant nepertraukiamą ir įvykiais grįstą perdavimą

Įvertinus srovės suvartojimo rezultatus 29 pav. pagal siuntimo režimą, matyti, kad įvykiais grįsti siuntimo režimai pasižymi stabilesniu srovės vartojimu nei nepertraukiamas siuntimas. Abiem įvykiais grįstais atvejais vidurkiai išlieka artimi – apie 29,3 mA.



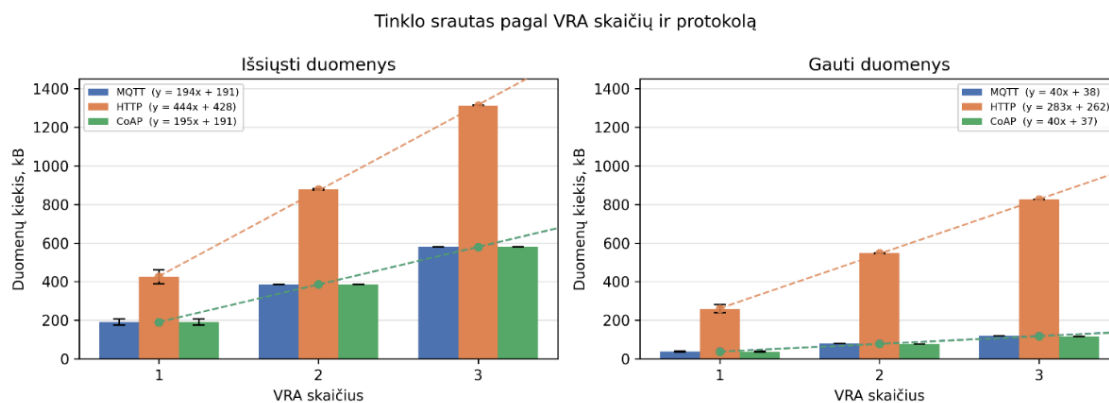
29 pav. VRA naudojama srovė perduodant duomenis įvykiais grįstu ir nepertraukiamu režimu

Tuo tarpu nepertraukiamo siuntimo režime matoma didesnė sklaida ir aukštesnės momentinės srovės reikšmės, tai rodo ilgesnė pusinės smuikinės diagramos uodega ir padidėjęs vidurkis. Tai leidžia teigti, kad įvykiais grįsta logika ne tik sumažina perduodamų duomenų kiekį, bet ir padeda išlaikyti tolygesnį VRA energijos vartojimą.

3.5. Paskirstytos sistemos apkrovos vertinimas didėjant įrenginių skaičiui

Paskutinis atliktas eksperimentas skirtas paskirstytos sistemos apkrovai įvertinti didėjant duomenis perduodančių VRA skaičiui. Šiuo bandymu analizuojama, kaip įrenginių skaičius veikia bendrą perdavimo sistemos apkrovą. Vertinimo metu analizuojami išsiųstų ir gautų duomenų kiekis, duomenų pristatymo laikas ir serverio apkrova. Šioje konfigūracijoje vertinami visi darbe apžvelgti protokolai: MQTT, HTTP ir CoAP.

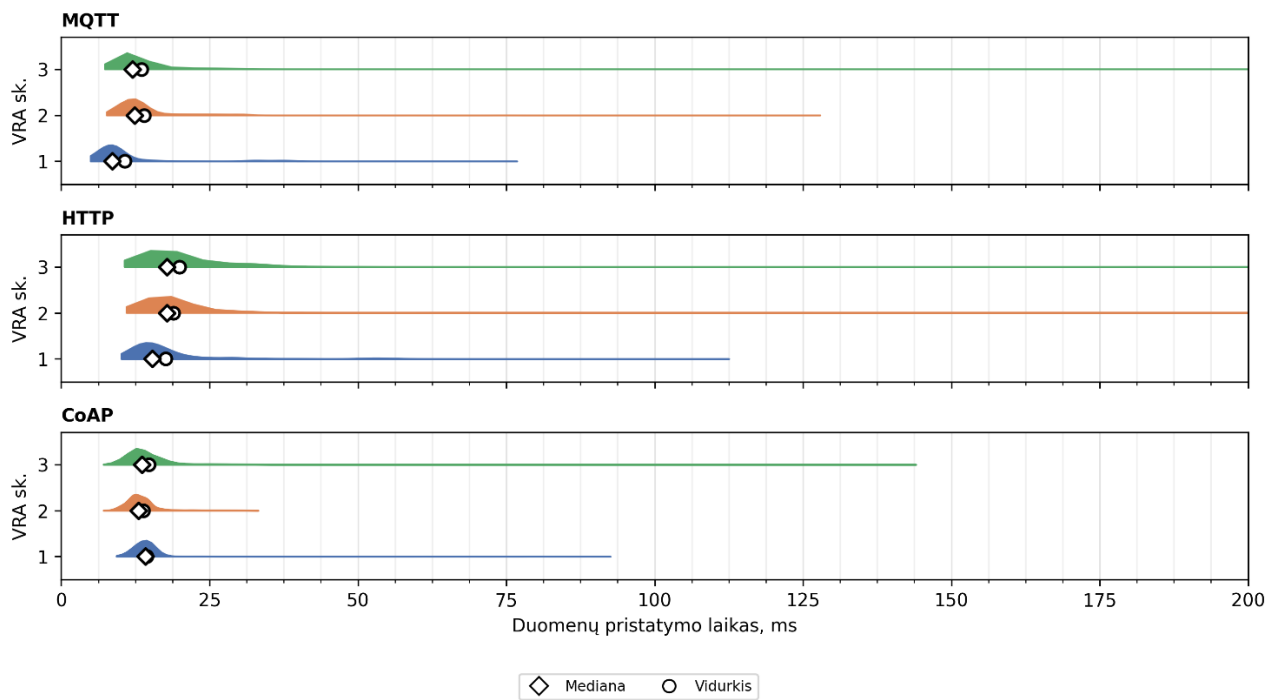
Atlikus perduodamo duomenų srauto palyginimą nustatyta, kad didėjant VRA skaičiui bendras išsiunčiamų ir gaunamų duomenų kiekis didėja tiesiškai. Skiriasi tik augimo koeficientas. Tai rodo, kad bendrą tinklo apkrovą galima proporcingai prognozuoti pagal įrenginių skaičių, nes kiekvienas papildomas VRA sukuria panašią papildomą duomenų srauto dalį. Eksperimento metu nustatyta išsiųstų ir gautų duomenų tendencija didėjant įrenginių kiekiui pateikiama 30 pav.



30 pav. Duomenų srauto pokytis didėjant VRA skaičiui

Atlikus VRA duomenų pristatymo laiko analizę, pateikiamą 31 pav., nustatyta, kad didėjant VRA skaičiui pastebimas nežymus pristatymo laiko didėjimas, tačiau dėl riboto įrenginių skaičiaus negalima teigti, kad tai turi aiškų įtaką tipiniam duomenų pristatymo laikui. MQTT atveju vidutinės reikšmės siekia apie 10,7–14,0 ms, HTTP atveju – apie 17,6–19,9 ms, o CoAP atveju – apie 13,8–14,8 ms. Pagal medianas didžiausias pristatymo laikas pastebimas HTTP protokolui, o MQTT ir CoAP rezultatai yra mažesni ir tarpusavyje artimesni. Vis dėlto dalinių smuikinių diagramų uodegos rodo, kad visais atvejais pasitaiko pavienių didesnio vėlinimo reikšmių, ypač naudojant kelis VRA. Todėl galima teigti, kad sistemos mastelio didinimas nuo 1 iki 3 VRA reikšmingai nepadidina tipinio pristatymo laiko, tačiau gali padidinti pristatymo laiko sklaidą.

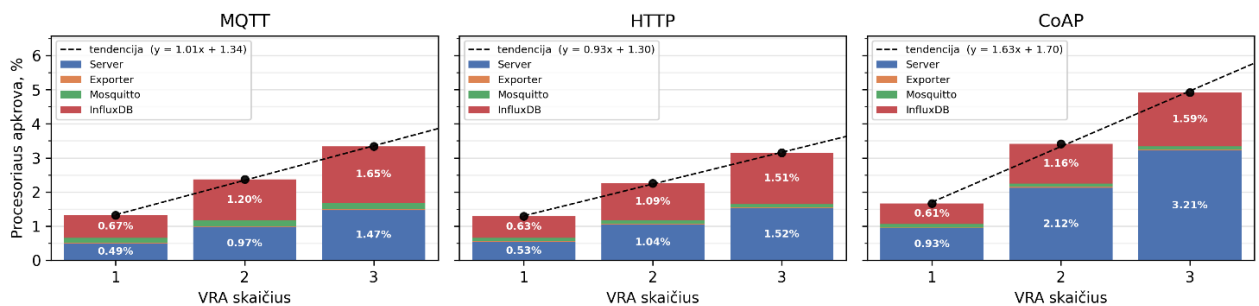
Skaitiklio duomenų pristatymo laiko į serverį priklausomybė nuo VRA skaičiaus



31 pav. Elektros skaitiklio duomenų pristatymo laikas naudojant skirtingus protokolus ir VRA kieki

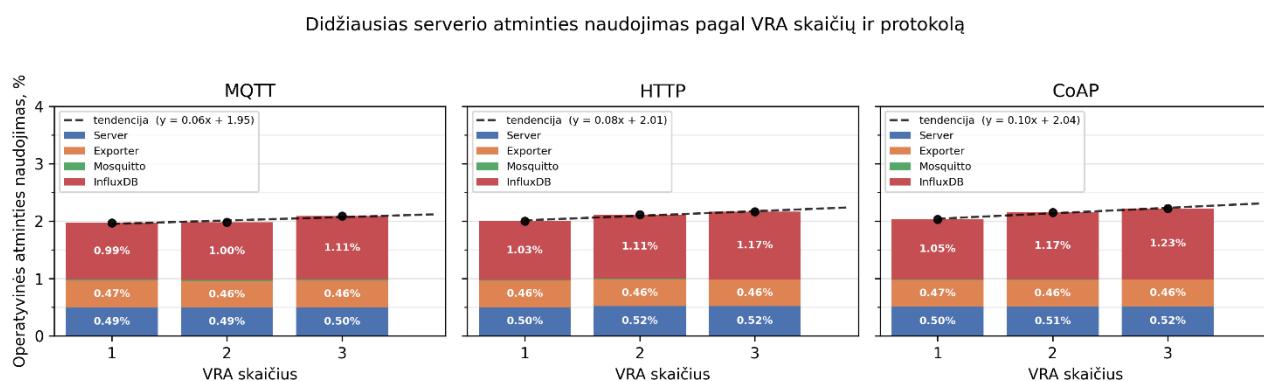
Pagal eksperimento duomenis suformuoti serverio apkrovos rezultatai rodo, kad didėjant VRA skaičiui labiausiai kinta serverio procesoriaus apkrova, pateikiama 32 pav., o operatyviosios atminties naudojimas 33 pav. išlieka beveik pastovus

Serverio procesoriaus apkrovimas pagal VRA skaičių ir protokolą



32 pav. Serverio procesoriaus apkrovos pokytis didėjant VRA skaičiui

MQTT atveju bendra procesoriaus apkrova padidėjo nuo 1,32 % iki 3,40 %, HTTP – nuo 1,30 % iki 3,20 %, o CoAP – nuo 1,70 % iki 4,90 %. Didėjant įrenginių skaičiui, sparčiausias augimas nustatytas naudojant CoAP protokolą, todėl galima teigti, kad ši konfigūracija reikalauja daugiau serverio išteklių.



33 pav. Serverio atminties apkrovimas pagal didėjantį VRA skaičių

Tuo tarpu operatyviosios atminties naudojimas visose konfigūracijose išliko stabilus ir siekė apie 2,0–2,2 %, todėl šis rodiklis nėra pagrindinis sistemą ribojantis veiksnys.

3.6. Rezultatų aptarimas ir rekomendacijos elektros tinklo parametru stebėsenai

Tyrimo rezultatai rodo, kad elektros skaitiklių surinkimo sistemos efektyvumas priklauso ne nuo vieno konkretaus parametro, o nuo tinklo apkrovos, pristatymo patikimumo, VRA ir serverio resursų naudojimo bei kitų ypatybių visumos. Tinkamiausias duomenų perdavimo sprendimas turi būti parenkamas kaip kompromisas, derinant tinkamą protokolą, duomenų paketavimą, patikimumo ir siuntimo mechanizmus.

Vertinant protokolus nustatyta, kad HTTP nėra racionalus pasirinkimas nuolatiniam mažų matavimo duomenų siuntimui telemetrijos sistemose, nes sukuria per didelį tinklo srautą. MQTT ir CoAP bazinėmis sąlygomis yra tinkamesni, tačiau jų pritaikymas skiriasi. CoAP pasižymi mažesne VRA apkrova, bet praranda pranašumą nestabiliame tinkle. Todėl CoAP tikslinga rinktis tik esant kontroliuojamoms ryšio sąlygoms arba kai leidžiamas dalinis duomenų praradimas. MQTT tikslingiau taikyti tada, kai reikalingas stabilesnis pranešimų pristatymas ir sistema turi veikti prastesnėmis ryšio sąlygomis.

Duomenų paketavimo rezultatai rodo, kad vienas praktiškiausių sistemos optimizavimo būdų yra kelių matavimų kaupimas viename pakete. Tačiau ši priemonė turi ribą. Paketavimas iki 5–10 matavimų leidžia reikšmingai sumažinti pridėtinį srautą, tačiau didesnis paketavimo lygis padidina VRA atminties naudojimą bei fragmentaciją, kas mažina įrenginio stabilumą. Nors esamame tyrime 30 reikšmių (apie 7 kB) veikė tvarkingai, praktiškai didesnės reikšmės gali dar labiau padidinti sistemos nestabilumo riziką.

Protokolų perdavimo patikimumo vertinimas parodė, kad tikslinga perdavimo režimą pasirinkti pagal duomenų svarbą ir ryšio kokybės sąlygas. Kritiniams įvykiams ir matavimams tinkamiausi yra MQTT QoS 1, nes tyrimo metu jis išlaikė stabiliausią pristatymą esant paketų praradimui. Mažesnės svarbos periodiniams duomenims galima taikyti MQTT QoS 0, kai siekiama mažesnių perdavimo sąnaudų. HTTP patikimumo požiūriu nebuvo prasčiausias, tačiau dėl didesnio pridėtinio srauto nėra

palankus nuolatinei telemetrijai. CoAP reikėtų rinktis tik tada, kai ryšio sąlygos stabilios arba pavieniai duomenų praradimai yra priimtini.

Įvykiais grįstas siuntimo modelis parodė didžiausią naudą tada, kai elektros tinklo parametrų pokyčiai nėra nuolatiniai. Šis metodas leidžia sumažinti ne tik perduodamų duomenų kiekį, bet ir serverio bei VRA procesoriaus apkrovą. Buvo pastebėta, kad siuntimo veiksmai labiau apkrauna VRA procesorių negu įvykių aptikimas. Vis dėlto šio modelio negalima vertinti tik pagal sumažėjusį srautą. Jo patikimumas priklauso nuo įvykių aptikimo algoritmo tikslumo. Eksperimentuose ne visi pokyčiai buvo aptikti, todėl toks modelis neturėtų būti naudojamas kaip vienintelis duomenų surinkimo būdas, jeigu reikia pilnos matavimų sekos.

Sistemos išplečiamumo vertinimas parodė, kad didėjant VRA skaičiui duomenų srautas auga beveik tiesiškai, todėl tinklo apkrovą galima lengvai prognozuoti pagal prijungtų įrenginių skaičių. Serverio pusėje pagrindiniu ribojančiu veiksniu tampa ne operatyvioji atmintis, o procesoriaus apkrova. Todėl plečiant sistemą svarbu ne tik atlikti pakeitimus serverio pusėje, bet ir mažinti perteklinį srautą VRA pusėje, taikant duomenų paketavimą, įvykiais grįstą filtravimą ir tinkamai parinktą patikimumo režimą.

Verta paminėti, kad šiame darbe nebuvo apžvelgti papildomi veiksniai, kurie turi įtakos praktiniam elektros skaitiklių duomenų surinkimo sistemos veikimui. Pirmiausia vietoje darbe naudoto JSON duomenų serializavimo formato realioje sistemoje būtų verta apsvarstyti dvejetainius duomenų serializavimo formatus, tokius kaip *Protocol Buffers*, kurie galėtų sumažinti perduodamų duomenų kiekį. Taip pat galėtų būti įvertinta duomenų glaudinimo galimybė prieš siunčiant duomenis. Skaitiklių duomenys yra homogeniški, o tai sudaro prielaidas geroms glaudinimo galimybėms. Be to, šiame darbe nebuvo atskirai nagrinėti saugumo ir privatumo aspektai. Saugumo požiūriu reikėtų įvertinti papildomų apsaugos mechanizmų, pavyzdžiui, TLS šifravimo, poveikį perduodamų duomenų kiekiui. Privatumo požiūriu reikėtų įvertinti riziką, kad elektros skaitiklio duomenys gali atskleisti jautrius vartotojo elgsenos modelius, ir apsvarstyti jų anonimizavimo galimybes. Ateityje būtų tikslinga įvertinti ir šių veiksnių įtaką elektros skaitiklių duomenų surinkimo sistemai.

Apibendrinant rezultatus, galima teigti, kad bendruoju atveju darbo tikslą geriausiai atitinka MQTT pagrindu veikiantis duomenų surinkimo sprendimas, derinamas su matavimų paketavimu ir hibridine įvykiais grįsta logika. Rekomenduojama elektros tinklo parametrų stebėsenai taikyti MQTT protokolą, 5–10 matavimų paketavimą viename pakete, o QoS lygį parinkti pagal duomenų svarbą, t. y. svarbiems, pavyzdžiui, suvartojimo duomenims, naudoti QoS 1, o mažesnės svarbos periodiniams matavimams apsvarstyti QoS 0 lygį. Įvykiais grįstas siuntimas turėtų būti naudojamas ne kaip pilnas periodinio stebėjimo pakaitalas, o kaip papildomas mechanizmas, sumažinantis srautą tada, kai tinkle nėra reikšmingų pokyčių. Toks sprendimas sudaro geriausią kompromisą tarp patikimumo, tinklo apkrovos ir ribotų VRA resursų naudojimo. Esant realaus laiko transliavimo poreikiui, geriausia naudoti MQTT protokolą ir transliuoti kiekvieną matavimą iš karto po jo gavimo. HTTP protokolas turėtų būti naudojamas tik esamų sistemų palaikymo sprendimams, tačiau ne naujiems sprendimams.

Išvados

1. Atlikus elektros tinklo stebėsenos taikymo uždavinių apžvalgą nustatyta, kad žemos įtampos tinkle išmanieji skaitikliai gali būti naudojami ne tik energijos apskaitai, bet ir kitoms paskirtims, tokioms kaip anomalijų aptikimas, tinklo diagnostika bei elektros energijos kokybės analizė. Šiems uždaviniams įprastų 10–15 min. intervalais perduodamų agreguotų duomenų dažniausiai nepakanka, nes trumpalaikiai įtampos, srovės ar galios pokyčiai gali likti nepastebėti. Norint tokius įvykius fiksuoti paskirstytoje sistemoje, reikalinga dažnesnė, pavyzdžiui, 1 s laiko raiškos matavimo informacija. Tačiau tokiu atveju perduodamų duomenų kiekis gali padidėti kelis šimtus kartų. Todėl šiame darbe analizuojamos perdavimo strategijos, leidžiančios perduoti sekundinės raiškos matavimo informaciją taip, kad būtų sumažintas perteklinis duomenų srautas, išlaikytas pakankamas perdavimo patikimumas ir optimaliai naudojami VRA bei tinklo resursai.
2. Išanalizavus elektros tinklo įrangos stebėsenai taikomus duomenų perdavimo sprendimus nustatyta, kad tokiose sistemose duomenys dažniausiai nuskaitomi per vietines skaitiklio sąsajas arba perduodami nuotoliniu būdu į centrinės sistemas. Išmaniųjų skaitiklių kontekste vietiniam duomenų nuskaitymui dažniausiai naudojamos P1/DSMR, optinio D0 prievado, RS-485, Modbus RTU, DLMS/COSEM ir M-Bus sąsajos. Nuotoliniam perdavimui – PLC, RF, Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M ir GSM/GPRS technologijos. Dalis elektros tinklo operatorių naudojamų sprendimų yra uždaro tipo arba gamintojo specifiniai, todėl jų analizė ir pritaikymas nepriklausomoms stebėsenos sistemoms yra riboti. Dėl to šiame darbe pasirinkta kurti nuo operatoriaus infrastruktūros nepriklausomą sprendimą, kuriame vertinami atviri IP pagrindu veikiantys komunikacijos protokolai – MQTT, HTTP ir CoAP, naudojant Wi-Fi ryšio technologiją ir nuskaitant skaitiklio duomenis per vietinę P1/DSMR sąsają.
3. Darbe aprašyta tyrimo metodologija leidžia kontroliuojamomis ir pakartojamomis sąlygomis įvertinti išmaniųjų skaitiklių duomenų perdavimo grandinę nuo DSMR duomenų gavimo VRA iki jų įrašymo į duomenų bazę. Metodologijoje apibrėžiamos šios sistemos vertinimo konfigūracijos: MQTT, HTTP ir CoAP protokolai, 1, 5, 10 ir 30 matavimų paketavimas, 0 %, 5 % ir 20 % paketų praradimo lygiai, MQTT QoS ir CoAP CON patvirtinimo mechanizmų vertinimas, periodinis ir įvykiais grįstas siuntimas bei sistemos apkrovos kitimas didėjant VRA skaičiui. Vertinimo kriterijai apima perduodamų duomenų kiekį, pristatymo patikimumą, pristatymo laiką, VRA bei serverio resursus ir srovės sąnaudas, todėl metodologija leidžia įvertinti ne tik tinklo apkrovą, bet ir perdavimo konfigūracijų poveikį VRA bei serverio darbui.
4. Darbo metu sukurtas neinvazinis elektros tinklo parametrų stebėjimo ir duomenų perdavimo sistemos prototipas. Ją sudaro DSMR/P1 duomenų šaltinis, VRA (sukurtas ESP32-C6 pagrindu), Wi-Fi prieigos taškas, maršrutizatorius, duomenų surinkimo serveris ir multimetras. VRA geba priimti DSMR formato duomenis iš realaus arba simuliuoto šaltinio, juos apdoroti ir perduoti į serverį MQTT, HTTP arba CoAP protokolu, kur duomenys įrašomi į InfluxDB duomenų bazę. Duomenų perdavimo srautas stebimas maršrutizatoriuje, o paketų praradimo sąlygos valdomos serveryje taikant srauto kontrolės mechanizmus. Tokia sistema suteikia galimybę vertinti pristatymo laiką, analizuoti paketų perdavimo eigą ir sinchronizuotai surinkti duomenis paskirstytoje sistemoje.
5. Atlikus eksperimentinius bandymus nustatyta, kad bendruoju atveju tinkamiausia konfigūracija yra MQTT pagrindu veikiantis perdavimas su 5–10 matavimų paketavimu ir pagal duomenų svarbą parenkamu QoS lygiu. Empiriškai nustatyta, kad HTTP protokolas nėra racionalus pasirinkimas nuolatiniam mažų telemetrijos pranešimų perdavimui, nes sukuria per didelį pridėtinį srautą. CoAP protokolą tikslinga naudoti tik stabiliomis ryšio sąlygomis arba tada, kai

pavienių duomenų praradimas yra priimtinas. Duomenų paketavimas ir įvykiais grįstas siuntimas leidžia reikšmingai sumažinti tinklo apkrovą, tačiau didesnis paketavimo ar įvykių kaupimo buferis didina VRA atminties fragmentaciją ir gali mažinti sistemos stabilumą. Taip pat nustatyta, kad įvykių analizė VRA jį apkrauna mažiau negu pats duomenų siuntimas. Sistemos išplečiamumo analizė parodė, kad didėjant VRA skaičiui duomenų srautas auga beveik tiesiškai, o serverio pusėje labiausiai apkraunamas procesorius.

Literatūros sąrašas

1. NAKUTIS, Z.; M. SAUNORIS; E. VAICIUKYNAS; V. DAUNORAS; J. SALTANIS ir kt. Novel Consumer Power Event-Driven Methods for Remote Estimation of Smart Meter Error. *IEEE Access*, t. 13 (2025), p. 179504–179522. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11204016>.
2. SAUNORIS, M.; J. ŠALTANIS; R. LUKOČIUS; V. DAUNORAS; K. ZULONAS ir kt. A Method for Assessment of Power Consumption Change in Distribution Grid Branch After Consumer Load Change. *Applied Sciences*, t. 15 (2025), nr. 15, p. 8299. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/app15158299>.
3. EJUH CHE, E.; K. ROLAND ABENG; C. D. IWEH; G. J. TSEKOURAS ir A. FOPAH-LELE. The Impact of Integrating Variable Renewable Energy Sources into Grid-Connected Power Systems: Challenges, Mitigation Strategies, and Prospects. *Energies*, t. 18 (2025), nr. 3, p. 689. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en18030689>.
4. SENOL, M.; I. S. BAYRAM; L. HUNTER; K. SEVDARI; C. MCGARRY ir kt. Harmonics Measurement, Analysis, and Impact Assessment of Electric Vehicle Smart Charging. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, t. 6 (2025), p. 109–127. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10766666>.
5. KHALID, M. Smart Grids and Renewable Energy Systems: Perspectives and Grid Integration Challenges. *Energy Strategy Reviews*, t. 51 (2024), p. 101299. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>.
6. CHEN, Z.; A. M. AMANI; X. YU ir M. JALILI. Control and Optimisation of Power Grids Using Smart Meter Data: A Review. *Sensors*, t. 23 (2023), nr. 4, p. 2118. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/s23042118>.
7. AB „ENERGIJOS SKIRSTYMO OPERATORIUS“. *SMART duomenų tvarkymo taisyklės*. Vilnius, 2023. Prieiga per internetą: <https://ismaniejiskaitikliai.lt/data/public/uploads/2023/02/smart-duomenu-tvarkymo-taisykles.pdf> [žiūrėta 2026-01-28].
8. GOPSTEIN, A.; C. NGUYEN; C. O'FALLON; N. HASTINGS ir D. A. WOLLMAN. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 4.0*. NIST Special Publication. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology, 2021. Prieiga per internetą: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=931882.
9. SRIVASTAVA, I.; S. BHAT; B. V. S. VARDHAN ir N. D. BOKDE. Fault Detection, Isolation and Service Restoration in Modern Power Distribution Systems: A Review. *Energies*, t. 15 (2022), nr. 19, p. 7264. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en15197264>.
10. ATHANASIADIS, C. L.; T. A. PAPADOPOULOS ir G. C. KRYONIDIS. A Review of Smart Meter Data Analytics for Distribution Network Applications. Iš: *2023 IEEE Belgrade PowerTech*, p. 1–6. Belgrade: IEEE, 2023.
11. HE, M.; Y. WANG; Z. SONG; Z. TAN; Y. CAI ir kt. Power Quality Mitigation in Modern Distribution Grids: A Comprehensive Review of Emerging Technologies and Future Pathways. *Processes*, t. 13 (2025), nr. 8, p. 2615. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/pr13082615>.
12. YUAN, R.; S. A. POURMOUSAVI; W. L. SOONG; A. J. BLACK; J. A. R. LIISBERG ir kt. Unleashing the Benefits of Smart Grids by Overcoming the Challenges Associated with Low-

- Resolution Data. *Cell Reports Physical Science*, t. 5 (2024), nr. 2, p. 101830. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2024.101830>.
13. AB „ENERGIJOS SKIRSTYMO OPERATORIUS". Išmanusis skaitiklis – pirmasis pagalbininkas ieškant staiga išaugusio suvartojimo priežasčių, sako ESO inžinieriai. 2025. Prieiga per internetą: <https://www.eso.lt/ismanusis-skaitiklis-pirmasis-pagalbininkas-ieskant-staiga-isaugusio-suvartojimo-priezasciu-sako-eso-inzinieriai/4815> [žiūrėta 2026-01-20].
 14. MITRA, S.; B. CHAKRABORTY ir P. MITRA. Smart Meter Data Analytics Applications for Secure, Reliable and Robust Grid System: Survey and Future Directions. *Energy*, t. 289 (2024), p. 129920. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544223033145>.
 15. CHATTERJEE, A. ir P. HEER. Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) with Very Low-Frequency Data from Smart Meters in Switzerland. *Energy and Buildings*, t. 344 (2025), p. 116002. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116002>.
 16. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *LST EN 60038:2012, Standartinės CENELEC įtampos (IEC 60038:2009, modifikuotas)*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012. Prieiga per internetą: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=primove&id=842683.
 17. POWELL, J.; A. MCCAFFERTY-LEROUX; W. HILAL ir S. A. GADSDEN. Smart Grids: A Comprehensive Survey of Challenges, Industry Applications, and Future Trends. *Energy Reports*, t. 11 (2024), p. 5760–5785. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.051>.
 18. DASHTI, R.; M. DAISY; H. MIRSHEKALI; H. R. SHAKER ir M. HOSSEINI ALIABADI. A Survey of Fault Prediction and Location Methods in Electrical Energy Distribution Networks. *Measurement*, t. 184 (2021), p. 109947. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109947>.
 19. AHSAN, F.; N. H. DANA; S. K. SARKER; L. LI; S. M. MUYEEN ir kt. Data-Driven Next-Generation Smart Grid Towards Sustainable Energy Evolution: Techniques and Technology Review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, t. 8 (2023), nr. 3, p. 1–42. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10374424> [žiūrėta 2026-02-18].
 20. KABEYI, M. J. B. ir O. A. OLANREWAJU. Smart Grid Technologies and Application in the Sustainable Energy Transition: A Review. *International Journal of Sustainable Energy*, t. 42 (2023), nr. 1, p. 685–758. Prieiga per internetą: <https://agris.fao.org/search/en/records/6942ceb2f2f3b9724406e760>.
 21. CONTE, F.; F. D'AGOSTINO; B. GABRIELE; G. SCHIAPPARELLI ir F. SILVESTRO. Fault Detection and Localization in Active Distribution Networks Using Optimally Placed Phasor Measurements Units. *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 38 (2023), nr. 1, p. 714–727. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751367>.
 22. BISWAL, C.; B. K. SAHU; M. MISHRA ir P. K. ROUT. Real-Time Grid Monitoring and Protection: A Comprehensive Survey on the Advantages of Phasor Measurement Units. *Energies*, t. 16 (2023), nr. 10, p. 4054. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/en16104054>.
 23. ABDULLAH, A. A.; B. M. EL-DEN; K. M. ABO-AL-EZ ir T. M. HASSAN. Security Management for an Advanced Metering Infrastructure (AMI) System of Smart Electrical Grids. *Applied Sciences*, t. 13 (2023), nr. 15, p. 8990. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/app13158990>.

24. SHOKRY, M.; A. I. AWAD; M. K. ABD-ELLAH ir A. A. M. KHALAF. Systematic Survey of Advanced Metering Infrastructure Security: Vulnerabilities, Attacks, Countermeasures, and Future Vision. *Future Generation Computer Systems*, t. 136 (2022), p. 358–377. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.06.013>.
25. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *LST IEC 62056-21:2003*, Elektros matavimas. Skaitiklio rodmenų, tarifo ir apkrovos valdymo duomenų mainai. 21 dalis. Tiesioginiai vietiniai duomenų mainai (*IEC 62056-21:2002*). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
26. VAN AUBEL, P. ir E. POLL. Smart Metering in the Netherlands: What, How, and Why. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, t. 109 (2019), p. 719–725. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.001>.
27. NETBEHEER NEDERLAND – WG DSMR. *PI Companion Standard*, v5.0.2. 2016. Prieiga per internetą: https://www.netbeheernederland.nl/sites/default/files/2024-02/dsmr_5.0.2_p1_companion_standard.pdf.
28. HASSAN, A.; H. N. AFROUZI; C. H. SIANG; J. AHMED; K. MEHRANZAMIR ir kt. A Survey and Bibliometric Analysis of Different Communication Technologies Available for Smart Meters. *Cleaner Engineering and Technology*, t. 7 (2022), p. 100424. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100424>.
29. QAYS, M. O.; I. AHMAD; A. ABU-SIADA; M. L. HOSSAIN ir F. YASMIN. Key Communication Technologies, Applications, Protocols and Future Guides for IoT-Assisted Smart Grid Systems: A Review. *Energy Reports*, t. 9 (2023), p. 2440–2452. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.085>.
30. BAYILMIŞ, C.; M. A. EBLEME; Ü. ÇAVUŞOĞLU; K. KÜÇÜK ir A. SEVIN. A Survey on Communication Protocols and Performance Evaluations for Internet of Things. *Digital Communications and Networks*, t. 8 (2022), nr. 6, p. 1094–1104. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.03.013>.
31. SEOANE, V.; C. GARCIA-RUBIO; F. ALMENARES ir C. CAMPO. Performance Evaluation of CoAP and MQTT with Security Support for IoT Environments. *Computer Networks*, t. 197 (2021), p. 108338. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108338>.
32. MYOUNG, N.; Y. KWON; M. PARK ir C. EUN. Data Interworking Model and Analysis for Harmonization of Smart Metering Protocols in IoT-Based AMI System. *Sensors*, t. 23 (2023), nr. 6, p. 2903. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/s23062903>.
33. ENGLAND, B. S. ir A. T. ALOUANI. Internet-Based Advanced Metering and Control Infrastructure of Smart Grid. *Electrical Engineering*, t. 103 (2021), nr. 6, p. 2989–2996. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01287-5>.
34. KUABAN, G. S.; T. ATMACA; A. KAMLI; T. CZACHÓRSKI ir P. CZEKALSKI. Performance Analysis of Packet Aggregation Mechanisms and Their Applications in Access (e.g., IoT, 4G/5G), Core, and Data Centre Networks. *Sensors*, t. 21 (2021), nr. 11, p. 3898. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.3390/s21113898>.
35. NAKUTIS, Z.; S. RINALDI; P. KUZAS ir R. LUKOCIUS. A Method for Noninvasive Remote Monitoring of Energy Meter Error Using Power Consumption Profile. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, t. 69 (2020), nr. 9, p. 6677–6685. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9116835>.

36. ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32-C6 ESP-Dev-Kits Documentation*. 2026. Prieiga per internetą: <https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32c6/esp-dev-kits-en-master-esp32c6.pdf> [žiūrėta 2026-03-11].
37. FAROOQ, A.; K. SHAHID ir R. L. OLSEN. Prioritization of Smart Meters Based on Data Monitoring for Enhanced Grid Resilience. *Computer Communications*, t. 234 (2025), p. 108082. Prieiga per internetą: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366425000398>.
38. HERRNLEBEN, S.; R. AILABOUNI; J. GROHMANN; T. PRANTL; C. KRUPITZER ir kt. An IoT Network Emulator for Analyzing the Influence of Varying Network Quality. *Simulation Tools and Techniques. SIMUtools 2020. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, t. 370, p. 580–599. Cham: Springer, 2021. Prieiga per internetą: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72795-6_47.

Mokslinių publikacijų magistro tezių tema sąrašas

Web of Science duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose su cituojamumo rodikliu (tarptautinės leidyklos):

1. NAKUTIS, Z.; SAUNORIS, M.; VAICIUKYNAS, E.; DAUNORAS, V.; SALTANIS, J. ir kt. Novel Consumer Power Event-Driven Methods for Remote Estimation of Smart Meter Error. *IEEE Access*, t. 13 (2025), p. 179504–179522. Prieiga per internetą: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11204016>.
2. SAUNORIS, M.; ŠALTANIS, J.; LUKOČIUS, R.; DAUNORAS, V.; ZULONAS, K. ir kt. A Method for Assessment of Power Consumption Change in Distribution Grid Branch After Consumer Load Change. *Applied Sciences*, t. 15 (2025), nr. 15, p. 8299. Prieiga per internetą: <https://www.proquest.com/docview/3239020221>.
3. ŠALTANIS, J.; SAUNORIS, M.; LUKOČIUS, R.; DAUNORAS, V.; ZULONAS, K. ir kt. Experimental Verification and Implementation Feasibility Analysis of Remote Smart Meter Error Monitoring System in Smart Cities. Rankraštis pateiktas recenzuoti žurnalui *Smart Cities*, 2026.