VILNIAUS UNIVERSITETO

KAUNO FAKULTETAS

SOCIALINIŲ MOKSLŲ IR TAIKOMOSIOS INFORMATIKOS INSTITUTAS

Finansų technologijų studijų programa

Kodas 6211BX022

MYKOLAS PAULAUSKAS

MAGISTRO BAIGIAMASIS DARBAS

Elektros energijos prekybos blokų grandinėje modelis grindžiamas kriptožetonų naudojimu

Kaunas 2025

VILNIAUS UNIVERSITETO

KAUNO FAKULTETAS

SOCIALINIŲ MOKSLŲ IR TAIKOMOSIOS INFORMATIKOS INSTITUTAS

MYKOLAS PAULAUSKAS

MAGISTRO BAIGIAMASIS DARBAS

ELEKTROS ENERGIJOS PREKYBOS BLOKŲ GRANDINĖJE MODELIS GRINDŽIAMAS KRIPTOŽETONŲ NAUDOJIMU

Magistrantas _____

(parašas)

Darbo vadovas _____

(parašas)

_____ Jaun. Asist. Danielius Paulius _____

(darbo vadovo mokslo laipsnis, mokslo

pedagoginis vardas, vardas ir pavardė)

Darbo įteikimo data

Registracijos Nr.

Kaunas 2025

Turinys

Įvadas

Temos aktualumas

Blokų grandinės ir energetikos rinkų sandūra pastaraisiais metais sulaukė nemažai dėmesio – tiek iš tyrėjų, tiek iš praktikų. Ypač įdomus atrodo šios technologijos pritaikymas prekybai elektros energija, kur atsiranda galimybė kurti decentralizuotas, skaidrias sandorių sistemas.

Kriptografiniai žetonai energetikos kontekste nėra vien abstrakti idėja. Tradicinės elektros rinkos turi konkrečių problemų: kainodara dažnai neatspindi realios pasiūlos ir paklausos, smulkiems gamintojams sunku patekti į rinką, o sandorių grandinė lieka nepakankamai skaidri. Blokų grandinė – su savo decentralizuota struktūra ir kriptografiniu saugumu – siūlo alternatyvą, kuri galėtų spręsti bent dalį šių problemų.

Žetonų panaudojimas čia atveria naujas galimybes. Jei žetonas atitinka tam tikrą elektros energijos kiekį, prekyba gali vykti beveik realiu laiku, be tarpininkų ir su aiškia kainų logika. Tai reikštų perėjimą nuo centralizuotų kainodaros mechanizmų prie lankstesnio, rinkos signalais grįsto modelio.

Problemos ištyrimo lygis

Technologinės galimybės yra gerai ištirtos, ypač kalbant apie saugius ir skaidrius sandorius, tačiau reikia daugiau dėmesio skirti didelės apimties rinkų masteliams. Ekonominis gyvybingumas buvo ištirtas, akcentuojant sandorių sąnaudų mažinimą ir rinkos efektyvumo didinimą (pasak Devine, Russo ir Cuffe (2019)) , tačiau išsamių sąnaudų ir naudos analizių nėra daug. Reguliavimo iššūkiai yra mažiausiai išvystyta sritis, kurioje reikia išsamių tyrimų dėl blokų grandinės integracijos į esamas teisines sistemas ir platesnio poveikio energetikos reguliavimui. Kaip teigia Bevin ir Verma (2023) priėmimas rinkoje ir vartotojų reakcija rodo pradinį teigiamą požiūrį į blokų grandinės skaidrumą , tačiau būtina gilesnė vartotojų elgsenos ir priėmimo veiksnių analizė. Galiausiai, Lucas ir kt. (2021) savo darbe nors ir pripažįstama, kad gali būti remiama atsinaujinančioji energija, blokų grandinės operacijų, ypač tų, kuriose naudojami daug energijos reikalaujantys mechanizmai, aplinkosaugos sąnaudos vis dar nepakankamai ištirtos. Šis daugialypis mokslinių tyrimų kraštovaizdis rodo, kad kai kurios sritys nuodugniai ištirtos, tačiau yra didelių reguliavimo ir poveikio aplinkai spragų, kurias reikia pašalinti siekiant sėkmingo įgyvendinimo.

Darbo problema

Kaip kriptografinių žetonų pagrindu suprojektuotas blokų grandinės modelis galėtų būti pritaikytas elektros energijos kainodarai ir prekybai, atsižvelgiant į ekonominį efektyvumą ir reguliavimo reikalavimus?

Darbo objektas –

Decentralizuotas elektros energijos kainodaros ir prekybos modelis, pagrįstas kriptografiniais žetonais blokų grandinės aplinkoje.

Darbo tikslas –

Pasiūlyti ir įvertinti elektros energijos kainodaros ir prekybos modelį, paremtą kriptografinių žetonų naudojimu blokų grandinėje.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti esamus blokų grandinės taikymo energijos rinkose tyrimus.
2. Ištirti esamus atvejus, kai blokų grandinė buvo įdiegta energetikos sistemose.
3. Įvertinti reguliavimo aplinką, darančią įtaką blokų grandinės sistemai energijos rinkose.
4. Sukurti lokalaus mikrotinklo elektros energijos prekybos modelį, pagrįstą kriptografiniais žetonais.
5. Ištirti siūlomo modelio įgyvendinamumą ir efektyvumą.

1. Elektros energijos prekyba naudojantis kripto žetonais teoriniais aspektai

Šiame skyriuje bus nagrinėjama blokų grandinių technologijų evoliucija, jų taikymo galimybės energetikos sektoriuje, kripto žetonų savybės, kurios leidžia efektyviai sekti ir valdyti energijos srautus, teisės aktų ir reguliavimo aspektai, susiję su kripto žetonų naudojimu energijos prekyboje, siekiant užtikrinti jų teisėtumą ir saugumą. Tai padės sukurti tvirtą teorinį pagrindą tolimesniems praktiniams sprendimams įgyvendinti.

1.1. Blokų grandinės technologijos apžvalga

Vis labiau pripažįstama, kad blokų grandinės technologija gali sukelti revoliuciją energetikos sektoriuje, skatindama efektyvumą, skaidrumą ir decentralizaciją. Remiantis įvairiais moksliniais tyrimais, šioje analizėje nagrinėjami įvairūs blokų grandinės technologijos taikymo būdai skirtinguose energetikos rinkos aspektuose, pabrėžiant skirtingų autorių indėlį.

Autoriai Wang ir kt. (2019, p. 24) gilinasi į sisteminį blokų grandinės poveikį energijos prekybos rinkoms, teigdami, kad blokų grandinės technologija didina sandorių efektyvumą ir sukuria saugią veiklos aplinką: "Blokų grandinės gali užtikrinti didesnį lankstumą ir geresnį veikimą energijos prekybos rinkoje." Taip užtikrinamas aukštas skaitmeninių sandorių vientisumo ir pasitikėjimo lygis, būtinas paskirstytųjų energijos išteklių pripažinimui ir plėtrai. Panašias išvadas galima aptikti ir Ante ir kt. (2021) atliktoje bibliometrinėje analizėje ir apžvalgoje, kurioje išsamiai apžvelgiama blokų grandinių integracija į įvairias energetikos sistemas, pabrėžiama blokų grandinės vaidmuo palengvinant atsinaujinančiosios energijos integraciją, ypač atkreipiant dėmesį į tai, kaip automatizuotos prekybos sistemos užtikrina, kad energijos gamyba ir paskirstymas būtų atsekami ir efektyviai įtraukiami į apskaitą, o tai labai svarbu siekiant subalansuoti pasiūlą ir paklausą paskirstytuose elektros energijos gamybos ir vartojimo tinkluose.

Aukščiau minėtas išvadas pagrindžia ir Dang ir kt. (2019) straipsnis atkreipdami dėmesį į tai, kaip blokų grandinė gali optimizuoti didelių pramoninių naudotojų energijos paklausos valdymą, teikdama realaus laiko duomenis, kurie padeda taikyti dinamines kainų nustatymo ir apkrovos perkėlimo strategijas, tokiu metodu siekiant sumažinti sąnaudas ir padidinti tinklo stabilumą.

„Pagrindinė šios apkrovos valdymo problemos ypatybė yra ta, kad naudotojas tiesiogiai kontroliuoja savo apkrovą. Gautas apkrovos valdymo modelis yra daug tikslesnis nei esami metodai, kai

sistemos operatoriai ar paklausos agregatoriai negali tiesiogiai valdyti apkrovos ir turi pasikliauti netiksliais įvertinimais.“ (Dang ir kt., 2019, p. 1)

Galima teigti, kad blokų grandinės gebėjimas palengvinti tarpusavio energijos sandorius ir teikti tikslius realaus laiko duomenis daro ją esmine paklausos valdymo priemone, leidžiančia sutaupyti resursus ir padidinti energijos tinklo patikimumą. Šiam teiginiui taip pat pritaria ir Wu, Li, ir Gao (2021, p. 6) darytas energijos prekybos blokų grandinėje modelio tyrimas: „rinkos pasiūla ir paklausa gali būti koreguojama pagal kainą realiuoju laiku“, o tai rodo blokų grandinės gebėjimą dinamiškai vykdyti energijos sandorius. Ši galimybė yra labai svarbi didžiausios apkrovos metu, užtikrinant veiksmingą energijos pasiūlos ir vartotojų paklausos suderinimą ir taip stabilizuojant tinklą, bei tiksliau formuojant kainas. Galiausiai, tyrimo rezultatai rodo, kad taikant šį modelį gerokai padidėja rinkos efektyvumas pritraukiant išorės dalyvius - platforma palaiko kainų stabilumą ir skatina daugiau dalyvių, o tai savo ruožtu skatina technologinę pažangą ir mažina prekybos sąnaudas.

Įvairūs tyrimai, susiję su blokų grandinės technologija energetikos sektoriuje, pabrėžia jos potencialą patobulinti elektros prekybos rinką - sudarydama sąlygas saugesniems, skaidresniems ir efektyvesniems procesams, blokų grandinės technologija sprendžia pagrindinius tradicinės ir atsinaujinančiosios energijos rinkų iššūkius. Šios galimybės padeda geriau integruoti atsinaujinančiuosius energijos šaltinius, optimizuoti energijos naudojimą pramonėje ir pagerinti rinkos operacijas realiuoju laiku, sudarydamos prielaidas sukurti atsparesnę ir tvaresnę energetikos infrastruktūrą. Blokų grandinės technologijai toliau tobulėjant, jai teks vis svarbesnis vaidmuo modernizuojant energetikos sistemas visame pasaulyje, užtikrinant, kad jos efektyviai ir tvariai tenkintų ateities poreikius.

1.2. Kriptografinių žetonų raida

Kriptovaliutų žetonų diegimas energetikos sektoriuje yra reikšminga technologinė pažanga, galinti padidinti rinkos efektyvumą, aplinkos tvarumą ir lengvinti gamintojų bei vartotojų įsitraukimą, toliau yra pateikiama analizė remiantis įvairiais moksliniais darbais ir pateikiama informacija apie tai, kaip žetonai gali pakeisti prekybą energija ir jos valdymą.

Devine, Russo ir Cuffe (2019) nagrinėja blokų grandinės technologijos potencialą patobulinti tradicines energijos rinkas, suteikiant galimybę vykdyti decentralizuotus vartotojų tarpusavio sandorius, sudarant energijos tiekimo sutartis remiantis žetonų išdavimo mechanizmais. Autoriai siūlo naują

išankstinio atsinaujinančiosios elektros energijos gamybos pardavimo mechanizmą, pagal kurį vėjo ar saulės jėgainių parkas gali tiesiogiai parduoti teisę ar leidimą naudoti savo gaminamą elektros energiją blokų grandinės žetonų pavidalu, kurie, naudojant išmaniųjų sutarčių kodą vykdomą blokų grandinėje, leidžia beveik realiuoju laiku kompensuoti žetonų turėtojų elektros energijos suvartojimą.

Taip pat Kim ir kt. (2021) gilinasi į svarbų žetonų vaidmenį skatinant aplinkos tvarumą pasitelkiant blokų grandinės technologiją aiškindami, kad naudodami žetonais išreikštus atsinaujinančiosios energijos sertifikatus, yra suteikiama galimybė tiesiogiai, patikimai ir patikrinamai sekti būtent atsinaujinančiosios energijos vartojimo, veiksmingai suderinant vartotojų veiksmus su pasauliniais tvarumo tikslais. Šis metodas gerokai padidina atsinaujinančiųjų energijos šaltinių atsekamumą, skatina platesnį jų taikymą ir remia perėjimą prie žaliosios energijos. Suteikdami skaidrų ir patikrinamą atsinaujinančiosios energijos vartojimo stebėjimo metodą, blokų grandinė ir kriptografiniai žetonai suteikia vartotojams galimybę priimti pagrįstus sprendimus, kurie tiesiogiai prisideda prie aplinkos tvarumo, ne tik didindami rinkos prieinamumą ir efektyvumą, bet ir skatindami tvaresnę energetikos ekosistemą, suderinant vartotojų elgseną su pasauliniais aplinkosaugos tikslais. Taigi, pagal Devine, Russo ir Cuffe (2021) ir Kim ir kt. (2021) kriptografinių žetonų naudojimas suteikia vartotojams galimybę ne tik saugiai, greitai ir patikimai įsigyti energijos, bet ir leidžia rinktis šios energijos šaltinį pagal vartotojų pageidavimus.

Lucas ir kt. (2021) pabrėžia žetonų naudojimo efektyvumą tinklo valdymui - straipsnyje nupasakojama, kad žetonų, kaip skaitmeninio atlygio sistemos naudojimas, ne tik skatina taupyti energiją piko metu, bet ir suteikia pasitikėjimo ir tikrumo, kurio nėra tradicinėse sistemose, toks sistemos modelis leidžia vartotojams matyti dinamišką elektros kainą ir sąmoningai pasirinkti kokiu metu jiems yra daugiau finansinių iniciatyvų ją naudoti, paskirsčius energijos vartojimą - stabilizuojama tinklo veikla ir skatinamas veiksmingas išteklių valdymas.

Bevin ir Verma (2023) savo darbe nagrinėja blokų grandinės technologijos teikiamas finansines naujoves decentralizuotose vietinėse elektros energijos rinkose. Jie pabrėžia žetonų vaidmenį tobulinant rinkos operacijas, ypač naudojant automatizuotų rinkos formuotojų protokolus. Bevin ir Verma (2023) pažymi, kad „tokenizuodami“ atsinaujinančią energiją gaminančių įrenginių elektrą, pateikiamas prieinamas investavimo modelis, kuris peržengia finansines kliūtis tradicinėse sistemose - atveriant naujas galimybes investuoti į žaliosios energijos projektus tvarios technologijos tampa ekonomiškai gyvybingesnės ir lengviau pritaikomos. Šių autorių įžvalgos sutampa su Kim ir kt. (2021), kurios teigia, kad kriptografiniai žetonų modeliai gali skatinti atsinaujinančios energijos gamybą ir vartojimą.

Išnagrinėjus įvairias mokslininkų perspektyvas dėl kriptografinių žetonų integracijos į energetikos sektorių, paaiškėja, kad tokie prekybos modeliai turi didelį potencialą atitikti tiek aplinkosaugos, tiek ekonominius tikslus - sudarydami sąlygas tiesioginei rinkos sąveikai, skatindami tvarų vartojimą, blokų grandinės technologija ir žetonai gali iš esmės pakeisti energetikos rinkų apibrėžimą pereinant prie labiau decentralizuotų, skaidresnių ir jautresnių sistemų, suteikiant galimybę pokyčiams besikeičiančiame pasaulinės energetikos valdymo ateityje.

1.3. Esamų tyrimų spragos

Nors blokų grandinės technologijos integravimas į energetikos sektorių rodo daug žadančios pažangos, yra pastebimų mokslinių tyrimų spragų, kurias reikia pašalinti, kad būtų galima visapusiškai išnaudoti jos potencialą - išanalizavus dabartinę literatūrą, išryškėja kelios sritys, kuriose tolesni tyrimai galėtų atnešti didelės naudos ir pažangos.

Vienas iš pagrindinių iššūkių, įvardytų esamuose tyrimuose, pavyzdžiui, Wang ir kt. (2019) darbe apie energijos prekybos sistemas - blokų grandinės sprendimų mastelio keitimas. Dabartinėms blokų grandinės sistemoms gali būti sunku vykdyti didelės apimties operacijas, būdingas nacionaliniams elektros energijos tinklams ar pasaulinėms tiekimo grandinėms. Tyrimuose pabrėžiami pradiniai rezultatai, tačiau trūksta išsamių bandymų didelio masto sistemose dalyvaujant dideliam vartotojų skaičiui, kada tokie faktoriai kaip tinklo vėlavimas ir sandorių pralaidumas tampa kritiškai svarbūs.

Nors blokų grandinės pranašumas skelbiamas dėl saugumo, jų poveikis vartotojų privatumui energetikos srityje nėra pakankamai ištirtas. Tokiuose tyrimuose, kaip Dang ir kt (2019) atliktas paklausos valdymo tyrimas, kalbama apie duomenų valdymą, tačiau nėra gilinamasi į privatumo problemas, kylančias, kai vartotojų energijos vartojimo duomenys saugomi blokų grandinėje, iš kurių duomenys negali būti panaikinami, todėl reikia tolesnių tyrimų, kad būtų galima suderinti skaidrumą ir saugumą su privatumo apsauga vartotojams bei teise būti pamirštam, tokiu būdu, kuris būtu suderintas su reguliavimo institucijoms.

Wu, Li, ir Gao (2021) darbe, skirtame realaus laiko energijos aukcionų modeliams, pristatomi ekonominiai blokų grandinės privalumai energijos rinkose, tačiau trūksta išsamių ekonominių analizių, kuriose būtų kiekybiškai įvertintos bendros blokų grandinės diegimo dideliu mastu sąnaudos lyginant su privalumais - išsamios sąnaudų analizės, įskaitant ilgalaikes veiklos sąnaudas, pradines investicijas ir

investicijų atsiperkamumą dėl sutaupytų efektyvumo lėšų, yra labai svarbios siekiant platesnio blokų grandinės technologijų pritaikymo ir investicijų į jas.

Wu ir kt. (2017) atliktame tiekimo grandinės valdymo tyrime pabrėžiamas blokų grandinės potencialas siekiant pagerinti stebėjimo ir apskaitos sistemas, tačiau pastebimas trūkumas tyrimų, susijusių su blokų grandinės technologijų sąveika su esama energetikos ir IT sistemų infrastruktūra. Integracijos iššūkius, ypač senesnėse sistemose, kurios gali nepalaikyti blokų grandinės technologijos be esminių atnaujinimų, reikia toliau tirti, kad būtų galima suprasti praktines problemas diegiant blokų grandines įvairiose energetikos sistemose.

Norint, kad blokų grandinės technologija būtų sparčiau diegiama ir efektyvesnė energetikos sektoriuje, būtina pašalinti šias mokslinių tyrimų spragas: mastelio plėtrą, vartotojų privatumą, ekonominį poveikį ir sistemų sąveiką. Tokie tolimesni tyrimai gali padėti visapusiškiau suprasti blokų grandinės diegimą energetikos sistemose, padidinti dabartines energijos prekybos galimybes ir užtikrinti, kad blokų grandinės technologijos diegimas būtų praktiškas ir naudingas įvairiais energetikos sektoriaus sąlygomis.

1.4. Elektros energijos rinkos apžvalga

Elektros energijos rinka yra kompleksinė sistema, kurioje dalyvauja įvairūs rinkos subjektai, tokie kaip gamintojai, tiekėjai, vartotojai ir reguliuojančios institucijos. Lietuvoje elektros energija gaminama iš įvairių šaltinių - pagrindiniai yra tradiciniai iškastinio kuro jėgainės ir vis augančios atsinaujinančios energijos jėgainės. Atsinaujinančių energijos šaltinių, tokių kaip vėjo ir saulės energija, svarba nuolat didėja, pagal pateikiamus duomenis (Oficialios statistikos portalas, 2023) 2022 metais daugiau nei du trečdaliai Lietuvoje pagamintos elektros energijos buvo iš atsinaujinančių šaltinių. Taip pat lyginant su duomenimis iš 2019 metų matome, kad iš visų atsinaujinančių šaltinių saulės energija pakilo nuo 0,5 proc. iki 1,6 proc.

Gaminantys vartotojai yra elektros energijos vartotojai, kurie ne tik sunaudoja, bet ir gamina elektrą naudodami savo energijos gamybos įrenginius, tokius kaip saulės baterijos ar vėjo jėgainės. Jie gali tiekti perteklinę energiją į elektros tinklą ir gauti už tai kompensaciją arba susigrąžinti energiją, kai jos trūksta, ši praktika leidžia sumažinti elektros sąnaudas ir skatina atsinaujinančios energijos šaltinių naudojimą, prisidedant prie aplinkos apsaugos ir energijos sistemos tvarumo. Tokios apskaitos sistemos skatina energijos decentralizaciją ir savarankiškumą, nes vartotojai gali tapti aktyviais rinkos dalyviais,

o ne tik pasyviais vartotojais. Tai taip pat padeda sumažinti energijos nuostolius, susijusius su perdavimu, ir didina energijos tiekimo saugumą. Gaminančių vartotojų kiekis Lietuvoje per 2023 metus išaugo dvigubai (Ignitis, 2024). O pagal Lietuvos energetikos agentūros duomenis gaminančių vartotojų pateiktos į tinklą elektros energijos kiekis 2023 metus išaugo nuo 191,4 GWh iki 543.7 GWh – pagal tai galime matyti žmonių tendencingumą vis daugiau gaminti naudoti ir pardavinėti elektros energijos, ko pasėkoje kyla poreikis tobulinti ir optimizuoti šios veiksmus, kadangi dabartinėje sistemoje galima įžvelgti keletą trūkumų, susijusių su apskaitos modeliais, kurie galėtų būti pagerinti.

Gaminantys vartotojai Lietuvoje gali rinktis tarp dviejų pagrindinių apskaitos modelių: dvipusės apskaitos (angl. *net metering*) ir grynojo atsiskaitymo (angl. *net billing*). Abudu pateikti modeliai leidžia vartotojams rinktis kaip jiems yra finansiškai kompensuojama už pagamintą perteklinę elektros energiją, tačiau kiekviename modelyje galime įžvelgti jų privalumų ir trūkumų - žemiau pateiktoje lentelėje apžvelgiami pagrindiniai šių apskaitos modelių trūkumai:

lentelė. 1: Gaminančių vartotojų elektros apskaitos tipai. Parengta pagal Ignitis duomenis (Ignitis, 2024)

Apskaitos tipas	**Dvipusė apskaita**	**Grynasis atsiskaitymas**
Tinkamumas	Gali rinktis visų tipų saulės elektrinių savininkai. Nuo 2024 m. nebetaikoma vėjo elektrinių savininkams.	Gali pasirinkti visų tipų saulės elektrinių savininkai. Vėjo elektrinių savininkams šis apskaitos modelis yra privalomas.
Energijos apskaita	Pagaminta energija parduodama už tuo metu biržoje esančią elektros kainą, tačiau gaminančiam vartotojui ji apskaitoma **kilovatvalandėmis**.	Pagaminta energija parduodama už su nepriklausomu tiekėju sutartą kainą, o gaminančiam vartotojui apskaitoma **jos piniginė vertė.**
Mokesčiai	Mokamas nustatytas mokestis už pasinaudojimą tinklais.	Netaikomas ESO mokestis už pasinaudojimą tinklais. Į kilovatvalandės kainą yra įskaičiuojamas standartinis persiuntimo tarifas, kaip ir visiems vartotojams.
Kaupimas	Kaupiamos nepanaudotos **kilovatvalandės**.	Kaupiami **eurai**, gauti už parduotą elektros energiją.
Naudojimas	Kai vartojama daugiau energijos, nei pagaminama, naudojamos sukauptos kilovatvalandės.	Kai vartojama daugiau energijos, nei pagaminama, ji įsigyjama už sukauptus pinigus.

Dvipusė apskaita ir grynasis atsiskaitymas turi savo privalumų, tačiau dėl centralizuoto tinklo valdymo jie turi ir savo trūkumų. Dvipusės apskaitos modelis leidžia vartotojams kaupti savo perteklinę energiją matuojant ją kilovatvalandėmis, tačiau tai reikalauja nuolatinės priežiūros iš centralizuoto tinklo operatoriaus pusės. Tuo tarpu grynasis atsiskaitymas, nors ir suteikia didesnį finansinį lankstumą, yra priklausomas nuo elektros kainų svyravimų ir centralizuotų reguliuojamų tarifų, kurie gali keistis ir daryti įtaką vartotojų sąskaitoms. Abu modeliai taip pat ne visada skatina optimizuotą energijos vartojimą ir gamybą realiu laiku, kas yra būtina moderniam ir tvariam energetikos sektoriui. Šiuos pateiktus trūkumus galėtų spręsti decentralizuotos elektros energijos rinkos įgyvendinimas.

Decentralizuotos elektros energijos rinkos plačiai pripažįstamos dėl savo gebėjimo didinti rinkos lankstumą - pasak Ahlqvist ir kt. (2022) decentralizuotos sistemos suteikia daugiau lankstumo, nes leidžia lokaliai koreguoti pasiūlą ir paklausą, o tai leidžia geriau prisitaikyti prie svyravimų ir padidinti tinklo patikimumą, taip pat ir Bjarghov (2021) pritaria šiai nuomonei, pabrėždami, kad vietinės rinkos didina lankstumą, sudarydamos sąlygas vietiniam balansavimui ir perkrovų valdymui. Panašiai ir Eid ir kt. (2016) pabrėžia paskirstytųjų energijos išteklių (angl. distributed energy resources, DER) potencialą suteikti didelį lankstumą, jei jie tinkamai valdomi, kas yra ypač aktualu Lietuvos energijos rinkai, turint omenyje, kaip ženkliai išaugo gaminančių vartotojų kiekis per pastaruosius metus.

Integruojant decentralizuotas rinkas kyla didelių techninių iššūkių, įskaitant tinklo stabilumą, technologijų sąveiką ir pažangių matavimo bei kontrolės sistemų poreikį. Ahlqvist ir kt. (2022) nurodo techninius iššūkius, susijusius su DER integravimu ir tinklo stabilumo palaikymu, kuriems reikia sudėtingo koordinavimo ir valdymo, ta pačia tema Bjarghov (2021) savo tyrime aptaria vietinių tinklo valdymo ir įvairių technologijų sąveikos užtikrinimo sunkumus, nurodydami, kad šie iššūkiai turi būti sprendžiami, kad decentralizuotos rinkos veiktų efektyviai. Eid ir kt. (2016) pabrėžia pažangių matavimo ir valdymo sistemų poreikį, kad būtų galima veiksmingai valdyti DER, pabrėždami, kad technologinė pažanga yra labai svarbi decentralizuotų rinkų sėkmei.

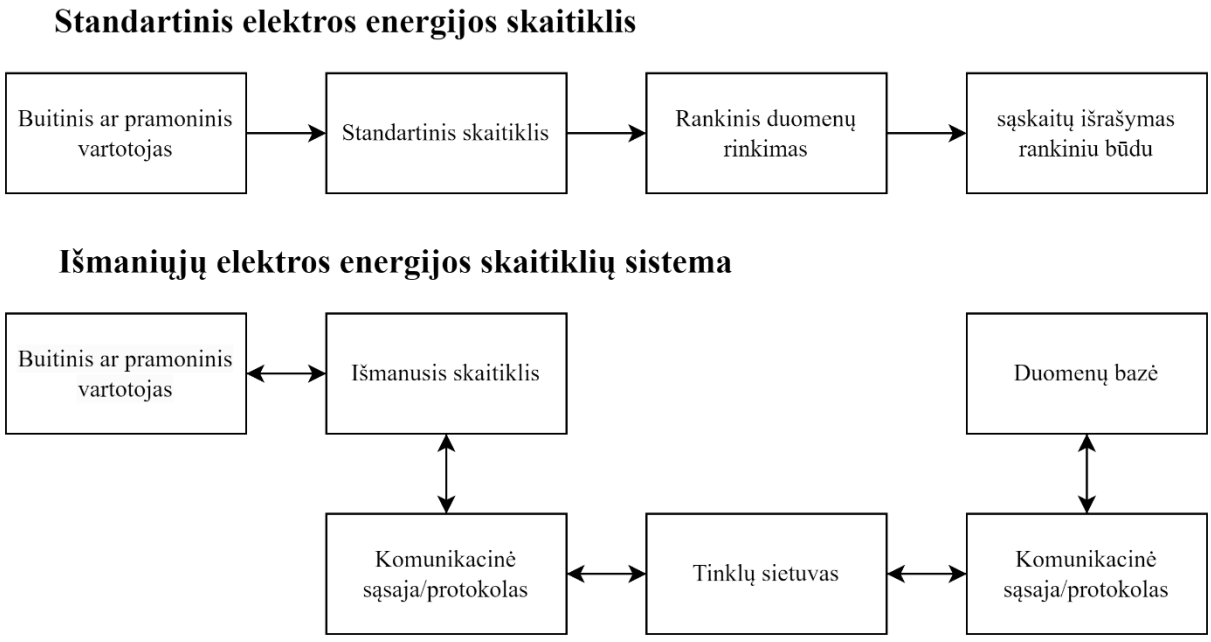
1.5. Energijos gamybos ir sąnaudų sekimo technologijos

Išmanieji skaitikliai iš esmės pakeitė elektros energijos apskaitą – vietoj tradicinių skaitiklių, kuriuos reikėdavo nuskaityti rankiniu būdu kartą per mėnesį, dabar duomenys perduodami automatiškai kas 15 minučių ar net dažniau. Praktiškai tai reiškia, kad tiek vartotojas, tiek tiekėjas mato tą pačią

informaciją beveik realiu laiku: kiek elektros sunaudota, kada vartojimo pikas, o prosumerių atveju – kiek energijos buvo pagaminta ir perduota į tinklą.

Dvikryptis ryšys tarp skaitiklio ir operatoriaus sistemos atveria galimybes, kurios anksčiau buvo neprieinamos. Pavyzdžiui, dinaminis tarifų taikymas – kai elektra pigesnė naktį ar saulėtą vidurdienį, vartotojas gali tai matyti ir atitinkamai planuoti energijai imlias veiklas. Prosumeriams tai dar aktualiau: išmanusis skaitiklis fiksuoja ne tik kiek elektros paimta iš tinklo, bet ir kiek atiduota, o tai būtina sąlyga bet kokiai P2P prekybos sistemai veikti.

Decentralizuotoje energetikoje išmanieji skaitikliai tampa infrastruktūros pagrindu. Be tikslių, laiku gaunamų duomenų apie gamybą ir vartojimą neįmanoma nei korektiškai atsiskaityti tarp šalių, nei subalansuoti tinklo, kai vis daugiau mažų gamintojų į jį tiekia kintamą saulės ar vėjo energiją. Šalys, kuriose išmaniųjų skaitiklių aprėptis siekia beveik 100%, turi aiškų pranašumą diegiant naujas energijos prekybos sistemas – tuo tarpu rinkose su žemesne aprėptimi infrastruktūros paruošimas išlieka viena iš pagrindinių prielaidų.



pav. 1 Standartinių ir išmanių skaitiklių architektūra (Depuru ir kt. (2011))

Schemoje lyginami įprasti energijos skaitikliai ir išmaniųjų skaitiklių sistemos. Įprastoje sistemoje energijos suvartojimą fiksuoja tradiciniai skaitikliai, o duomenys renkami ir sąskaitos išrašomos rankiniu būdu, todėl pasitaiko klaidų ir vėlavimų. Tuo tarpu išmaniuosiuose skaitikliuose duomenys renkami ir sąskaitos išrašomos automatizuotai, realiuoju laiku palaikant abipusį ryšį su centralizuota duomenų baze, tai leidžia tiksliai, realiuoju laiku stebėti ir nuotoliniu būdu valdyti energijos

suvartojimą. Išmanieji skaitikliai didina efektyvumą, mažina veiklos sąnaudas ir padeda decentralizuotoms energetikos sistemoms, nes leidžia tiksliai stebėti ir integruoti atsinaujinančius energijos šaltinius.

Išmanieji skaitikliai - pagrindiniai modernių energijos tinklų komponentai, kurie ne tik matuoja energijos suvartojimą, bet ir gali integruotis į komunalinių paslaugų bendrovių sistemas, kurios sudaro galimybes vartotojams dalintis informacija apie energijos suvartojimą, tinklo būklę ir remiantis šiais duomenimis kontroliuoti energijos vartojimo nurodymus. Tokia abipusio ryšio galimybė yra labai svarbi šiuolaikinėms energetikos sistemoms, leidžianti realiuoju laiku stebėti ir valdyti buitinius prietaisus ir kitus įrenginius pagal individualius vartotojų pageidavimus. Sun ir kt. (2016) išsamioje apžvalgoje sistemingai nagrinėjamas išmaniųjų energijos skaitiklių kūrimas ir diegimas, pabrėžiant jų esminį vaidmenį plėtojant energetikos tinklus siekiant didesnio efektyvumo. Išmanieji skaitikliai palaiko įvairias funkcijas ir integracijas į kitas sistemas, įskaitant automatinį skaitiklių rodmenų nuskaitymą, sistemos diagnostiką ir apkrovos valdymą, o visa tai padeda kontroliuoti energijos suvartojimą siekiant tvaresnių energijos vartojimo būdų ir metodų. Šios funkcijos ypač svarbios decentralizuotoms energetikos sistemoms, nes leidžia tiksliai stebėti ir valdyti energijos gamybą ir sąnaudas, siekiant pagerinti energijos rinkos veiklą naudojant pažangias matavimo technologijas.

Kai išmanieji skaitikliai integruojami į tinklą, atsiranda galimybė valdyti energijos srautus kur kas tiksliau nei anksčiau. Depuru ir kt. (2011) pažymi, kad šie prietaisai matuoja ne vien suvartotą energiją - jie fiksuoja ir įtampą, fazės kampą, dažnį. Iš pirmo žvilgsnio tai gali atrodyti kaip techninė detalė, tačiau praktikoje tokie duomenys leidžia operatoriams matyti, kas iš tiesų vyksta tinkle, ir reaguoti dar prieš kylant problemoms. Kitas svarbus aspektas yra nuotolinis valdymas - komunalinių paslaugų įmonėms nebereikia siųsti darbuotojo, kad atjungtų ar prijungtų vartotoją, komanda įvykdoma per kelias sekundes. Tai palengvina ir nelegalaus vartojimo aptikimą - anomalijos duomenyse iškart matomos, o ne aptinkamos tik po kelių mėnesių rankinio patikrinimo. Žvelgiant plačiau, išmanieji skaitikliai tampa jungtimi tarp namų ūkio ir platesnės energetikos sistemos. Jie leidžia integruoti saulės paneles ant stogo, baterijas garaže ar elektromobilį - visa tai tampa ne atskirais prietaisais, o dalimi bendros sistemos, kuri reaguoja į kainas, tinklo apkrovą ar net oro prognozes. Būtent ši sąsaja tarp vartotojo pusės ir tinklo valdymo daro išmaniuosius skaitiklius esminiu decentralizuotos energetikos elementu.

Sujungus blokų grandinę su išmaniaisiais skaitikliais, atsiranda prielaidos kurti rinką, kurioje gamintojas ir vartotojas susitaria tiesiogiai - be tiekėjo ar kito tarpininko. Lazaroiu ir Roscia (2018) teigia, kad toks modelis mažina transakcijų kaštus ir kartu didina pasitikėjimą: abi pusės mato tuos pačius

duomenis, įrašytus į nekintamą registrą. Manipuliuoti informacija tampa techniškai sudėtinga, o tai ypač aktualu rinkose, kur dalyviai vienas kito nepažįsta.

Išmaniųjų skaitiklių vaidmuo čia gana konkretus - jie tiekia realaus laiko duomenis apie tai, kiek energijos pagaminta ir kiek suvartota. Be šių duomenų blokų grandinė būtų tiesiog tuščia infrastruktūra; su jais - tampa veikiančia atsiskaitymo sistema. Hussain, Farooq ir Ustun (2019) akcentuoja dar vieną šios integracijos aspektą: išmaniąsias sutartis. Kai skaitiklis užfiksuoja, kad prosumeris perdavė, tarkime, 5 kWh į tinklą, išmanioji sutartis automatiškai įvykdo mokėjimą pagal iš anksto sutartas sąlygas. Žmogaus įsikišimas nereikalingas –

nei patvirtinti sandorį, nei patikrinti duomenų. Tai ne tik pagreitina procesą, bet ir eliminuoja klaidas ar nesąžiningumą, kuris gali atsirasti rankiniame apdorojime.

1.6. Teisinių reguliavimo aspektų analizė

Energetikos sektorius yra vienas labiausiai reguliuojamų - teisės aktai ir politikos priemonės siekia užtikrinti rinkos stabilumą, vartotojų apsaugą ir tvarų vystymąsi. Todėl analizuojant blokų grandinės taikymą elektros prekyboje, būtina suprasti, kaip esamos taisyklės veikia decentralizuotas sistemas ir jų dalyvius. Ši technologija patenka į kelių teisės sričių sankirtą: energetikos, finansų rinkų ir asmens duomenų apsaugos - kiekviena jų kelia savitus reikalavimus, kuriuos sistema privalo atitikti.

1.6.1. Reguliavimo iššūkiai naujosioms technologijoms

Teisinis pagrindas blokų grandinės taikymui energetikoje jau egzistuoja - tiek ES, tiek nacionaliniu lygiu yra priimti aktai, reguliuojantys energetikos bendruomenes, duomenų apsaugą ir kriptoturto rinkas. Tačiau problema ta, kad šie reguliavimai buvo kuriami skirtingu metu ir skirtingiems tikslams, todėl jų tarpusavio sąveika ne visada aiški. Ahl ir kt. (2019) atkreipia dėmesį, kad energetikos teisė ir skaitmeninių technologijų reguliavimas retai buvo derinami kartu, o tai sukuria pilkąsias zonas - situacijas, kai formaliai niekas nedraudžiama, bet ir nėra aišku, ar leidžiama. Autoriai siūlo reguliavimo smėlio dėžes kaip būdą išbandyti naujas technologijas kontroliuojamoje aplinkoje, kol teisės aktai suspėja prisitaikyti.

P2P prekyba energija yra viena tokių pilkųjų zonų. Almeida ir kt. (2021) nurodo, kad tiesioginiai mainai tarp prosumerių netelpa į tradicinį tiekėjo–vartotojo modelį, kuriam pritaikyti dabartiniai vartotojų apsaugos, sutarčių ir konkurencijos teisės aktai. Kas atsitinka, jei prosumeris parduoda nekokybišką energiją? Ar jam taikoma ta pati atsakomybė kaip licencijuotam tiekėjui? Šie klausimai kol kas neturi vienareikšmių atsakymų, nors pati veikla nėra uždrausta.

Borges ir kt. (2022) tyrimas atskleidžia, kad būtent šis neapibrėžtumas stabdo potencialius dalyvius. Apklausti prosumeriai teigė, jog domisi automatizuota prekyba per išmaniąsias sutartis, tačiau nerimauja dėl teisinių pasekmių - ką daryti, jei sistema suklysta, kas atsakingas už nuostolius, kaip spręsti ginčus. Tyrėjai rekomenduoja ne tiek kurti visiškai naujus įstatymus, kiek adaptuoti esamus - aiškiai apibrėžti, kurios normos taikomos P2P prekybai, o kurios ne.

Toliau aptariami konkretūs reguliavimai - energetikos, duomenų apsaugos ir finansų srityse - parodo, kad teisinė bazė iš tiesų egzistuoja. Iššūkis yra ne reguliavimo nebuvimas, o jo interpretacija ir praktinis pritaikymas naujiems verslo modeliams.

1.6.2. Energetikos sektoriaus reguliavimo sistema

Lietuvoje elektros energijos gamybą, tiekimą ir prekybą prižiūri Valstybinė energetikos reguliavimo taryba (VERT). P2P elektros sandoriai kelia klausimą, kas tokioje sistemoje laikomas tiekėju - ar kiekvienas prosumeris, parduodantis perteklinę energiją kaimynui, tampa reguliuojamu rinkos dalyviu su visomis iš to kylančiomis prievolėmis?

Pagal dabartinę Lietuvos teisę, teisėtas būdas organizuoti tokią prekybą - veikti per piliečių energetikos bendruomenę arba atsinaujinančiosios energijos bendruomenę (Lietuvos Respublikos Seimas, 2011). Tokia bendruomenė, turėdama juridinio asmens statusą, gali gaminti, vartoti, kaupti ir parduoti energiją savo nariams ar kitiems vartotojams. Svarbu tai, kad bendruomenės nariai išlaiko visas vartotojo teises - tai reiškia, jog prisijungimas prie P2P schemos neturėtų pabloginti jų padėties lyginant su įprastais vartotojais.

2023 m. gruodį Seimas patvirtino perėjimą nuo „net-metering" prie „net-billing" nebuitiniams gaminantiems vartotojams (Lietuvos Respublikos Seimas, 2011). Pagal naują schemą, sukaupta ir nepanaudota energija pateikiama nepriklausomam tiekėjui ir kaupiama virtualioje sąskaitoje eurais pagal sutartą tarifą. Šiuo modeliu jau dabar gali naudotis atsinaujinančių išteklių energijos bendrijos ir piliečių energetinės bendrijos - tai žingsnis link P2P prekybos, nors tiesioginis prosumerių tarpusavio prekiavimas be tarpininko vis dar nėra pilnai reglamentuotas.

Elektros vidaus rinkos direktyva (2019/944) ir Atsinaujinančios energijos direktyva (2018/2001) įtvirtina teisinį pagrindą P2P prekybai. Direktyva 2019/944 tiesiogiai apibrėžia P2P prekybą kaip „atsinaujinančios energijos pardavimą tarp rinkos dalyvių pagal sutartį su iš anksto nustatytomis sąlygomis, reglamentuojančiomis automatizuotą sandorio vykdymą ir atsiskaitymą - tiesiogiai tarp dalyvių arba netiesiogiai per sertifikuotą trečiosios šalies rinkos dalyvį, pavyzdžiui, agregatorių".

2024 m. pakeitimai Direktyva (2024/1711) įvedė naują „energijos dalijimosi" koncepciją, kuri išplečia galimybes. Pagal ją galutiniai vartotojai gali lengviau prieiti prie atsinaujinančios energijos, pagamintos ar saugomos ne jų patalpose - pavyzdžiui, šeimos narių, kaimynų ar bendruomenės. Vartotojas, dalyvaujantis energijos dalijime, turi teisę į sąskaitos sumažinimą proporcingai suvartotai dalijamos energijos daliai, taip pat gali nustatyti kainą perteklinei energijai, kad gautų pagrįstą investicijų grąžą.

Direktyva taip pat nustato valstybių narių pareigas: užtikrinti, kad agregatoriai būtų traktuojami vienodai su kitais rinkos dalyviais; nustatyti skaidrias taisykles, apibrėžiančias visų dalyvių roles ir atsakomybes; sukurti duomenų mainų tarp rinkos dalyvių tvarką; reglamentuoti kompensacijas tarp laikytojų ir tiekėjų, kai paklausos valdymas sukelia disbalansą.

REMIT reglamentas (European Parliament and Council of the European Union, 2011) ir skaidrumo reikalavimai nurodo, kad net nedideli P2P sandoriai gali patekti į didmeninės rinkos apibrėžtį. 2024 m. reglamento pakeitimai (European Parliament and Council of the European Union, 2024) sugriežtino reikalavimus: suderino energetikos rinkų piktnaudžiavimo taisykles su finansų rinkų reguliavimu, išplėtė taikymo sritį energijos kaupimui, suteikė ACER įgaliojimus tirti tarpvalstybinius atvejus.

Praktiškai tai reiškia, kad energetikos bendruomenė, naudodama blokų grandinės platformą, privalo: pirma, užkirsti kelią manipuliavimui rinka ir prekybai pasinaudojant viešai neatskleista informacija; antra, užtikrinti visų sandorių skaidrumą; trečia, registruoti didmeniniais laikomus sandorius ACER sistemoje.

Blokų grandinė čia turi struktūrinį pranašumą. Tradicinėse sistemose skaidrumas pasiekiamas per ataskaitų teikimą reguliuotojui - tai sukuria administracinę naštą ir laiko tarpą tarp sandorio ir jo matomumo. Blokų grandinėje kiekvienas sandoris iš karto fiksuojamas nekintamame registre, prieinamame auditui. REMIT reikalavimas „užtikrinti sandorių skaidrumą" tampa ne papildoma prievole, o natūralia sistemos savybe.

Vienas praktiškai svarbių, bet mažiau aptartų aspektų – kas atsitinka, kai prosumeris tampa de facto tiekėju. Vokietijos praktika rodo, kad P2P rinkoje dalyvaujantys prosumeriai pagal energetikos įstatymą (EnWG) gali būti traktuojami kaip energijos tiekėjai, o tai užtraukia:

- Pranešimo ir leidimų pareigas reguliuotojui
- Elektros mokesčių ir kitų kainos komponentų atsiskaitymo reguliavimą
- Sąskaitų atitikimą teisiniams reikalavimams, įskaitant elektros kilmės ženklinimą
- Atsakomybės riziką už tiekiamos energijos kokybę

Ši administracinė našta privatiems asmenims praktiškai neįveikiama be platformos ar bendruomenės tarpininkavimo. Būtent todėl P2P modeliai paprastai reikalauja juridinio asmens – energetikos bendruomenės ar platformos operatoriaus – kuris prisiima dalį reguliacinių prievolių ir veikia kaip „skėtis" individualiems prosumeriams.

1.6.3. Duomenų apsaugos teisinė sistema

Energetikos blokų grandinės sistemoje tvarkomi dideli asmens duomenų kiekiai - namų ūkių energijos gamybos ir vartojimo duomenys, sandorių informacija. Pagal Bendrąjį duomenų apsaugos reglamentą (2016, Str. 17) tokie duomenys laikomi asmeniniais, todėl platformos sprendimai turi derėti su griežtais privatumo reikalavimais. Ypatingas dėmesys skiriamas duomenų subjektų teisėms ir privatumo išsaugojimui decentralizuotoje, nekintamoje duomenų bazėje.

Vartotojų tapatybės blokų grandinėje slepiamos po pseudoniminiais identifikatoriais. Realūs asmens duomenys - vardas, adresas ir kita identifikuojanti informacija - saugomi saugioje ne viešoje (off-chain) duomenų bazėje. Prieiga prie tikrųjų tapatybės duomenų suteikiama tik turint teisinį pagrindą, pavyzdžiui, vartotojui sutikus arba teisėsaugos reikalavimu. Taip sumažinama neteisėto identifikavimo rizika.

Į blokų grandinę įrašoma tik tiek informacijos, kiek būtina sandoriams patvirtinti - perduotos energijos kiekis ir sandorio laikas - vengiant perteklinių asmeninių detalių saugojimo viešame registre. Išsamūs vartojimo profiliai, grafikai ir kiti jautrūs duomenys laikomi už grandinės ribų vidinėse sistemos saugyklose. Taip pat nustatytas automatinis senų duomenų archyvavimas ir ištrinimas pasibaigus nustatytam terminui, pavyzdžiui, po dvejų metų, kad būtų įgyvendintas duomenų kiekio apribojimo principas.

BDAR 17 straipsnyje (2016, Str. 17) nustatyta asmens teisė reikalauti ištrinti su juo susijusius duomenis susiduria su blokų grandinės nekintamumo principu. Šiai kolizijai spręsti sistemoje vengiama

tiesiogiai į blokų grandinę įrašyti identifikuojančią informaciją, kurią vėliau tektų pašalinti. Vartotojui pareikalavus būti pamirštam, jo asmeniniai duomenys gali būti pašalinami ar anonimizuojami iš off-chain duomenų bazių. Kadangi viešame registre išliktų tik pseudoniminiai įrašai be galimybės juos nesunkiai susieti su konkrečiu asmeniu, praktikoje užtikrinama, jog asmens tapatybę atsekti būtų itin sunku arba neįmanoma. Tokiu būdu platforma derina blokų grandinės technologijos privalumus su BDAR reikalavimais.

1.6.4. Finansinio reguliavimo atitiktis

Nors siūlomas energijos žetonas yra inovatyvi atsiskaitymo priemonė, būtina įvertinti jo statusą pagal finansų rinkos teisę ir užtikrinti atitiktį susijusiems reikalavimams.

Sistemoje naudojamas kriptografinis energijos žetonas kuriamas kaip naudingumo žetonas (utility token) - skaitmeninis vienetas, suteikiantis jo turėtojui teisę į tam tikrą paslaugą ar prekę platformos viduje. Kiekvienas žetonas tiesiogiai atitinka fizinį energijos kiekį: vienas žetonas lygus vienai kilovatvalandei ir suteikia teisę gauti atitinkamą elektros paslaugą bendruomenėje. Svarbu tai, kad žetonas pats savaime nesuteikia jokių nuosavybės teisių į įmonę ar projekto valdymą ir negarantuoja turėtojui pasyvių pajamų ar pelno dalies.

Dėl šių savybių žetonas nėra laikomas finansiniu instrumentu pagal ES finansų rinkos teisę. Pagal MiFID II direktyvą finansiniais instrumentais laikomi perleidžiami vertybiniai popieriai, išvestinės priemonės ir panašūs produktai, kurių požymių žetonas neatitinka (2014). Todėl jo leidimui netaikomi vertybinių popierių siūlymo reikalavimai, pavyzdžiui, ES Prospekto reglamento nuostatos dėl prospekto rengimo.

Žetonas patenka į ES kriptoturto rinkų reglamento (MiCA) taikymo sritį. MiCA tokio tipo kriptografinį aktyvą apibrėžia kaip prekių ir paslaugų žetoną, kurio vienintelė paskirtis – suteikti prieigą prie žetono emitento tiekiamos prekės ar paslaugos (European Parliament and Council of the European Union, 2023). Siūlomos sistemos atveju ši sąlyga tenkinama, kadangi žetonas suteikia galimybę atsiskaityti už realiai teikiamą energijos paslaugą, o ne tarnauja kaip spekuliacinė investicija.

MiCA taip pat nustato, jog jei viešai siūlomas naudingumo žetonas suteikia prieigą prie egzistuojančios prekės ar paslaugos, o ne būsimos idėjos, jam gali būti netaikomi tam tikri viešo siūlymo reikalavimai - nebūtina rengti išsamios kriptografinio turto baltosios knygos (2023). Platformoje energijos žetonai bus leidžiami susietai su esama paslauga - elektros tiekimu - ir platinami bendruomenės nariams mainais už pagamintą energiją, o ne per pirminį viešą ICO platinimą. Dėl to galima pasinaudoti MiCA numatytomis išimtimis.

Tačiau svarbu pažymėti, kad jeigu žetonai vėliau būtų pardavinėjami viešoje kriptovaliutų biržoje ar pradėti aktyviai siūlyti spekuliaciniams investuotojams, teisinis statusas keistųsi. Tokiu atveju tektų pilnai laikytis MiCA nustatytų skaidrumo ir informacijos atskleidimo reikalavimų: parengti ir užregistruoti baltąją knygą, gauti licencijas ir vykdyti kitas prievoles, kadangi bet koks žetono prekybos skatinimas už platformos ribų eliminuotų minėtą išimtį.

Nepaisant to, kad energijos žetonai nepripažįstami finansinėmis priemonėmis, platformos veiklai taikomi pinigų plovimo ir teroristų finansavimo prevencijos teisės aktai. ES 5-oji Kovos su pinigų plovimu direktyva (European Parliament and Council of the European Union, 2018) išplėtė reguliavimą virtualiųjų valiutų sektoriui, nustatydama, kad kripto keityklos ir paslaugų teikėjai privalo registruotis bei identifikuoti savo klientus.

Sistemoje numatoma KYC (Know Your Customer) procedūra visiems naudotojams. Registruojantis reikalaujama pateikti bent minimalius identifikacinius duomenis. Mažos vertės transakcijoms tarp bendruomenės narių gali būti taikoma supaprastinta identifikacija, pavyzdžiui, patvirtintas elektroninis paštas. Tačiau didėjant perkamų ar parduodamų žetonų apimčiai, numatytas griežtesnis tapatybės tikrinimas: pasiekus nustatytą metinę sandorių sumą, tarkime, tūkstantį eurų, vartotojui tektų atlikti pilną asmens tapatybės patvirtinimą. Be to, platformoje bus vykdoma nuolatinė sandorių stebėsena ir įtartinų operacijų perdavimas atitinkamoms institucijoms, kaip to reikalauja AML teisės aktai (European Parliament and Council of the European Union, 2018).

Pridėtinės vertės mokestis aktualus parduodant elektros energiją galutiniams vartotojams. Pagal Lietuvos įstatymus elektros energijos tiekimas apmokestinamas standartiniu 21% PVM tarifu. Tai reiškia, kad jeigu bendruomenės narys per platformą parduoda elektros energiją kitam asmeniui, sandoriui taikomas šis mokestis. Platformoje numatoma automatizuoti PVM apskaičiavimą – išmaniosios sutartys galėtų realiu laiku pridėti reikiamą sumą prie sandorio kainos ir nukreipti ją atskirai mokesčių sąskaitai, kad vėliau būtų lengviau atsiskaityti su valstybės biudžetu. Verslo subjektų tarpusavio sandoriams gali būti taikomas atvirkštinio apmokestinimo mechanizmas, kai PVM sumokėjimu pasirūpina pirkėjas, todėl sistema galės diferencijuoti mokesčio taikymą atsižvelgiant į sandorio šalis (Lietuvos Respublikos Seimas, 2002a).

Gyventojų pajamų mokestis taip pat aktualus gaunant pajamas už parduotą energiją. Bendruomenės nariai, kurie per platformą sistemingai parduoda pagamintą elektros energiją ir gauna pajamų, privalės jas deklaruoti mokesčių inspekcijai (Lietuvos Respublikos Seimas, 2002b). Siekiant palengvinti šią naštą, platformoje planuojama integruoti pajamų apskaitos ir ataskaitų teikimo funkcijas.

Sistema galėtų automatiškai generuoti metines pajamų iš energijos prekybos suvestines kiekvienam gaminančiam vartotojui ir pateikti jas Valstybinei mokesčių inspekcijai arba leisti eksportuoti duomenis į VMI elektroninę deklaravimo sistemą. Taip pat svarstoma integracija su i.SAF elektroninių sąskaitų faktūrų posisteme, kad visos P2P elektros pardavimo sąskaitos būtų fiksuojamos ir prieinamos mokesčių administratoriui.

1.7. Egzistuojančių blokų grandinės energetikos projektų analizė

Blokų grandinės technologijos taikymas energetikos sektoriuje nėra nauja idėja - per pastarąjį dešimtmetį buvo įgyvendinta nemažai komercinių projektų, siekusių pakeisti elektros prekybą, kurie, tiek sėkminga, tiek nesėkminga, suteikia vertingų įžvalgų kuriant naujus sprendimus, todėl svarbu suprasti, kodėl kai kurie ambicingi projektai nepasiekė užsibrėžtų tikslų ir kokios techninės bei verslo klaidos buvo padarytos.

1.7.1. Power ledger

Australijos įmonė Power Ledger, įkurta 2016 metais, tapo vienu ryškiausių vardų blokų grandinės energetikos srityje (Power Ledger, 2019). Bendrovė sukūrė P2P prekybos platformą, leidžiančią namų ūkiams ir verslams tiesiogiai prekiauti pertekline saulės energija. Pradinė platforma veikė Ethereum tinkle, tačiau 2023 m. liepą projektas migravo į pritaikytą Solana blokų grandinę, kuri pasižymi aukštu pralaidumu – iki 50 000 transakcijų per sekundę – ir mažesniu energijos suvartojimu (Jain, 2024).

Iki 2024 metų Power Ledger buvo sukūręs kelis produktus skirtingiems rinkos segmentams. xGrid platforma leido gyventojams prekiauti saulės energija per paskirstymo tinklą nepriklausomai nuo to, ar jie naudojasi tuo pačiu elektros tiekėju. uGrid sprendimas sudarė galimybę dalintis energija daugiabučiuose pastatuose ar verslo parkuose už pagrindinio skaitiklio. Bendrovė taip pat sukūrė TraceX platformą atsinaujinančios energijos sertifikatų prekybai (Power Ledger, 2019).

Konkrečių rezultatų požiūriu Power Ledger pasiekė nemažai: iki 2024 m. platforma buvo apdorojusi daugiau nei 1,67 GWh energijos prekybos, o aktyvūs projektai veikė Europoje, Azijoje ir Australijoje. Vienas įspūdingiausių pavyzdžių – Šiaurės Indijos Utar Pradešo valstijoje Power Ledger platforma leido pirkti energiją 43% pigiau nei standartiniais mažmeniniais tarifais. Tailande, Chiang Mai universitete, buvo įgyvendintas išmaniojo miesto projektas, apimantis 142 pastatus (Jain, 2024).

Vis dėlto Power Ledger modelis turi ir trūkumų. Platforma remiasi dviejų žetonų sistema – POWR ir Sparkz – kas sukuria papildomą sudėtingumą vartotojams. Be to, migracija nuo Ethereum prie Solana, nors ir pagerino našumą, kelia klausimų dėl ilgalaikio stabilumo. Reguliacine prasme Power

Ledger veikia daugiausia rinkose su palankia teisine aplinka, tačiau jo modelis sunkiai pritaikomas šalyse su griežtesniu energetikos reguliavimu, pagal Soto ir kt. (2021).

1.7.2. WePower

WePower projektas, įkurtas Vilniuje 2016 metais, yra ypač svarbus šio darbo kontekste - tai buvo Lietuvos startuolis, siekęs tapti pasauliniu žaliosios energijos prekybos lyderiu (WePower, 2019). Projekto istorija iliustruoja tiek blokų grandinės technologijos potencialą, tiek realias kliūtis, su kuriomis susiduria tokie ambicingi sumanymai.

WePower siūlė dviejų žetonų sistemą. WPR buvo pagrindinis ERC-20 standarto naudingumo žetonas, suteikiantis pirmenybę aukcionuose (pirmas 48 valandas), 0,9% energijos donacijų ir balsavimo teises. Antras žetonų tipas - išmanieji energijos žetonai (Smart Energy Tokens) - reprezentavo konkrečius energijos kiekius santykiu 1 žetonas = 1 kWh. Šie žetonai veikė kaip skaitmeninės savaime įvykdomos energijos pirkimo sutartys, kurias buvo galima parduoti arba likviduoti didmeninėje rinkoje.

2017 m. spalį WePower pasirašė susitarimo memorandumą su Elering - Estijos nacionaliniu elektros ir dujų perdavimo sistemos operatoriumi. Estija buvo pasirinkta neatsitiktinai: šalis turėjo 100% išmaniųjų skaitiklių aprėptį ir centralizuotą Estfeed duomenų platformą. Šios sąlygos atrodė idealios blokų grandinės sprendimo diegimui.

Pilotinio projekto metu buvo pasiekti tam tikri techniniai rezultatai: į sistemą įkelta 26 000 valandų ir 24 TWh duomenų, sukurta 39 mlrd. išmaniųjų energijos žetonų, o maždaug 700 000 namų ūkių duomenys agreguoti pagal pašto kodus siekiant BDAR atitikties (WePower, 2019).

Būtent Estijos pilotas atskleidė fundamentalią Ethereum L1 blokų grandinės problemą. Techninė analizė parodė, kad Ethereum tinklui reikėjo mažiausiai 15 sekundžių, kad išsaugotų vieną bloką su 200 duomenų taškų. Neapdoroti Estijos energetikos duomenys sudarė daugiau nei 6 trilijonus įrašų. Paprastas skaičiavimas atskleidė šokiruojančią realybę: teoriškai visų duomenų įkėlimas į blokų grandinę užtruktų 14 metų ir kainuotų apie 210 mln. eurų.

WePower komanda taikė įvairias optimizacijas: agregavo duomenis pagal pašto kodus (700 000 namų ūkių sumažinta iki 3 837 taškų), konvertavo valandinius duomenis į mėnesinius (3 837 × 12 = 46 044 taškai), pakavo 15 duomenų taškų į vieną 256 bitų sveikąjį skaičių (EVM optimizacija), grupavo transakcijas. Šios priemonės leido įgyvendinti pilotą, tačiau kaina buvo didelė - sistema prarado pagrindinį blokų grandinės privalumą, nes tapo hibridine, o ne pilnai decentralizuota (WePower, 2019).

Pati WePower komanda piloto ataskaitoje pripažino: „Nors Ethereum yra pakankamai subrendusi daugiamečių sutarčių vykdymui, pilnai decentralizuota aplikacija didelio masto autonominiam naudojimui šiuo metu nėra įgyvendinama".

Dabartinė situacija ir žlugimo priežastys. 2024 m. duomenimis WePower statusas - „visam laikui uždarytas" (Crunchbase, 2024). WPR žetono kaina nukrito nuo 0,22 USD rekordinės reikšmės 2018 m. kovą iki maždaug 0,0001 USD – tai sudaro 99,95% nuosmukį (CoinGecko, 2024). Rinkos kapitalizacija sumažėjo iki maždaug 69 000 USD nuo 40 mln. USD ICO, o dienos prekybos apimtis svyruoja tarp 8 ir 22 USD.

Projekto nesėkmę lėmė keletas veiksnių. Pirma, Ethereum L1 mastelio problema pasirodė esanti neįveikiama be kompromisų. Antra, hibridinis sprendimas, nors ir techniškai veikiantis, prarado pagrindinę blokų grandinės vertės propoziciją - decentralizaciją ir skaidrumą. Trečia, reguliacinė fragmentacija Europoje reiškė, kad kiekviena šalis turėjo skirtingus energetikos įstatymus ir energijos pirkimo sutarčių reikalavimus, pasak Soto ir kt. (2021). Ketvirta, žetono ekonomika buvo silpna - 0,9% energijos donacija nebuvo pakankamai patraukli ilgalaikiam žetonų laikymui.

1.7.3. Brooklyn Microgrid

LO3 Energy, Niujorke įsikūrusi įmonė, kartu su Siemens 2016 metais pradėjo Brooklyn Microgrid projektą - vieną pirmųjų pasaulyje blokų grandine paremtų mikrotinklų. Projektas veikia Park Slope ir Gowanus rajonuose Brukline, kur gyventojai su saulės moduliais gali parduoti perteklinę energiją kaimynams per Exergy platformą (Lampriere, 2017).

Projektas pasiekė konkrečių rezultatų: vartotojai sutaupė 6–12% elektros sąskaitose, o energijos gamintojai, kurie pirko ir pardavė energiją, padidino pajamas 18–37% (Mengelkamp ir kt. (2018)). Sistema veikė tiek prisijungusi prie pagrindinio tinklo, tiek autonomiškai „salos" režimu – tai buvo ypač aktualu po 2012 m. uragano Sandy, kuris sukėlė ilgalaikes elektros tiekimo pertraukas regione. Mikrotinklai sumažina energijos nuostolius perdavimo metu – centralizuotose sistemose prarandama apie 5% pagamintos elektros.

Vis dėlto Brooklyn Microgrid išliko santykinai mažo masto demonstraciniu projektu. Plėtra į kitas JAV vietas ir tarptautines rinkas vyko lėčiau nei tikėtasi, iš dalies dėl reguliacinių barjerų kiekvienoje jurisdikcijoje (Breuer, 2017).

1.7.4. Quartierstrom

Šveicarijos Federalinės energetikos tarnybos finansuotas Quartierstrom projektas Walenstadt miestelyje (2019–2020) apėmė 37 namų ūkius ir senelių namus (Kucheryavenkov ir kt., (2018)). Dalyviai prekiavo saulės energija naudodami blokų grandinės platformą, kurioje dvigubi aukcionai vyko kas 15 minučių (Quartierstrom, 2020).

Projekto rezultatai buvo įspūdingi ir gerai dokumentuoti: bendruomenės savarankiškumas (self-sufficiency) padidėjo nuo 19,3% iki 35,9%, o savivartė (self-consumption) – nuo 31,6% iki 58,7% (Anleitner ir kt. (2020)). Praktiškai P2P prekyba beveik padvigubino lokaliai pagamintos ir suvartojamos elektros dalį.

Quartierstrom taip pat parodė netikėtai aukštą dalyvių įsitraukimą. Projekto tyrėjai pastebėjo, kad dalyviai reguliariai prisijungdavo prie platformos, stebėjo sandorius ir koreguodavo kainas – elgesys, kurio tyrėjai nesitikėjo iš eilinių namų ūkių (Ableitner ir kt., (2020)). Po sėkmingo pirmojo etapo projektas tęsiamas kaip Quartierstrom 2.0, plėtojant platformą su naujomis funkcijomis (Quartierstrom, 2020).

2. Elektros energijos kainodaros ir prekybos modelio kūrimas

Šiame skyriuje pristatomas sukurtas elektros energijos kainodaros ir prekybos modelis, paremtas blokų grandinės technologija ir kriptografiniais žetonais, projektuotas atsižvelgiant į Lietuvos energetikos rinkos specifiką, sparčiai augantį gaminančių vartotojų skaičių ir poreikį modernizuoti energijos prekybos procesus.

2.1. Siūlomo modelio reikalavimai remiantis konkurentų analize

Ankstesniuose skyriuose atlikta egzistuojančių blokų grandinės energetikos projektų analizė atskleidė, kad nacionalinio ar tarptautinio masto platformos susiduria su rimtomis mastelio, reguliacinėmis ir rinkos priėmimo problemomis. WePower bandymas veikti keliose šalyse vienu metu baigėsi nesėkme, o Ethereum L1 blokų grandinės apribojimai privertė projektą pereiti prie hibridinio sprendimo, prarandant pagrindinį decentralizacijos privalumą. Tuo tarpu lokalūs, bendruomenės mastu veikiantys projektai - Quartierstrom Šveicarijoje ir Brooklyn Microgrid JAV - pasiekė apčiuopiamų rezultatų ir išliko gyvybingi.

Ši patirtis aiškiai rodo, kad mikrotinklo modelis šiuo metu yra perspektyviausia blokų grandinės taikymo kryptis energetikos sektoriuje. Mikrotinklai sprendžia iškart kelias identifikuotas problemas: lokalus energijos perdavimas minimizuoja transmisijos nuostolius, ribota geografinė aprėptis leidžia išvengti reguliacinės fragmentacijos, o bendruomenės mastelis skatina aktyvų dalyvių įsitraukimą, kurio trūksta anoniminėse nacionalinėse platformose.

Siūlomas modelis remiasi Polygon L2 blokų grandine, kuri užtikrina pakankamą pralaidumą lokaliam mikrotinklui be hibridinių kompromisų. Duomenų integracijai naudojamas decentralizuotas orakulų tinklas su MQTT/TLS 1.3 protokolu, išvengiant priklausomybės nuo centralizuotų TSO platformų.

Modelis orientuojasi į 500–1000 būstų kvartalą su bendra 5-10 MWh baterijų sistema ir paskirstytais saulės moduliais. Toks mastas atitinka ES direktyvose numatytą piliečių energetikos bendruomenės teisinį modelį ir leidžia įgyvendinti „salos" režimo funkcionalumą - bendruomenė gali autonomiškai veikti pagrindinio tinklo gedimo atveju. Koncentracija į Lietuvos jurisdikciją užtikrina aiškų reguliacinį pagrindą ir atitiktį VERT reikalavimams.

2.2. Konceptualus modelis ir architektūra

2.2.1. Sistemos vizija ir tikslai

Siūlomas elektros energijos kainodaros ir prekybos modelis remiasi blokų grandinės technologija, kurios tikslas - pakeisti dabar veikiančią centralizuotą energetikos rinką į decentralizuotą ir skaidresnę platformą. Pasak Wang ir kt. (2019), blokų grandinė gali suteikti daugiau lankstumo energijos prekybai, nes leidžia vykdyti saugius ir aiškiai atsekamus sandorius be įprastų tarpininkų. Tokiu būdu energijos gamintojai ir vartotojai galėtų tiesiogiai prekiauti tarpusavyje, o tai sumažintų tiek biurokratiją, tiek transakcijų kaštus.

Projektuojant sistemą atsižvelgiama į Lietuvos situaciją: 2023 m. gaminančių vartotojų skaičius išaugo dvigubai, o į tinklą patiektos elektros energijos kiekis išaugo nuo 191,4 GWh iki 543,7 GWh (Lietuvos energetikos agentūra, 2024). Toks spartus augimas rodo, kad dabartiniai prekybos procesai nebepakankamai prisitaiko prie decentralizuotos gamybos tendencijų. Devine, Russo ir Cuffe (2021) pažymi, kad blokų grandinė sudaro galimybes kurti naujus išankstinio atsinaujinančios energijos pardavimo būdus: gamintojai gali iš anksto parduoti savo būsimos gamybos dalį žetonų forma.

Siūlomas modelis orientuotas į tris pagrindines naudotojų grupes: gaminančius vartotojus (prosumerius), kurie ir gamina, ir naudoja energiją; grynuosius vartotojus, naudojančius tik tinklo energiją; ir elektros tinklo operatorių (ESO), atsakingą už tinklo stabilumą ir balansavimą. Kiekviena grupė atlieka savo funkcijas, o jų tarpusavio sąveika leidžia efektyviau paskirstyti energijos išteklius.

2.2.2. Trijų sluoksnių architektūra

Sistema grindžiama trijų sluoksnių architektūra, susidedančia iš blokų grandinės sluoksnio, off-blockchain komunikacijos sluoksnio ir fizinio sluoksnio kaip aprašė Abdella ir Shuaib (2019) savo energijos prekybos modelyje - ši architektūra užtikrina sistemos modulinį atskyrimą tarp fizinės infrastruktūros, verslo logikos ir vartotojo sąsajos komponentų.

Fizinis sluoksnis apima visą energetikos infrastruktūrą ir matavimo įrenginius, kurie tiesiogiai sąveikauja su energijos gamybos šaltiniais. Šiame sluoksnyje veikia išmanieji elektros skaitikliai, integruoti su atsinaujinančiosios energijos šaltiniais, tokiais kaip saulės panelės ir vėjo turbinos. Sun ir kt. (2016) pabrėžia, kad išmanieji skaitikliai yra pagrindiniai pažangiųjų energijos tinklų komponentai, leidžiantys ne tik matuoti energijos suvartojimą, bet ir palaikyti abipusį ryšį tarp energijos tiekėjų ir vartotojų.

Blokų grandinės sluoksnis realizuoja pagrindinę verslo logiką ir užtikrina sistemos saugumą per išmaniąsias sutartis ir paskirstytą registrą – tai leidžia jam veikti kaip kontrolės centrui, prižiūrinčiam ir registruojančiam energijos transakcijas per išmaniųjų sutarčių funkcijas.

Sistemos komponentų sąveika organizuojama per apibrėžtas sąsajas, užtikrinančias funkcijų paskirstymą individualiuose moduliuose ir plėtros galimybes. Duomenų verifikavimo procesas vyksta per Oracle tinklą, kuris, pasak Dang ir kt. (2019), yra kritiškai svarbus užtikrinant duomenų patikimumą blokų grandinės sistemose. Išmaniosios sutartys automatiškai vykdo mokėjimo transakcijas, kai energijos transakcijos yra užbaigtos, užtikrindamos saugias ir skaidrias finansines transakcijas tarp prekyboje dalyvaujančių šalių remiantis Aoun ir kt. (2024) atliktais darbais.

2.3. Žetonų ekonomikos modelis

2.3.1. Žetonų kūrimo ir naikinimo mechanizmas

Energijos žetonai (LET - Lithuanian Energy Token) yra pagrindinis sistemos ekonomikos elementas, suprojektuoti pagal ERC-20 standartą, kuris yra techninis pagrindas, naudojamas Ethereum blokų grandinėje išmaniosioms sutartims, apibrėžiantis bendrą sąsajų ir funkcijų rinkinį, kurį gali naudoti įvairios žetonų sutartys (Ethereum, 2025).

Vienas žetonas atitinka vieną kilovatvalandę elektros energijos, užtikrinant paprastą ir intuityvų santykį tarp fizinės energijos ir skaitmeninės vertės. Remiantis Toderean ir kt. darbu (2021) energijos žetonai realizuojami kaip „Lockable ERC20" tipo žetonai, suteikiantys galimybę savininkui užrakinti dalį savo žetonų naudojant išmaniąsias sutartis.

Sistema palaiko tris vartojimo scenarijus:

- **Pakankamas balansas:** žetonai naikinami pagal suvartojimą
- **Dalinis balansas:** naikinami visi turimi žetonai, likutis registruojamas kaip deficitas
- **Nulinis balansas:** visas suvartojimas registruojamas kaip deficitas, aktyvuojamas automatinio pirkimo mechanizmas

2.3.2. Dinaminis kainodaros algoritmas

Remiantis Dang ir kt. (2019) darbu Kainodara grindžiama automatizuoto rinkos formavimo (AMM) principu, adaptuotu energijos rinkai. AMM algoritmai, tokie kaip naudojami Uniswap protokole, nustato kainas pagal likvidumo fondų santykį, kur žetonų kaina visada atspindi pasiūlą ir paklausą, kaip aprašyta .

Bazinė kainodaros formulė:

$$P(t) = Pbase \times (1 + \alpha \times (D(t) - S(t)) / (D(t) + S(t)))$$

Kur:

- P(t) – kaina laiko momentu t
- Pbase – bazinė kaina (nustatoma pagal ESO tarifus)
- α – elastingumo koeficientas (0.1 – 0.5)
- D(t) – paklausa laiko momentu t
- S(t) – pasiūla laiko momentu t

Laiko diferencijavimas įgyvendinamas naudojant skirtingus koeficientus:

- Ryto pikas (7:00–9:00): koeficientas 1.3
- Dienos laikotarpis (9:00–17:00): koeficientas 0.9
- Vakaro pikas (17:00–21:00): koeficientas 1.4
- Naktis (21:00–7:00): koeficientas 0.7

Tinklo apkrovos įvertinimas integruojamas per papildomą koeficientą:

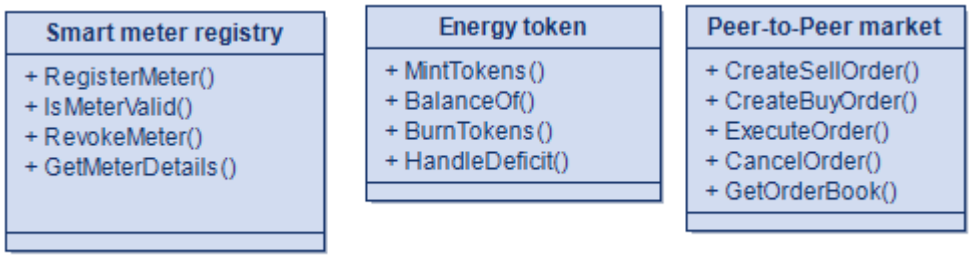
$$Pfinal = P(t) \times (1 + \beta \times GridLoad / GridCapacity)$$

Kur $\beta = 0.2$, o GridLoad ir GridCapacity duomenys gaunami iš ESO sistemų.

2.4. Išmaniųjų sutarčių sistema

2.4.1. Sutarčių architektūra

Išmaniųjų sutarčių sistema sukurta laikantis modulinės architektūros principų – skirtingos funkcijos atskirtos į specializuotas sutartis. Pagrindinė žetonų infrastruktūra paremta ERC-20 standartu, todėl sistemoje įgyvendintos tokios standartinės funkcijos kaip totalSupply, balanceOf, transfer, approve, transferFrom ir allowance. Šios funkcijos užtikrina, kad LCX platformoje žetonai veiktų įprastais būdais (galima tikrinti pasiūlą, balansus, pervedimus ir kt.), o prireikus būtų lengva integruoti papildomą funkcionalumą. Toliau pateikiami pagrindiniai sistemos išmaniųjų sutarčių komponentai ir jų vaidmenys:



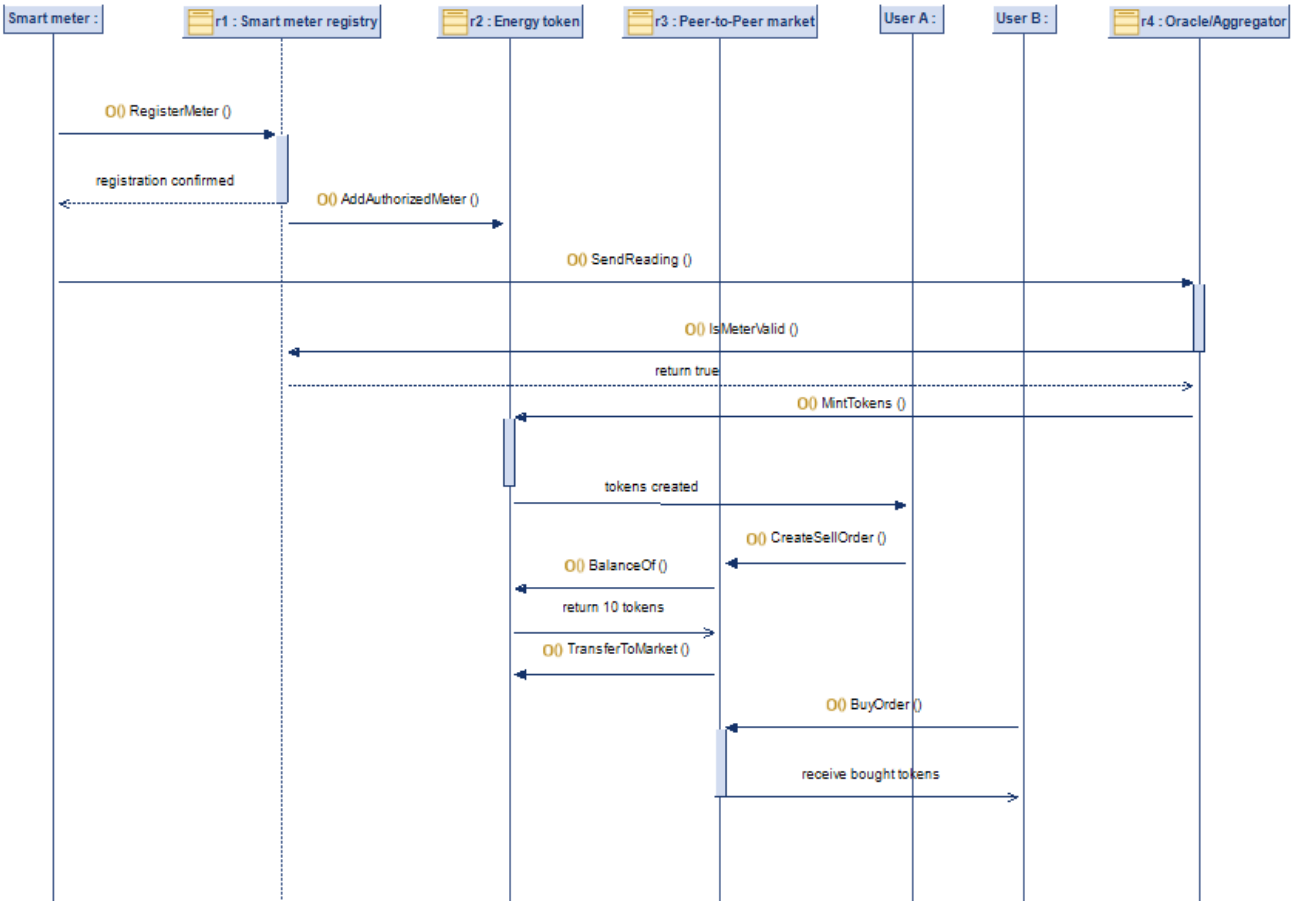
pav. 2 Bazinės sistemos išmaniųjų sutarčių komponentai ir jų funkcijos

MeterRegistry.sol - išmaniųjų skaitiklių registras. Ši sutartis atsakinga už energijos skaitiklių registravimą ir valdymą. Ji pateikia funkcijas registruoti naują skaitiklį (registerMeter), pašalinti/netekinti skaitiklio registraciją (revokeMeter), patikrinti, ar skaitiklis galioja (isMeterValid), bei gauti išsamią informaciją apie skaitiklį (getMeterDetails). Sutartis užtikrina, kad duomenis sistemai teiktų tik autentiški ir patikrinti skaitikliai. Naujo skaitiklio prijungimas vykdomas nuosekliai per kelis etapus: pirma atliekamas fizinis skaitiklio patikrinimas, tuomet sugeneruojamas unikalus kriptografinis raktas, po to skaitiklis užregistruojamas blokų grandinėje, ir galiausiai periodiškai atnaujinamas jo sertifikatas. Toks daugiapakopis procesas garantuoja skaitiklių patikimumą ir saugumą.

EnergyToken.sol - pagrindinė energijos žetono sutartis, paveldinti ERC-20 standarto galimybes ir papildyta specializuota logika. Ši sutartis realizuoja visas standartines ERC-20 funkcijas (žetonų leidybą, balansų sekimą, pervedimus ir kt.), tačiau taip pat prideda keturias svarbias energetikai pritaikytas funkcijas: mintTokens, burnTokens, handleDeficit ir getEnergyBalance. Naudojant funkciją mintTokens sistema išleidžia naujus žetonus (pvz., prideda prosumeriui* žetonų už pagamintą elektros energiją). Funkcija burnTokens sunaikina (išnaudoja) žetonus iš vartotojo balanso proporcingai jo suvartotai energijai. Jei vartotojo turimų žetonų neužtenka pilnai padengti suvartojimą, pasitelkiama handleDeficit – ši funkcija fiksuoja žetonų trūkumą (deficitą), t. y. tą energijos dalį, kuri nepadengta žetonais ir turės būti apmokėta įprastiniu būdu. Funkcija getEnergyBalance leidžia gauti naudotojo energijos balansą ar su energijos vartojimu susijusius duomenis vienoje vietoje. EnergyToken.sol sutartyje įdiegta prieigos kontrolė (naudojant „OpenZeppelin“ AccessControl biblioteką), kuri riboja, kas gali atlikti kritines operacijas, tokias kaip žetonų kūrimas ar naikinimas – tik autorizuoti subjektai (turintys specialius sistemos vaidmenis) gali vykdyti šias funkcijas. Taip užtikrinama, kad žetonų emisija ir sunaikinimas atitiktų realius energijos srautus ir būtų apsaugoti nuo piktnaudžiavimo.

P2PMarket.sol - tarpusavio prekybos (P2P) platformos sutartis, skirta žetonų prekybai tarp sistemos naudotojų. Ji realizuoja orderių knygos modelį, leidžiantį vartotojams pateikti pasiūlymus pirkti arba parduoti žetonus. Sutartis turi funkcijas sukurti pardavimo orderį (pvz., createSellOrder – nurodant

žetonų kiekį ir kainą už žetoną) ar pirkimo orderį (createBuyOrder – nurodant kiekį ir maksimalią mokamą kainą), vykdyti suderėtą sandorį (executeOrder) bei atšaukti nesuderintą orderį (cancelOrder). Taip pat galima gauti visą esamą orderių knygos sąrašą (getOrderBook). Automatinio atitikimo mechanizmas poruoja pirkimo ir pardavimo orderius – kai tik kainos sutampa, sandoris automatiškai įvykdomas išmaniosios sutarties lygmeniu. Siekiant apsaugoti prekybos sąžiningumą, P2PMarket.sol integruotas depozito (escrow) mechanizmas: pateikus pardavimo orderį, pardavėjo siūlomi žetonai užrakinami sutartyje. Taip užtikrinama, kad pardavėjas negalėtų parduoti tų pačių žetonų kelis kartus ar jų atsiimti prieš sandorio įvykdymą. Ši prekybos platforma leidžia decentralizuotai suderinti energijos perteklių turinčius ir trūkstančius vartotojus, išlaikant pasitikėjimą be tarpininkų.



pav. 3 sistemos žetonų valdymo pavyzdinis duomenų srautas

2.4.2. Žetonų valdymo logika

Energijos žetonų valdymo logika užtikrina, kad skaitmeninių žetonų srautai atspindėtų realius elektros energijos srautus ir būtų suderinti su esama elektros rinkos infrastruktūra. Vienas sistemos žetonas atitinka 1 kWh elektros energijos, todėl labai svarbu, kad žetonų išleidimas ir sunaikinimas vyktų preciziškai pagal pagamintą ir suvartotą energiją. Kaip minėta, sistemos žetonas sukurtas pagal ERC-20

standartą – tai reiškia, kad žetonus galima laisvai perleisti tarp adresų, jie turi bendrą pasiūlą, o visi vartotojų balansai bei operacijos yra skaidriai matomi blokų grandinėje. Standartinės ERC-20 funkcijos suteikia žetonui bazinį funkcionalumą, o ant jo uždedama specializuota valdymo logika, pritaikyta energetikos scenarijui.

Centrinė žetonų valdymo dalis yra žetonų kūrimo ir naikinimo mechanizmas. Žetonų kūrimas (minting) inicijuojamas, kai sistemoje fiksuojamas naujas patvirtintas elektros energijos kiekis, kuris turi būti įskaitytas kaip žetonai. Pavyzdžiui, prosumeriui pagaminus papildomos elektros energijos ir patiekus ją į tinklą, atitinkamas žetonų kiekis yra išleidžiamas į jo sąskaitą (mintTokens funkcija prideda žetonų nurodytam adresui). Žetonų sunaikinimas (burning) vyksta tuomet, kai vartotojas suvartoja energiją padengdamas ją turimais žetonais – sistema nuskaito (sudegina) jam priklausančius žetonus pagal suvartotą kiekį (burnTokens funkcija eliminuoja žetonus iš vartotojo balanso). Taip realizuojamas tiesioginis atitikimas: 1 kWh suvartotos energijos sunaikina 1 turėtą žetoną, užtikrinant, kad žetonų likučiai visada atspindi nepanaudotą energijos kreditą. Jeigu vartotojo turimų žetonų nepakanka visai suvartotai energijai padengti, sistema dalį energijos padengia žetonais, o likusią dalį užfiksuoja kaip deficitą. Šis trūkumas registruojamas specialia funkcija handleDeficit, kuri pažymi, kiek kWh nebuvo padengta žetonais. Už nefiksuotą žetonais energiją vartotojui vėliau taikomas tradicinis atsiskaitymas už elektros energiją (pvz., per mėnesinę sąskaitą iš energijos tiekėjo). Tokiu būdu blokų grandinės sistema sklandžiai integruojama su įprasta atsiskaitymo tvarka: viskas, ką padengia žetonai, apmokama žetonais realiu laiku, o perteklius ar trūkumas pereina į įprastas elektros tiekimo sąskaitas.

Siekiant užtikrinti, kad žetonų valdymas būtų saugus ir patikimas, sistemoje įdiegtos kelių lygių apsaugos. Pirma, taikoma rolėmis pagrįsta prieiga prie kritinių funkcijų. Kiekvienas svarbus sistemos dalyvis turi priskirtą vaidmenį su griežtai apibrėžtomis teisėmis (pagal AccessControl modelį). Pavyzdžiui, METER_ROLE suteikiamas patvirtintiems išmaniesiems skaitikliams ar jų valdytojams – tik jie gali inicijuoti duomenų perdavimą, kuris gali iššaukti žetonų kūrimą arba sunaikinimą. ORACLE_ROLE turi decentralizuoti orakulo mazgai, kurie tikrina ir tvirtina duomenis (pvz., kainų ar pagamintos energijos informaciją) prieš perduodant juos išmaniosioms sutartims. OPERATOR_ROLE skiriamas sistemos operatoriams (tokiems kaip ESO – Energijos skirstymo operatorius), kurie prižiūri visos sistemos veikimą ir gali vykdyti administracines funkcijas, o ADMIN_ROLE rezervuotas aukščiausio lygmens administratoriui (-iams), galintiems keisti sistemos parametrus ar skubių atvejų metu stabdyti sutartis. Dėl šios griežtos rolės sistemoje tik įgalioti asmenys gali vykdyti žetonų išdavimo, užrakinimo ar sunaikinimo operacijas, kas apsaugo nuo neteisėtos žetonų emisijos ar trynimo.

Antra, operacijų patikros mechanizmai integruoti tiesiai į žetonų sutarties funkcijas. Kiekviena žetonų pervedimo ar išorinio pervedimo funkcija prieš vykdydama patikrina, ar siuntėjas turi pakankamą balansą ir (jei taikoma) ar gavėjas yra patvirtintas, o taip pat ar siuntėjas suteikė reikiamą patvirtinimą (approval), jei žetonus perkelia trečioji šalis. Pavyzdžiui, jeigu vartotojas nori perleisti žetonus per išorinę mokėjimų platformą (pvz., MoonPay ar panašią keityklą), sutartis užtikrina, kad toks pervedimas galimas tik pateikus aiškų naudotojo sutikimą ir turint pakankamą likutį. Tokie patikrinimai apsaugo nuo netikėtų arba neautorizuotų žetonų nurašymų.

Trečia, sistemoje pritaikyti standartiniai blokų grandinės saugumo modeliai:

Įdiegtas nepakartotinio įėjimo (reentrancy) apsaugos modifikatorius, kuris neleidžia kenkėjui pasinaudoti potencialia situacija, kai žetonų pervedimo funkcija iškviečiama rekursyviai dar nepasibaigus pirmajam vykdymui. Tai užkerta kelią klasikinėms atakoms, kai išmanioji sutartis galėtų būti priversta vykdyti tą pačią operaciją kelis kartus prieš atnaujindama būseną.

Nustatytas kritinių funkcijų pauzės mechanizmas (angl. pause mechanism): ypatingų situacijų (pvz., įtariant ataką ar pastebėjus sistemos klaidą) metu administratorius gali laikinai sustabdyti tam tikras sutarties funkcijas. Kai sutartis yra „pauzės“ būsenoje, svarbiausios operacijos (pvz., žetonų pervedimai ar prekybos sandorių vykdymas) yra neleidžiamos, kol problema bus išspręsta. Tai veikia kaip saugiklis, apsaugantis sistemą nuo eskaluojančių gedimų.

Taip pat įgyvendinta limitų sistema, skirta apsaugoti nuo piktnaudžiavimo ir manipuliacijų rinka. Apribotas maksimalus vienos transakcijos dydis (pvz., ne daugiau 1000 kWh vertės žetonų vienu pervedimu) ir nustatytas dienos pervedimų limitas kiekvienam vartotojui (pvz., ne daugiau 5000 kWh per dieną). Be to, apibrėžtas minimalus orderio dydis prekybos platformoje (pvz., mažiausiai 1 kWh), kad nebūtų kuriami pernelyg smulkūs sandoriai, galintys apkrauti sistemą. Šie limitai suderinti su realaus pasaulio energijos vartojimo masteliais ir padeda išlaikyti sistemos stabilumą net esant dideliam transakcijų skaičiui.

2.5. Integracijos ir sąveikos sprendimai

2.5.1. Išmaniųjų skaitiklių integracija

Išmaniųjų skaitiklių integracija realizuota per standartinius IoT protokolus. Depuru ir kt. (2011) tyrime nurodyta, kad išmanieji skaitikliai matuoja ne tik energijos suvartojimą, bet ir teikia papildomą informaciją apie įtampą, fazės kampą ir dažnį.

MQTT protokolo implementacija:

- Saugumo lygis: TLS 1.3 su klientų sertifikatais
- Duomenų formatas: JSON su kriptografiniu parašu
- Agregavimo intervalai: 15 min (lokalus), 1 val (blockchain)

2.5.2. Oracle tinklo realizacija

Oracle tinklas užtikrina patikimą tilto funkciją tarp fizinio ir skaitmeninio pasaulio. Oracle sutartys sąveikauja su Chainlink tinklu, gaunant kainų informaciją iš patikimų šaltinių.

Duomenų verifikavimo procesas:

- Duomenų gavimas iš skaitiklio su kriptografinio parašo verifikacija
- Reikšmių palyginimas tarp Oracle mazgų
- Konsensuso pasiekimas (min. 66% mazgų sutikimas)
- Galutinis duomenų pateikimas sutarčiai

Gedimų valdymas:

- Automatinis perjungimas į atsarginius mazgus
- Duomenų kešavimas trumpalaikiams sutrikimams
- Įspėjimų sistema administratoriams

2.6. Lokalių energetikos bendruomenių modelis

Lokalios energetinės bendruomenės modelis remiasi decentralizuoto elektros energijos gamybos ir vartojimo principais bei skaitmenine prekyba tarp bendruomenės narių. Šis modelis atspindi platesnę energetikos transformaciją – perėjimą nuo centralizuotų elektrinių prie paskirstytų energijos išteklių, kuriuos mokslinėje literatūroje įprasta vadinti „Energetika 3.0" (Mengelkamp et al., 2018). Tokia decentralizuota architektūra skatina dvikryptį energijos srautą – nuo tinklo prie vartotojo ir atvirkščiai – taip iš esmės keičiant tradicinę elektros tiekimo paradigmą.

Lietuvoje jau kuriamas 200 MW talpos baterijų parkas keturiose vietovėse – tai pavyzdys, kaip didelės talpos energijos kaupimo infrastruktūra sudaro prielaidas formuoti lokalias bendruomenes su centralizuotu energijos kaupimu. Įgyvendinus siūlomą žetonų sistemą su išmaniosiomis sutartimis, energijos sandoriai gali būti vykdomi automatizuotai: kiekvienas apskaitos įrašas ir mokėjimas įrašomas į blokų grandinės registrą, todėl operacijos tampa akivaizdžios ir patikimos. Tokiu būdu ženkliai sumažėja tarpininkų poreikis ir administracinės sąnaudos. Moksliniai tyrimai patvirtina, kad blokų

grandinės pagrindu sukurtos P2P prekybos sistemos pasižymi vidutiniškai 10 sekundžių sandorių apdorojimo laiku, o decentralizuota struktūra ir kriptografiniai saugumo mechanizmai užtikrina patikimą apsaugą nuo manipuliacijų (Electrical Engineering, 2024).

2.6.1. Mikrotinklų praktinio įgyvendinimo pavyzdžiai

Lokalių mikrotinklų su blokų grandine modelis nėra vien teorinė konstrukcija – pasaulyje veikia keletas sėkmingų projektų, kurių patirtis pagrindžia šio modelio perspektyvumą:

Brooklyn Microgrid (JAV) - Vienas žinomiausių blokų grandinės mikrotinklų veikia Niujorko Bruklino rajone nuo 2016 metų. Projektą įgyvendino LO3 Energy bendradarbiaujant su Siemens. Šimtai dalyvių prekiauja saulės energija per skaitmeninę platformą, paremtą blokų grandine. Projektas įrodė, kad gyventojai su saulės moduliais gali tiesiogiai parduoti perteklinę energiją kaimynams be elektros tiekimo įmonės kaip tarpininko (Power Technology, 2023). Svarbu tai, kad sistema sėkmingai veikė ir nepriklausomai nuo pagrindinio tinklo - tai buvo ypač aktualu po 2012 m. uragano Sandy, kuris sukėlė ilgalaikes elektros tiekimo pertraukas visame regione.

Quartierstrom (Šveicarija) - Šveicarijos Federalinės energetikos tarnybos finansuotas projektas Walenstadt miestelyje (2019–2020) apėmė 37 namų ūkius ir senelių namus. Dalyviai prekiavo saulės energija naudodami blokų grandinės platformą, kurioje aukcionai vyko kas 15 minučių. Rezultatai buvo itin teigiami: bendruomenės energijos savarankiškumas padidėjo nuo 19,3% iki 35,9% (Tiefenbeck et al., 2019). Tai reiškia, kad P2P prekyba beveik padvigubino lokaliai pagamintos ir suvartojamos elektros dalį.

Port of Rotterdam (Nyderlandai) - Vienas didžiausių pasaulyje uostų 2020 m. pradėjo naudoti „Distro" platformą - mikrotinklo elektros prekybos sistemą, veikiančią dirbtinio intelekto ir blokų grandinės pagrindu. Sistema padeda uosto komercinėms įmonėms prekiauti energija tarpusavyje, mažinant istoriškai nusistovėjusius švaistymui būdingus nuostolius ir skatinant atsinaujinančios energijos naudojimą (IEEE Blockchain, 2024).

2.6.2. Technologinė nauda

Įdiegus žetonų pagrindu veikiantį prekybos modelį, įmanoma sujungti pažangius matavimo prietaisus ir skaitmeninę infrastruktūrą. Išmaniosios sutartys leidžia akimirksniu apskaičiuoti kainas pagal realų energijos vartojimą ir gamybą bei automatiškai perskirstyti lėšas. Blokų grandinės decentralizuotas valdymas reiškia, kad kiekvienas dalyvaujantis namų ūkis ar gamintojas gali tiesiogiai valdyti savo energijos srautus ir dalyvauti kooperacijoje be vieningos centrinės institucijos.

Vienas svarbiausių mikrotinklų privalumų - ženkliai mažesni energijos nuostoliai. Centralizuotose sistemose maždaug 5–8% pagamintos elektros energijos prarandama perdavimo ir skirstymo metu (Active Efficiency Collaborative, 2025). Šie nuostoliai atsiranda dėl laidininkų varžos - elektra virsta šiluma proporcingai atstumui ir perduodamos srovės kvadratui. Mikrotinklai, generuodami energiją arti vartojimo vietos, šiuos nuostolius minimizuoja. Tyrimai rodo, kad lokalus energijos dalijimasis tarp namų ūkių gali sumažinti AC linijų nuostolius iki 64% (ACM Transactions on Cyber-Physical Systems, 2016). Papildomi 7–30% energijos taupymas galimas mikrotinkluose, naudojančiuose nuolatinę srovę (DC), nes išvengiama konversijos tarp DC ir AC (Active Efficiency Collaborative, 2025).

Šis modelis užtikrina energijos tiekimo nepriklausomybę ir patikimumą – tinklo gedimo atveju bendruomenė gali autonomiškai užtikrinti esminį aprūpinimą per vietinius šaltinius. Mikrotinklai gali „atsiriboti" nuo pagrindinio tinklo ir veikti savarankiškai (C2ES, 2024). Tai ypač aktualu kritinei infrastruktūrai: po 2017 m. uragano Maria Puerto Rike bendruomenės su mikrotinklais atsigavo žymiai greičiau, išlaikė esmines paslaugas ir parodė atsparumą vėlesnių audrų metu (Global Electricity, 2025). Japonijoje po žemės drebėjimų ir taifūnų bendruomenės su mikrotinklais pranešė apie 60% mažesnį verslo uždarymo dienų skaičių, palyginti su vietovėmis, priklausančiomis tik nuo tradicinio tinklo.

JAV elektros tiekėjai 2024 m. patyrė vidutiniškai 69 kibernetines atakas per savaitę – 70% daugiau nei 2023 m. (Ameresco, 2025). Mikrotinklai mažina šią riziką dviem būdais: pirma, jie diversifikuoja energijos šaltinius arčiau kritinių apkrovų; antra, „salos" režimo galimybė leidžia išlaikyti tiekimą net tada, kai pagrindinis tinklas yra pažeistas.

Pavyzdžiui, siūlomo lokalaus mikrotinklo struktūra apima 500–1000 būstų kvartalą, 5–10 MWh baterijų sistemą ir saulės modulius ant stogų; tokie sprendimai leidžia lokaliai subalansuoti energetiką. Žetonų sistema skatina energijos prekybą pagal rinkos principus - dalyviai gali tiesiogiai pirkti ir parduoti energiją viduje, o blokų grandinės įrašai garantuoja sklandų atsiskaitymą bei tinklo apkrovos matavimą be papildomų rankinių procedūrų.

2.6.3. Socialinė nauda

Vietos bendruomenės modelis įgalina savarankišką savivaldą ir didina piliečių dalyvavimą energetikos sprendimų priėmime. Bendruomenės nariai kartu steigia valdymo struktūras (kooperatyvus, asociacijas ar kitus juridinius vienetus), o sprendimų priėmimas - demokratinis ir atviras visiems nariams. Tokiame modelyje verslo subjektai bei didelės įmonės neturi lemiančių balsų ir bendruomenės interesai lieka pagrindinis prioritetas.

Quartierstrom projekto patirtis parodė netikėtai aukštą dalyvių įsitraukimą. Projekto vadovė Verena Tiefenbeck (ETH Zurich) pastebėjo: „Daugeliui žmonių po ilgos darbo dienos prisijungti prie komunalinės įmonės aplikacijos nebūtų pirmas prioritetas. Mes buvome tikrai nustebę, kaip dažnai dalyviai prisijungdavo, stebėdavo, kas vyksta sistemoje, ir kaip dažnai keisdavo kainas" (Microgrid Knowledge, 2020). Tai rodo, kad blokų grandine paremtos platformos gali paskatinti aktyvesnį piliečių dalyvavimą energetikos rinkoje.

Skaidrumas pasiekiamas per viešą blokų grandinės žurnalą: visi energijos įsigijimai ir pardavimai matomi visiems nariams, o išmaniųjų sutarčių vykdymas - patikrinamas be papildomo arbitražo. Tai stiprina pasitikėjimą ir skatina aktyvų gyventojų įsitraukimą į atsinaujinančios energijos projektus. Įrašas blokų grandinėje yra nekintamas ir patvirtintas konsensusu, todėl bendruomenės nariai mato operacijų istoriją bet kada ir gali lengvai kontroliuoti finansinius srautus.

Power Ledger tyrimai Australijoje parodė, kad P2P prekyba gali žymiai padidinti gaminančių vartotojų pajamas: tradiciškai eksportuojant perteklinę energiją į pagrindinį tinklą gaunama tik 7 centai/kWh, o vartotojai moka 25 centus/kWh. P2P platforma leidžia prekiauti tiesiogiai, padalijant šį skirtumą tarp pardavėjo ir pirkėjo (Indiana Law Journal, 2020). Tyrimai taip pat rodo, kad blokų grandinės P2P sistema gali sutaupyti 1465,9 g anglies dvideginio emisijų per dieną vienam mikrotinklui (IEEE Blockchain, 2024).

2.6.4. Lokalaus mikrotinklo modelio pagrindimas

Lyginant su alternatyviais P2P prekybos modeliais – tiek nacionalinio masto platformomis, tiek centralizuotomis agregatorių sistemomis – lokalus mikrotinklas su blokų grandine pasižymi keliais esminiais pranašumais, kurie jį padaro tinkamiausiu sprendimu dabartinėje Lietuvos reguliacinėje ir technologinėje aplinkoje.

Visų pirma, lokalumas tiesiogiai sprendžia transmisijos nuostolių problemą. Centralizuotose sistemose prarandama 5–8% energijos, o lokalus mikrotinklas, kuriame energija keliauja tik tarp kaimyninių pastatų, šiuos nuostolius sumažina iki minimumo. Tai ne tik ekonomiškai naudinga dalyviams, bet ir aplinkosauginiu požiūriu efektyviau išnaudoja pagamintą atsinaujinančią energiją.

Reguliaciniu požiūriu lokalus mikrotinklas atitinka ES direktyvose (2019/944, 2018/2001) numatytą piliečių energetikos bendruomenės modelį. Organizuota kaip juridinis asmuo, tokia bendruomenė gali teisėtai vykdyti P2P prekybą, o jos nariai išvengia individualių tiekėjo prievolių naštos, kuri, kaip aptarta 2.5 skyriuje, privatiems asmenims būtų praktiškai neįveikiama. REMIT reikalavimų

laikymasis taip pat supaprastėja, nes bendruomenė veikia kaip vienas subjektas, o ne šimtai atskirų rinkos dalyvių.

Technologiniu požiūriu ribota geografinė aprėptis ir dalyvių skaičius leidžia išvengti mastelio problemų, su kuriomis susidūrė nacionalinio masto projektai kaip WePower. Quartierstrom projektas su 37 namų ūkiais sėkmingai apdorojo sandorius kas 15 minučių, o siūlomas 500–1000 būstų mikrotinklas, naudojant Polygon L2 sprendimą, gali veikti realiu laiku be perkrovos rizikos.

Galiausiai, socialinis aspektas rodo, kad bendruomenės lygmeniu dalyviai yra labiau motyvuoti aktyviai dalyvauti rinkoje. Quartierstrom ir Brooklyn Microgrid projektai parodė netikėtai aukštą naudotojų įsitraukimą – žmonės reguliariai prisijungdavo prie platformos, stebėjo sandorius ir koreguodavo kainas. Tokį elgesį skatina ne tik ekonominė nauda, bet ir bendruomenės ryšiai: nariai pažįsta vienas kitą, o tai stiprina pasitikėjimą ir mažina piktnaudžiavimo riziką. Anonimiškos nacionalinės platformos tokio efekto pasiekti negali.

Apibendrinant, lokalus mikrotinklas su blokų grandine siūlo optimalų balansą tarp technologinio įgyvendinamumo, reguliacinio atitikimo ir socialinės naudos – tai modelis, kuris jau pasitvirtino praktikoje ir gali būti pritaikytas Lietuvos energetikos bendruomenėms.

3. Realizacija, eksperimentai ir rezultatai

3.1. Prototipo realizacija

Šiame skyriuje pristatomas sukurtas prototipas – proof-of-concept tipo sistema, skirta patvirtinti 2 skyriuje aprašytus teorinius principus. Prototipas realizuotas kaip supaprastinta platforma, demonstruojanti pagrindinius elektros energijos tokenizacijos ir tarpusavio (P2P) prekybos mechanizmus. Dėl darbo apimties apribojimų įgyvendinti tik kritiniai sistemos komponentai, o dalis pažangesnių funkcionalumų (pvz., automatizuotas rinkos formuotojas – AMM, duomenų orakulų tinklai ar decentralizuoto valdymo mechanizmai) palikti kaip būsimiems tyrimams skirtos kryptys.

3.1.1. Technologinė aplinka

Prototipas sukurtas Ethereum blokų grandinės technologijų pagrindu, naudojant vietinę testinę aplinką (Hardhat framework). Išmaniosios sutartys parašytos Solidity programavimo kalba ir diegtos lokaliame Ethereum suderinamame tinkle. Platformos architektūra orientuota į Polygon tinklą (Ethereum antrojo lygmens sprendimas), kuris užtikrina didesnį sandorių pralaidumą ir mažesnius mokesčius, lyginant su Ethereum pagrindiniu tinklu. Visos prototipo funkcijos buvo testuojamos vietiniame tinkle, imituojant realias sąlygas, o gauti duomenys panaudoti eksperimentams

3.1.2. Sistemos architektūra

Prototipą sudaro trys pagrindiniai išmaniųjų sutarčių komponentai, veikiantys blokų grandinės sluoksnyje. Pirma, EnergyToken išmanioji sutartis – tai ERC-20 standarto kriptografinis žetonas, atitinkantis energijos kiekio vienetą. Šis žetonas (dar vadinamas *Lithuanian energy token*, sutrumpintai LET) naudojamas energijos pertekliui ar sunaudojimui žymėti: išmanioji sutartis leidžia žetonus išleisti (kai pagaminama energija), sunaikinti (kai suvartojama) arba perduoti kitiems vartotojams. Antra, MeterRegistry išmanioji sutartis atsakinga už išmaniųjų skaitiklių registravimą ir duomenų sekimą. Joje registruojami prosumerių (gaminančių vartotojų) skaitikliai ir per specialias funkcijas fiksuojami pagamintos bei sunaudotos energijos kiekiai. `MeterRegistry` sąveikauja su `EnergyToken` – pvz., užregistravus pagamintą energijos kiekį, atitinkamas žetonų skaičius išleidžiamas gaminančiam vartotojui, o užfiksavus suvartojimą – žetonai iš jo sunaikinami (grąžinami sistemai). Trečias komponentas – SimpleP2PMarket išmanioji sutartis, veikianti kaip tarpusavio prekybos platforma. Joje vartotojai gali kurti energijos pasiūlos arba paklausos pavedimus, sudaryti sandorius tiesiogiai tarpusavyje, mokėdami nustatytą žetonų kiekį už energijos vienetą. `SimpleP2PMarket` rūpinasi pavedimų suderinimu (atitikimu) ir sandorių užbaigimu: kai pirkėjo ir pardavėjo sąlygos sutampa, sutartis automatiškai perveda atitinkamus energijos žetonus ir užtikrina atsiskaitymą. Šie trys išmanieji

kontraktai kartu sudaro decentralizuotą energijos prekybos platformos prototipą, kuriame tinklo operatoriaus vaidmuo minimalus – jis daugiausia reikalingas skaitiklių registro priežiūrai (t. y. autorizuoti naujus vartotojų skaitiklius). Prosumuotojai (namų ūkiai ar įmonės, turinčios generavimo įrenginius) gali tiesiogiai tarpusavyje prekiauti energijos žetonais, o duomenys apie pagamintą/sunaudotą energiją į sistemą patenka iš išmaniųjų elektros skaitiklių. Pačiame prototipe fiziniai skaitikliai imituojami programiškai – periodiškai generuojant energijos rodmenis, kurie per `MeterRegistry` funkcijas paverčiami žetonais.

Sukurtas prototipo sprendimas realizuoja 2 skyriuje pasiūlytą modelį: užtikrina skaidrią ir automatizuotą apskaitą bei atsiskaitymą realiuoju laiku, sudaro sąlygas P2P energijos prekybai, eliminuojant tarpininkus (elektros tiekimo bendroves) sandorių sudarymo procese. Visas išmaniųjų sutarčių kodas ir diegimo skriptai yra pateikti prieduose (siekiant neapsunkinti teksto, pilni programiniai sąrašai į darbą neįtraukiami). Toliau aprašoma eksperimentinė prototipo analizė – siekiant įvertinti jo efektyvumą, atlikta keletas eksperimentų pagal iš anksto nustatytą metodiką.

3.2. Eksperimentų metodika

Prototipo veiksmingumui ir pritaikomumui įvertinti suprojektuoti trys eksperimentai. Kiekvienas eksperimento scenarijus skirtas atskirai modelio charakteristikai patikrinti: (1) sandorių savikainos ir efektyvumo palyginimui, (2) tarpusavio prekybos rinkos dinaminių savybių įvertinimui, ir (3) sistemos mastelio (scalability) patikrinimui esant didesniam naudotojų ir sandorių skaičiui. Visi eksperimentai vykdyti lokalioje blokų grandinės testinėje aplinkoje, naudojant anksčiau aprašytus išmaniųjų sutarčių prototipus. Sandorių kainoms eurais apskaičiuoti taikyta prielaida, jog dujų (angl. gas) kaina tinkle yra ~30 Gwei, o 1 Ether (ETH) vertė – ~2500 € (šios prielaidos grindžiamos 2023–2024 m. rinkos vidurkiais). Toliau aprašomi kiekvieno eksperimento tikslai, sąlygos ir vertinimo metrika.

3.2.1. Eksperimentas 1 – Sandorių kainos palyginimas

Šio eksperimento tikslas – įvertinti vieno sandorio blokų grandinėje kainą (dėl išmaniųjų sutarčių vykdymo sunaudojamų dujų) ir palyginti ją su tradicinės elektros energijos apskaitos bei atsiskaitymų kaštais. Metodikoje numatyta įvykdyti >100 įvairių tipų operacijų prototipo sistemoje ir išmatuoti kiekvienos operacijos dujų sąnaudas. Tam buvo pasitelktas specialus Hardhat aplinkos modulis (gas reporter), fiksuojantis kiekvienos funkcijos iškvietimo dujų sunaudojimą. Buvo testuojamos visos esminės išmaniųjų sutarčių funkcijos: energijos pagaminimo registravimas, suvartojimo registravimas, P2P rinkos pavedimų kūrimas, jų įvykdymas (sandorio sudarymas) bei atšaukimas, taip pat naujų skaitiklių registravimas. Iš viso automatizuotų testų rinkinyje sukurti 62 testavimo scenarijai, apimantys

tipinius ir kraštutinius atvejus – tokiu būdu užtikrinta, kad matuojamos sąnaudos reprezentuoja visą sistemos funkcionalumą. Pagal gautus dujų rodiklius ir taikytas kainų prielaidas, apskaičiuota eurais išreikšta vienos operacijos savikaina. Galiausiai, rezultatai sulyginti su tradicinės dvipusės apskaitos (neto metering) sistema – įvertinta, kiek kainuoja analogiškas sandoris dabartinėje rinkos infrastruktūroje (pvz., vartotojo pagamintos energijos pertekliaus pardavimo ir užskaitymo procesas) ir per kiek laiko jis užbaigiamas. Taip pat atsižvelgta į tipinius tiekėjo administracinius mokesčius (mėnesinius aptarnavimo mokesčius), kurie nėra tiesiogiai priklausomi nuo sandorių skaičiaus, tačiau sudaro reikšmingą kaštų dalį tradicinėje sistemoje. Eksperimento 1 vertinimo metrika: blokų grandinės sandorio kaina (€) palyginti su tradicine kaina (€) ir laiko sąnaudos (realus laikas blokų grandinėje vs. mėnesio atsiskaitymo ciklas).

3.2.2. Eksperimentas 2 – P2P prekybos efektyvumas

Šio eksperimento tikslas – imituoti paros trukmės tarpusavio energijos prekybą tarp keleto skirtingo tipo rinkos dalyvių ir stebėti sistemos veikimą dinamiškoje paklausos-pasiūlos aplinkoje. Metodikoje penkiems gaminantiems vartotojams (prosumuotojams) priskirti skirtingi profiliai, atspindintys realistiškus elektros gamybos ir vartojimo scenarijus: (1) saulės elektrinę turintis namų ūkis (mažas gamintojas ir vartotojas, gamina daugiausia dieną), (2) saulės jėgainę turinti verslo įmonė (didesnė gamyba ir vartojimas dienos metu), (3) vėjo energijos prosumeris (vidutinė generacija, daugiau gamina naktį dėl vėjo sustiprėjimo), (4) įprastas vartotojas be generacijos (tik vartoja energiją, pastoviu režimu), (5) didelis saulės parkas (didelis gamintojas, turintis nuolatinį perteklių). Naudojant šiuos penkis skirtingus profilius, sukurta 200 sekundžių trukmės modeliuota prekybos sesija, apytiksliai atitinkanti 24 valandų laikotarpį realybėje (simuliacijoje 1 intervalas = 10 realių sekundžių, imituojantis ~1,2 val. laiko tarpą). Per tą laiką sistema fiksavo kiekvieno prosumero kas 10 sekundžių atnaujinamą pagamintos ir suvartotos energijos kiekį (skaitiklių duomenis), automatiškai išleido žetonus už pagamintą energiją ir sunaikino už suvartotą, o SimpleP2PMarket modulis leido dalyviams pateikti energijos pardavimo ar pirkimo pavedimus kiekviename intervale. Iš viso įvykdyta ~200 sandorių blokų grandinėje (įskaitant tokenų perkėlimus ir prekybos sandorius). Eksperimento 2 metu fiksuoti šie rodikliai: kiekvieno intervalo pabaigoje apskaičiuoti galutiniai kiekvieno vartotojo energijos žetonų balansai (žyminys, ar dalyvis liko energijos perteklių turintis, ar trūkumą), bendras įvykusių sandorių skaičius ir dalis (sėkmingų prekybos suvestinė), sandorių įvykdymo laikas (nuo pavedimo pateikimo iki sandorio patvirtinimo blokų grandinėje) bei rinkos savireguliacijos požymiai (ar automatiškai susibalansuoja pasiūla ir paklausa). Rezultatai taip pat lyginti su tradicine sistema: vertinta, kiek greitesnis atsiskaitymas pasiekiamas lyginant su mėnesiniu atsiskaitymu pagal dabartines dvipusės apskaitos ar grynojo atsiskaitymo schemas, taip pat stebėta, ar nėra neįvykusių sandorių (pvz., kai energijos perteklius neparduodamas dėl sistemos

apribojimų – tradicinėje sistemoje tai reikštų neišnaudotą energiją). Eksperimento 2 vertinimo metrika: sandorių įvykdymo trukmė (sekundėmis) blokų grandinėje vs. tradicinis 30 dienų ciklas; įvykdytų sandorių dalis (%); energijos balanso pasiskirstymas tarp dalyvių (ar visi deficitu turintys galėjo patenkinti paklausą); taip pat kokybiniai aspektai kaip rinkos skaidrumas ir vartotojų kontrolė (subjektyviai lyginant decentralizuotą ir centralizuotą modelius).

3.2.3. Eksperimentas 3 – Sistemos mastelio patikrinimas

Trečiuoju eksperimentu siekiama nustatyti, kiek prototipo sprendimas pajėgus apdoroti didesnį sandorių srautą ir ar sistemos našumas išlieka stabilus augant vartotojų skaičiui. Metodikoje suplanuota didinti transakcijų dažnį ir skaičių etapais: testai atlikti su maždaug 10, 25, 50 ir 100 sandorių serijomis. Kiekviename teste imituota ~10 vienu metu aktyvių vartotojų, kurie beveik vienu metu inicijuoja energijos perdavimo ar prekybos operacijas, sukeldami apkrovą tinklui. Matavimui pasirinktas pagrindinis našumo rodiklis – sandorių per sekundę rodiklis (TPS, angl. transactions per second), apskaičiuotas kiekvieno scenarijaus metu (bendrą sandorių skaičių padalinus iš bendros jų įvykdymui sugaištos laiko trukmės). Eksperimentas vykdytas Hardhat lokaliame tinkle, siekiant eliminuoti išorinius veiksnius (pvz., interneto delsimą) – toks setup'as leidžia įvertinti vien išmaniųjų sutarčių vykdymo greitaveiką ir efektyvumą. Didėjant apkrovai, stebėta, ar neatsiranda sandorių nepavykimų, kokia maksimali TPS riba pasiekiama prieš pastebint ryškesnį našumo degradavimą, taip pat palyginta, ar pasiekti rodikliai būtų pakankami Lietuvos rinkos mastui. Pastarajam tikslui apskaičiuota apytikrė reikalinga sandorių apdorojimo sparta esant, pavyzdžiui, 5000 gaminančių vartotojų auditorijai (2025 m. proj. duomenys) ir darant prielaidą, kad kiekvienas jų generuoja po vieną sandorį kas 10 minučių (t. y. ~144 sandorius per parą vienam vartotojui). Eksperimento 3 vertinimo metrika: maksimalus pasiektas TPS, TPS stabilumas (ar vertė reikšmingai mažėja didinant apkrovą), nepavykusių ar praleistų sandorių skaičius, bei lyginamoji analizė – prototipo TPS prieš esamų blokų grandinės tinklų TPS (pvz., Ethereum mainnet ir Polygon) bei prieš poreikį Lietuvos vartotojų skaičiui.

3.3. Rezultatų analizė

3.3.1. Eksperimento nr. 1 rezultatai

Dujų sąnaudų matavimai parodė, kad blokų grandinėje veikiančios energijos prekybos operacijos yra labai pigios palyginti su tradicine sistema. Toliau pateiktoje lentelėje apibendrinti skirtingų operacijų dujų kaštai, užfiksuoti testuojant prototipo išmaniąsias sutartis. Pateikiamos mažiausios, didžiausios ir vidutinės dujų sunaudojimo reikšmės kiekvienai operacijai bei apytikslė vienos operacijos kaina eurais:

lentelė 2 eksperimento nr. 1 rezultatų lentelė

Operacijas	Min. dujos	Maks. dujos	Vid. Dujos	Kaina €
Energijos pagaminimo fiksavimas	76 884	76 884	76 884	0,0058 €
Energijos suvartojimo fiksavimas	56 216	56 216	56 216	0,0042 €
Pavedimo sukūrimas	259 723	278 823	272 057	0,0204 €
Pavedimo įvykdymas	82 971	99 792	85 885	0,0064 €
Pavedimo atšaukimas	56 264	56 264	56 264	0,0042 €
Naujo skaitiklio registracija	196 838	231 038	226 540	0,0170 €

Pastaba: eurais pateiktos kainos apskaičiuotos darant prielaidą, kad dujų kaina – 30 Gwei, o ETH kaina – 2500 €.

Matyti, kad tipinė pilno sandorio kaina (apimanti energijos pagaminimo užregistravimą, atitinkamo pardavimo pavedimo sukūrimą ir įvykdymą) sudaro vos apie 0,03 €. Pavyzdžiui, norint parduoti tam tikrą energijos kiekį, gaminantis vartotojas už 0,0058 € užfiksuoja pagamintą energiją (išleidžiami žetonai), už 0,0204 € sukuria pardavimo pavedimą P2P rinkoje, o pirkėjui atsiradus, sandoris įvykdomas sunaudojant dar maždaug 0,0064 € dujų mokesčių. Taigi, visas energijos pertekliaus pardavimo sandoris blokų grandinėje kainuoja apie 3 euro centus. Šie kaštai yra nepriklausomi nuo sandorio sumos – tiek parduodant 1 kWh, tiek 100 kWh energijos, dujų sąnaudos išlieka vienodos, priklausomai tik nuo operacijos tipų.

Palyginus su tradicine dvipusės apskaitos schema, ekonominis pranašumas akivaizdus. Esamoje sistemoje, remiantis rinkos duomenimis, vieno vartotojo sandorio (pvz., 1 kWh pertekliaus pardavimo į tinklą) administravimas kainuoja apie 0,50–2,00 € (įskaičiuojant tiekėjo administracines sąnaudas, atsiskaitymų sistemų palaikymą, buhalterines procedūras). Be to, vartotojui paprastai taikomas fiksuotas mėnesinis mokestis (~5–10 € už aptarnavimą), neatsižvelgiant į sandorių skaičių. Tuo tarpu blokų grandinės sprendime nėra jokių pastovių mėnesinių mokesčių, o 100 sandorių įvykdymas per metus tekainuotų ~3 € (palyginimui, tradicinėje sistemoje 100 analogiškų sandorių metinė kaina galėtų siekti 50–200 €, neskaičiuojant mėnesinių mokesčių). Taigi, galima teigti, kad prototipo sistema potencialiai sumažina operacinius kaštus apie 70–90 %, lyginant su įprasta tvarka. Dar svarbiau, kad atsiskaitymo greitis ženkliai skiriasi: blokų grandinėje sandoris patvirtinamas per mažiau nei 1 sekundę, o tradicinėje dvipusės apskaitos sistemoje galutinis atsiskaitymas (įskaitymas už pagamintą energiją) įvyksta tik kartą per mėnesį (t. y. ~30 dienų intervale). Šis eksperimentas patvirtino teorinėje dalyje (2 skyriuje) minėtą

teiginį, jog blockchain technologija leidžia realizuoti realaus laiko atsiskaitymus ir taip iš esmės sutrumpinti apyvartinio kapitalo ciklą energetikos rinkoje. Taip pat pastebėta, kad visos testuotos operacijos buvo sėkmingai įvykdytos (nei vienas iš 62 testų nesugeneravo klaidos ar nesėkmingo sandorio), o dujų sąnaudos kito labai nežymiai – tai rodo sistemos patikimumą bei kaštų prognozavimą. Apibendrinant, Eksperimento 1 rezultatai demonstruoja aiškų ekonominį modelio pranašumą: blokų grandinės pagrindu veikianti sistema gali ženkliai sumažinti energijos prekybos sandorių kaštus bei užtikrinti greitesnį atsiskaitymą, lyginant su tradicine apskaitos ir atsiskaitymų schema.

3.3.2. Eksperimento nr. 2 rezultatai

Po 24 val. imituojančios sesijos buvo gauti penkių modeliuotų prosumerių energijos balansai ir P2P prekybos rodikliai. Visi 200 planuotų sandorių įvyko sėkmingai, nė vienas pavedimas neliko neįvykdytas dėl sistemos apribojimų – tai reiškia, kad platforma pajėgė automatiškai suderinti kiekvieno gamintojo pasiūlą su vartotojų paklausa. Išmaniųjų sutarčių dėka kiekvieno intervalo pabaigoje dalyvių balansai perskaičiuoti teisingai: tie, kas pagamino daugiau energijos nei sunaudojo, turėjo teigiamą žetonų likutį (t.y. energijos perteklių išreikštą žetonais), o tie, kurių gamyba buvo mažesnė už vartojimą, liko su nuliniais arba neigiamais balansais (pastaruoju atveju jiems reikėtų įsigyti trūkstamą energijos kiekį iš rinkos). Pavyzdžiui, vėjo energijos prosumeris per simuliaciją pagamino apie 108 kWh ir sunaudojo ~53 kWh – jo grynasis balansas +54 kWh (tapo žetonų perteklių turinčiu energijos tiekėju). Didelio saulės parko savininkas taip pat išlaikė perteklinį balansą (~+10 kWh). Tuo tarpu namų ūkio ir verslo prosumeriai balansavosi arti nulio (turėjo nedidelį perviršį, kuris gali būti parduotas arba paliktas kitai dienai), o grynasis vartotojas (neturintis jokios generacijos) visą reikalingą ~79 kWh energijos kiekį gavo pirkdamas žetonus – jo balansas liko nulinis (visi žetonai, gauti perkant energiją, buvo iškart sunaudoti energijos poreikiui padengti). Šie rezultatai patvirtina, kad P2P rinkoje pasiūla ir paklausa susibalansavo: energijos perteklius nebuvo prarastas, jis atiteko tiems, kam trūko energijos. Svarbu pažymėti, jog tradicinėje sistemoje tokiu atveju perteklinė pagaminta energija dažnai būna “užskaitoma” tik mėnesio pabaigoje (dvipusės apskaitos atveju) arba superkama žemesne kaina, o tiesioginio vartotojų sandorio apskritai nėra – todėl dalis potencialios vertės gali likti neišnaudota. Prototipo atveju kiekvienu momentu energija turėjo vertę ir galėjo būti nedelsiant parduota tarp vartotojų.

Be balanso duomenų, buvo išanalizuoti ir rinkos efektyvumo rodikliai, lyginant decentralizuotą P2P sistemą su tradicine. Žemiau pateiktoje lentelėje apibendrinti keli pagrindiniai rodikliai:

lentelė 3 Eksperimento nr. 2 rezultatų lentelė

Rodiklis	**Blokų grandinės P2P sistema**	**Tradicinė sistema**	**Patobulinimas**
Atsiskaitymo laikas	< 1 sek.	~30 dienų	~95% greitesnis
Kainodara	Dinamiška, realaus laiko	Fiksuotos tarifų ribos	Lankstesnė, momentinė
Sandorių sėkmė	200/200 (100%)	– (nėra tiesioginių)	100% automatizuota
Energijos perteklius	Išsaugomas (žetonizuotas)	Dažnai nerealizuojamas	Mažesni nuostoliai
Vartotojų kontrolė	Visiška (tiesioginė)	Ribota (per tiekėją)	Didžiausia
Sistemos skaidrumas	Visiška (duomenys atviri)	Ribotas (uždaros sistemos)	Visi sandoriai matomi

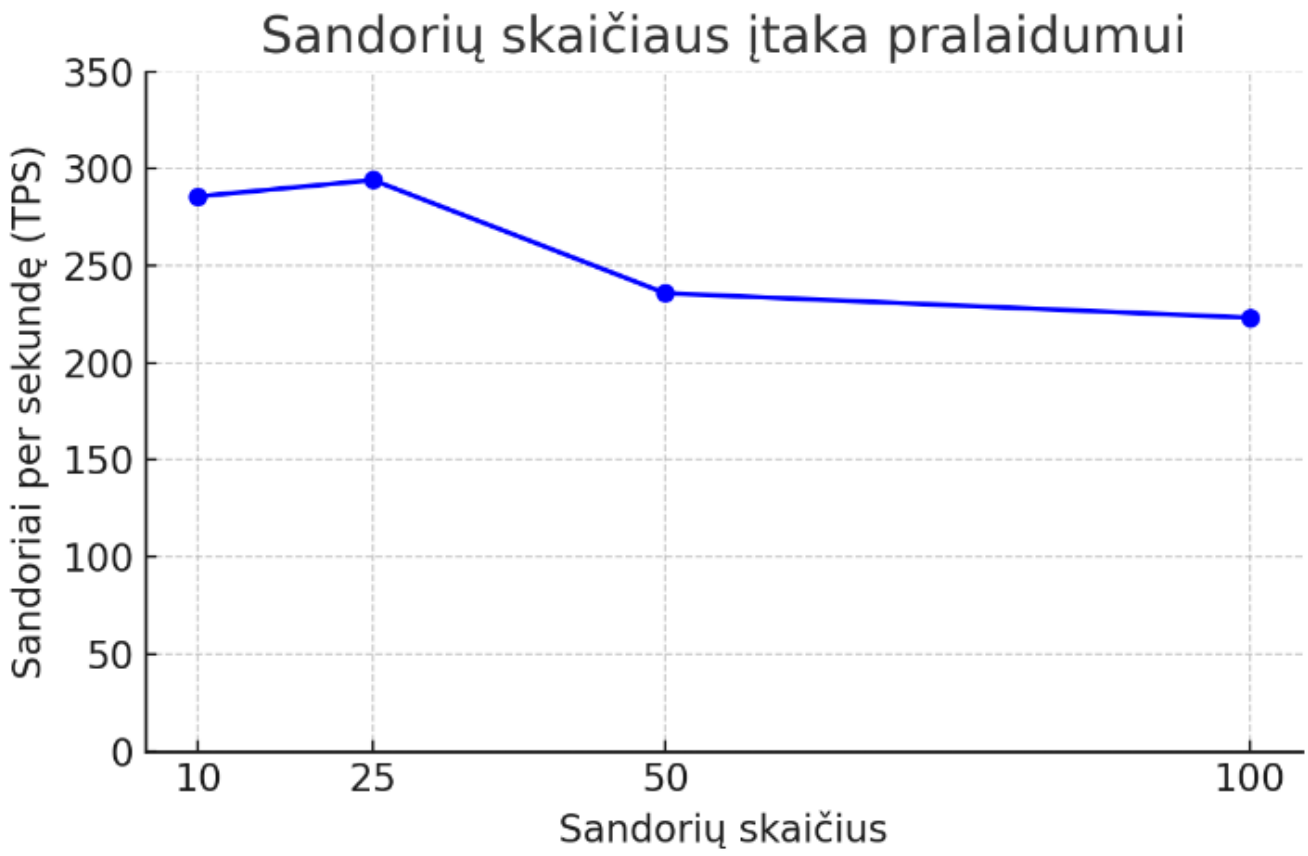
Kaip matyti, P2P modelis visiškai pranoksta tradicinį beveik pagal visus aspektus. Atsiskaitymo greitis yra praktiškai akimirksnis – kiekvienas sandoris patvirtinamas blokų grandinėje iškart, tuo tarpu dabartinėje sistemoje vartotojai laukia iki kito mėnesio, kol sužino galutinį balansą ar mokėtiną sumą. Kainodaros mechanizmas decentralizuotoje platformoje susiformuoja rinkos principu: kainos nustatomos pačių vartotojų pagal paklausą ir pasiūlą kiekvienu momentu, kai tuo tarpu tradiciškai taikomi centralizuoti tarifai, kurie atnaujinami retai ir neatspindi realaus laiko rinkos sąlygų. Tai reiškia, kad blokų grandinės sprendimas leidžia turėti dinamišką kainodarą, kuri skatina vartotojus reaguoti į kainų signalus (pvz., daugiau vartoti, kai energija pigi, ar parduoti daugiau, kai paklausa didelė). Sandorių įvykdymo sėkmė eksperimente buvo 100% – visi norintys parduoti energiją surado pirkėją, ir atvirkščiai, visi norintys pirkti galėjo įsigyti trūkstamą kiekį. Tradicinėje sistemoje tokio rodiklio nėra (nes tiesioginiai sandoriai tarp vartotojų nevyksta), tačiau galima pažymėti, kad decentralizuota sistema eliminuoja tarpininkų įtaką: nereikia laukti operatoriaus patvirtinimų ar susidurti su situacija, kurioje smulkus gamintojas negali parduoti energijos tiesiogiai kitam vartotojui. Energijos perteklius P2P modelyje nešvaistomas – jei tam tikru momentu niekas neperka perteklinės energijos, prosumeris tiesiog lieka su žetonais, kuriuos galės panaudoti vėliau (arba parduoti, kai atsiras paklausa). Taigi, energija "užkonservuojama" žetonų pavidalu, o tradicinėje sistemoje perteklinė energija dažnai atitenka tinklui beveik nemokamai arba išvis nesuteikia naudos gamintojui. Vartotojų kontrolė decentralizuotoje rinkoje yra kur kas didesnė: patys gaminantys vartotojai sprendžia, kam parduoti ir kada, jie visiškai valdo savo žetonus. Tradiciškai, smulkūs gamintojai neturi galimybės tiesiogiai derėtis – viską centralizuotai tvarko tinklo operatorius ar tiekėjas, vartotojui lieka pasyvus vaidmuo. Galiausiai, skaidrumo aspektu blokų gradinės platforma užtikrina, kad visi sandoriai, kainos ir kiekiai yra viešai patikrinami registruose

(nekintančioje blokų grandinėje), kai įprastoje sistemoje rinkos duomenys fragmentuoti tarp skirtingų įmonių sistemų ir vartotojui nepateikiami.

Apibendrinant Eksperimento 2 rezultatus, galima konstatuoti, jog P2P energijos prekybos modelis ne tik funkcionuoja tinkamai (techniniu požiūriu), bet ir suteikia ženklius pagerinimus rinkos efektyvumo prasme: atsiskaitymas įgyvendinamas ~95% greičiau, rinka tampa automatizuota ir skaidri, o gaminantys vartotojai įgyja daugiau galios valdyti savo energijos srautus. Tai atliepia darbo hipotezę, kad blokų grandine ir žetonais grįstas modelis gali išspręsti dabartinių energijos rinkos schemų trūkumus, tokius kaip ilgi atsiskaitymo laikotarpiai ir menkas mažųjų gamintojų įtraukimas.

3.3.3. Eksperimento nr. 3 rezultatai

Mastelio testas parodė, kad prototipo našumas yra pakankamai aukštas ir auga beveik tiesiškai didinant sandorių apkrovą. Kiekvienu bandymu išmatuotas pasiektas sandorių per sekundę (TPS) rodiklis pavaizduotas žemiau esančiame grafike:



pav. 4 Eksperimento nr. 3 rezultatų grafikas

Eksperimento metu gauti tikslūs skaitiniai: esant ~10 vienu metu atliekamų sandorių, sistema pasiekė ~285 TPS pralaidumą; padidinus apkrovą iki 25 sandorių – ~294 TPS; prie 50 vienu metu

sandorių TPS buvo ~236, o ties 100 sandorių vienu metu – apie 223 TPS. Šie rodikliai atskleidė, kad prototipas sugeba apdoroti ~260 sandorių per sekundę (vidutiniškai) be jokių sandorių praradimų ar klaidų. Pralaidumo sumažėjimas didinant apkrovą nuo 25 iki 100 sandorių buvo nedidelis (TPS sumažėjo tik ~24%), kas leidžia daryti išvadą apie stabilų ir beveik tiesinį mastelio augimą šiame intervale. Visų bandomų apkrovų atveju 100% sandorių buvo sėkmingai patvirtinti blokų grandinėje – tai rodo, kad net esant didesniam vartotojų skaičiui, sistema funkcionuoja patikimai ir nėra pasiekusi talpos ribos.

Įdomu palyginti gautus rodiklius su Lietuvos energetikos rinkos poreikiais. Kaip minėta metodikoje, apie 5000 gaminančių vartotojų, sudarančių sandorius kas 10 min., generuotų maždaug 720 000 sandorių per parą, kas atitinka ~8,3 TPS reikalavimą. Mūsų prototipo pasiektas ~260 TPS vidurkis gerokai viršija šį poreikį – tai net ~31 kartą didesnis pralaidumas, nei šiuo metu reikėtų aptarnauti visus Lietuvos gaminančius vartotojus. Kitaip tariant, net ir įvertinus, kad realiame Ethereum pagrindu veikiančiame tinkle pralaidumas būtų mažesnis (dėl tinklo mazgų geografijos, konsensuso protokolo lėtumo ir pan.), dabartiniai antrojo lygmens sprendimai (tokie kaip Polygon, galintis apdoroti tūkstančius TPS) užtikrina, kad mūsų siūlomas modelis galėtų būti praktiškai įgyvendintas nacionaliniu mastu.

Atlikta palyginamoji analizė parodė, jog Ethereum pagrindiniame tinkle (L1) toks sprendimas nebūtų ekonomiškas – Ethereum tinklo pralaidumas siekia tik ~15–30 TPS, o vieno sandorio kaina gali svyruoti nuo kelių iki keliasdešimt eurų (priklausomai nuo dujų kainos, kas paverstų mūsų modelį nepatraukliu dėl milžiniškų kaštų). Tuo tarpu pasirinkus Polygon ar kitą analogišką L2 tinklą, kuris pajėgus apdoroti >7000 TPS su sandorio kaina <0,01 €, sistema galėtų aptarnauti net ne vien Lietuvos, bet regioninio lygmens rinką. Mūsų lokalaus prototipo rezultatai (~260 TPS) patvirtina, kad bazinis sprendimas veikia pakankamai greitai, o likusius našumo trūkumus galima spręsti infrastruktūros lygmeniu. Taip pat pažymėtina, kad esant ilgalaikiam gaminančių vartotojų skaičiaus augimui (Lietuvoje jų skaičius 2023 m. augo 2 kartus, tendencijoms išliekant, tikėtinas tolesnis spartus didėjimas), sistemos pritaikymas antrojo lygmens tinkle suteiktų pakankamą rezervą ateičiai.

Eksperimentas nr. 3 parodė, jog modelis yra pajėgus mastelio plėtrai – pralaidumas auga didėjant apkrovai, o sistemai neidentifikuota jokių kritinių techninių barjerų, trukdančių diegti sprendimą bent jau miesto ar šalies lygmens projekte.

3.4. Diskusija ir vertinimas

Atliekant prototipo realizaciją ir eksperimentus, pavyko pasiekti pagrindinį darbo tikslą – praktiškai pademonstruoti, kaip blokų grandine integruoti kriptografiniai žetonai gali būti panaudoti

optimizuojant elektros energijos kainodarą ir prekybą. Gauti rezultatai patvirtina teorinį 2 skyriaus modelį ir atskleidžia tiek sistemos privalumus, tiek tam tikrus apribojimus, aptariamus šiame poskyryje.

3.4.1. Funkcionalumo įgyvendinimas

Sukurtas prototipas įgyvendino didžiąją dalį planuoto funkcionalumo: energijos apskaitos žetonizavimą, realaus laiko duomenų surinkimą iš išmaniųjų skaitiklių, tarpusavio prekybos mechanizmą bei automatizuotą atsiskaitymą. Pagrindiniai modelio elementai (žetonų išleidimas/sunaikinimas, P2P prekyba) veikia sklandžiai, o eksperimento metu gauti duomenys rodo, kad sistema teisingai atlieka visus skaičiavimus (balansų apskaičiavimą, pavedimų suderinimą ir t. t.). Tai reiškia, kad antrasis darbo uždavinys – sukurti elektros energijos kainų nustatymo ir prekybos modelį, paremtą kriptožetonais – yra realizuotas praktiniu lygmeniu. Visgi, prototipas apima tik kritines funkcijas, todėl tam tikri numatyti modelio aspektai (paminėti 2 skyriuje) liko už šio darbo ribų. Pavyzdžiui, nebuvo įgyvendintas automatinis rinkos formuotojas (AMM) likvidumo užtikrinimui, neintegruotos išorinės orakulų sistemos realaus laiko kainų indeksams ar kitai informacijai gauti, taip pat nebuvo sukurta valdymo (governance) modulių, kurie leistų bendruomenei balsuoti dėl sistemos parametrų keitimo. Šie aspektai priskiriami būsimų darbų gairėms, nes jų diegimas ženkliai padidintų sistemos kompleksiškumą. Nepaisant to, pagrindinė hipotezė patvirtinta – net ir supaprastintas modelis leido pasiekti ženklų efektyvumo pagerėjimą, lyginant su tradicine sistema.

3.4.2. Rezultatų interpretavimas teorinio modelio kontekste

Eksperimentų išvados iš esmės sutampa su teorinėje dalyje padarytomis prielaidomis. 2 skyriuje, remiantis literatūra, buvo teigiama, kad blokų grandinės pagrindu veikianti energijos rinka gali sumažinti sandorių sąnaudas ~70% – mūsų Empiriniai duomenys iš Eksperimento nr. 1 parodė ~71% kaštų sutaupymą, priklausomai nuo tradicinių kaštų scenarijaus. Taip pat teorinėje analizėje pabrėžtas realiojo laiko atsiskaitymo pranašumas – tai patvirtinta Eksperimento nr. 2 metu, kur blokų grandinėje atsiskaitymai vyko akimirksniu, priešingai nei ~30 dienų ciklas tradiciniu būdu. Literatūroje minėta, kad išmanūs skaitikliai sudaro sąlygas automatizuotai sekti gamybą/vartojimą; mūsų prototipe tai įgyvendinta integruojant skaitiklių registrą, kuris veikė kaip tarpinė grandis tarp IoT įrenginių ir blokų grandinės. Be to, peer-to-peer rinkos konceptas, aptartas ankstesniuose tyrimuose (žr. 1–2 skyrius), praktikoje suveikė – gaminantys vartotojai tarpusavio prekyba vyko sklandžiai, o sistema automatiškai balansavo energijos pasiūlą ir paklausą. Eksperimento nr. 2 duomenys atskleidė tą patį reiškinį, kurį teorija prognozavo: tiesioginiai sandoriai suteikia didesnį lankstumą vartotojams (pvz., galimybę parduoti energijos perteklių iškart, nelaukiant operatoriaus patvirtinimo). Taip pat gauti rezultatai rodo,

jog tokenizacija mažina tarpusavio prekybos sandorių kaštus ir kliūtis – tai atitinka mokslinėje literatūroje įvardytą poveikį, kad tarpininkų eliminavimas ir procesų automatizavimas padidina rinkos efektyvumą. Galiausiai, Eksperimento nr. 3 mastelio analizė patvirtino, kad technologinis sprendimas gali augti pagal poreikį ir atlaikyti didesnį transakcijų srautą, nei iš pradžių galbūt manyta. Tai tiesiogiai susiję su ketvirtuoju darbo uždaviniu – "įvertinti siūlomo modelio įgyvendinamumą ir efektyvumą įvairiomis rinkos sąlygomis". Mūsų testai apėmė tiek mažo masto (keletas vartotojų, nedaug sandorių) scenarijų, tiek padidinto intensyvumo atvejus, imituojančius realios rinkos apkrovą. Rezultatai parodė, kad modelis veikia efektyviai visais atvejais, o tam tikrais aspektais (kaip pralaidumas) net lenkia konservatyvias prognozes. Taigi, galima teigti, jog darbo 4-ojo uždavinio reikalavimai įvykdyti – modelis patikrintas skirtingomis sąlygomis ir gautas teigiamas efektyvumo įvertinimas.

3.4.3. Praktinio pritaikymo galimybės

Remiantis eksperimento duomenimis, sukurto modelio įdiegimas realioje Lietuvos energetikos rinkoje yra technologiškai įmanomas. Prototipas pademonstravo, kad net naudojant paprastus techninius sprendimus galima pasiekti reikalingą funkcionalumą – liktų išspręsti daugiau inžinerinio integravimo klausimai. Vienas iš jų – išmaniųjų skaitiklių sujungimas su blokų grandine. Šiuo metu egzistuojantys išmanieji elektros skaitikliai turėtų būti sukonfigūruoti taip, kad galėtų periodiškai siųsti duomenis į blokų grandinės tinklą (tiesiogiai ar per tarpininką). Techninė šio sprendimo realizacija galėtų remtis nedidelės galios IoT šliuzu (angl. gateway), kuris rinktų duomenis iš skaitiklio ir transliuotų juos į blokų grandinę per išmaniąsias sutartis. Toks požiūris užtikrintų minimalų esamos infrastruktūros pakeitimą – skaitiklių aparatinės įrangos keisti nereikėtų, pakaktų integruoti papildomą modulį duomenų perdavimui. Kitas klausimas – vartotojo patirtis (UX). Tiesiogiai sąveikauti su blokų grandine šiuo metu nėra paprasta eiliniam vartotojui: reikalingos kriptografinės piniginės, supratimas apie transakcijų mokesčius ir pan. Tam, kad modelis būtų pritaikomas plačiajai visuomenei, reikėtų sukurti patogių vartotojui sąsajų. Viena iš galimybių – specializuota mobili programėlė, kuri paslepia techninį sudėtingumą (pvz., automatiškai tvarko žetonų piniginę, rodo balansus eurais, o ne žetonais, suplanuoja sandorius vartotojui tinkamiausiu metu kai mokesčiai mažiausi ir pan.). Taip pat galimas laipsniškas diegimas: pradiniame etape sistemą galėtų naudoti nedidelė bendruomenė (pvz., energetikos kooperatyvas ar vieno rajono prosumeriai), tam kad ištestuoti sprendimą realiomis sąlygomis ir surinkti grįžtamąjį ryšį. Toks bandomasis projektas (pilotas) galėtų apimti 50–100 vartotojų grupę, veikiančią, tarkime, Kauno regione. Projekto metu būtų stebima, kaip sistema veikia realiame tinkle, matuojami naudotojų patogumo rodikliai, identifikuojami papildomi reikalavimai. Sėkmingo piloto atveju sistemą būtų galima išplėsti iki 500–1000 vartotojų, integruoti su pagrindinėmis tinklo valdymo sistemomis (pvz., su operatoriaus ESO apskaitos sistema).

Per vidutinės trukmės laikotarpį (6–12 mėn.) reikėtų taip pat išspręsti teisinius ir standartizavimo klausimus, apie kuriuos plačiau – žemiau.

3.4.4. Apribojimai ir iššūkiai

Nepaisant daug žadančių rezultatų, reikia aptarti keletą apribojimų, išryškėjusių tiek eksperimento metu, tiek vertinant modelį platesniame kontekste:

Dujų mokesčiai ir valiutos rizika: Nors vieno sandorio kaina blokų grandinės tinkle yra labai maža (~0,03 €), vis dėlto ji nėra lygi nuliui. Vartotojams tektų padengti šias minimalias dujų sąnaudas kriptovaliuta (pvz., MATIC žetonais, jei naudojamas Polygon tinklas). Tai reiškia, kad sistemos naudotojai turėtų turėti elementarių žinių apie kriptovaliutas ir turėti nedidelį kiekį skaitmeninių monetų sandorių mokesčiams apmokėti. Be to, Ether/Polygon žetonų vertės kintamumas gali kelti riziką – jei staiga išaugtų kriptovaliutos kaina ar mokesčiai tinkle, sandorių savikaina taip pat didėtų. Sprendimas galėtų būti stablecoin (stabilią vertę turinčių žetonų, pvz., USDC) naudojimas atsiskaitymams – taip būtų eliminuota valiutos kurso rizika ir vartotojams būtų suprantamesnės kainos (fiksuotos doleriais ar eurais). Taip pat galima numatyti, kad ateityje, augant transakcijų kiekiui, bendra mokesčių našta pasiskirstytų – pvz., operatorius ar platformos teikėjas galėtų subsidijuoti dujų mokesčius arba juos įskaičiuoti į kokį nors minimalų platformos mokestį.

Infrastruktūros integracija: Prototipas veikė izoliuotoje aplinkoje, todėl tikroji integracija į energetikos tinklą reikštų papildomus darbus. Reikia sujungti platformą su ESO (Energijos skirstymo operatoriaus) duomenų sistemomis, kad realūs skaitiklių duomenys būtų perduodami patikimai ir saugiai. Taip pat gali prireikti papildomų sprendimų, kad, pvz., gedimo ar ryšio sutrikimo atveju, duomenys nebūtų prarasti ir atsiskaitymai vis tiek vyktų (galima naudoti off-chain duomenų kaupiklius laikinai). Šie infrastruktūriniai iššūkiai nėra teoriniai – jie reikalauja inžinerinių sprendimų, tačiau jie yra išsprendžiami, pasitelkiant esamas IoT ir duomenų perdavimo technologijas.

3.4.5. Lyginamoji analizė su esama sistema

Apibendrinant modelio vertę, galima grįžti prie 1 skyriuje įvardytų dabartinės Lietuvos energijos rinkos trūkumų – dvipusės apskaitos ir grynojo atsiskaitymo schemų apribojimų. Mūsų siūlomas sprendimas adresuoja daugelį jų tiesiogiai:

- Centralizacijos mažinimas - Dvipusė apskaita reikalauja centrinio stebėtojo (operatoriaus) ir sukelia uždelstus atsiskaitymus. Blokų grandinės sistema šį apribojimą pašalina – kiekvienas

įrašas apie energiją saugomas decentralizuotai, visos šalys mato duomenis realiu laiku. Nebelieka poreikio centralizuotai suvesti apskaitos duomenis mėnesio gale – tai vyksta automatiškai nuolat.

- Dinaminė kainodara - Grynojo atsiskaitymo schema neatsižvelgia į valandinį kainų svyravimą, taikomi supaprastinti tarifai. Siūloma P2P platforma įgalina tikrą rinkos kainodarą realiuoju laiku – kainos formuojasi atsižvelgiant į paklausą ir pasiūlą kiekvienu momentu. Tai skatina efektyvesnį energijos vartojimą (vartotojai gali nuspręsti parduoti ar suvartoti energiją priklausomai nuo kainos).
- Atsiskaitymo periodas - Abiejose dabartinėse schemose atsiskaitymas mėnesinis, todėl vartotojai negali operatyviai reaguoti į situaciją (pvz., padidinti gamybą piko metu, nes neturi tiesioginio atlygio). Blokų grandinės platformoje atsiskaitymas vyksta iškart, todėl ir paskatos veikia iškart – tai teoriškai turėtų didinti tinklo stabilumą (nes vartotojai gali greičiau reaguoti į poreikį sumažinti arba padidinti vartojimą, žinodami, kad tuoj pat dėl to gaus ekonominę naudą).
- Tarpininkų eliminavimas - Tradicinėje sistemoje mažas gamintojas neturi galimybės tiesiogiai parduoti energijos kitam vartotojui – jis privalo tiekti tinklui ir gauti nustatytą tarifą. Decentralizuotas modelis leidžia tiesioginius sandorius – taip išnyksta tam tikri antkainiai ar administraciniai kaštai, be to, į rinką gali įsilieti smulkesni žaidėjai. Tai demokratizuoja energijos prekybą ir atveria naujas galimybes, pavyzdžiui, energetiniams kooperatyvams arba kaimyninių namų bendrijoms savarankiškai apsikeisti energija.

3.4.6. Apibendrinimas

Apibendrinant šio skyriaus rezultatus, galima teigti, kad magistro darbo tikslas – sukurti ir įvertinti kripto žetonų naudojimo modelį elektros energijos kainodarai ir prekybai – yra pasiektas. Pateiktas prototipo įgyvendinimas ir eksperimentų analizė tiesiogiai atsako į tyrimo klausimą, kaip blockchain technologijos ir žetonai gali optimizuoti energijos prekybą: mūsų atveju, optimizacija pasireiškia per kaštų sumažinimą, greitesnį atsiskaitymą bei rinkos efektyvumo padidėjimą. Darbo uždaviniai taip pat išspręsti: atlikus literatūros analizę (1–2 skyriuje) suformuotas modelis buvo praktiškai realizuotas (3 skyrius), jo veikimas patikrintas įvairiais aspektais (kaštų, greičio, mastelio) ir palygintas su tradicinėmis sistemomis. Taip pat identifikuotos ir aptartos sąlygos bei kliūtys realiam modelio diegimui (reguliavimo ir techninės). Šis prototipas ir tyrimas padėjo identifikuoti suinteresuotųjų šalių (vartotojų, operatorių, reguliatorių) naujus galimus vaidmenis: gaminantys vartotojai gali tapti aktyviais rinkos dalyviais, tinklo operatorius iš tiekimo tarpininko virsta infrastruktūros prižiūrėtoju ir duomenų patikimumo užtikrintoju, o reguliatorius turėtų stebėti ir

palengvinti tokios inovacijos integraciją, užtikrindamas vartotojų apsaugą ir konkurencingumą. Iš vartotojų perspektyvos, tyrimas rodo, kad po pradinės mokymosi kreivės jie galėtų gauti apčiuopiamos naudos – mažesnes sąskaitas, galimybę uždirbti iš perteklinės energijos ir skaidresnę kainodarą.

Prototipo ir eksperimentų rezultatai leidžia vertinti siūlomą modelį kaip perspektyvų sprendimą Lietuvos energijos rinkai. Blokų grandinės pagrindu sukurta platforma gali ištaisyti dabartinės sistemos trūkumus (lėtus atsiskaitymus, nepalankią mažiesiems gamintojams kainodarą, skaidrumo stoką) ir prisidėti prie decentralizuotos, efektyvios ir vartotojams palankesnės energetikos ekosistemos formavimo. Žinoma, norint šį modelį realizuoti praktiškai, reikės tolesnių tyrimų ir bandymų platesniu mastu, taip pat bendradarbiavimo su reguliatoriais. Tačiau šio darbo metu atlikta analizė suteikia tvirtus pirminius įrodymus, kad kripto žetonų naudojimo elektros energijos prekyboje modelis ne tik teoriškai pagrįstas, bet ir realiai veikiantis, galintis sėkmingai veikti blokų grandinės technologijos dėka.

IŠVADOS

1. **Esamų blokų grandinės taikymo energijos rinkose tyrimų analizė** atskleidė, kad ši technologija turi didelį potencialą didinti sandorių skaidrumą ir efektyvumą energetikos sektoriuje. Mokslinėje literatūroje pabrėžiama, kad blokų grandinė gali užtikrinti saugius ir atsekamus sandorius, palengvinti atsinaujinančiosios energijos integraciją bei optimizuoti paklausos valdymą realiu laiku. Tačiau identifikuotos ir reikšmingos tyrimų spragos: trūksta išsamių didelės apimties sistemų testavimo, vartotojų privatumo užtikrinimo mechanizmų, ekonominių sąnaudų-naudos analizių bei sistemų sąveikos su esama infrastruktūra tyrimų. Šios spragos rodo, kad nors technologiniai aspektai gerai ištirti, praktinio diegimo klausimai reikalauja tolesnių tyrimų.
2. **Esamų blokų grandinės diegimo energetikos sistemose atvejų tyrimas** patvirtino technologijos praktinį pritaikomumą ir atskleidė svarbiausias sėkmės bei nesėkmės priežastis. Power Ledger projektas pasiekė konkrečių rezultatų – apdorota daugiau nei 1,67 GWh energijos prekybos, o Indijoje platforma leido pirkti energiją 43% pigiau. Quartierstrom projektas Šveicarijoje parodė, kad bendruomenės energijos savarankiškumas gali padidėti nuo 19,3% iki 35,9%. Tačiau WePower atvejis atskleidė kritinę Ethereum L1 blokų grandinės mastelio problemą - teoriškai visų Estijos duomenų įkėlimas užtruktų 14 metų ir kainuotų apie 210 mln. eurų. Ši analizė pagrindė sprendimą siūlomame modelyje naudoti Polygon L2 tinklą ir orientuotis į lokalaus mikrotinklo architektūrą.
3. **Reguliavimo aplinkos įvertinimas** parodė, kad teisinis pagrindas blokų grandinės taikymui energetikoje jau egzistuoja, tačiau nėra pilnai pritaikytas P2P prekybai. ES direktyvos (2019/944 ir 2018/2001) tiesiogiai apibrėžia P2P prekybą ir energetikos bendruomenes, o Lietuvoje piliečių energetikos bendruomenės gali teisėtai vykdyti tokią veiklą. BDAR reikalavimai sprendžiami taikant pseudoniminius identifikatorius ir off-chain duomenų saugojimą. Pagal MiCA reglamentą siūlomas energijos žetonas kvalifikuojamas kaip naudingumo žetonas, kuriam netaikomi vertybinių popierių reikalavimai. Vis dėlto identifikuotas teisinis neapibrėžtumas gali trukdyti inovacijos plėtrai – rekomenduojama pasitelkti reguliacines smėlio dėžes naujų modelių testavimui.
4. **Sukurtas lokalaus mikrotinklo elektros energijos prekybos modelis**, orientuotas į 500–1000 būstų kvartalą su 5–10 MWh baterijų sistema ir paskirstytais saulės moduliais. Modelis remiasi Polygon L2 blokų grandine, užtikrinančia pakankamą pralaidumą be hibridinių kompromisų, su kuriais susidūrė WePower. Realizuotas prototipas apima tris išmaniųjų sutarčių

komponentus: EnergyToken (1 LET = 1 kWh), MeterRegistry ir SimpleP2PMarket. Mikrotinklo architektūra sprendžia identifikuotas problemas: lokalus energijos perdavimas minimizuoja transmisijos nuostolius (centralizuotose sistemose prarandama 5–8% energijos), „salos" režimo funkcionalumas užtikrina energijos tiekimą pagrindinio tinklo gedimo atveju, o bendruomenės mastelis skatina aktyvų dalyvių įsitraukimą – Quartierstrom projektas parodė netikėtai aukštą naudotojų aktyvumą stebint sandorius ir koreguojant kainas.

5. **Modelio įgyvendinamumo ir efektyvumo vertinimas** įvairiomis rinkos sąlygomis parodė reikšmingus pranašumus prieš tradicines sistemas. Eksperimentiniai rezultatai atskleidė ~71% mažesnes operacijų sąnaudas (vieno sandorio kaina ~0,03 € blokų grandinėje vs. 0,50–2,00 € tradicinėje sistemoje) ir ~95% spartesnį atsiskaitymą – sandoriai įvykdomi per <1 sekundę vietoje įprastų 30 dienų. Mastelio testavimas parodė, kad sistema pasiekia ~260 TPS pralaidumą su 100% sandorių sėkme, kas yra ~31 kartą daugiau nei reikalinga aptarnauti visus Lietuvos gaminančius vartotojus (~8,3 TPS). P2P prekybos simuliacija su 5 skirtingais prosumerių profiliais patvirtino, kad decentralizuota rinka automatiškai subalansuoja pasiūlą ir paklausą, eliminuojant energijos pertekliaus praradimą.

LITERATŪRA

1. Abdella, J. A., & Shuaib, K. (2019). An Architecture for Blockchain based Peer to Peer Energy Trading. *2019 Sixth International Conference on Internet of Things: Systems, Management and Security*, (p. 412-419). Granada, Spain.
2. Ableitner, L., Tiefenbeck, V., Meeuw, A., Wörner, A., Fleisch, E., & Wortmann, F. (2020). User behavior in a real-world peer-to-peer electricity market. *Applied Energy, 270*. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115061
3. Ahl, A., Masaru, Y., Tanaka, K., & Daishi, S. (2019). Review of blockchain-based distributed energy: Implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 200-211.
4. Ahlqvist, V., Holmberg, P., & Tangerås, T. (2022). A survey comparing centralized and decentralized electricity markets. *Energy Strategy Review*.
5. Almeida, L., Cappelli, V., Klausmann, N., & Soest, H. (2021). *Peer-to-Peer Trading and Energy Community in the Electricity Market.* Robert Schuman Centre for Advanced Studies.
6. Ante, L., Steinmetz, F., & Fiedler, I. (2021). Blockchain and energy: A bibliometric analysis and review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 137*.
7. Aoun, A., Adda, M., Ilinca, A., Ghandour, M., & Ibrahim, H. (2024). Comparison between Blockchain P2P Energy Trading and Conventional Incentive Mechanisms for Distributed Energy Resources—A Rural Microgrid Use Case Study. *Applied Sciences*, 14(17).
8. Bevin, K., & Verma, A. (2023). Decentralized local electricity market model using Automated Market Maker. *Applied Energy 334*.
9. Bjarghov, S. (2021). Developments and Challenges in Local Electricity. *IEEE Access*, 58910-58943.
10. Borges, C., Kapassa, E., Touloupou, M., Macón, J. L., & Casado-Mansilla, D. (2022). Blockchain application in P2P energy markets: social and legal. *Connection Science*, 1066-1088.
11. Breuer, H. (2017 m. Rugsėjis 27 d.). *New York neighbours power up blockchain-based Brooklyn Microgrid*. Nuskaityta iš Silicon Republic: https://www.siliconrepublic.com/machines/brooklyn-microgrid-blockchain-energy-networks

12. CoinGecko. (2024). *WePower (WPR) price, market cap, and historical data*. Nuskaityta iš https://www.coingecko.com/en/coins/wepower

13. Crunchbase. (2024). *WePower company profile*. Nuskaityta iš https://www.crunchbase.com/organization/wepower-network

14. Dang, C., Zhang, J., Kwong, C.-P., & Li, L. (2019). Demand side load management for big industrial energy users under blockchain-based peer-to-peer electricity market. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6426-6435.

15. Depuru, S. S., Wang, L., Devabhaktuni, V., & Gudi, N. (2011). Smart Meters for Power Grid – Challenges, Issues, Advantages and Status. *Power Systems Conference and Exposition*, (p. 1-7). Phoenix, AZ, USA.

16. Devine, M., Russo, M., & Cuffe, P. (2019). Blockchain electricity trading using tokenised power delivery contracts. *ESRI Working Paper No. 649*.

17. Eid, C., Codani, P., Perez, Y., Reneses, J., & Hakvoort, R. (2016). Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 237-247.

18. Ethereum. (2025). *ERC-20 Token Standard*. Nuskaityta iš ethereum.org: https://ethereum.org/lt/developers/docs/standards/tokens/erc-20/

19. European Parliament and Council of the European Union. (2011). Regulation (EU) No 1227/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on wholesale energy market integrity and transparency. *Official Journal of the European Union, 326*, 1-16. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32011R1227

20. European Parliament and Council of the European Union. (2014). Directive 2014/65/EU of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on markets in financial instruments and amending Directive 2002/92/EC and Directive 2011/61/EU. *Official Journal of the European Union, L 173*, 349-496. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/65/oj

21. European Parliament and Council of the European Union. (2016, Str. 17). Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Da. *Official Journal of the European Union, L 119*, 1-88. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj

22. European Parliament and Council of the European Union. (2018). 2018/843 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive (EU) 2015/849 on the prevention of the use of the financial system for the purposes of money laundering or terrorist financing, and amending Directives 2009/138/EC an. *Official Journal of the European Union, L 156*, 43-74. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/843/oj

23. European Parliament and Council of the European Union. (2019/944). Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU. *Official Journal of the European Union,, L 158*, 125-199. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj

24. European Parliament and Council of the European Union. (2023). Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council of 31 May 2023 on markets in crypto-assets, and amending Regulations (EU) No 1093/2010 and (EU) No 1095/2010 and Directives 2013/36/EU and (EU) 2019/1937. *Official Journal of the European Union, L 150*, 40-205. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1114/oj

25. European Parliament and Council of the European Union. (2024). Regulation (EU) 2024/1106 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 amending Regulations (EU) No 1227/2011 and (EU) 2019/942 as regards improving the Union's protection against market manipulation on the wholesale energy market. *Official Journal of the European Union, 2024/116*.

26. European Parliament and Council of the European Union. (2024/1711). Directive (EU) 2024/1711 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 amending Directives (EU) 2018/2001 and (EU) 2019/944 as regards improving the Union's electricity market design. *Official Journal of the European Union, L 2024/1711*. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1711/oj

27. European Parliament and Council of the European Union. (2018/2001). 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union, L 328*, 82-209. Nuskaityta iš https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj

28. Hussain, S., Farooq, S. M., & Ustun, T. S. (2019). Implementation of Blockchain technology for Energy Trading with Smart Meters. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies*, 1-5. doi:10.1109/i-PACT44901.2019.8960243

29. Ignitis. (2024 m. 01 29 d.). *Elektrą gaminančių vartotojų skaičius pernai padvigubėjo*. Nuskaityta iš ignitis.lt: https://ignitis.lt/lt/naujienos/ignitis-elektra-gaminanciu-vartotoju-skaicius-pernai-padvigubejo

30. Ignitis. (2024). *Gaminantys vartotojai. Ką reikia žinoti?* Nuskaityta iš Ignitis.lt: https://ignitis.lt/lt/gaminantiems-vartotojams

31. Jain, A. (2024 m. Gruodis 10 d.). *Powering the Energy Sector through Blockchain*. Nuskaityta iš California Management review: https://cmr.berkeley.edu/2024/12/powering-the-energy-sector-through-blockchain/

32. Kim, H. M., Laskowski, M., Zargham, M., Turesson, H., Barlin, M., & Kabanov, D. (2021 m. Sausis). Token Economics in Real Life: Cryptocurrency and Incentives Design for Insolar's Blockchain Network. *Computer, 54*(1), 70-80. doi:10.1109/MC.2020.2996572

33. Kucheryavenkov, A., Kartasheva, E., & Kondrashenko, E. (2018). Outage monitoring and management in Overhead and Cable networks with various types of architecture. *CIRED 2018 Ljubljana Workshop* (p. 467). Ljubljana, Slovenia: AIM. doi:http://dx.doi.org/10.34890/181

34. Lampriere, M. (2017 m. Balandis 11 d.). *The Brooklyn microgrid: blockchain-enabled community power*. Nuskaityta iš Power Technology: https://www.power-technology.com/features/featurethe-brooklyn-microgrid-blockchain-enabled-community-power-5783564/?cf-view

35. Lazaroiu, G. C., & Roscia, M. (2018). Blockchain and smart metering towards sustainable prosumers. *International Symposium on Power Electronics*.

36. Lietuvos Respublikos Seimas. (2002a). Lietuvos Respublikos pridėtinės vertės mokesčio įstatymas (Nr. IX-751, su vėlesniais pakeitimais).

37. Lietuvos Respublikos Seimas. (2002b). Lietuvos Respublikos gyventojų pajamų mokesčio įstatymas (Nr. IX-1007, su vėlesniais pakeitimais). Nuskaityta iš https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.171369

38. Lietuvos Respublikos Seimas. (2011). Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas (Nr. XI-1375, su vėlesniais pakeitimais). Nuskaityta iš https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.398874

39. Lucas, A., Geneiatakis,, D., Soupionis, Y., Nai-Fovino, I., & Kotsakis, E. (2021). Blockchain Technology Applied to Energy Demand Response. *Energies*, 14. doi:https://doi.org/10.3390/en14071881

40. Mengelkamp, E., Gärttner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy, 210*, 870-880. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.054

41. Oficialios statistikos portalas. (2023). *Atsinaujinantys energijos ištekliai.*

42. Power Ledger. (2019). *Power Ledger - Whitepaper.* Nuskaityta iš https://uploads-ssl.webflow.com/5fc9b61246966c23f17d2601/6087c060d74a5f523f6b84a6_Power%20Ledger%20White%20Paper%202021.pdf

43. Quartierstrom. (2020). *Final report on project Quartierstrom.* Nuskaityta iš https://quartier-strom.ch/: https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=66041&Load=true

44. Soto, E., Bosman, L., Wollega, E., & Leon-Salas, W. (2021). Peer-to-peer energy trading: A review of the literature. *Applied Energy, 283*. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116268

45. Sun, Q., Li, H., Ma, Z., Wang, C., Campillo, J., Zhang, Q., . . . Guo, J. (2016). A Comprehensive Review of Smart Energy Meters in Intelligent Energy Networks. *IEEE INTERNET OFTHINGSJOURNAL*, 464-480.

46. Toderean, L., Antal, C., Antal, M., Mitrea, D., Cioara, T., Anghel, I., & Salomie , I. (2021). *A Lockable ERC20 Token for Peer to Peer Energy Trading.* Cluj-Napoca, Romania : Computer Science Department Technical University of Cluj-Napoca.

47. Wang, N., Zhou, X., Lu, X., Guan, Z., Wu, L., Du, X., & Guizani, M. (2019). When Energy Trading Meets Blockchain in Electrical. *Applied Sciences, 9*(8). doi:https://doi.org/10.3390/app9081561

48. WePower. (2019 m. Vasario 27 d.). *WePower: Green energy tokenization white paper v.2.1.* Nuskaityta iš https://www.coinpare.io/whitepaper/wepower.pdf

49. Wu, H., Li, Z., King, B., Miled, Z. B., Wassick, J., & Tazelaar, J. (2017). A Distributed Ledger for Supply Chain Physical Distribution Visibility. *Information, 8*(4), 137. doi:https://doi.org/10.3390/info8040137

50. Wu, Y., Li, J., & Gao, J. (2021). Real-Time Bidding Model of Cryptocurrency Energy Trading Platform. *Energies, 14*(21). doi:https://doi.org/10.3390/en14217216

PRIEDAI

Sukūrto modelio kodas pateikiamas GitHub saugykloje, nuoroda: https://github.com/TheRapsas/electricity-token-trading-platform