



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Matas Bodendorfas

Projekto autorius

Asist. Roma Račkienė

Vadovė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Matas Bodendorfas

Projekto autorius

Asist. Roma Račkienė

Vadovė

Doc. prakt. Aistija Vaišnorienė

Recenzentė

Kaunas, 2024



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Matas Bodendorfas

Vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Matas Bodendorfas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Bodendorfas, Matas. Vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė asist. dr. Roma Račkienė; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: baterijų kaupimo sistema, lankstumo paslaugos, skirstomasis tinklas, hibridinis mikrotinklas, valdymas apkrova, optimizacinis modelis.

Kaunas, 2024. 59 p.

Santrauka

Dabartinėje energetikos sistemoje, reikės esminių pokyčių, tam, kad būtų galima įgyvendinti tris pagrindinius Europos energetikos politikos uždavinius: tvarumą, tiekimo saugumą ir konkurencingumą energetikos srityje. Didėjanti atsinaujinančiosios energijos išteklių integracija ir perėjimas prie tvaresnės energetikos sistemos kelia iššūkių tiek visuomenei, tiek Europos energetikos sistemai ir jos valdymui. Šiame perėjime ypač svarbus aktyvus vartotojų vaidmuo. Siekiant spręsti energetikos sistemų ir jų valdymo transformacijos ir vartotojo vaidmens šiame procese klausimą, reikalingi kompleksiški tyrimai, tam, kad būtų galima iširti daugybę socialinių, ekonominių ir inžinerinių aspektų ir perspektyvų.

Vienas svarbiausių energetikos srities inovacijų yra atsinaujinančiųjų šaltinių diegimas. Tačiau, elektros energijos iš atsinaujinančių šaltinių gamyba turi vieną pagrindinį neigiamą aspektą – gamybos nepastovumą ir nenuspėjamumą. Šiai problemai spręsti vis dažniau pasitelkiamos baterijų kaupimo sistemos, kurios kaupia perteklinę energiją ir atiduoda ją į tinklą elektros energijos vartojimo pikų metu, taip mažindamos atsinaujinančiųjų energijos išteklių elektrinių gamybos nepastovumą, didindamos elektros tiekimo saugumą bei prisidėdamos prie elektros tinklo balansavimo ir elektros kokybės parametrų palaikymo.

Dėl šių priežasčių, vis populiarėjant mažoms, privačių namų ūkių sistemoms (mažos galios saulės elektrinės ir nedidelės talpos, privačios baterijų sistemos) šiame darbe nagrinėjama, kaip efektyviai išnaudoti šias sistemas jas pasitelkiant ne tik vartotojo poreikių patenkinimui, bet ir elektros skirstomojo tinklo valdymo lankstumo didinimo tikslams.

Pirmoje darbo dalyje nagrinėjamos baterijų bei mažų privačių išmaniųjų tinklų galimybės ir technologijos, nagrinėjama mokslinė literatūra susijusi su vartotojo įtraukimo į elektros sistemos valdymą galimybėmis ir būdais. Antroje dalyje, pasitelkiant „MATLAB“ ir „Excel“ programinę įrangą, atliekamas tyrimas, kuriame modeliuojamas privačių mikrotinklų veikimas bei lankstumo paslaugų teikimo galimybės, vertinant jas iš vartotojo perspektyvos. Atlikus modeliavimus, apskaičiuojami pagrindiniai ekonominiai rodikliai, pagal kuriuos vėliau vykdomas ekonominis scenarijų vertinimas.

Bodendorfas, Matas. Investigation of Involving Consumers into Flexible Management of Electric System. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Roma Račkienė; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): energy engineering, engineering science.

Keywords: battery storage system, flexibility services, distribution network, hybrid microgrid, load control, optimization model.

Kaunas, 2024. Number of pages 59.

Summary

The current energy system will need to undergo profound changes in order to address the three main challenges of European energy policy: sustainability, security of supply and energy market liberalization. The increasing integration of renewable energy sources and the transition to a more sustainable energy system pose challenges for both society and the European energy system and its governance. The active role of consumers is particularly important in this transition. In order to address the transformation of energy systems and their management and the role of the consumer in this process, complex research is needed in order to study many social, economic and engineering aspects and perspectives.

One of the most important aspects of innovation in the field of energy is the introduction of renewable sources. However, the production of electricity from renewable sources has one main negative aspect – the volatility and unpredictability of production. To address this problem, battery systems are increasingly being used, which store excess energy and put it into the grid during peaks in electricity consumption, thereby reducing the volatility of the production of power plants from renewable energy sources, increasing the security of electricity supply and contributing to balancing the electricity grid and maintaining electricity quality parameters. For these reasons, with the increasing popularity of small, private household systems (low-power solar power plants and low-capacity, private battery systems), this work examines how to effectively use these systems not only to meet the needs of the consumer, but also for balancing the electricity distribution network.

The first part of the work reviews the possibilities and technologies of batteries and small private smart networks, examines the scientific literature related to the possibilities and methods of involving the user in the management of the electrical system. In the second part, with the help of “MATLAB” and “Excel” software, a study is carried out that models the operation of private micro-networks and the possibilities of providing flexibility services, looking at them from the user's perspective. As a result of the simulations, the main economic indicators are calculated, on the basis of which the economic assessment of the scenarios is subsequently carried out.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	12
1.1. Temos aktualumas politiniame kontekste	12
1.2. Vartotojo dalyvavimas vartojimo pusės apkrovos atsako procese, panaudojant išmaniųjų tinklų technologijas	13
1.3. Techniniai sprendimai ir strategijos, reikalingos vartotojų įtraukimui į lankstų elektros sistemos valdymo procesą	15
1.4. Energijos kaupimo sistemų svarba, technologijos ir panaudojimas	17
1.4.1. Didelės galios kaupimo sistemos ir technologijos.....	17
1.4.2. Privačių namų ūkių kaupimo sistemos ir technologijos	23
1.5. Lankstumo paslaugų projektų Lietuvoje ir Europoje apžvalga	25
1.5.1. ESO lankstumo paslaugos	26
1.5.2. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugos aprašymas ir techninė specifikacija..	26
1.5.3. „Fusebox“ projektas, jo veikla	28
1.5.4. „OneNet“ projektas, jo veikla.....	29
2. Tyrimo metodika	31
2.1. Tipinių vartotojų profilių aprašymas	31
2.2. Namų ūkių elektros energijos vartojimo duomenys.....	31
2.2.1. I tipo vartotojo apkrovos kreivės	32
2.2.2. II tipo vartotojo apkrovos kreivės.....	34
2.2.3. III tipo vartotojo apkrovos kreivės	36
2.3. Reikalingi duomenys tyrimui atlikti.....	38
2.3.1. „NordPool“ biržos elektros energijos kainos Lietuvos regionui	38
2.3.2. Saulės apšvietos duomenys Lietuvoje	39
2.3.3. Privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos įdiegimo, įrangos bei priežiūros kaštai	39
2.4. Modeliavimo metodika.....	40
2.4.1. Modeliavimo, naudojantis „MATLAB“ optimizaciniu modeliu, metodika.....	41
2.4.2. Lankstumo paslaugos teikimo galimybių vertinimo „Excel“ skaičiuoklėje metodika.....	43
2.5. Ekonominio skirtingų scenarijų vertinimo metodika	44
2.5.1. Ekonominių skaičiavimų „Excel“ skaičiuoklėje metodika	44
3. Tyrimas.....	46
3.1. Modeliavimo scenarijai	46
3.2. „MATLAB“ modeliavimo rezultatai.....	47
3.2.1. Pavyzdinės modeliavimo rezultatų kreivės	47
3.2.2. 1–9 scenarijų modeliavimo rezultatai.....	48
3.3. Lankstumo paslaugos teikimo vertinimas	49
3.3.1. Pavyzdiniai lankstumo paslaugų kainos skaičiavimo rezultatai.....	50
3.3.2. Lankstumo paslaugų kainos skaičiavimo rezultatai	50
3.4. Scenarijų ekonominių rodiklių skaičiavimas ir vertinimas	52

3.4.1. Pavyzdinis ekonominių rodiklių skaičiavimas	52
3.4.2. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai visiems modeliavimo scenarijams	53
Išvados	56
Literatūros sąrašas	57

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugos specifikacija [26].....	27
2 lentelė. Namų ūkių sistemų tipų aprašymas	31
3 lentelė. Privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos kaštai	40
4 lentelė. Modeliavimo scenarijų aprašymas	46
5 lentelė. 1–9 scenarijų suminės metinių rezultatų reikšmės	49
6 lentelė. 10–18 scenarijaus skaičiavimų rezultatai	50
7 lentelė. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai 1–18 scenarijams, be naudojimosi valstybės parama	53
8 lentelė. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai 1–18 scenarijams, su valstybės paramos panaudojimu	53

Paveikslų sąrašas

1 pav. Reguliavimo apkrova kategorijos ir tipai [5]	14
2 pav. Kaupimo sistemų pajėgumų augimas 2015 – 2021 m. laikotarpiu [12].....	18
3 pav. Didelės talpos baterijų sistemų instaliuotos galios ir jų prognozė iki 2030 m. [12]	19
4 pav. Tinklo masto baterijų kaupimo sistemos principinė schema [14].....	20
5 pav. Energijos kaupimo technologijų pasiskirstymas pagal jų panaudojimo pobūdį ir efektyvumą [12]	21
6 pav. Principinė hidroakumuliacinės jėgainės / kaupyklos sandaros schema [18].....	22
7 pav. Išmaniojo namų ūkio, su baterijų kaupykla ir saulės elektrine, sistemos tipinė schema [24]	25
8 pav. I tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas	32
9 pav. I tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną.....	33
10 pav. I tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną	33
11 pav. II tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas	34
12 pav. II tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną	35
13 pav. II tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną.....	35
14 pav. III tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas.....	36
15 pav. III tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną.....	37
16 pav. III tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną.....	37
17 pav. 2023 metų „Day-ahead“ rinkos elektros kainų Lietuvoje kitimas [30].....	38
18 pav. 2020 metų saulės apšvietos Lietuvoje duomenys [31].....	39
19 pav. Tyrimo modelio veikimo principinė schema [35].....	41
20 pav. Konstantų reikšmės optimizavimo lygtyje [35]	43
21 pav. Modeliavimo rezultatai, baterijos įkrovos lygis, 1 scenarijus	47
22 pav. Modeliavimo rezultatai, tinklo elektros energijos srautas, 1 scenarijus.....	48
23 pav. Modeliavimo rezultatai, pinigų srautas per dieną, 1 scenarijus	48
24 pav. Pinigų srautas per metus 1–9 scenarijumi	49
25 pav. 10 scenarijaus pajamų prieaugio priklausomybė nuo lankstumo paslaugos kainos.....	50
26 pav. Pinigų srautas per metus, įvertinant lankstumo paslaugų teikimą.....	51
27 pav. Vartotojui priimtina lankstumo paslaugų kaina, atsižvelgiant į baterijų kaupimo sistemos konfigūraciją.....	51
28 pav. IRR vertė kiekvienam scenarijui, įvertinant naudojamą valstybės paramą.....	54
29 pav. NPV vertė kiekvienam scenarijui, įvertinant naudojamą valstybės paramą	54
30 pav. Investicijos į sistemą atsipirkimo laikas, įvertinant naudojamą valstybės paramą	55

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ES – Europos Sąjunga;

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos;

ESO – Energijos Skirstymo Operatorius;

AB – Akcinė Bendrovė.

Terminai:

Lankstumo paslaugos – rinkos dalyvių aktyvus elektros vartojimo ir gamybos koregavimas, atsižvelgiant į elektros tinkle kylančias problemas (per didelis elektros vartojimas, svyruojančios įtampos ir pan.).

Įvadas

Dabartinėje energetikos sistemoje, reikės esminių pokyčių, tam, kad būtų galima įgyvendinti tris pagrindinius Europos energetikos politikos uždavinius: tvarumą, tiekimo saugumą ir konkurencingumą energetikos srityje. Didėjanti atsinaujinančiosios energijos išteklių integracija ir perėjimas prie tvaresnės energetikos sistemos kelia iššūkių tiek visuomenei, tiek Europos energetikos sistemai ir jos valdymui. Šiame perėjime ypač svarbus aktyvus vartotojų vaidmuo. Siekiant spręsti energetikos sistemų ir jų valdymo transformacijos ir vartotojo vaidmens šiame procese klausimą, reikalingi kompleksiški tyrimai, tam, kad būtų galima iširti daugybę socialinių, ekonominių ir inžinerinių aspektų ir perspektyvų.

Viena svarbiausių energetikos srities inovacijų yra atsinaujinančiųjų šaltinių diegimas. Naudojant vėjo, saulės, vandens, biomasės ir geoterminę energiją, yra siekiama sumažinti poveikį aplinkai ir stabdyti globalinio atšilimo procesus, mažinant šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) išmetimą į atmosferą. Taip pat, vystant šias technologijas, yra mažinami elektros gamybos kaštai ir taip didinama konkurencija su tradicinio kuro elektrinėmis (anglies, dujų, naftos produktų). Tačiau, elektros energijos iš atsinaujinančių šaltinių gamyba turi vieną pagrindinį neigiamą aspektą – gamybos nepastovumą ir nenuspėjamumą. Šiai problemai spręsti vis dažniau pasitelkiamos baterijų kaupimo sistemos, kurios kaupia perteklinę energiją ir atiduoda ją į tinklą elektros energijos vartojimo pikų metu, taip mažindamos atsinaujinančiųjų energijos išteklių elektrinių gamybos nepastovumą, didindamos elektros tiekimo saugumą bei prisidedamos prie elektros tinklo balansavimo ir elektros kokybės parametrų palaikymo.

Pasaulyje jau yra iširta ir naudojama daugybė įvairių energijos kaupimo technologijų, pavyzdžiui, superkondensatoriai, srauto baterijos, kuro elementai, suslėgto oro energijos kaupimas, šiluminės energijos kaupimas ir hidroakumuliacinės elektrinės. Tarp jų tradicinės energijos kaupimo technologijos paprastai pasižymi mažu veikimo efektyvumu, reikalauja didžiulių kapitalo investicijų ir turi apribojimų priklausančių nuo prijungimo vietos tinkle. Dėl šių priežasčių, vis populiarėjant privačių namų ūkių mažoms sistemoms (mažos galios saulės elektrinės ir nedidelės talpos, privačios baterijų sistemos) galima būtų pasvarstyti, kaip efektyviai išnaudoti šias sistemas jas pasitelkiant ne tik vartotojo poreikių patenkinimui, bet ir elektros skirstomojo tinklo valdymo lankstumo gerinimui.

Pirmoje darbo dalyje apžvelgiamos baterijų bei mažų privačių išmaniųjų tinklų galimybės ir technologijos, nagrinėjama mokslinė literatūra susijusi su vartotojo įtraukimo į elektros sistemos valdymą galimybėmis ir būdais. Taip pat šiame darbe atliekamas tyrimas, kuriame modeliuojamas privačių mikrotinklų veikimas, bei lankstumo paslaugų teikimo galimybės, jas vertinant iš vartotojo perspektyvos. Atlikus modeliavimus, apskaičiuojami pagrindiniai ekonominiai rodikliai, pagal kuriuos vėliau vykdomas ekonominis scenarijų vertinimas.

Darbo tikslas – iširti vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą galimybes, panaudojant baterijų kaupimo sistemas.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti literatūrą, susijusią su vartotojo įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą svarba ir būdais, bei aprašyti energijos kaupimo sistemas ir jų technologijas;
2. sudaryti tyrimo metodiką, kuria naudojantis bus atliekamas vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimas, panaudojant baterijų kaupimo sistemas;

3. atlikti vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą tyrimą, panaudojant baterijų kaupimo sistemas;
4. pagal gautus tyrimo rezultatus, atlikti ekonominių rodiklių skaičiavimus, įvertinant vartotojo dalyvavimą lankstumo paslaugų teikime ir valstybės paramos panaudojimą sistemos įdiegimo kaštų kompensavimui.

1. Literatūros analizė

1.1. Temos aktualumas politiniame kontekste

Energetikos politika šiandien yra esminis ir neatidėliotinas Europos Sąjungos politinės strategijos iššūkis. Taip teigiama todėl, nes ji yra neatsiejamai susijusi su klimato kaita ir joje dalyvauja įvairūs suinteresuotieji subjektai, veikiantys įvairiais lygmenimis – tiek nacionaliniu, tiek tarptautiniu mastu, skatinami skirtingų interesų. Todėl ES politinėje darbotvarkėje tam reikia skirti daug dėmesio ir nustatyti atitinkamus prioritetus [1]. Energetikos politika ES lygmeniu ir integruotos energijos vidaus rinkos sukūrimas yra itin svarbūs stiprinant energetinį saugumą ES. Tai lemia geresnę kainodarą dėl padidėjusios konkurencijos ir didesnės atsinaujinančiųjų energijos išteklių integracijos.

Nepaisant šių pranašumų, pirmaisiais Europos integracijos dešimtmečiais pažanga kuriant bendrą energetikos politiką buvo ribota. ES energetikos politikos tyrimuose teigiama, kad „energetikos politika paprastai buvo aiškinama kaip dvišaliai vartotojų ir tiekėjų santykiai, menkai atsižvelgiant į koalicijos kūrimo strategijas ES viduje arba atsakingesnę energijos vartojimą namų ūkių lygmeniu“ [2]. Pažanga, padaryta rengiant pirmąjį teisės aktų rinkinį – Direktyvą 96/92/EB dėl elektros energijos vidaus rinkos bendrųjų taisyklių ir Direktyvą 98/30/EB dėl gamtinių dujų vidaus rinkos bendrųjų taisyklių – daugiausia buvo grindžiama ES sutartyse nustatytais vidaus rinkos ir aplinkos apsaugos teisės aktais.

Didelė pažanga bendros energetikos politikos srityje padaryta tik 2007 m., kai ES valstybių ir vyriausybės vadovai patvirtino pirmąjį ES „energetikos veiksmų planą“, po kurio buvo parengta Komisijos strategija „Europos energetikos politika“ (Europos Komisija, 2007 m.), kurioje nustatyti trys pagrindiniai Europos energetikos politikos uždaviniai: tvarumas, tiekimo saugumas ir konkurencingumas. Po veiksmų plano buvo padaryti ES teisės aktų pakeitimai. Lisabonos sutartimi (1999 m.) į Sutartį dėl Europos Sąjungos veikimo (SESV) buvo įtraukta nauja dalis dėl energetikos. Naujai įtrauktame straipsnyje nurodoma, kad „Vidaus rinkos kūrimo ir veikimo kontekste (...) Sąjungos energetikos politika turi (...)“ [3]:

- užtikrinti energijos rinkos veikimą;
- užtikrinti energijos tiekimo saugumą Sąjungoje;
- skatinti energijos vartojimo efektyvumą ir taupymą bei naujų ir atsinaujinančių energijos formų plėtojimą;
- skatinti atskirų energetikos tinklų sujungimą.“

Europos Sąjungos požiūris į vartotojų vaidmenį energijos rinkoje išsamiau išdėstytas Europos Komisijos komunikate „Naujų galimybių energijos vartotojams įgyvendinimas“ (toliau – naujasis dokumentų rinkinys). Šis komunikatas buvo paskelbtas kaip vasaros dokumentų rinkinio dalis 2015 m. liepos 15 d., siekiant pateikti gaires dėl būsimų veiksmų šioje srityje, įskaitant siūlomus teisės aktus. „Naujajame kurse“ pabrėžiama, kad būtina didinti skaidrumą ir geriau informuoti apie energijos kainas. Jame pabrėžiama, kad svarbu palengvinti energijos tiekėjų keitimo procesą vartotojams, ir nurodoma, kad svarbu skatinti tinklo balansavimą apkrova ir vartotojų gamybos iniciatyvas. Be to, naujuoju dokumentų rinkiniu siekiama skatinti išmaniųjų namų ir tinklų plėtrą, o tam reikės diegti naujas energetikos technologijas. Galiausiai naujajame kurse raginama įgyvendinti naujas priemones, kuriomis būtų sprendžiamos problemos, su kuriomis susiduria pažeidžiami vartotojai, ir kovojama su energijos nepritekliais ES.[3]

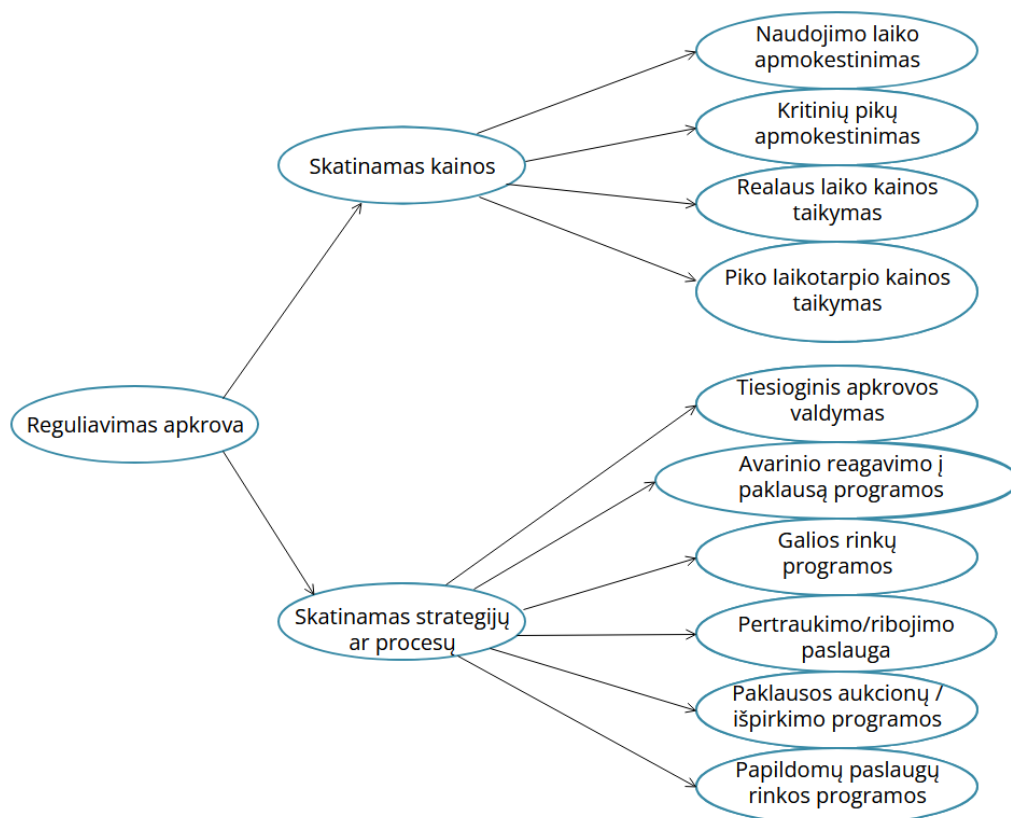
Europos Komisijos Pažangiųjų tinklų darbo grupė (2010 m.) aiškiai pripažino vartotojų įsitraukimo ir įtraukimo į tvarų vartojimą vaidmenį: „Vartotojų įsitraukimas ir švietimas yra pagrindinis šio proceso uždavinys, nes mažmeninėje energijos rinkoje įvyks esminių pokyčių. Norint pasiekti platesnius energijos vartojimo efektyvumo ir tiekimo saugumo tikslus, reikės iš esmės pakeisti vartotojų energijos vartojimo pobūdį (...). Dėl nepakankamo vartotojų pasitikėjimo naujosiomis sistemomis nepavyks pasinaudoti visa galima pažangiųjų skaitiklių ir pažangiųjų tinklų nauda“ [4]. Terminai „įsitraukimas“, „švietimas“ ir „pasitikėjimas“ tampa pagrindiniais pažangiųjų tinklų sėkmės veiksniais. Europos Komisijos komunikate „Pažangieji tinklai: nuo naujovių iki diegimo“ (Europos Komisija, 2011 m.) taip pat pripažįstama vartotojų informuotumo svarba ir pabrėžiama, kaip „pažangiųjų tinklų plėtra konkurencingoje mažmeninėje rinkoje turėtų skatinti vartotojus keistis, tapti aktyvesniems ir prisitaikyti prie naujų „pažangių“ energijos vartojimo modelių“ [4]. Tačiau komunikate taip pat pripažįstamas su šia nauja technologija susijęs iššūkis: „Taip pat nėra aiškumo, kaip integruoti sudėtingas išmaniųjų tinklų sistemas, kaip pasirinkti ekonomiškai efektyvias technologijas, kokie techniniai standartai ateityje turėtų būti taikomi išmaniesiems tinklams ir ar vartotojai naudosis naująja technologija“ [2].

Iš apžvelgto politinio konteksto Europos sąjungos energetikos politinėse gairėse, galima matyti, kad vartotojų įtraukimo į energijos sistemos veikimą didinimas yra labai svarbus politikos aspektas, siekiant įgyvendinti Europos sąjungos energetikos direktyvų tikslus. Tiek išmaniųjų apskaitos sistemų diegimas, tiek gaminančių vartotojų skaičiaus augimo skatinimas, tiek vartotojų švietimas energijos vartojimo efektyvumo ir naujų sistemų diegimo ir naudojimo klausimais skatina energetikos sistemos modernizaciją ir transformaciją teigiama linkme. Kaip buvo paminėta paskutinėje pastraipoje, su naujomis technologijomis atsiranda naujų iššūkių, todėl yra svarbu išnagrinėti išmaniųjų tinklų ir išmaniųjų namų ūkių diegimo ir naudojimo naudą ir galimybes vartotojo ir bendros energetikos sistemos kontekste.

1.2. Vartotojo dalyvavimas vartojimo pusės apkrovos atsako procese, panaudojant išmaniųjų tinklų technologijas

JAV energetikos departamentas išmanųjį tinklą apibrėžia kaip technologijų kategoriją, modernizuojančią komunalinės elektros energijos tiekimo sistemas, naudojant kompiuterinius nuotolinio valdymo ir automatizavimo metodus [5, 6]. Šios sistemos valdomos naudojant dvipusio ryšio technologijas ir kompiuterinį apdorojimą, kurie daugelį metų buvo naudojami įvairiose pramonės šakose [6]. Pažangusis tinklas palengvina elektros energijos mainus tarp elektros energijos rinkų ir sudaro sąlygas integruoti atsinaujinančiuosius energijos išteklius į tinklą. Mokslininkai nuolat ieško naujų būdų, kaip geriau patenkinti paklausą didinant pasiūlą arba valdant paklausą pasiūlos ribose. Aktyvus paklausos valdymas yra svarbus procesas balansuojant elektros energijos tiekimo tinklą. Taip pat didelės paklausos laikotarpiais prieiga prie atsinaujinančiųjų energijos išteklių ar atsarginių išteklių tampa gyvybiškai svarbi pažangiųjų tinklų sprendimuose. Visos šios priemonės bendrai gali būti vadinamos reguliavimu apkrova arba apkrovos atsako procesu [5].

Šiuo metu reguliavimą apkrova galima suskirstyti į pagrindines kategorijas, kurios toliau skirstomos į įvairias formas. Detalesnis reguliavimo apkrova tipų sąrašas pateikiamas 1 paveiksle.



1 pav. Reguliavimo apkrova kategorijos ir tipai [5]

Remiantis dabartiniu reguliavimo apkrova poveikio supratimu, vis labiau pripažįstama, kad tai yra priemonė, padedanti patenkinti atsirandančius geresnio sistemos valdymo poreikius, taip pat spręsti problemas, susijusias su energetiniu saugumu ir poveikiu aplinkai [7]. Aktyviai reaguoti į paklausą galima tiek rankiniais, tiek automatizuotais metodais. Rankinis reagavimas į paklausą paprastai apima konkrečių prietaisų naudojimo kontrolę, skirtingais laikotarpiais per dieną. Pusiau automatizuotas reagavimas į paklausą apima iš anksto užprogramuotų strategijų, kurios inicijuojamos per centralizuotą valdymo sistemą, naudojimą. Visiškai automatizuotas reagavimas į paklausą veikia be žmogaus įsikišimo ir yra aktyvuojamas namuose, pastate ar objekte gavus išorinio ryšio signalą [8].

Pramoninių vartotojų ir buitinių vartotojų sektoriai reguliavimo apkrova procesą vertina skirtingai. Pramonės sektoriuje pagrindinis tikslas yra pelno maksimizavimas. Kadangi elektros energijos suvartojimas sudaro didelę gamybos sąnaudų dalį, ypač tokiose pramonės šakose kaip chemijos pramonė, reguliavimo apkrova procesas gali greitai sumažinti elektros energijos sąnaudas. Todėl jis tokiuose pramonės subjektuose gali būti taikomas ir vystomas žymiai greičiau ir palankiau [5].

Buitinių vartotojų sektorius susiduria su sunkumais taikant reguliavimo apkrova procesą ir jo vystymas vyksta ne taip sparčiai, kaip pramonės sektoriuje, nes daugiausia dėmesio yra skiriama komforto lygio didinimui. Bartusch, C. ir kt. atliktas tyrimas, kuriame buvo apklausti 500 Švedijos elektros sistemos vartotojų, atskleidė, kad tyrime dalyvauti sutiko tik 50 respondentų [9]. Šis rezultatas parodo, kad vartotojai nenori, kad jų gyvenimą reguliuotų kainų tarifai arba, kad reguliuotojams būtų leidžiama nuotoliniu būdu kontroliuoti jų privačių namų ūkių apkrovas, ir jie tikrai nenori gaišti laiko nuolat stebėdami savo elektros energijos suvartojimą [9]. Nors visi siekia

sutaupyti pinigų sąskaitoms už elektrą, dauguma buitinių vartotojų nesiryžta aukoti komforto dėl finansinių paskatų, ypač kai taupymas yra minimalus. Be to, daugeliui vartotojų taikomas fiksuotas elektros energijos tarifas, pagrįstas vidutinėmis elektros energijos sąnaudomis, nepaisant to, kad elektros energijos kainos realiuoju laiku svyruoja [5].

Kainomis grindžiamas reguliavimas apkrova privatiems namų ūkiams naudoja elektros energijos kainas kaip paskatas, skatinančias vartotojus koreguoti savo energijos vartojimo modelius. Šių kainų signalų naudojimo tikslas yra sumažinti bendrą energijos suvartojimą ir perkelti dalį didžiausios apkrovos į mažesnio vartojimo valandas. Kaip atvaizduojama 1 paveiksle, kainomis grindžiamas reguliavimas apkrova apima įvairias kainodaros programas, įskaitant naudojimo laiko kainodarą, kritinių didžiausių pikų laikotarpių kainodarą ir kainos realiuoju laiku taikymą [5].

Tam, kad būtų galima įgyvendinti reguliavimo apkrova procesus buitinių vartotojų sektoriuje bei įtraukti vartotojus į lankstų sistemos valdymą, reikalingas gerai išvystytas aktualių parametrų stebėjimo ir apdorojimo realiu laiku procesas. Vienas iš įrankių šiam procesui įgyvendinti yra išmaniojo matavimo sistema (angl. *smart metering*). Tai matavimo sistema, kuri realiu laiku (kas valandą ar dažniau) registruoja vartotojo suvartojimą (kartais ir papildomus parametrus) ir kas valandą ar net minutę perduoda matavimus ryšių tinklu į duomenų apdorojimo tašką. Geriau išvysčius infrastruktūrą buitinių vartotojų sektoriuje ir išaugus pažangiųjų skaitiklių skvarbai, elektros energijos suvartojimo stebėjimas realiuoju laiku išmaniajame tinkle tapo plačiai prieinamas [5].

1.3. Techniniai sprendimai ir strategijos, reikalingos vartotojų įtraukimui į lankstų elektros sistemos valdymo procesą

Nors centralizuotos energetikos sistemos yra ekonomiškai patrauklios, vietinės energetikos sistemos yra svarbios energetinei nepriklausomybei ir energijos tiekimo kokybei išlaikyti. Pastaraisiais metais tokių sistemų tyrimai labai išaugo. Šiuose tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama atskiroms technologijoms ir su įgyvendinimu susijusiems klausimams, tačiau trūksta išsamaus ir integruoto požiūrio į vietos energetikos sistemas. Konkrečiai, trūksta namų ūkių ir bendruomenių vaidmens vertinimo esamoje sistemos struktūroje ir iš to kylantį poveikį, kurį jie gali turėti moderniajam tinklui. Daugybė turimų technologijų, institucijų ir rinkos mechanizmų dar labiau apsunkina integruotų vietos energetikos sistemų įgyvendinimą. Dėl tokio sudėtingumo reikia naujų priemonių ir institucinių susitarimų, kad būtų galima optimaliai integruoti gamybą ir paklausą vietos lygmeniu. Siūlomi integracijos įgyvendinimo būdai [10]:

- mikrotinklai;
- integruotos energetikos sistemos;
- virtualios elektrinės;
- energijos centrai;
- gaminančių vartotojų bendruomenių grupių kūrimas.

Tačiau šie metodai yra skirti prisitaikyti prie esamos centralizuotos energetikos sistemos struktūros. Vis dar trūksta labiau principu „iš apačios į viršų“ grindžiamo sprendimo, kuris galėtų pasinaudoti visais paskirstytos energijos gamybos ir vartojimo privalumais. Vietos energetikos sistemoms reikia visapusiško ir integruoto požiūrio, pagal kurį vartotojų bendruomenės galėtų visiškai kontroliuoti savo energetikos sistemą ir pasinaudoti visais, įvairių integracijos galimybių teikiamais privalumais [10].

Mikrotinklai. Bendrijos mikrotinklus sudaro vietos lygmeniu, kontroliuojamos paskirstytos generacijos šaltinių grupės, kurios tiek elektros gamybos, tiek rinkos požiūriu laikomos vienu paklausos ar pasiūlos šaltiniu. Mikrotinklai gali atsiskirti nuo nacionalinio tinklo ir prireikus veikti autonomiškai. Tai užtikrina didesnę paskirstytos generacijos skvarbą, pvz., saulės ir vėjo elektrinės ir kaupimo sistemos. Tokiu būdu vietos išteklių gali būti naudojami vietinei paklausai patenkinti, taip sumažinant nuostolius ir padidinant energijos tiekimo sistemų efektyvumą [10].

Virtualios elektrinės. Įvairių namų ūkių vartojimas ir gamyba gali būti susumuojami taip, kad sudarytų lanksčios gamybos pajėgumus, prilygstančius didelės elektrinės gamybai, taip sukuriant virtualią elektros energijos jėgainę. Virtualios elektrinės yra „išsklaidytų generatorių, lanksčių apkrovų ir saugojimo sistemų grupė, sugrupuota taip, kad veiktų kaip vienas subjektas“. Virtualios jėgainės gali būti techninio arba komercinio pobūdžio. Techninio pobūdžio jėgainės yra priklausomos nuo veikimo vietos specifiškumo, susijusio su lankstumu, daugiausia paskirstymo sistemoje. Komercinio pobūdžio virtualios jėgainės neturi vietos specifikos. Tokio tipo jėgainės yra lanksčios sistemos plėtimui ir gamybos pajėgumų sutelkimui iš skirtingų generacijos sistemų. Ši technologija suteikia galimybę paskirstytos generacijos šaltiniams dalyvauti energijos rinkose, taip pat ji prisideda prie sistemos veikimo palaikymo. Dėl šių aspektų, virtualios elektrinės palaipsniui galėtų pakeisti centralizuotas elektrines [10].

Energijos centrai. Energijos centras valdo energijos srautus tam tikrame regione per optimalų kelių energijos perdavimo ir skirstymo linijose parinkimą. Ši sistema apima kaupimo, konversijos ir paskirstymo technologijas, skirtas tiekti elektros energiją, šilumą, dujas ir kitą kurą galutiniams vartotojams [10].

Gaminančių vartotojų bendruomenių grupės (GVBG). Šis reiškinys yra apibrėžiamas kaip „gaminančių vartotojų, turinčių santykinai panašų energijos pasidalijimo būdą ir interesus, kurie stengiasi siekti abipusio tikslo ir kartu konkuruoti energijos rinkoje, tinklas“ [10]. GVBG iš esmės virtualiai sujungia gaminančius vartotojus, kurie nebūtinai gali būti sujungti techniškai.

Integruotų gaminančių vartotojų energetikos sistemų pagrindas yra pažangiųjų tinklų vystymas ir panaudojimas. Decentralizuotų energetikos tinklų ir rinkų eksploatavimo technologijos labai patobulėjo dėl informacinių ir ryšių technologijų pažangos. Technologijos reikalingos vartotojų integruotoms energetikos sistemoms valdyti [10]:

- išmanieji namų buities įrenginiai (indaplovės, skalbyklės);
- elektra varomos transporto priemonės;
- elektros ir šilumos kaupimo sistemos;
- baterijų kaupimo sistemų valdymo įrenginiai;
- namų ūkių energijos valdymo sistemos.

Šioms sistemoms gali būti būdingas aktyvus informacijos ir energijos srautų valdymas paskirstytos gamybos, kaupimo, vartojimo ir lanksčios paklausos kontekste. Be to, energijos valdymo sistemos, tokios kaip namų ūkių energijos valdymo sistemos, baterijų kaupimo valdymo sistemos ir vartotojų bendruomenių energijos valdymo sistemos, užtikrina veiksmingą energetikos bendruomenių kontrolę ir veikimą [10].

1.4. Energijos kaupimo sistemų svarba, technologijos ir panaudojimas

Nulinio grynojo išmetamųjų teršalų kiekio iki 2050 m. scenarijus yra Tarptautinės Energetikos Agentūros nustatytas scenarijus, kuriame išdėstytas pasaulinio energetikos sektoriaus planas, kaip iki 2050 m. pasiekti nulinį grynąjį išmetamą CO₂ kiekį. Pagal šį planą numatoma, kad išsivysčiusios ekonomikos šalys turėtų pirmauti siekiant nulinio grynojo išmetamųjų teršalų kiekio, palyginti su kitomis pasaulio šalimis. Be to, šis scenarijus atitinka su energetika susijusius Jungtinių Tautų darnaus vystymosi tikslus, kuriais siekiama iki 2030 m. užtikrinti visuotinę prieigą prie energijos ir gerinti oro kokybės parametrus. Taip pat šiuo scenarijumi siekiama apriboti globalios vidutinės temperatūros kilimą iki 1,5 °C per metus, su minimaliu viršijimu arba be jo (su 50 % tikimybe) [11].

Yra keletas galimų strategijų, kaip iki 2050 m. pasiekti pasaulinius į atmosferą išmetamo CO₂ kiekio tikslus. Kiekvieną iš šių strategijų veikia daugybė faktorių, galinčių turėti įtakos jų rezultatams. Norint pasiekti nustatytus tikslus, yra svarbūs keli veiksniai, tokie kaip, technologinių inovacijų vystymo sparta besiformuojančiose srityse, asmenų noras keisti savo elgesį, tvarios bioenergijos prieinamumas, tarptautinio bendradarbiavimo lygis ir jo veiksmingumas. Principai, kuriais grindžiamas nulinio grynojo išmetamųjų teršalų kiekio iki 2050 m. scenarijus [11]:

1. turimų technologijų ir išmetamųjų teršalų kiekio mažinimo galimybių pritaikymą lemia tokie veiksniai kaip sąnaudos, technologijų išbaigtumas, politikos prioritetai, rinkos sąlygos ir konkrečios šalies aplinkybės;
2. kitas svarbus faktorius yra tarptautinis šalių bendradarbiavimas, siekiant pasaulinio nulinio grynojo išmetamųjų teršalų kiekio tikslų. Tai apima aktyvų visų tautų dalyvavimą, abipusiai naudingą bendradarbiavimą ir pripažįstant skirtingus šalių ir regionų ekonominio vystymosi galimybes ir resursus. Taip pat svarbu, kad būtų užtikrintos sąžiningos ir teisingos pertvarkos ir reformos;
3. pirmenybė teikiama organizuotai pertvarkai visame energetikos sektoriuje. Tai apima nuolatinio kuro ir elektros energijos tiekimo užtikrinimą, poveikio įrangos nusidėvėjimui ir nuvertėjimui mažinimą, energijos rinkų pastovumo didinimą.

Istoriškai energetikos sektoriui teko maždaug trys ketvirtadaliai viso pasaulyje išmetamo šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekio. Pagal nulinio išmetamo CO₂ kiekio scenarijų, siekiant iki 2050 m. pasiekti nulinį grynąjį su energija susijusį ir pramoninių procesų metu išmetamą CO₂ kiekį, daugiausia dėmesio skiriama veiksams pačiame energetikos sektoriuje. Tačiau norint visapusiškai spręsti klimato kaitos problemą, reikia imtis veiksmų visuose pramonės sektoriuose [11].

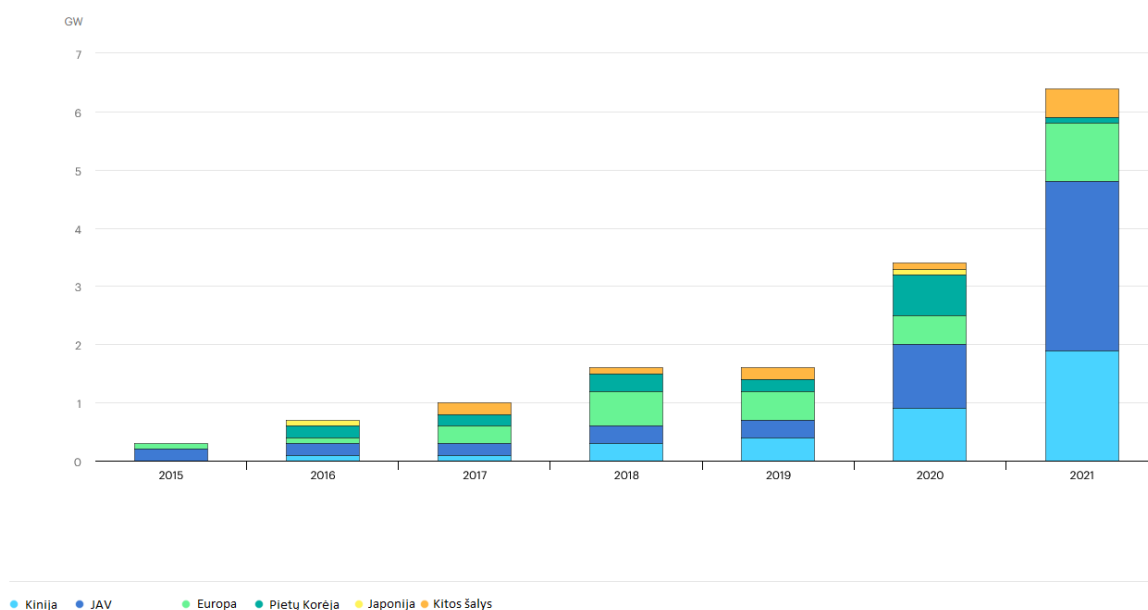
Pagal minėtą scenarijų, svarbus vaidmuo tenka didelės galios kaupimo sistemoms, nes pasitelkiant jų veikimą yra teikiamos svarbios sistemos paslaugos, pradedant trumpalaikiais balansavimo ir eksploatavimo rezervais, papildomomis tinklo stabilumo paslaugomis ir investicijų į naujas perdavimo ir skirstymo linijas atidėjimu ir baigiant ilgalaikiu energijos kaupimu ir tinklo operacijų atkūrimu po elektros energijos tiekimo nutraukimo [12].

1.4.1. Didelės galios kaupimo sistemos ir technologijos

Hidroakumuliacinė hidroenergija yra plačiausiai naudojama kaupimo technologija, kadangi ji turi didelį potencialą įvairiuose pasaulio regionuose. Baterijos yra labiausiai lankstus ir lengvai pritaikomas tinklo masto saugojimo būdas, o jų rinka pastaraisiais metais sparčiai augo. Kitos saugojimo technologijos apima suslėgto oro ir gravitacija paremtas kaupimo sistemas, tačiau jos

atlieka palyginti nedidelį vaidmenį dabartinėse energijos sistemose. Vandeniliu paremtas kaupimas, taip pat yra besiformuojanti technologija, turinti sezoninio atsinaujinančiosios energijos kaupimo potencialą [12].

Hidroakumuliacinė hidroenergija šiuo metu tebėra vyraujanti didelės talpos ir galios kaupimo technologija. 2021 m. bendra instaliuota šios technologijos galia siekė apie 160 GW. Kalbant apie pasaulinius pajėgumus, ji sudarė daugiau nei 90% visų elektros energijos saugyklų, o 2020 m. jos pajėgumas buvo apie 8 500 GWh. Jungtinės Valstijos turi didžiausią pajėgumą tarp visų šalių. Dauguma šiuo metu veikiančių elektrinių yra naudojamos kasdienio balansavimo tikslais. Nepaisant to, didelės galios baterijų sistemų naudojimas sparčiai populiarėja. Nors dabartinis jų pajėgumas vis dar yra gerokai mažesnis nei hidroakumuliacinės hidroenergijos, prognozuojama, kad baterijomis paremtos kaupimo sistemos, turės didžiausią įtaką energijos saugojimo sistemų pajėgumų augimui visame pasaulyje. Tinklo baterijų kaupimo sistemos pirmiausia naudojamos valandiniam, valandiniam ir kasdieniam balansavimui. Iki 2021 m. pabaigos bendra instaliuota tinklo baterijų saugyklų galia siekė beveik 16 GW, o per pastaruosius penkerius metus buvo matomas didžiulis instaliuotos galios prieaugis. 2021 m. įrenginių skaičius sparčiai augo ir, palyginti su 2020 m., padidėjo 60 proc., buvo pridėta daugiau kaip 6 GW akumuliacinių pajėgumų. Jungtinės Valstijos, Kinija ir Europa yra lyderiaujantys regionai šios rinkos plėtroje, prisideddami prie pajėgumų pildymo naujų, gigavatų dydžio sistemų įrengimu. Tinklo baterijų technologinė sudėtis 2021 m., palyginti su 2020 m., iš esmės nepasikeitė. Ličio jonų baterijos ir toliau dominavo kaip plačiausiai taikoma technologija, sudaranti didžiąją dalį naujai įrengtos talpos [12]. Žemiau pateiktas grafikas (2 paveikslas) atspindi kaupimo sistemų pajėgumų augimą 2015-2021 m. laikotarpiu.



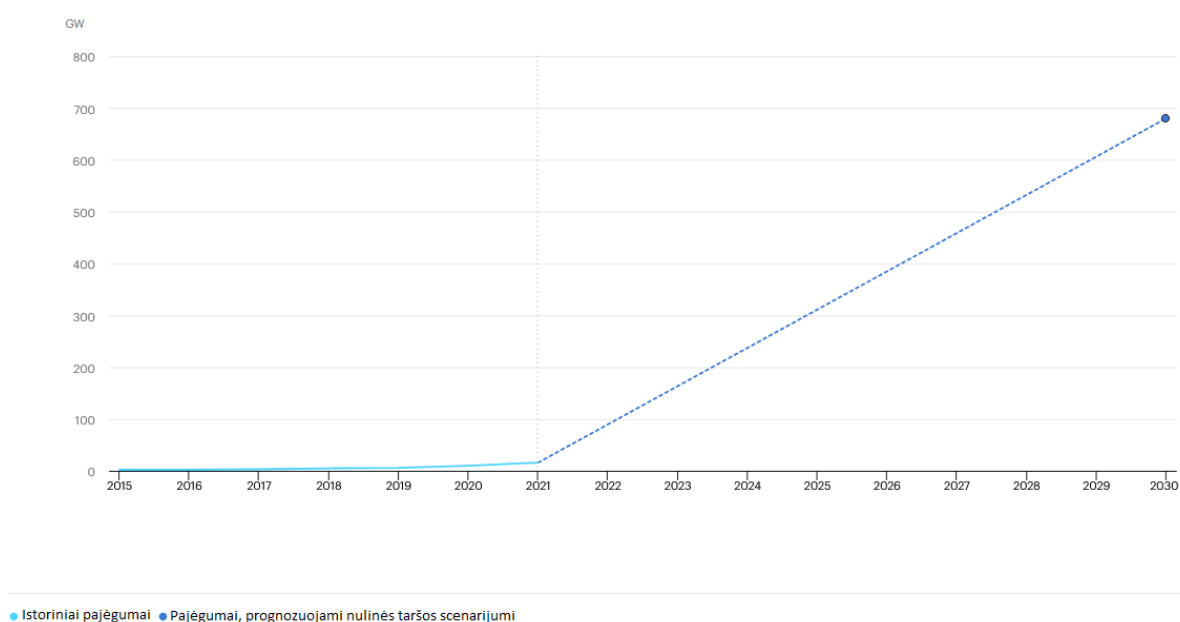
2 pav. Kaupimo sistemų pajėgumų augimas 2015 – 2021 m. laikotarpiu [12]

Sparti energijos kaupimo sistemų plėtra bus labai svarbi siekiant spręsti vėjo ir saulės šaltinių elektros energijos generacijos nepastovumo tinkle problemą, ypač atsižvelgiant į tai, kad remiantis Europos Sąjungos direktyvomis atsinaujinančiųjų šaltinių gamybos apimtys tinkle sparčiai didėja. Didėjančių lankstumo poreikių tenkinimas mažinant elektros energijos gamybos priklausomybę nuo iškastinio kuro yra pagrindinis elektros energijos sektoriaus uždavinys, todėl reikia išnaudoti visus tinklo

lankstumą užtikrinančius procesus, įskaitant tinklo stiprinimą, reguliavimą apkrova, tinklo energijos kaupimo sistemų naudojimą [12].

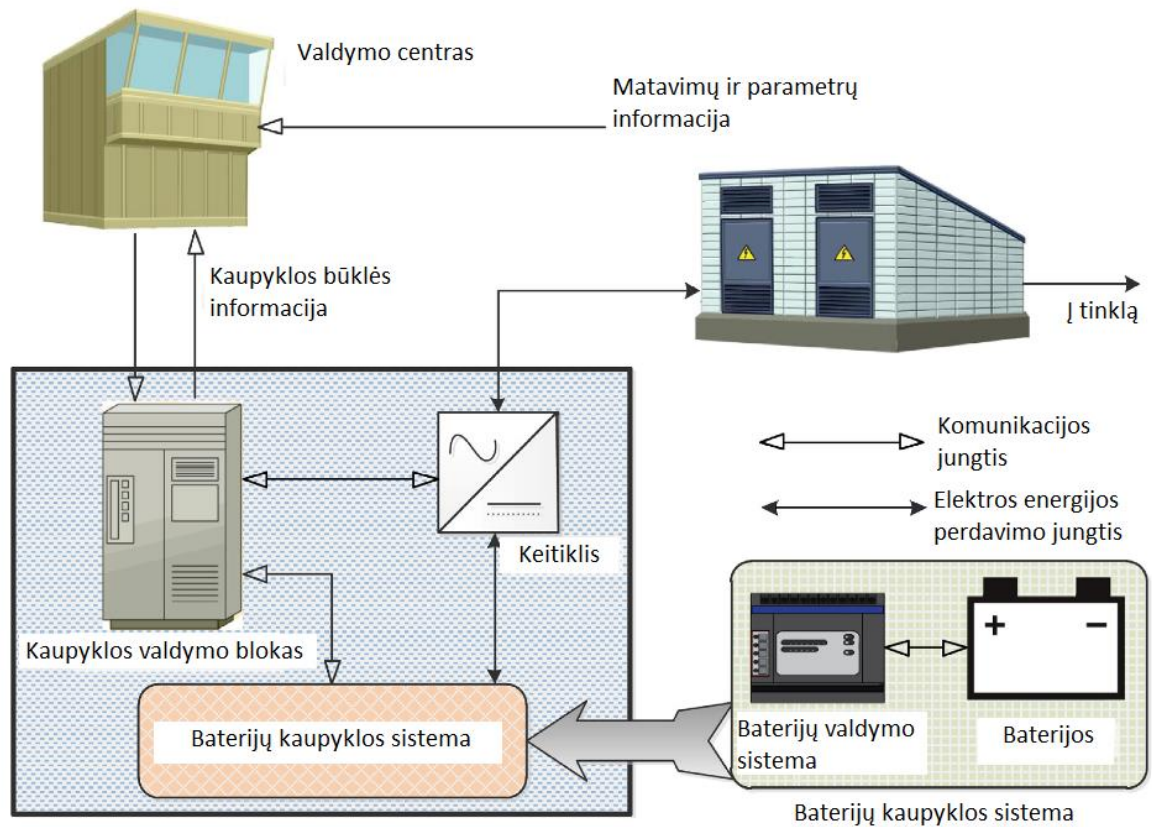
Siekiant globalių klimato kaitos mažinimo tikslų, ypatingą dėmesį reikia skirti tinklo baterijų kaupimo sistemų įdiegtos galios pajėgumų didinimui. Pagal nulinės taršos scenarijų 2021–2030 m. instaliuota tinklo baterijų saugojimo sistemų talpa turėtų išaugti 44 kartus iki 680 GW instaliuotos galios. Vien 2030 m. prognozuojamas beveik 140 GW galios prieaugis, palyginti su 6 GW 2021 m. Norint sėkmingai įgyvendinti minėtąjį scenarijų, metinė pajėgumų plėtra turi gerokai išaugti – 2022–2030 m. laikotarpiu vidutiniškai siekti daugiau kaip 80 GW per metus [12].

Nors daroma pažanga, prognozuojamas tinklo kaupimo sistemų pajėgumų augimas šiuo metu neatitinka nulinio poveikio klimatui scenarijaus ir reikalauja didesnių pastangų jį įgyvendinant [12]. Didelės talpos baterijų sistemų instaliuotų galių prognozės, nulinio scenarijaus atveju, yra pateikiamos 3 paveiksle.



3 pav. Didelės talpos baterijų sistemų instaliuotos galios ir jų prognozė iki 2030 m. [12]

Baterijos susideda iš sujungtų elementų, kurie leidžia cheminę energiją paversti elektros energija ir atvirkščiai. Sujungus elementus nuosekliai ir/arba lygiagrečiai, galima pasiekti norimą akumuliatoriaus įtampos ir srovės lygį [13].



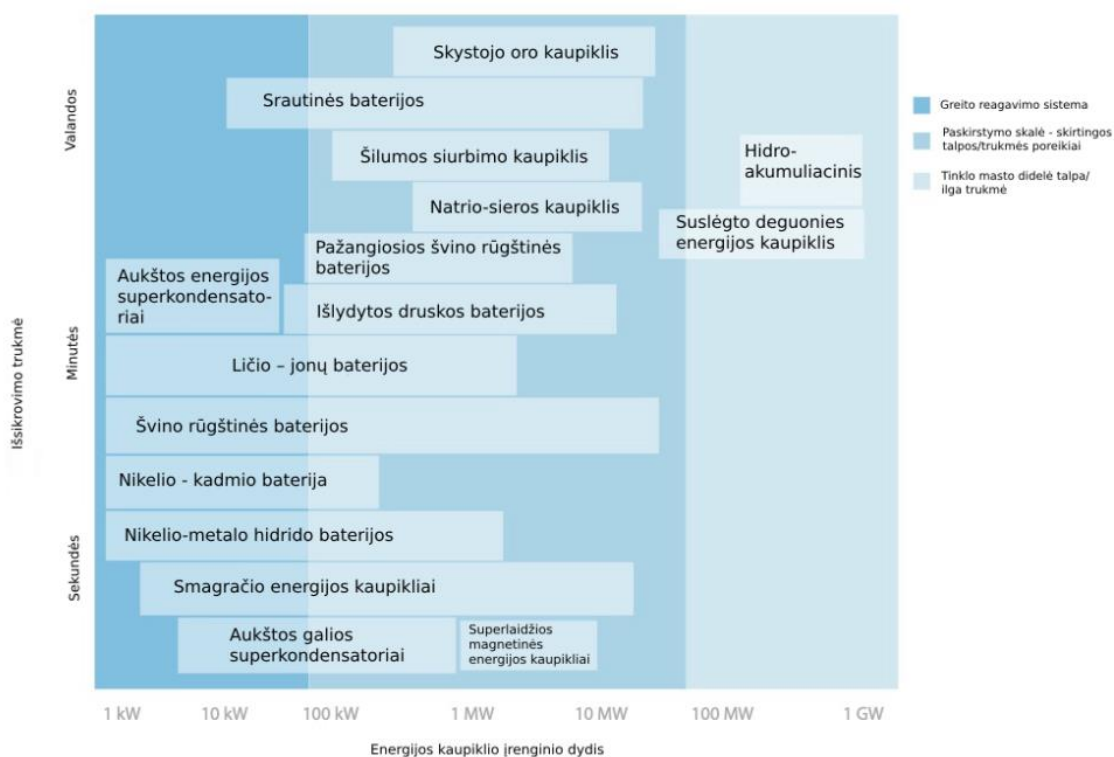
4 pav. Tinklo masto baterijų kaupimo sistemos principinė schema [14]

Baterijų energinė talpa ir galia yra pagrindinės specifikacijos, pagal kurias yra vertinamos baterijų sistemos. Daugumos tipų akumuliatorių galia ir energijos talpa yra tarpusavyje susijusios ir nustatomos akumuliatoriaus projektavimo etape. Be energijos ir galios pajėgumų, baterijos turi ir kitų svarbių savybių [13]:

- efektyvumas, kuris rodo, kaip efektyviai akumuliatorius gali kaupti ir išlaikyti energiją;
- sistemos eksploatacijos trukmė, kuri paprastai matuojama pagal ciklą, kuriuos akumuliatorius gali praeiti, kol jo veikimas pablogėja, skaičių;
- darbinė temperatūra, kuri gali turėti įtakos akumuliatoriaus veikimui;
- iškrovimo lygis, nurodantis lygį, iki kurio akumuliatorius gali būti iškraunamas naudojimo metu;
- savaiminis išsikrovimas, kuris nusako greitį, kuriuo akumuliatorius praranda savo elektros talpą, kai nėra naudojamas;
- energijos tankis, kuris reiškia energijos kiekį, kurį akumuliatorius gali kaupti ir saugoti, palyginti su jo dydžiu ar svoriu.

Šiuo metu pastebima didelė baterijų technologijų pažanga. Kuriamos įvairių tipų baterijos, kai kurios iš jų jau yra rinkoje, o kitos vis dar yra tiriamos ir tobulinamos. Elektros energijos sistemose daugiausia buvo naudojamos giliojo ciklo baterijos, panašios į tas, kurios naudojamos elektra varomose transporto priemonėse. Šių baterijų energijos talpa svyruoja nuo 17 iki 40 MWh, o jų efektyvumas yra maždaug 70 – 80 %. Iš daugybės skirtingų baterijų technologijų, kai kurios iš jų yra tinkamesnės ir jau yra naudojamos elektros energijos kaupimo ir balansavimo tinkle reikmėms [15].

5 paveiksle yra grafiškai pateikiamas energijos kaupimo technologijų pasiskirstymas pagal jų panaudojimo pobūdį ir efektyvumą.



5 pav. Energijos kaupimo technologijų pasiskirstymas pagal jų panaudojimo pobūdį ir efektyvumą [12]

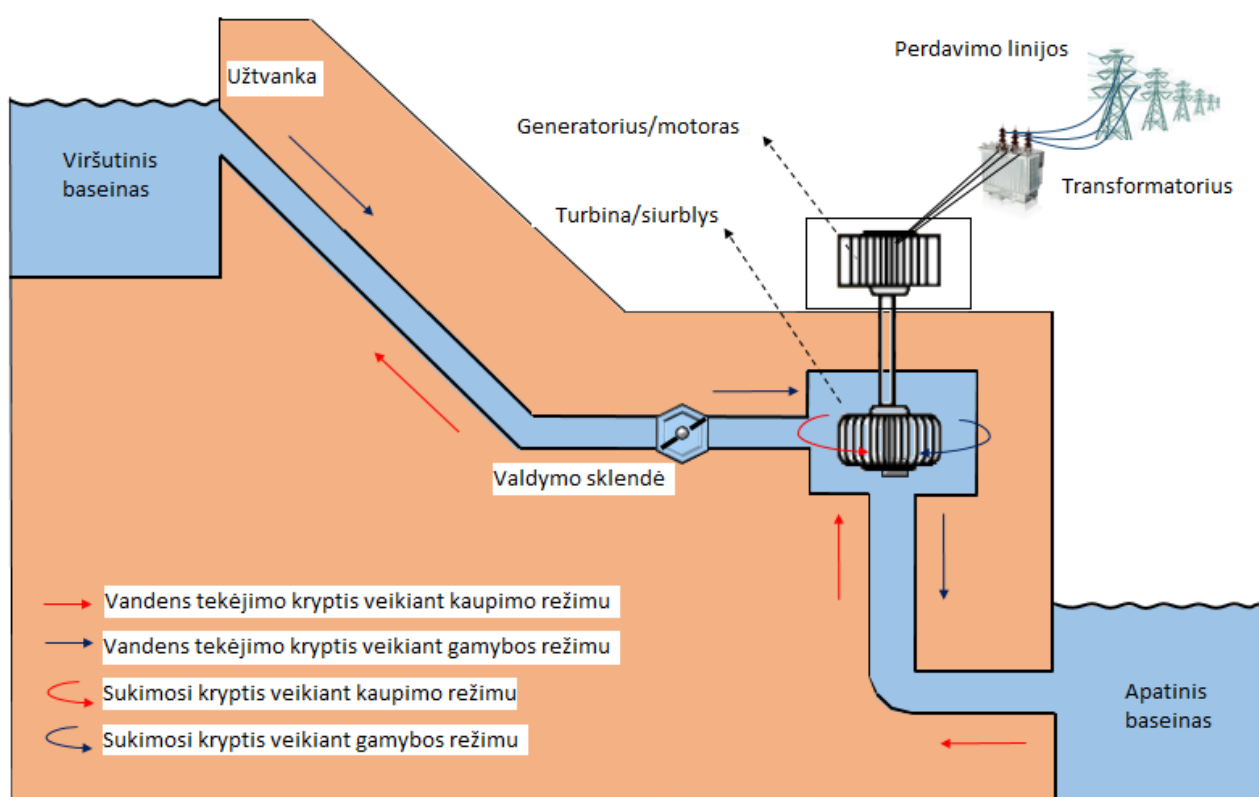
Atsižvelgiant į sąnaudų ir energijos tankio santykį, ličio geležies fosfato baterijos, kurios yra ličio jonų baterijų pogrupis, tebėra tinkamiausias pasirinkimas didelės talpos energijos saugojimui. Didesnio energijos tankio cheminės sandaros baterijų technologijos, tokios kaip nikelio kobalto aliuminis (NCA) ir nikelio mangano kobaltas (NMC), yra populiarnesnės privačių namų ūkių energijos kaupimo sistemų atveju, kur vieta, kurioje galima įrengti sistemą, yra ribota. Be ličio jonų baterijų, srauto baterijos gali tapti populiaria ir inovatyvia technologija, naudojama baterijų kaupimo sistemoms. Per 25–30 metų jų našumas pablogėja minimaliai ir jų dydis gali būti nustatomas pagal konkrečius energijos kaupimo reikalavimus su palyginti mažomis investicijomis. 2022 m. liepą Kinija užsakė didžiausią pasaulyje vanadžio redokso srauto bateriją, kurios galia siekia 100 MW, o saugojimo tūris – 400 MWh [12].

Nors per pastarąjį dešimtmetį ličio jonų baterijų kainos gerokai sumažėjo, svarbu pabrėžti, kad tolesnis sąnaudų mažinimas priklauso ne tik nuo technologinės pažangos, bet ir nuo baterijų mineralų kainų pokyčio. Ličio jonų baterijų pramonė yra pagrindinis ličio paklausos variklis, nes litis yra esminis įvairių ličio jonų baterijų, įskaitant ličio geležies fosfato, NiCoAl ir NiMnCo baterijas, komponentas. Taigi ličio prieinamumas ir kaina turės didelę įtaką siekiant dekarbonizuoti privataus ir lengvojo keleivinio transporto sritis bei vystant ir plečiant baterijų kaupimo sistemas. Nuo 2021 m. pradžios kiekvieno ličio išgavimo grandinės komponento – nuo kasamo spodumeno iki didelio grynumo ličio karbonato ir hidroksido – kainos pastebimai išaugo. Be to, baterijų metalų rinką paveikė Rusijos invazija į Ukrainą. Ši geopolitinė padėtis turi įtakos nikelio ir kobalto (naudojamas baterijos katodui), taip pat grafito (naudojamas baterijos anodui) kainoms. Tokia situacija susidarė todėl, kad Rusija yra didžiausia baterijų klasės nikelio gamintoja, kuriai tenka 20% viso globaliai

iškasamo nikelio kiekio. Be to, ji yra antra pagal dydį kobalto gamintoja ir ketvirta pagal dydį grafito gamintoja [12].

Anksčiau minėtos hidroakumuliacinės kaupimo sistemos išsiskiria kaip vyraujanti tinklo energijos kaupimo technologija. Ji buvo plačiai priimta dėl kelių pagrindinių veiksnių. Pirmiausia, hidroakumuliacinės kaupyklos leidžia saugoti didelį potencialios energijos kiekį hidrorezervuaruose, taip pat bendras viso ciklo energijos konversijos efektyvumas yra gana aukštas, lyginant su kitomis kaupimo sistemų technologijomis. Hidroakumuliacinės kaupimo sistemos energijos vieneto kaina ir lankstumas, kurį ji suteikia perdavimo sistemai vykdamas trumpalaikes operacijas, dar labiau prisideda prie tokios sistemos, kaip geriausio pasirinkimo didelio kiekio energijos kaupimui, patrauklumo. Todėl, jau nuo 1890 m. hidroakumuliacinės hidroelektrinės buvo plačiai diegiamos ir eksploatuojamos visame pasaulyje [16].

Hidroakumuliacinės kaupimo sistemos kompleksą paprastai sudaro viršutinis ir apatinis rezervuarai, sujungti vandens trasomis. Jame taip pat yra jėgainė, kurioje yra elektromechaninis hidrogeneratorius ir perdavimo jungtis su elektros tinklu. Tradiciniame eksploatavimo metode nebrangi elektros energija, dažniausiai naktį arba savaitgaliais, kai energijos poreikis yra mažas, naudojama vandeniui siurbti iš apatinio rezervuaro į viršutinį rezervuarą. Tada viršutiniame rezervuare sukauptas vanduo išleidžiamas didelės paklausos laikotarpiais, tiekiant vertingesnę elektros energiją į tinklą [17].



6 pav. Principinė hidroakumuliacinės jėgainės / kaupyklos sandaros schema [18]

1.4.2. Privačių namų ūkių kaupimo sistemos ir technologijos

Visame pasaulyje energijos gamybos iš atsinaujinančiųjų šaltinių tendencija tampa vis svarbesnė. Kaupimas baterijose gali integruoti didelį elektros energijos kiekį iš saulės fotovoltinės energijos į vietinį tinklą, kad būtų galima sumažinti įprastinės elektrinės reikalingą instaliuoti galią [19].

Pavyzdžiui nuo 2012 m. Vokietijoje iš atsinaujinančiųjų išteklių gautos elektros energijos (kurios didžioji dalis yra iš vietoje gaunamos ir suvartojamos fotovoltinės energijos) pagaminama tiek pat kiek ir iš iškastinio kuro gautos elektros energijos. Tai rodo, kad ekonominė nauda, vartoti pačių pasigamintą elektros energiją, o ne grąžinti ją atgal į tinklą, didėja. Šį pokytį galima paaiškinti trimis pagrindiniais veiksniais [19]:

1. mažėjančiomis fotovoltinių sistemų kainomis.
2. mažėjančiais elektros energijos supirkimo tarifais.
3. palyginti didelėmis mažmeninėmis elektros energijos kainomis Vokietijoje, kurios sudarė apie 30 EUR–ct/kWh.

Įdiegus baterijų saugojimo sistemą, kurios ekonominis patrauklumas kasmet auga, nes baterijų kainos ir toliau mažėja, dar labiau padidėja savarankiško vartojimo pajėgumai [19].

Didžiausias iššūkis platesniam saulės energijos panaudojimui yra gamybos nepastovumas. Kadangi fotovoltinių sistemų gamybos ir vartojimo profiliai skiriasi [20], fotovoltinės energijos pagamintą elektros energiją būtina kaupti realiuoju laiku, kad būtų galima efektyviau suvartoti pasigamintą elektros energiją. Baterijų kaupimo sistemų panaudojimas elektros energijai saugoti gali pakeisti gamybą maždaug keturioms valandoms. Jei yra pakankama baterijos talpa ir saulės šviesos trukmė, įmanoma visiškai savarankiškai patenkinti pastato elektros energijos poreikį naudojantis tik elektra, pagaminta saulės elektrinėje. Be padidėjusio pasigamintos energijos suvartojimo, baterijų kaupimas taip pat gali padėti sumažinti vietinio tinklo pajėgumo apribojimus ir taip padėti palaikyti tinkamą sistemos veikimą [19].

Tačiau kyla klausimas, *ar ir kokiomis sąlygomis* tokie baterijų kaupikliai, pridėti prie gyvenamosios paskirties fotovoltinės sistemos, gali būti laikomi pelningi? Yra keletas energijos kaupimo pelningumo modeliavimo metodų. Be padidėjusio pasigamintos energijos vartojimo vertės, yra ir palyginti nauja baterijų kaupimo koncepcija, siekiant teikti paslaugas tinklui. Trys baterijų kaupimo gamintojai „Caterva“, „Sonnen“ ir „Fenecon“ buvo pirmosios įmonės, siūlančios paslaugą, skirtą parduoti tiek sukauptą elektros energiją, tiek atsarginius privačių baterijų kaupimo sistemų pajėgumus rezervinės energijos rinkoje. Sujungus mažas ličio jonų baterijų kaupimo sistemas, sukuriamas virtualus didelio masto kaupimo įrenginys, atitinkantis dalyvavimo rezervinės energijos perdavimo tinklo lygmeniu arba pagalbinių paslaugų rinkoje perdavimo ir skirstomojo tinklo lygmeniu, reikalavimus [19].

Taigi, atsižvelgdami į pageidaujama funkcionalumą, vartotojai turi keletą galimybių kaip panaudoti baterijų sistemas ir kokias sistemas diegti privačiuose namų ūkiuose [21].

- Vartotojas gali rinktis įdiegti mažas baterijas, kad galėtų reguliuoti savo elektros energijos suvartojimo iš tinklo laiką. Tai gali būti ypač naudinga didžiausios paklausos laikotarpiais, padedant sumažinti bendras sąskaitas už elektrą.

- Taip pat galimas pasirinkimas yra įdiegti vidutinio dydžio baterijas, siekiant maksimaliai išnaudoti saulės elektros energiją, pagamintą iš asmeninės fotovoltinių saulės modulių elektrinės. Šiuo atveju tinklas naudojamas kaip atsarginis energijos šaltinis.
- Galiausiai, vartotojai turi galimybę visiškai atsijungti nuo tinklo, pasikliaudami tik didele saulės ir baterijų namų energijos sistema, kad patenkintų visus savo namų ūkio energijos poreikius.

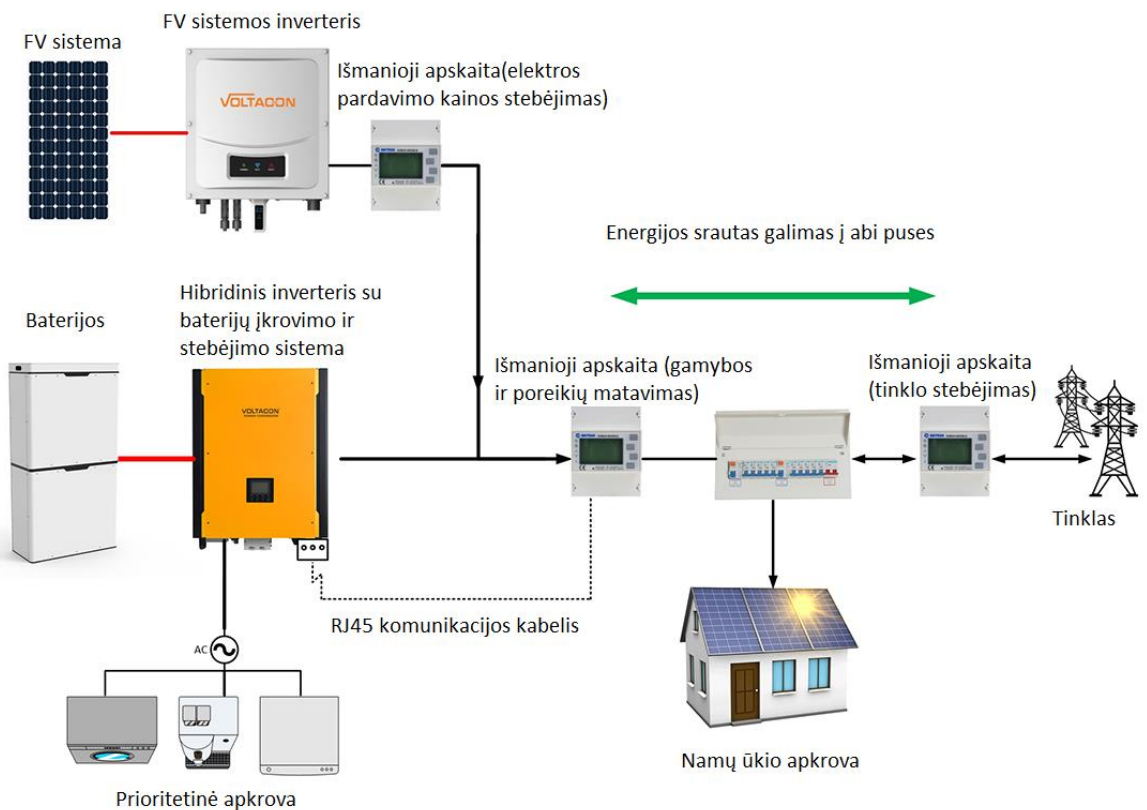
Norint atlikti išsamią ekonominę analizę, labai svarbu atlikti išsamius investies parametrų ir supančios aplinkos tyrimus. Pirma, būtina nustatyti išlaidas, susijusias su investicijomis į baterijas. Tai apima išlaidas, susijusias su pačia baterija, keitikliu, kurio reikia norint prijungti sistemą prie PV sistemos, įrengimo išlaidas ir nuolatinės eksploataavimo bei priežiūros išlaidas. Antra, reikia atsižvelgti į sąnaudas, susijusias su elektros energijos pirkimu iš tinklo ir būsimų pokyčių numatymu. Be to, būtina išnagrinėti naudą, susijusią su investicijomis į kaupimo sistemą. Pasigamintos energijos vartojimo vertę didina kylančios mažmeninės elektros energijos kainos, o hibridinės fotovoltinių baterijų sistemos sudaro sąlygas didesniai pasigamintos energijos vartojimui. Trečia, be pasigamintos energijos vartojimo, svarbu išnagrinėti alternatyvias pajamų galimybes, kurias siūlo anksčiau minėtos mažesnių baterijų sutelkimo į didesnes sistemas koncepcijos. Galiausiai, baterijų ekonominiam efektyvumui didelę įtaką daro mažėjančios baterijų kainos, taip pat mažėjanti kompensacija už elektros tiekimą į tinklą bei elektros pasaugojimo paslaugą [19, 22].

Tipinę vartotojo baterijų kaupimo sistemos struktūrą sudaro keli pagrindiniai komponentai, kurie kartu kaupia ir valdo elektros energiją. Dažniausiai naudojamos baterijų sistemos komponentų sandara yra [23]:

- **baterijos.** Sistemos pagrindinis komponentas yra baterijos, kurios kaupia elektros energiją vėlesniam naudojimui. Jos paprastai yra įkraunamos ir suprojektuotos taip, kad atlaikytų dažnus įkrovimo ir iškrovimo ciklus. Ličio jonų baterijos dažniausiai naudojamos buitinėse sistemose dėl didelio energijos tankio ir efektyvumo;
- **baterijų valdymo sistema (toliau – BMS).** BMS stebi ir kontroliuoja akumulatoriaus veikimą. Tai užtikrina, kad akumulatoriai būtų saugiai įkraunami ir iškraunami, apsaugo nuo per didelio įkrovimo ar per didelio iškrovimo ir padeda optimizuoti akumulatoriaus veikimą bei tarnavimo laiką;
- **keitiklis.** Keitiklis yra esminis komponentas, kuris baterijose sukauptą nuolatinės srovės (DC) elektros energiją paverčia kintamosios srovės (AC) elektros energija, naudojama buitiniuose prietaisuose. Keitiklis taip pat užtikrina sklandų energijos perdavimą tarp akumulatoriaus saugojimo sistemos ir elektros tinklo;
- **įkrovimo valdiklis.** Sistemose, prijungtose prie saulės baterijų, įkrovimo valdiklis reguliuoja elektros energijos srautą iš saulės fotovoltinių modulių į baterijas. Valdiklis apsaugo nuo baterijų perkrovimo ir optimizuoja įkrovimo procesą, kad būtų užtikrintas maksimalus sistemos efektyvumas;
- **stebėjimo ir valdymo sistema.** Ši sistema užtikrina akumulatoriaus saugojimo sistemos stebėjimą ir valdymą realiuoju laiku. Tai leidžia namų savininkams sekti akumulatoriaus įkrovos būseną, energijos suvartojimą ir sistemos veikimą. Kai kurios pažangios sistemos taip pat įgalina nuotolinį valdymą ir integraciją su išmaniųjų namų technologijomis;
- **integracija su energijos šaltiniais.** Namų ūkių baterijų kaupimo sistemos dažnai veikia kartu su kitais energijos šaltiniais. Šie šaltiniai gali būti saulės fotovoltiniai moduliai, vėjo jėgainės ar net prijungimas prie elektros tinklo. Baterijų sistema padeda kaupti šių šaltinių generuojamą

perkleinę energiją ir suteikia atsarginę energiją didelės paklausos ar elektros energijos tiekimo nutraukimo laikotarpiais;

- **išmanioji energijos srauto valdymo sistema.** Sudėtingesnėse sąrankose gali būti naudojama išmanioji energijos srauto valdymo sistema. Ši sistema optimizuoja energijos iš įvairių šaltinių (pvz., Saulės, akumulatoriaus ar tinklo) naudojimą, atsižvelgiant į elektros energijos poreikį, naudojimo laiko tarifus ir kitus veiksnius. Ji gali teikti pirmenybę pasigamintos atsinaujinančiųjų išteklių energijos vartojimui arba sudaryti sąlygas energijos arbitražui, įkraudama baterijas ne piko valandomis, kai elektros energijos kainos yra mažesnės.



7 pav. Išmaniojo namų ūkio, su baterijų kaupykla ir saulės elektrine, sistemos tipinė schema [24]

Svarbu paminėti, kad konkretūs komponentai ir jų konfigūracija gali skirtis priklausomai nuo gamintojo, sistemos dydžio ir individualių namų ūkio reikalavimų [23].

1.5. Lankstumo paslaugų projektų Lietuvoje ir Europoje apžvalga

Lankstumo paslaugų koncepcija pastaraisiais metais yra intensyviai vystoma ir tiriama. Tokie projektai kaip „OneNet“ ir „Fusebox“ jau yra naudojami ir ruošiami naudojimui įvairiose Europos šalių rinkose ir Lietuvoje. Lietuvoje AB „Energijos Skirstymo Operatorius“ taip pat jau planuoja pradėti vykdyti lankstumo paslaugų užsakymus tiek iš buitinių, tiek iš komercinių vartotojų.

Toliau bus apžvelgiama, kaip lankstumo paslaugos yra apibūdinamos ir siūlomos įgyvendinti „OneNet“, „Fusebox“ ir „ESO lankstumo paslaugos“ projektuose.

1.5.1. ESO lankstumo paslaugos

Remiantis ESO lankstumo paslaugų apibūdinimu, lankstumo paslaugos yra „rinkos dalyvių aktyvus elektros vartojimo ir gamybos koregavimas, atsižvelgiant į elektros tinkle kylančias problemas (per didelis elektros vartojimas, svyruojančios įtampos ir pan.).“ Vartotojai dalyvaudami lankstumo paslaugų teikime gali gauti papildomų pajamų keisdami savo elgseną (pavyzdžiui, sumažindami elektros vartojimą piko valandomis), taip padėdami išlaikyti tinklo stabilumą [25].

Lankstumo paslaugos gali būti naudojamos sprendžiant įvairius elektros tinklo iššūkius, kai susidaro per didelis tinklo apkrovimas, atsiranda įtampos svyravimai, daug naujų klientų prijungimų, vyksta elektros tinklo priežiūros techniniai darbai (pavyzdžiui, ESO vykdant elektros tinklo priežiūros darbus, gali būti ribojamas tinklo pralaidumas ir dėl to nėra galimybių užtikrinti kokybišką elektros energijos tiekimą vartotojams) [25].

Lankstumo paslaugas gali teikti visi rinkos dalyviai, kurie atitinka techninių specifikacijų reikalavimus. Prieš teikiant šias paslaugas būtina atlikti bandomuosius testus, kurių metu patikrinama, ar rinkos dalyvių objektai gali reaguoti į operatoriaus signalus ir prašymus. Objektai, kurie teiktų lankstumo paslaugas, turi turėti išmaniąją apskaitą. Lankstumo paslaugų teikėjais gali tapti [25]:

- telkėjai;
- industriniai ir komerciniai vartotojai;
- energetinės bendrijos;
- aktyvūs vartotojai;
- AEI parkai;
- elektros gamintojai;
- kiti rinkos dalyviai (pvz. buitiniai vartotojai, gaminantys vartotojai).

Lankstumo paslaugos gali būti: ilgalaikės arba trumpalaikės, aktyvios arba reaktyvios galios (ar energijos), galios arba energijos. Šiuo metu ESO yra patvirtinta tik viena iš lankstumo paslaugų – ilgo laikotarpio aktyvios galios paslauga [25].

1.5.2. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugos aprašymas ir techninė specifikacija

Remiantis AB „Energijos skirstymo operatoriaus“ nutarimu dėl prekybos lankstumo paslaugomis tvarkos aprašo patvirtinimo, ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugos aprašymas ir techninė specifikacija pateikiami apačioje sąraše ir 1 lentelėje [26].

1. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslauga – įsigyjama nuo kelių mėnesių ar metų prieš lankstumo paslaugos poreikį.
2. Paslauga matuojama galia (kW) ir energija (kW/h).
3. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslauga skirta padėti Operatoriui valdyti elektros tinklo perkrovų problemas rinkos dalyviams susimąžinus / pasididinus savo vartojimo arba gamybos apimtį.
4. Paslauga perkama tose elektros tinklo vietose, kur Operatorius iš anksto numatytų galimas elektros tinklo perkrovų problemas, kurios kyla dėl padidėjusio klientų vartojimo ar per didelės atsinaujinančių energijos šaltinių gamybos.
5. Paslauga gali būti įsigyjama ir planuojat įvairius elektros tinklo priežiūros darbus, siekiant visiškai neatjungti konkrečios elektros tinklo vietos.
6. Operatorius įsigyja produktą laikotarpiui ne ilgesniam nei treji metai.

1 lentelė. Ilgo laikotarpio aktyvios galios lankstumo paslaugos specifikacija [26]

Eil. Nr.	Atributas	Atributų paaiškinimas	Vertė
1.	Galia / energija (angl. <i>Capacity/energy</i>)	Atributas nurodo, ar perkama galia ar energija.	Galia + energija
2.	Aktyvioji / reaktyvioji energija (angl. <i>Active / reactive energy</i>)	Atributas nurodo, ar perkama aktyvioji ar reaktyvioji galia/energija.	Aktyvi energija
3.	Reikalinga lokacija (taip/ne) (angl. <i>Location required (Y/N)</i>)	Atributas nurodo, ar perkant šią paslaugą yra svarbi konkreti paslaugos suteikimo lokacija.	Taip
4.	Pasiekiamumo lygis (angl. <i>Level of availability</i>)	Atributas nurodo, koks turi būti produkto pasiekiamumo lygis (t. y. kokia procentine dalimi jis turi būti pasiruošęs suteikti paslaugą bet kurio laiko momentu).	100%
5.	Pasirengimo laikotarpis (angl. <i>Preparation period</i>)	Laikotarpis nuo Operatoriaus prašymo pateikimo iki kitimo pradžios.	24 val.
6.	Suaktyvinimo laikas (angl. <i>Ramping period</i>)	Laikotarpis nuo Operatoriaus aktyvinimo prašymo pateikimo iki paslaugos suaktyvinimo.	15 – 60 min
7.	Minimalus privalomas laikotarpis produkto tiekimui (angl. <i>Minimum required duration of delivery period</i>)	Minimalus laiko tarpas, kurį lankstumo paslauga turi būti aktyvuota pilnu pajėgumu.	60 min – 12 val. (konkretus laikotarpis nusakomas kiekvieno pirkimo metu atskirai)
8.	Tiekimo laikotarpis (angl. <i>Delivery period</i>)	Laikotarpis, kurį lankstumo paslaugų teikėjas užtikrina visą prašomą energijos tiekimo į sistemą pakeitimą arba visą prašomą energijos vartojimo iš sistemos pakeitimą.	Apibrėžta pirkime
9.	Pasyvinimo laikotarpis (angl. <i>Deactivation period</i>)	Laikotarpis, per kurį energijos tiekimas arba vartojimas visu pajėgumu vėl sumažinamas iki nuostačio.	15 – 60 min
10.	Atsigavimo laikotarpis (angl. <i>Recovery period</i>)	Laikotarpis tarp išjungimo laikotarpio ir kitos aktyvacijos.	24 val.
11.	Maksimalus aktyvacijų skaičius (per dieną, savaitę) (<u>Maximum number of activations (per day, week...)</u>)	Maksimalus aktyvacijų skaičius per nurodytą laikotarpį.	1 kartą per dieną, 2 kartus per savaitę
12.	Aktyvacijos metodas (automatinis / rankinis) (<i>Required mode of activation</i>)	Atributas nurodo, ar paslauga turi būti aktyvuota automatiškai ar rankiniu būdu.	Galimi abu variantai
13.	Dalumas (turi nurodyti / neturi nurodyti) (angl. <i>Divisibility (Y accepted / Y required /N)</i>)	Lankstumo paslaugos teikėjas turi nurodyti, ar jo paslaugos pasiūlymas gali būti padalintas. T. y., ar jis gali paslaugą aktyvuoti dalinai ar tik pilnu pajėgumu. Galimybė Operatoriui panaudoti tik dalį lankstumo paslaugų teikėjo energijos arba pajėgumo siūlymo, galios aktyvinimo arba trukmės atžvilgiu.	Turi nurodyti
14.	Rezoliucija (angl. <i>Granularity</i>)	Galios / energijos mažiausias galimas pasiūlymo apimties padidėjimas.	1 kW

15.	Maksimali kaina (angl. <i>Maximum price</i>)	Maksimali kaina.	Apibrėžta pirkime
16.	Rezervacijos kaina (taip/ne) (angl. <i>Availability price</i> (Y/N))	Atributas nurodo, ar paslauga turi kainos dedamąją už lankstumo paslaugos prieinamumą (rezervacija).	Taip
17.	Aktyvacijos kaina (taip/ne) (angl. <i>Activation price</i> (Y/N))	Atributas nurodo, ar paslauga turi kainos dedamąją už realiai pristatytą paslaugą.	Taip
18.	Simetrinė / asimetrinė paslauga (angl. <i>Symmetric/asymmetric product</i>)	Atributas nurodo ar paslauga gali būti aktyvuota simetriškai ir (ar) asimetriškai. Simetrinė paslauga gali būti aktyvuota tokia pačia galia tiek prašant susimąžinti ar pasididinti savo vartojimą / gamybą. Asimetrinė paslauga nurodo, kad galios susimąžinimas ir padidinimas nebus vienodi.	Galimi abu variantai
19.	Leidžiamas telkimas (taip/ne) (angl. <i>Aggregation allowed</i> (Y/N))	Atributas nurodo, ar paslaugos galia / energija gali būti pasiekiami telkiant skirtingus objektus.	Taip
20.	Kryptis (angl. <i>Direction</i>)	Galimos dvi kryptys: + (up), kai pakeliama gamyba ar sumažinimas vartojimas ir – (down), kai sumažinama gamyba arba padidinimas vartojimas.	Galios pasididindimas ir susimąžinimas
21.	Kainos žingsnis (angl. <i>Price step</i>)	Nurodo kainos žingsnį už galią/energiją.	0,01 EUR/vienetas (kW arba MW)

Remiantis 1.5.1. skyrelyje pateiktu lankstumo paslaugos aprašymu, galima teigti, kad namų ūkis, turintis gaminančio vartotojo statusą ir įsirengęs baterijų kaupimo sistemą, gali būti vienas iš lankstumo paslaugos teikėjų.

1.5.3. „Fusebox“ projektas, jo veikla

„Fusebox“ yra Estijoje įkurta įmonė, kurios pagrindinis produktas, tai virtuali elektrinė - programinė įranga, padedanti vartotojui optimizuoti energijos gamybos ir vartojimo valdymo procesus [27].

„Fusebox“ šiuo metu yra vienintelė įmonė Baltijos šalyse, siūlanti energetikos sistemos balansavimo ir prekybos platformą, kurioje aktyvi prekyba vyksta Estijos ir Lietuvos rinkose. Bendrovė taip pat turi atstovus Latvijoje, Suomijoje, Lenkijoje, Malaizijoje, Šri Lankoje, Australijoje ir Brazilijoje [27].

Remiantis „Fusebox“ projekto puslapiu, lankstus energijos vartojimas – tai galimybė reguliuoti tuo metu sunaudojamos energijos kiekį pagal energijos prieinamumą. Sumažinti energijos suvartojimą didelės paklausos ir mažos pasiūlos laikotarpiais ir padidinti jį esant mažai paklausai ir didelei pasiūlai [27].

Tai gali būti atliekama [27]:

- naudojant išmaniuosius prietaisus, kurie automatiškai koreguoja energijos suvartojimą, priklausomai nuo paros laiko ar elektros kainos;
- dalyvaujant reagavimo į paklausą programose, kuriomis stambūs energijos vartotojai skatinami mažinti energijos suvartojimą piko valandomis išjungiant nebūtiną įrangą, koreguojant gamybos grafikus arba naudojant vietoje esančius generatorius;
- naudojant energijos kaupimo sistemas, iš atsinaujinančiųjų išteklių pagamintai energijai kaupti, kad ji būtų išleista į tinklą esant didelei paklausai;

- naudojant elektra varomų transporto priemonių išmanųjį įkrovimą esant mažam paklausos laikui ir energiją gražinant į tinklą didelės paklausos laikotarpiais, pasitelkiant transporto priemonių prijungimo prie tinklo (V2G) technologiją;
- naudojant pastato energijos valdymo sistemas (BEMS), kurios koreguoja energijos suvartojimą pagal užimtumą, temperatūrą ir kitus kintamuosius;
- koreguojant energijos gamybą pagal paklausą, naudojant elektros energijos generatorius, tokius kaip saulės elektrinės, vėjo turbinos ir hidroelektrinės.

„Fusebox“ funkcionalumas [27]:

- gamybos ir vartojimo stebėseną realiuoju laiku, generavimo šaltinių valdymas, veikiantis atsižvelgiant į energijos disbalansą taip sumažinant balansavimo energijos pirkimo išlaidas;
- „day-ahead“ ir „intra-day“ prekyba: efektyvus energetikos objektų valdymas pagal savo energijos rinkos išsipareigojimus, vykdant kainos stebėjimą realiuoju laiku. Tokiu būdu išnaudojamas valandinių kainų svyravimas finansinei naudai gauti;
- energijos kaupimo valdymas: energijos kaupimo valdymo funkcijų naudojimas pelningam energijos arbitražui, papildomoms paslaugoms (FCR, aFRR, mFRR) arba vietinio vartojimo padengimui. "Fusebox" programinė įranga automatizuoja bendradarbiavimą tarp vietinių gamybos ir vartojimo išteklių, neviršydamą tinklo perdavimo pajėgumų;
- lankstumo paslaugos papildomose rinkose: automatizuotos programinės įrangos naudojimas, pažangių reagavimo į paklausą paslaugų teikimui. Ryšių užmezgimas su perdavimo tinklo operatoriumi papildomų paslaugų prekybai, perdavimui ir ataskaitoms teikti.

1.5.4. „OneNet“ projektas, jo veikla

„OneNet“ (vienas tinklas Europai) yra programos „Horizontas 2020“ projektas, kurio pagrindinis tikslas yra „mažo anglies dioksido kiekio technologijų ir klimato kaitos poveikiui atsparios ateities kūrimas“. Projektas suburia konsorciumą, kurį sudaro daugiau kaip 70 partnerių, įskaitant pagrindinius IT srities atstovus, pirmaujančias mokslinių tyrimų institucijas ir dvi svarbiausias tinklų operatorių asociacijas [28].

Nors elektros tinklas pereina nuo visiškai centralizuotos prie labai decentralizuotos sistemos, tinklo operatoriai turi pakeisti savo veikimo procesus, kad prisitaikytų prie greitesnės reakcijos ir lankstumo tinklo valdyme išnaudojimo. „OneNet“ siekia padėti įgyvendinti šį svarbų etapą, sudarydama sąlygas naujos kartos tinklo paslaugoms, galinčioms visiškai išnaudoti reguliavimą apkrova, kaupimą ir paskirstytą gamybą, kartu sukuriant sąžiningas, skaidrias ir atviras sąlygas vartotojui. „OneNet“ tikslas yra sukurti lengvai pritaikomą ir lengvai plėtojama architektūrą, leidžiančią visai Europos elektros sistemai veikti kaip vienai sistemai [28].

Pagrindinė „OneNet“ projekto statistika [28]:

- 72 projekto partneriai;
- projekte dalyvauja 23 šalys (taip pat ir Lietuva);
- projektas pritraukė 28 mln. Eurų investicijų;
- projekto vykdymo trukmė yra 3 metai.

„OneNet“ 7 žingsnių veikimo principas [28]:

1. naujų ir standartizuotus produktų ir paslaugų nustatymas, remiantis praeities projektų patirtimi;
2. tinkamų rinkos struktūrų nustatymas, kuriomis būtų paremti nustatyti produktai ir paslaugos;

3. atvirosios IT architektūros kūrimas, paremtas keičiamo dydžio duomenų valdymu, įgalinančiu rinkos struktūras;
4. architektūros diegimas pavyzdinėje versijoje, kuri bus naudojama kaip „OneNet“ diegimo Europoje pagrindas;
5. „OneNet“ siūlomų koncepcijų ir sprendimų patikrinimas dideliame realaus veikimo bandymų rinkinyje;
6. informacijos apie „OneNet“ projektą sklaida Europoje tarp pagrindinių suinteresuotųjų šalių organizuojant „GRIFOn“ forumo mokymus;
7. „OneNet“ standartizacijos proceso rezultatų palaikymas ir gerinimas, kad būtų užtikrintas reikalingas įsisavinimas rinkoje.

„OneNet“ projekto įgyvendinimas buvo vykdomas 4 etapais [28]:

- 2020 metais buvo kuriami lankstumo valdymo Europoje principai ir sprendimai;
- 2021 metais buvo vystoma sklandi projekto integracija tarp projekto partnerių;
- 2022 metais atliekami bandymai realiame plataus masto veikime Europoje bei renkami ir analizuojami gauti bandymų rezultatai;
- nuo 2022 metų projektas vystomas, tobulinamas ir standartizuojamas platesnei rinkai ir veikimo komercializavimui.

Apžvelgus literatūrą, galima daryti išvadą, kad vartotojo įtraukimo į lankstų elektros sistemos tinklo valdymą įgyvendinimui, turėtų būti pasitelkiamos atsinaujinančiais šaltiniais ir baterijų kaupyklomis paremtos sistemos, jas naudojant kartu su išmaniųjų tinklų koncepcijomis, kainomis grindžiamu reguliavimo apkrova procesu bei išmaniojo matavimo sistema. Reguliavimo apkrova procesas, suteikiant tam tikrų buitinių prietaisų naudojimo valdymą tinklo operatoriui, nėra patrauklus būdas privačiam namų ūkiui, kadangi kasdienis komfortas, paprastam vartotojui, yra svarbesnis nei ekologijos ar minimalaus kaštų sutaupymo klausimai.

Apžvelgus lankstumo paslaugų projektus Lietuvoje ir Europoje, galima pastebėti, kad jie yra sparčiai vystomi ir rengiami pritaikyti plačiam naudojimui įvairiose rinkose. „Fusebox“ ir „OneNet“ projektai yra labiau skirti komerciniams vartotojams ir lankstumo paslaugų įgyvendinimui šalies ir perdavimo tinklo mastu. ESO lankstumo paslaugų projektas galėtų būti puiki platforma buitiniam vartotojui, norinčiam bei galinčiam teikti lankstumo paslaugas.

Kadangi Lietuvoje ir visame pasaulyje vis labiau populiarėja privačių saulės elektrinių įsirengimas, kurių išnaudojimo efektyvumui padidinti galima įrengti baterijų kaupimo sistemas, ir jas papildomai panaudoti teikiant lankstumo paslaugas elektros energijos skirstymo operatoriui, šiame darbe toliau ir bus nagrinėjami būtent tokie vartotojų hibridiniai mikrotinklai. Jų veikimas bus modeliuojamas iš buitinio vartotojo perspektyvos, atsižvelgiant į galimas tokios sistemos diegimo ir lankstumo paslaugos teikimo naudas.

2. Tyrimo metodika

Vartotojų įtraukimo į lankstų elektros sistemos valdymą, panaudojant privačias baterijų energijos kaupimo sistemas, tyrimui atlikti, reikės nagrinėti kelis šio proceso scenarijus bei aspektus. Tam, kad tyrimo planavimas būtų sklandesnis, sudaromas tyrimo planas, pagal kurį vėliau aprašoma tyrimo metodologija ir atliekamas pats tyrimas:

- nustatyti ir aprašyti 3 tipinius nekomercinių vartotojų profilius, kurių elgsena ir namų ūkių elektros sistemų galimybės bus modeliuojamos ir tiriamos;
- surinkti ir aprašyti namų ūkių elektros energijos vartojimo duomenis pagal kiekvieną aprašytą vartotojo tipą, naudojantis AB „Energijos skirstymo operatoriaus“ pateikiamais duomenimis;
- naudojantis informacijos šaltiniais, surinkti modeliavimui bei ekonominiam vertinimui reikalingus duomenis;
- aprašyti modeliavimo scenarijus, kuriuose bus atsižvelgta į skirtingus privačios namų ūkio sistemos aspektus;
- aprašyti „*Microgrid-EMS-Optimization-master*“ MATLAB modelį, kuriuo naudojantis bus atliekamas namų ūkių elektros sistemų modeliavimas skirtingais scenarijais;
- atlikti modeliavimą, pasitelkiant aprašytą MATLAB modelį;
- atlikti skaičiavimus „Excel“ skaičiuoklėje, vertinant lankstumo paslaugos teikimo įgyvendinimą;
- apdoroti gautus modeliavimo duomenis ir atlikti ekonominę gaminančių vartotojų baterijų kaupimo sistemų diegimo galimybių analizę.

Toliau, kiekviename metodikos skyriaus poskyryje, bus aprašyti pasiruošimo tyrimui etapai, pagal sudarytą tyrimo planą.

2.1. Tipinių vartotojų profilių aprašymas

Namų ūkių sistemų modeliavimui, pasirenkami 3 vartotojų tipai, pagal įrengtą saulės elektrinės ir kaupimo sistemos galią bei pagal suvartojamą elektros energijos kiekį per metus. Nustatant tipinius vartotojų profilius yra supaprastinamas modeliavimo procesas, priimant, kad didžioji dalis vartotojų, atitiktų kažkurį vieną iš nustatytų tipų. Parenkami parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Namų ūkių sistemų tipų aprašymas

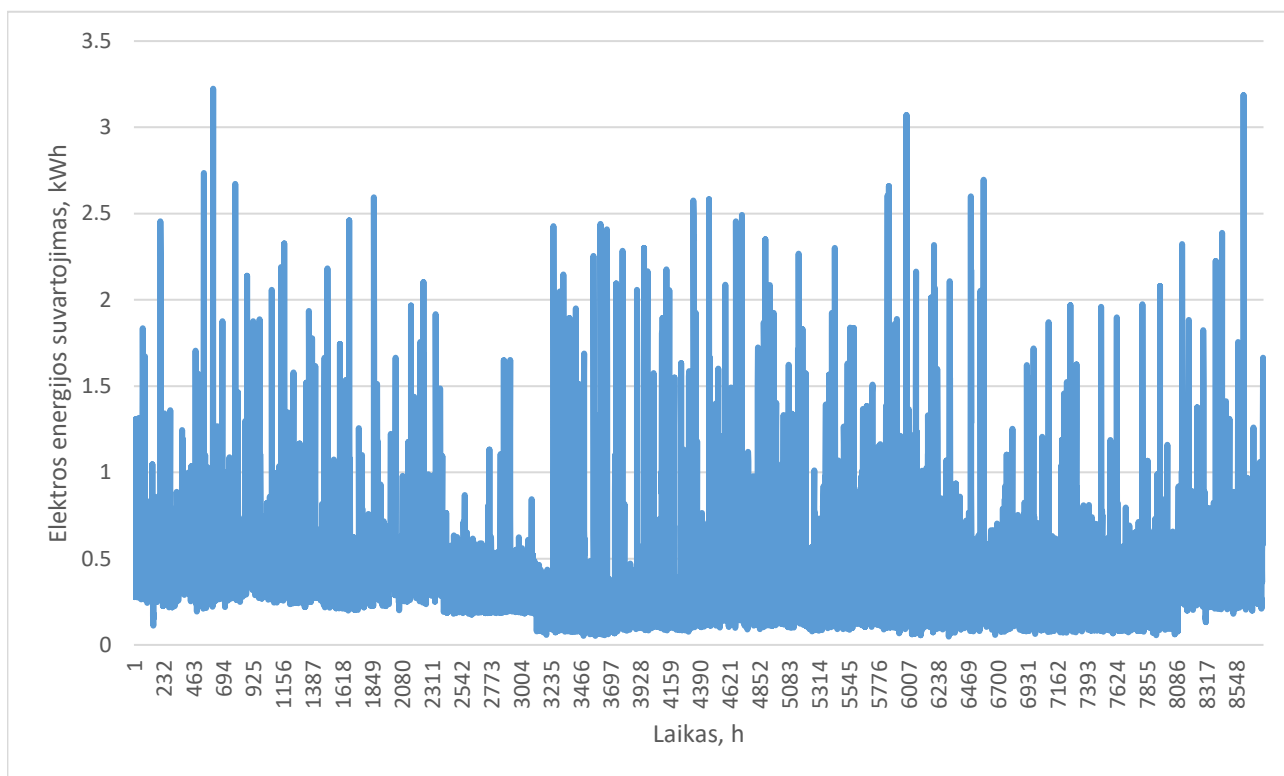
Namų ūkio sistemos tipas	I tipas	II tipas	III tipas
Suvartojamas elektros energijos kiekis per metus	~4000 kWh	~10000 kWh	~30000 kWh
Saulės elektrinės įrengtoji galia	5 kW	10 kW	30 kW
Baterijų kaupimo sistemos parametrai	5 kW, 1 valandos, 2 valandų arba 4 valandų	10 kW, 1 valandos, 2 valandų arba 4 valandų	30 kW, 1 valandos, 2 valandų arba 4 valandų

2.2. Namų ūkių elektros energijos vartojimo duomenys

Vartotojų apkrovos kreivių nustatymui pasinaudojama viešai prieinamais duomenų rinkiniais iš AB „Energijos skirstymo operatorius“. Naudojami 2021 metų, buitinių vartotojų automatizuotų apskaitų neagreguoti valandiniai duomenys [29].

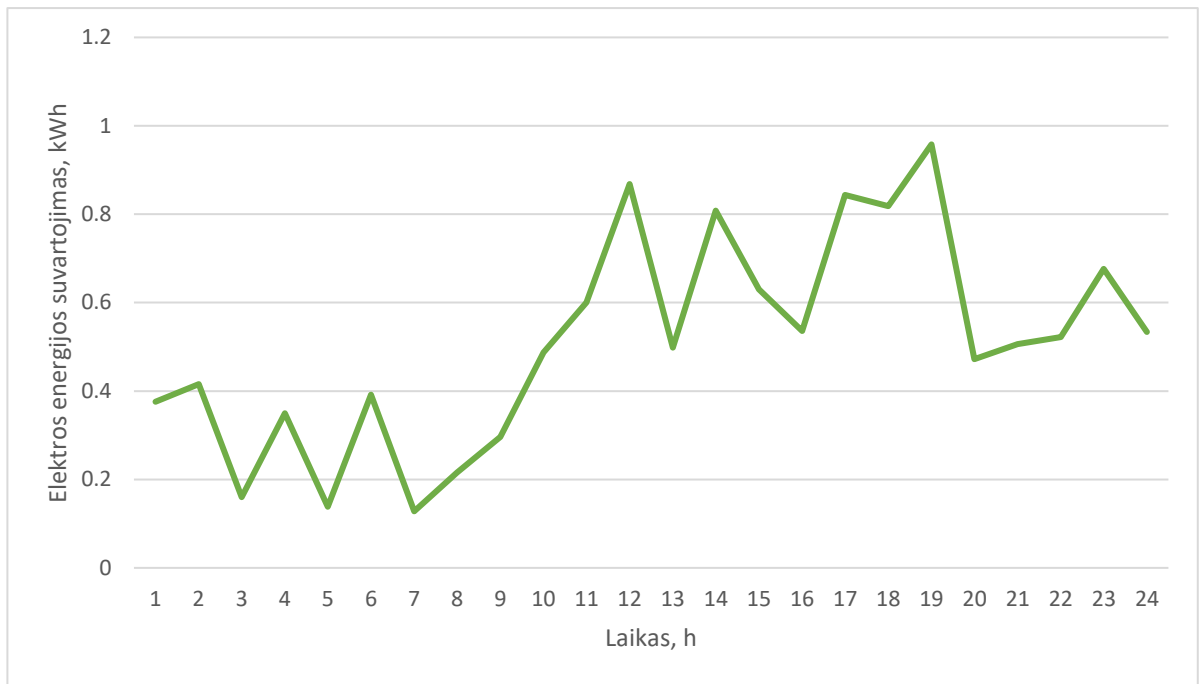
2.2.1. I tipo vartotojo apkrovos kreivės

Pagal pirmąjį aprašytą vartotojo tipą parenkame vartotoją, kurio metinis suvartojimas yra ~3899 kWh per metus. Bendro metinio suvartojimo grafikas pateikiamas 8 paveiksle.



8 pav. I tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas

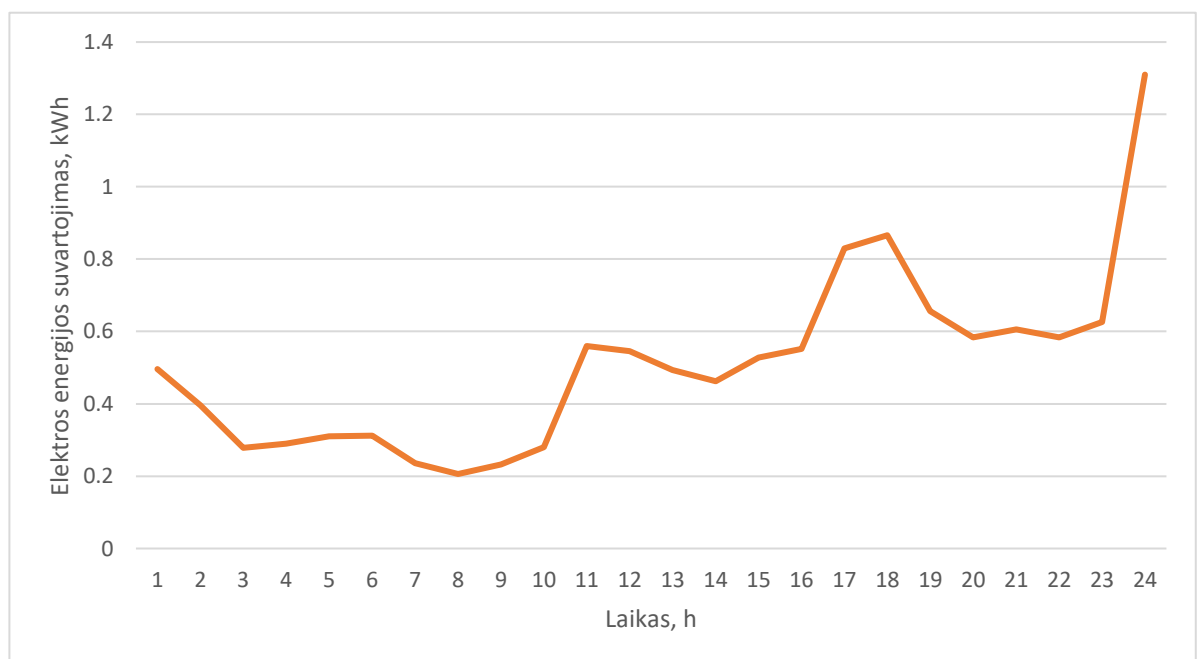
Remiantis grafike pateiktais duomenimis, galime matyti, kad I tipo vartotojo suvartojimo kreivėje yra silpnas sezoniskumas, kuomet vartojimas yra šiek tiek didesnis žiemą ir minimaliai mažesnis vasarą. Taip pat galima matyti, kad yra daug vartojimo pikų ir šuolių. Tolimesnei analizei nagrinėsime dvi tipines metų darbo dienas, vieną žiemos laikotarpiu ir kitą – vasaros laikotarpiu. Tai padės nustatyti kokiomis dienos valandomis atsiranda didžiausi vartojimo momentai. Vasaros diena pasirinkta liepos 19 diena. Paros elektros energijos suvartojimo kreivė pateikiama 9 paveiksle.



9 pav. I tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną

Iš grafiko nustatoma, kad didžiausi pikai vasaros darbo dieną yra 12 valandą, 14 valandą ir 19 valandą. Analizuojant kitų vasaros parų duomenis, matoma panaši tendencija, kai pikas pasiekiamas 14 valandą. I vartotojo vartojime yra didelis nepastovumas, kadangi ryškių pikų nėra, nes vartojimas yra sąlyginai nedidelis.

Tipine žiemos diena pasirenkama gruodžio 20 diena. Paros elektros energijos suvartojimo kreivė pateikiama 10 paveiksle.

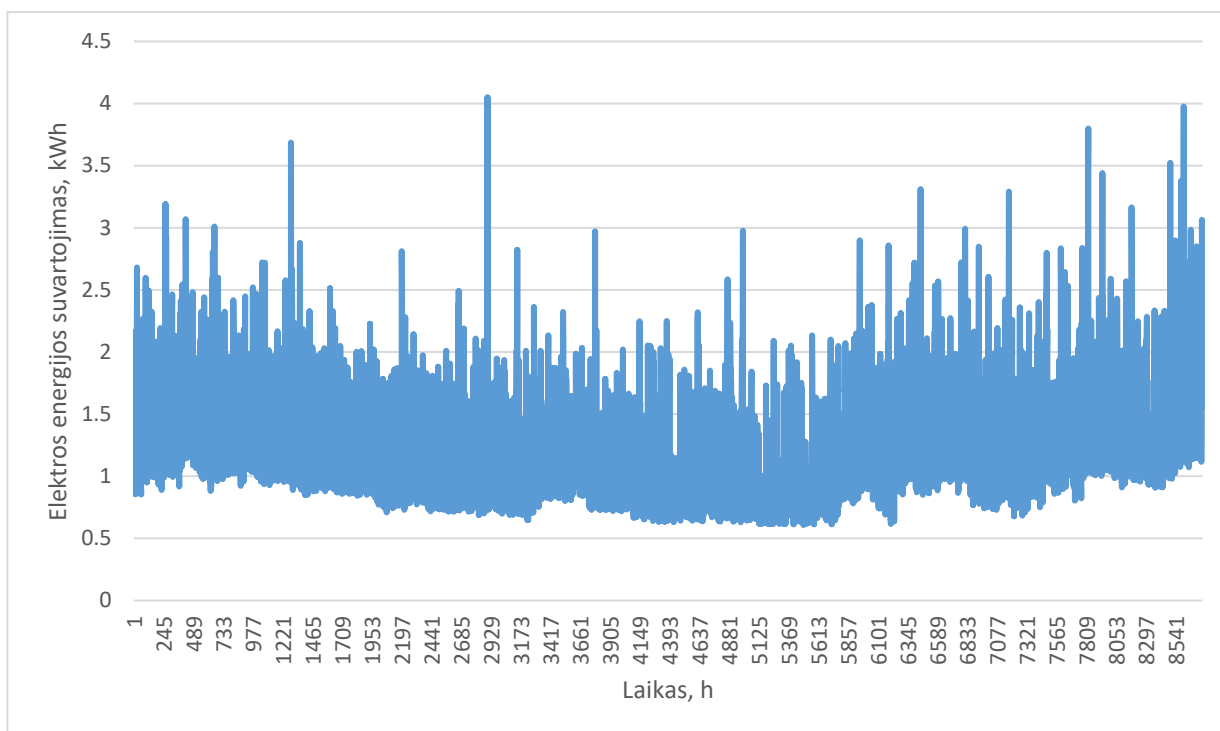


10 pav. I tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną

Grafike matoma, kad pikinės vartojimo valandos yra panašios kaip ir vasaros darbo dieną. Pikai yra 11–12 valandą, 18 valandą ir vartojimo šuolis 24 valandą.

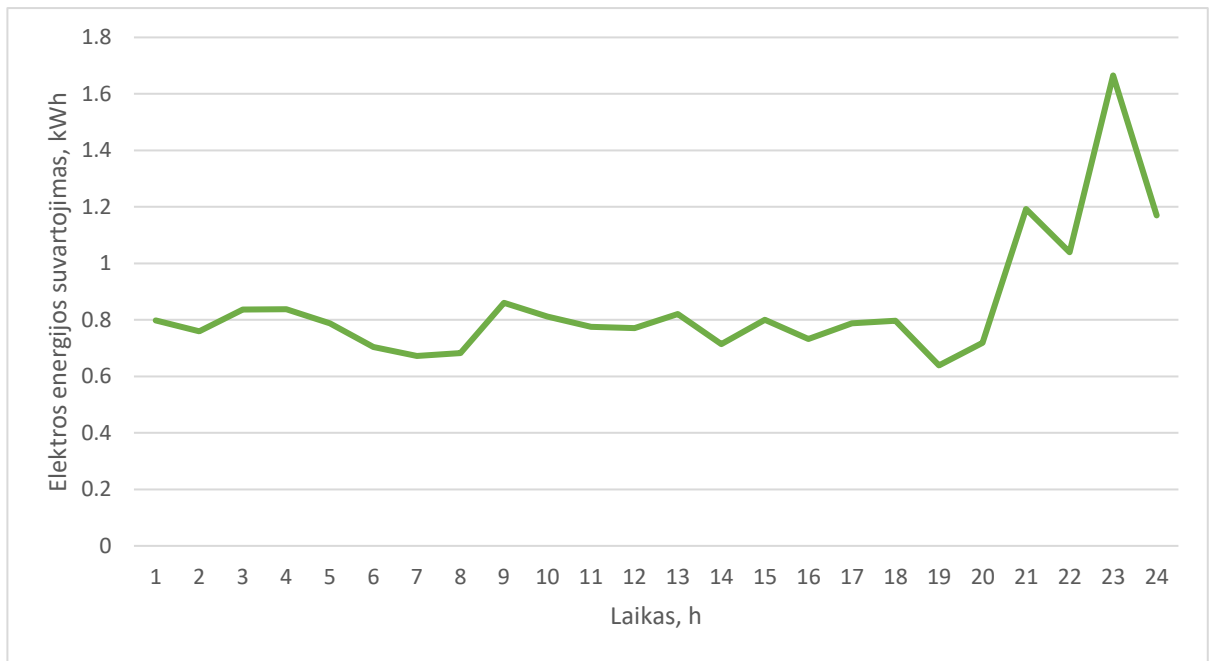
2.2.2. II tipo vartotojo apkrovos kreivės

Pagal antrąją aprašytą vartotojo tipą, parenkamas vartotojas, kurio metinis suvartojimas yra ~9978 kWh per metus. Bendro metinio suvartojimo grafikas pateikiamas 11 paveiksle.



11 pav. II tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas

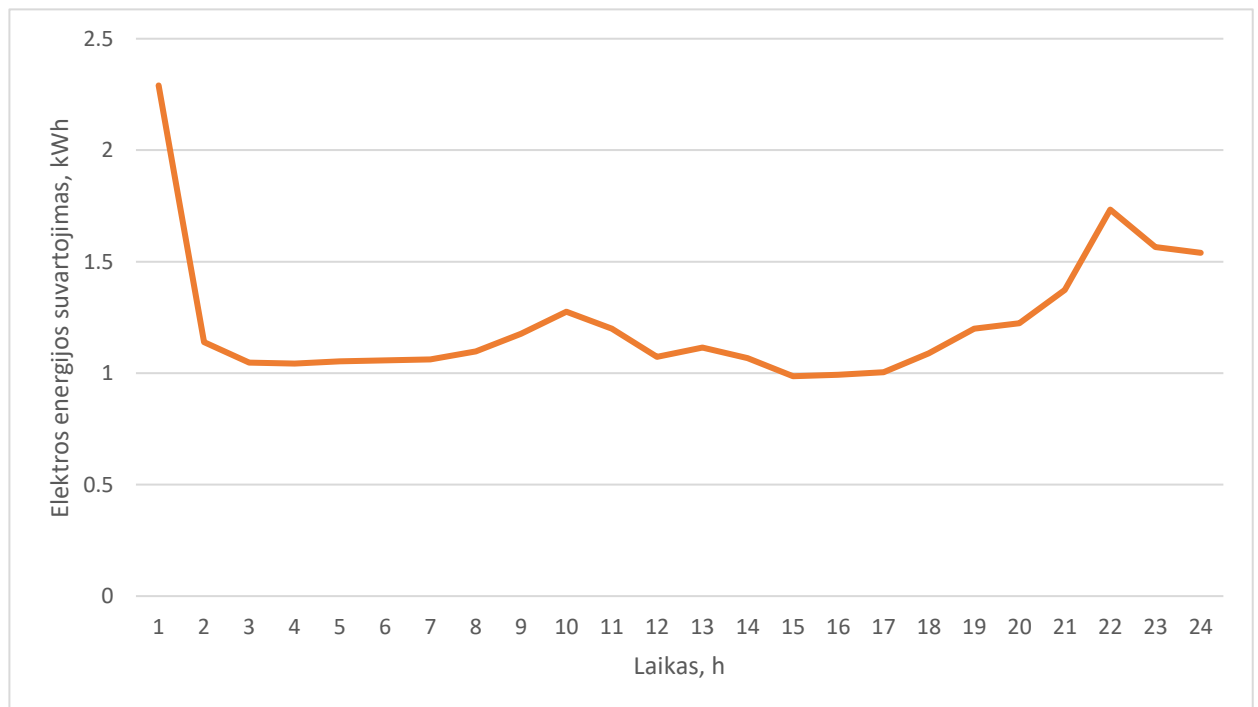
Remiantis grafike pateiktais duomenimis, galima matyti, kad II tipo vartotojo suvartojimo kreivėje yra šiek tiek stipresnis sezoniškumas nei I tipo vartotojo atveju. Vartojimas yra didesnis žiemą ir minimaliai mažesnis vasarą. Taip pat galima matyti, kad pagrindiniai vartojimo režiai yra tarp 1 kWh ir 2 kWh per valandą. Toliau atliekama analogiška paros elektros energijos suvartojimo analizė kaip ir pirmojo tipo vartotojui. Vasaros darbo dienos suvartojimo kreivė pateikiama 12 paveiksle.



12 pav. II tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną

Iš grafiko nustatoma, kad didžiausi pikai vasaros darbo dieną yra 21 valandą ir 23 valandą. Analizuojant kitų vasaros parų duomenis, matoma panaši tendencija, kai pikas pasiekiamas 18–20 valandomis ir retkarčiais 22–23 valandomis. Kiti pastebimi pikai yra apie 12 valandą dienos, bet jie yra mažiau pasikartojantys.

Tipinė žiemos paros elektros energijos suvartojimo kreivė pateikiama 13 paveiksle.

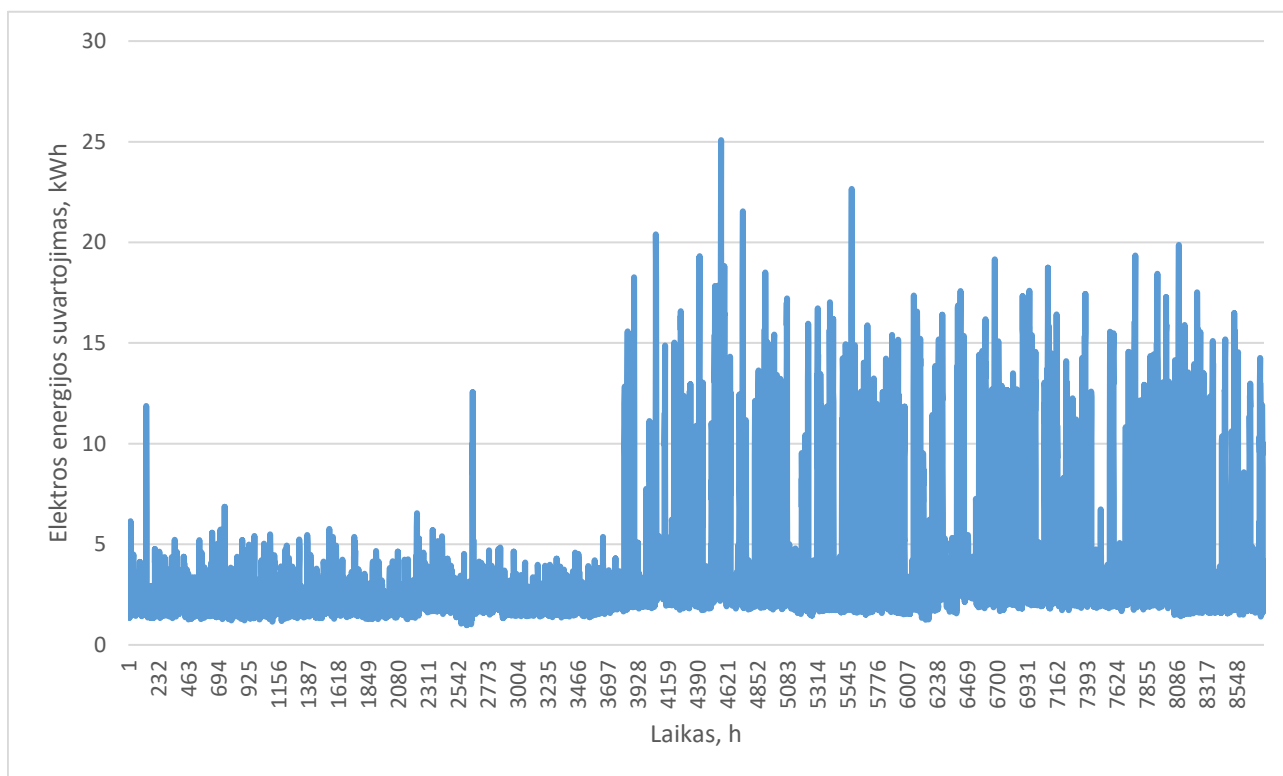


13 pav. II tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną

Žiemos paros vartojimo grafike vėl pastebimas tas pats 22 valandos vartojimo pikas. Tai pat atsiranda didelis vartojimas 1–2 valandomis. Dienos eigoje vartojimas pastovus. Analizuojant kitų žiemos parų duomenis taip pat pastebimi 18–20 valandų pikai, bei retais atvejais, 12–15 valandų pikai. Taigi, tendencija išlieka panaši kaip ir vasaros metu, tačiau bendrai vartojimas yra šiek tiek didesnis.

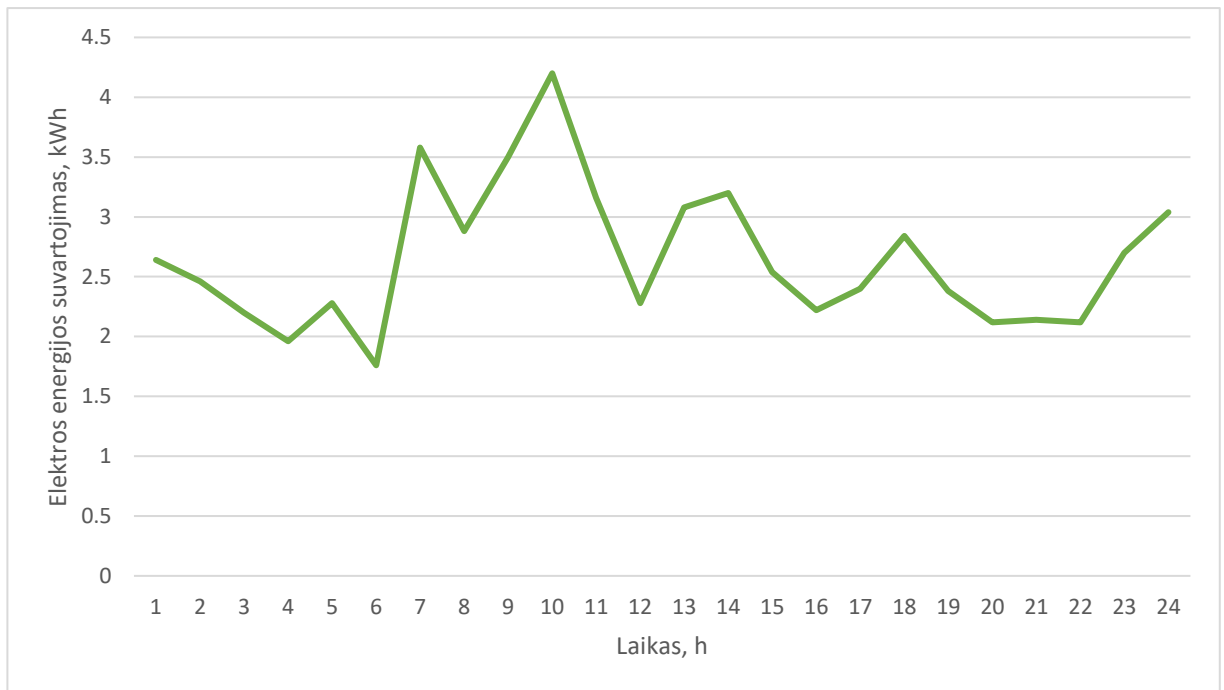
2.2.3. III tipo vartotojo apkrovos kreivės

Pagal trečiąją aprašytą vartotojo tipą, parenkamas vartotojas, kurio metinis suvartojimas yra ~30578 kWh per metus. Bendro metinio suvartojimo grafikas pateikiamas 14 paveiksle.



14 pav. III tipo vartotojo metinio elektros energijos suvartojimo grafikas

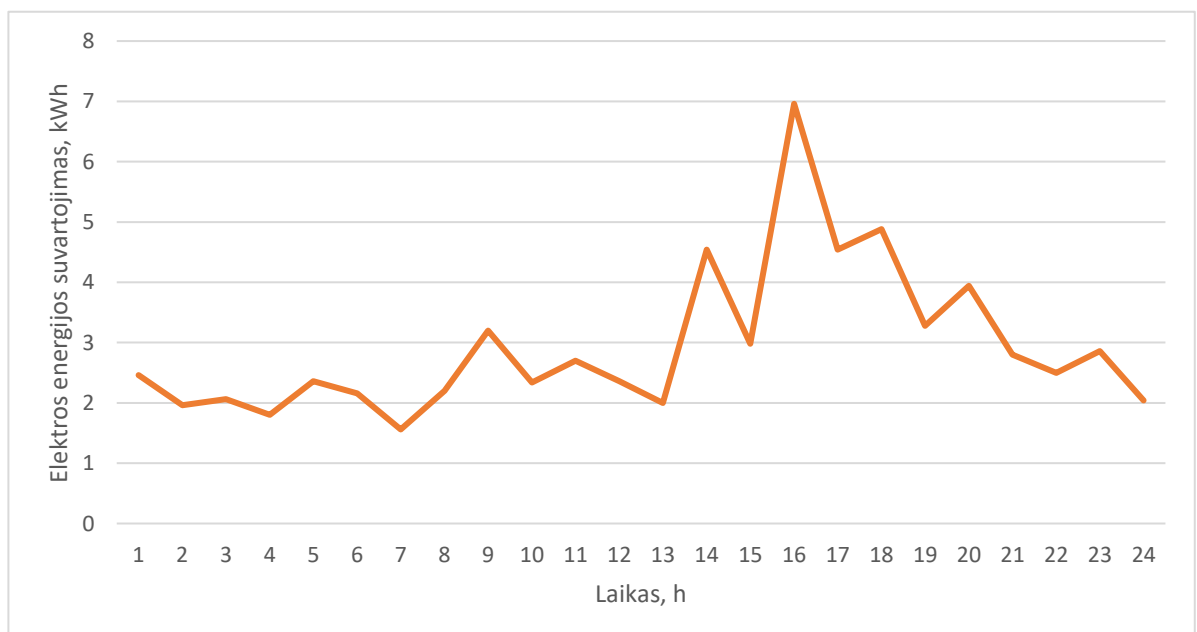
Remiantis grafike pateiktais duomenimis, galima matyti, kad III tipo vartotojo suvartojimo kreivėje sezoniškumas yra mažiau pastebimas, tačiau maždaug nuo birželio vidurio, atsiranda papildomas vartojimas. Taip gali būti dėl to, kad namų ūkis įsigijo elektromobilį arba įsirengė elektrinio šildymo / vėsinimo įrenginį. Toliau atliekama analogiška paros elektros energijos suvartojimo analizė kaip ir pirmojo bei antrojo tipo vartotojams. Vasaros darbo dienos suvartojimo kreivė pateikiama 15 paveiksle.



15 pav. III tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas vasaros darbo dieną

Iš grafiko nustatoma, kad didžiausi pikai vasaros darbo dieną yra 7–10 valandomis, 14 valandą, 18 valandą ir 24 valandą. Analizuojant kitų vasaros parų duomenis, matoma didesnio vartojimo tendencija 9–14 valandomis, taip pat pikas pasiekiamas 18 valandą ir retkarčiais 22–24 valandomis. Atsižvelgiant į tai galima numanyti, kad yra naudojamosi kondicionavimo įrenginiai vėšiai namų vidaus temperatūrai palaikyti karštomis dienomis.

Tipinė žiemos paros elektros energijos suvartojimo kreivė pateikiama 16 paveiksle.



16 pav. III tipo vartotojo paros suvartojimo grafikas žiemos darbo dieną

Grafike matomi pikai yra 14 valandą ir 16 valandą. Analizuojant kitų žiemos dienų suvartojimo duomenis matomi 16–19 valandų pikai, taip pat kai kuriomis dienomis matomas vartojimo kilimas nuo 9 iki 14 valandos ir mažėjimas iki 19 valandos.

Apžvelgus visų 3 vartotojų suvartojimo kreives, galima pastebėti, kad pagrindiniai vartojimo pikai susidaro 16–19 valandomis, taip pat ryte 6–9 valandomis ir vėlai vakare 22–23 valandomis. Pagal šį vertinimą, skaičiavimų atlikimui bus priimama, jog skirstomojo tinklo operatorius, lankstumo prašys būtent šių vartojimo pikų metu.

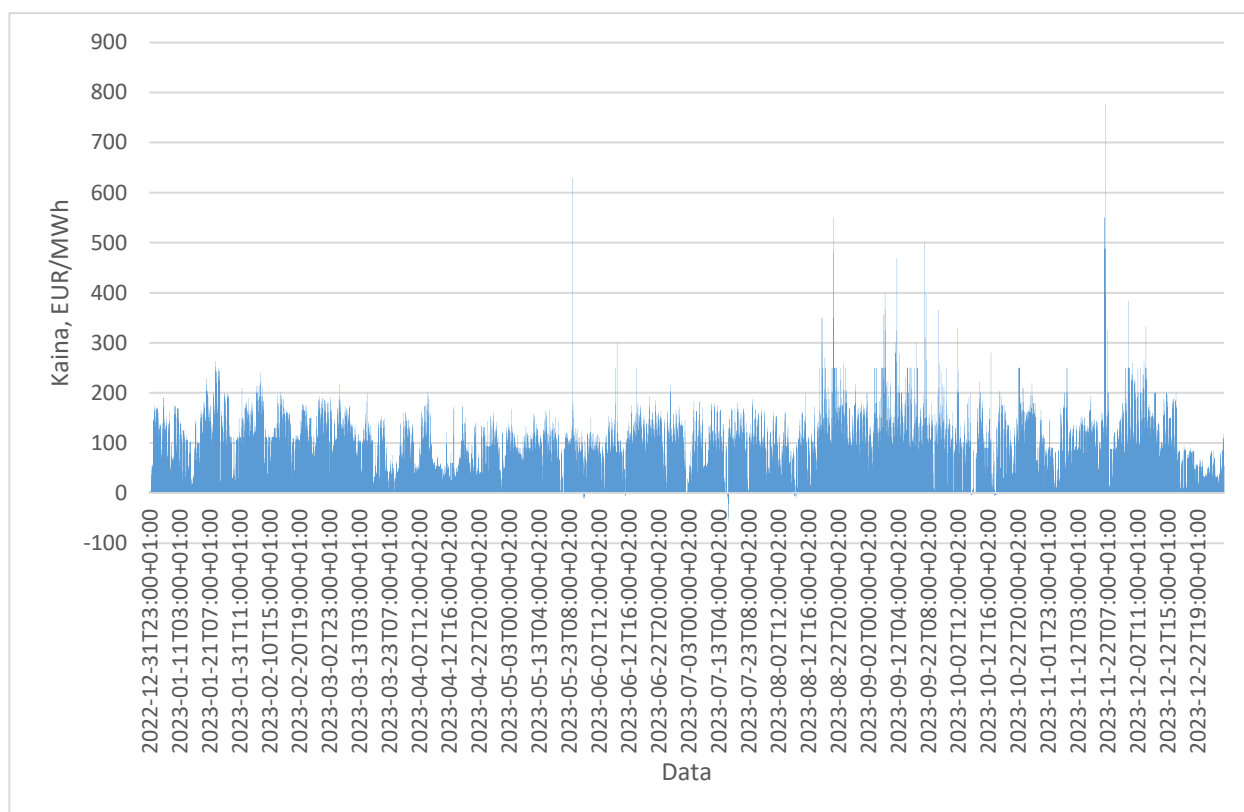
2.3. Reikalingi duomenys tyrimui atlikti

Modeliavimui ir ekonominiam modeliavimo rezultatų bei skirtingų tipų sistemų diegimo galimybių vertinimui atlikti, reikia surinkti ir nustatyti šiuos duomenis:

- „NordPool“ biržos elektros energijos kainos Lietuvos regionui;
- saulės apšvietos duomenys;
- privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos įdiegimo, įrangos bei priežiūros kaštai.

2.3.1. „NordPool“ biržos elektros energijos kainos Lietuvos regionui

Elektros energijos supirkimo kainos įvertinimui, naudojami „NordPool“ biržos kainų duomenys. Pasirenkamas 2023 metų laikotarpis. Kainų kitimas „dienos prieš“ (*angl. Day-ahead*) rinkoje 2023 metais pateikiamas 17 paveiksle [30].



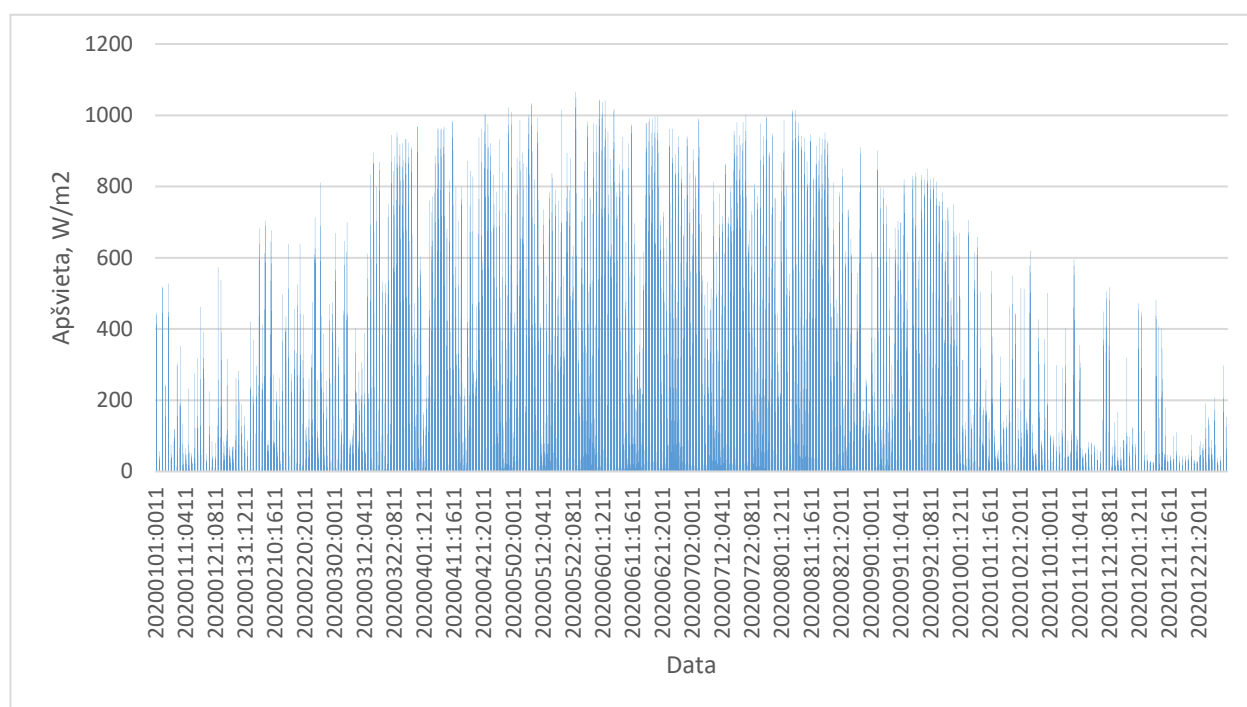
17 pav. 2023 metų „Day-ahead“ rinkos elektros kainų Lietuvoje kitimas [30]

Iš gautų duomenų galima matyti, kad kainų vidurkis 2023 metais „NordPool“ „Day-ahead“ rinkoje buvo apie 9,5 cento už kilovatvalandę.

Modeliavimui atlikti, daroma prielaida, kad elektros energiją vartotojas pirks ir parduos „NordPool“ „Day-ahead“ rinkos kainomis.

2.3.2. Saulės apšvietos duomenys Lietuvoje

Saulės apšvietos duomenys gaunami naudojantis viešai prieinama PVGIS duomenų baze. Duomenų laikotarpis yra 2020 metai (naujausi prieinami duomenys). Duomenų vertės yra fiksuojamos vertinant optimistiškiausią scenarijų - saulės elektrinė yra orientuota į pietus. Pasirinktas saulės spindulių kritimo kampas yra 25 laipsniai. Gauti duomenys grafiškai atvaizduojami 19 paveiksle [31].



18 pav. 2020 metų saulės apšvietos Lietuvoje duomenys [31]

Kaip matoma iš grafiko, apšvietai didelę įtaką turi sezoniškumas. Taip pat iš grafiko galima nustatyti, kad maksimalios apšvietos verčių vidurkis yra apie 1000 W/m². Toliau šie duomenys naudojami modelyje, saulės elektrinės gamybos simuliacijoje.

2.3.3. Privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos įdiegimo, įrangos bei priežiūros kaštai

Ekonominiam vertinimui atlikti, reikia įvertinti, kokie bus privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos kaštai. Šie kaštai susidaro iš įrangos kainos bei įrengimo darbų kainos. Kadangi tokios sistemos nereikalauja daug priežiūros ir dažniausiai atsiradę gedimai yra šalinami garantinio aptarnavimo metu, priimama, kad tokių sistemų aptarnavimo kaštai bus lygūs 0.

Naudojantis įmonės „Saulės Grąža“ tinklalapiu, nustatoma, kad 10 kWh „Huawei“ baterijų sistemos su įrengimo darbais kaina yra 6700 eurų [32]. Ši kaina yra vertinant, kad namų ūkyje jau yra įrengta saulės elektrinė ir sumontuotas keitiklis, turintis galimybę baterijų sistemos prijungimui. Kitu atveju, keitiklio kaina papildomai yra 1850 eurų už 10 kW galios „Huawei“ keitiklį [33].

3 lentelė. Privataus namų ūkio baterijų kaupimo sistemos kaštai

	Kaina, eur/kWh
Sistema su saulės elektrine	670
Sistema be saulės elektrinės	860

2.4. Modeliavimo metodika

Modeliavimas atliekamas skirtingais scenarijais. Jais vertinama, kokius kaštus patiria vartotojas turintis skirtingų konfigūracijų elektros sistemas ir vartojimo iš tinklo procesą optimizuojant taip, kad tie kaštai būtų kuo mažesni. Taip pat vertinama, kokią naudą gautų vartotojas ir tinklo operatorius, jei vartotojas teiktų lankstumo paslaugas skirstomojo tinklo operatoriui ir taip prisidėtų prie tinklo valdymo lankstumo didinimo.

Baterijų kaupimo sistemos, gali būti panaudojamos keliais skirtingais būdais. Jie aprašomi apačioje [34].

Gamybos piko panaudojimas (angl. *peak shaving*) - paprasčiausia skirstymo strategija, kuria siekiama saugoti energijos gamybos perteklių, kad jis būtų tiekiamas į tinklą mažos gamybos laikotarpiais. Tokiu būdu apribota energija iš generacijos piko yra atkuriamas ir vėl suleidžiama ne piko valandomis. Tokiu būdu akumulatorius įkraunamas, kai tik PV generacija viršija fiksuotą energijos panaudojimo (atidavimo į tinklą arba apkrovos padengimo) ribą. Akumulatorius pradamas iškrauti, kai gamyba nukrenta žemiau šios ribos. Akumulatorius niekada neįkraunamas energija iš tinklo [34].

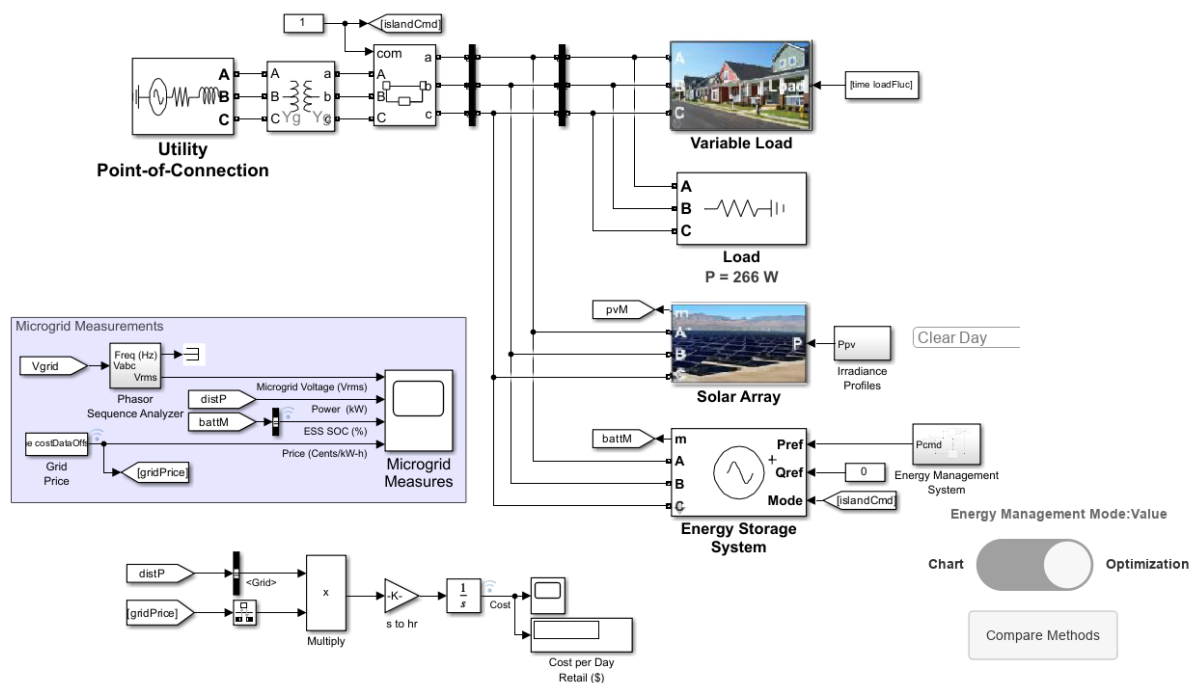
Savarankiško (vietinio) vartojimo strategija siekiama kuo labiau sumažinti elektros energijos mainus su tinklu. Tai daroma teikiant pirmenybę baterijų įkrovimui, o ne elektros atidavimui į tinklą. Tada sukaupta energija naudojama tam tikram apkrovos profiliui padengti, kai energijos gamyba iš saulės elektrinės yra maža. Akumulatorius nesąveikauja su tinklu, jis įkraunamas tik iš PV sistemos ir iškraunamas atsižvelgiant į apkrovos poreikį [34].

Silpno tinklo salos režimo palaikymo strategija (angl. *weak grid islanding*), kuri naudoja akumulatoriaus saugyklą kaip atsarginę tinklo imitaciją, kad būtų galima naudoti elektros energiją namų ūkyje net įvykus elektros tinklo gedimui ir nuo jo atsijungus. Šiuo režimu akumulatorius taip pat naudojamas savarankiško vartojimo apkrovos profiliui padengti, tačiau akumulatoriaus iškrovimo lygis normaliai veikiant yra apribotas iki ribos, leidžiančios išlaikyti apkrovos profilį galimo tinklo gedimo metu. Kai įvyksta tinklo gedimas, akumulatoriui leidžiama išsikrauti iki žemesnio lygio. Šiose simuliacijose naudotojas gali pasirinkti, ar pagaminta elektros energija iš fotovoltinės sistemos gali būti atiduodama į tinklą, ar ne. Tačiau šia strategija neleidžiama įkrauti ar iškrauti akumulatoriaus iš tinklo ar į jį [34].

Simuliuojant minėtas tipines vartotojų sistemas, skirtingais scenarijais, parenkama gamybos piko panaudojimo (angl. *peak shaving*) strategija, kuri leis teikti lankstumo paslaugą skirstomojo tinklo operatoriui, bei savarankiško vartojimo strategija, kuomet vartotojo kaupimo sistemos valdymo tikslas – asmeninių elektros energijos kaštų sumažinimas, t.y. kuo mažesnio elektros energijos kiekio pirkimas iš tinklo.

2.4.1. Modeliavimo, naudojantis „MATLAB“ optimizaciniu modeliu, metodika

Tyrimui naudojamas „MATLAB“ ir „Simulink“ paketus pasitelkiantis optimizacinis modelis „Microgrid-EMS-Optimization-master“ [35]. Modelio principinė schema pateikiama 20 paveiksle.



19 pav. Tyrimo modelio veikimo principinė schema [35]

Schemą sudaro šie elementai:

1. tinklas;
2. kintanti apkrova;
3. pastovi apkrova;
4. saulės elektrinė;
5. baterijų energijos kaupimo sistema;
6. baterijų valdymo sistema;
7. kainos apskaičiavimo blokas;
8. mikrotinklo parametrų matavimo blokas.

Modelio įvesties duomenys:

1. saulės apšvietos duomenys;
2. elektros kainų duomenys;
3. elektros energijos suvartojimo duomenys;
4. saulės elektrinės galia;
5. baterijų kaupimo sistemos talpa ir galia;
6. modeliavimo laiko periodas.

Modeliavimo laiko periodui yra parenkama 8760 valandų.

Atlikus optimizacinį modeliavimą, gaunami ir nuskaitomi duomenys:

1. elektros energijos srautas iš tinklo;
2. saulės elektrinės pagaminamas elektros energijos kiekis;
3. baterijų įkrovimo lygis;
4. baterijų įkrovimo / iškrovimo galia;
5. vartotojo patiriami kaštai už elektros energiją.

Optimizavimo uždavinys modelyje yra sprendžiamas siekiant minimizuoti kaštus, už elektros energiją, kurie yra apskaičiuojami pagal 1 formulę [35]:

$$C_{sum} = \sum_{k=0}^N C_{tinklo}(k) \cdot E_{tinklo}(k); \quad (1)$$

C_{sum} – kaštai; C_{tinklo} – perkamos iš tinklo elektros energijos kaina; E_{tinklo} – perkamos iš tinklo elektros energijos kiekis.

Modelyje yra nustatyti tam tikri apribojimai [35]:

Baterijos įkrovimas / iškrovimas aprašomas pagal 2 formulę:

$$E_{bat}(k) = E_{bat}(k - 1) + P_{bat}(k)\Delta T; \quad (2)$$

E_{bat} – baterijoje sukaupta energija, laiko momentu k ; P_{bat} – baterijos įkrovimo / iškrovimo galia.

Baterijos įsikrovimo efektyvumo procentas - 90%, baterijos išsikrovimo efektyvumo procentas - 95%.

Galios balansas aprašomas pagal 3 formulę:

$$P_{ap}(k) = P_{pv}(k) + P_{tinklo}(k) + P_{bat}(k); \quad (3)$$

P_{ap} – apkrova; P_{pv} – saulės elektrinės generuojama galia; P_{tinklo} – sistemos mainų su tinklu momentinė galia; P_{bat} – baterijos įkrovimo / iškrovimo momentinė galia.

Saulės elektrinės generuojama galia apskaičiuojama pagal 4 formulę:

$$P_{pv}(k) = A_{pv}(k) \cdot S_{pv} \cdot Ef_{pv}; \quad (4)$$

P_{pv} – saulės elektrinės generuojama galia; A_{pv} – saulės apšvieta; S_{pv} – saulės modulių užimamas plotas; Ef_{pv} – saulės modulio efektyvumo procentas, modelyje priimamas kaip 30%.

Saulės modulių užimamas plotas apskaičiuojamas pagal 5 formulę:

$$S_{pv} = \frac{G_{pv}}{G_{mod}} \cdot S_{mod}; \quad (5)$$

G_{pv} – saulės elektrinės nominali instaliuota galia, kW; G_{mod} – saulės modulio nominali galia, priimama kaip 500 W; S_{mod} – vieno 500 W galios saulės modulio užimamas plotas – modelyje priimamas kaip 2,6 m².

Modelyje, optimizavimas atliekamas naudojantis linijinio optimizavimo principu. Optimizavimo lygtis aprašoma taip:

$$\min_x f^T x \text{ (minimizuoti taip, kad) } - \begin{cases} A * x \leq b \\ A_{eq} * x = b_{eq} \end{cases}; \quad (6)$$

x vertės optimizavimui:

- $P_{tinklo}(1:N)$ – sistemos mainų su tinklu galia, laiko momentais nuo 1 iki N ;
- $P_{bat}(1:N)$ – baterijos iškrovimo galia, laiko momentais nuo 1 iki N ;
- $E_{bat}(1:N)$ – sukaupta energija baterijoje, laiko momentais nuo 1 iki N ;

$$x = [P_{tinklo}(1:N) \ P_{bat}(1:N) \ E_{bat}(1:N)]^T. \quad (7)$$

Konstantų reikšmės pateikiamos 21 paveiksle.

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} A_{eq} \\ \left[\begin{array}{ccc} I_{N \times N} & I_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & \Upsilon_{N \times N} & \Phi_{N \times N} \end{array} \right] x = \end{array} \\ \Upsilon_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & \Delta T & 0 \end{bmatrix} \end{array} \quad \begin{array}{c} b_{eq} \\ \left[\begin{array}{c} P_{load}(1:N) - P_{pv}(1:N) \\ E_{batt}(1) \\ 0_{N-1} \end{array} \right] \\ \Phi_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \begin{array}{c} A \\ \left[\begin{array}{ccc} 0_{N \times N} & I_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & -I_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & I_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & -I_{N \times N} \end{array} \right] x \geq \end{array} \\ \begin{array}{c} b \\ \left[\begin{array}{c} P_{max} \\ -P_{min} \\ E_{max} \\ -E_{min} \end{array} \right] \end{array} \end{array}$$

20 pav. Konstantų reikšmės optimizavimo lygtyje [35]

2.4.2. Lankstumo paslaugos teikimo galimybių vertinimo „Excel“ skaičiuoklėje metodika

Nuskaičius skyrelyje 2.5.1. nurodytus duomenis iš „MATLAB“, jie yra importuojami į „Excel“ skaičiuoklę. Remiantis 2.2. poskyryje nustatytais dienos vartojimo pikais, bus įvedamas lankstumo paslaugos suteikimo faktorius. Vadinasi, kad tam tikromis nustatytomis valandomis, 2 kartus per parą, vartotojo baterija turi būti pasiruošusi atiduoti elektros energiją į tinklą už tam tikrą, iš anksto nustatytą, kainą. Tyrimo atlikimui priimama, kad baterija, turi turėti galimybę atiduoti bent 50 procentų savo nominalios talpos energijos. Taip pat nustatoma, kad po šio iškrovimo, baterija įsikraus už mažiausią ateinančių 24 valandų kainą iki to energijos lygio, koks buvo prieš suteikiant lankstumo paslaugą.

Atlikus šį vertinimą, nustatoma, kokia kaina turėtų būti mokama vartotojui, kiekvieno scenarijaus atveju, kad jis gautų ekonominę naudą teikdamas lankstumo paslaugas.

2.5. Ekonominio skirtingų scenarijų vertinimo metodika

Sumodeliavus skirtingus vartotojų mikrotinklų veikimo scenarijus, pagal gautus rezultatus atliekamas ekonominis šių scenarijų vertinimas. Jis atliekamas pasitelkiant „Excel“ skaičiuoklę, kurioje atsižvelgiama į pagrindinius projekto ekonominio naudingumo vertinimo kriterijus ir kintamuosius.

2.5.1. Ekonominių skaičiavimų „Excel“ skaičiuoklėje metodika

Skaičiuoklėje, kuri naudojama ekonominiam scenarijų vertinimui atlikti, atsižvelgiama į pagrindines vertes, reikalingas ekonominio vertinimo skaičiavimams atlikti. Toliau yra pateikiami jų aprašymai.

Kapitalo kaštai. Tai investicijos reikalingos projekto įgyvendinimui. Privačių namų ūkių kaupimo sistemos kaina nustatoma pagal 3 lentelę, tai bus 670 Eurų už baterijos talpos kWh.

Projekto gyvavimo laikas. Tai laikas, kurį gali veikti analizuojamas projektas, atsižvelgiant į naudojamų komponentų ir įrangos efektyvumą bei veikimo saugumą.

Elektros energijos kaina. Tai kaina, už kurią yra perkama ir parduodama elektros energija tam tikru laikotarpiu. Kainai nustatyti naudojami 2023 metų „NordPool“ rinkos duomenys.

Diskonto norma. Tai yra palūkanų norma, taikoma apibūdinti ateities pinigų srautų dabartinę vertę [36].

Atlikus skaičiavimus, gaunami ekonominiam vertinimui reikalingi rodikliai yra – grynoji projekto dabartinė vertė, vidinė grąžos norma, atsipirkimo laikas.

Grynoji projekto dabartinė vertė (NPV). Tai skirtumas tarp pinigų įplaukų dabartinės vertės ir pinigų išmokų dabartinės vertės per tam tikrą laikotarpį. Grynoji projekto dabartinė vertė naudojama kapitalo biudžeto sudarymui ir investicijų planavimui, siekiant išanalizuoti numatomos investicijos ar projekto pelningumą. Grynoji projekto dabartinė vertė yra skaičiavimų, kuriuose randama dabartinė būsimo pinigų srauto vertė, naudojant tinkamą diskonto normą, rezultatas. Jeigu NPV vertė yra teigiama, tai parodo, kad projektas ar investicija turėtų būti pelninga ir ekonomiškai naudinga.[37]

Grynoji dabartinė vertė apskaičiuojama naudojantis tokia formule [37]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t}; \quad (8)$$

čia:

R_t – pinigų srautai laiko periode t ,

i – diskonto normos vertė,

t – laiko periodų kiekis.

Vidinė gražos norma (IRR). Tai metrika, naudojama finansinėje analizėje galimų investicijų pelningumui įvertinti. IRR yra diskonto norma, su kuria diskontuotų pinigų srautų analizėje visų pinigų srautų grynoji dabartinė vertė (NPV) yra lygi nuliui [38].

Apskritai, kuo didesnė vidinė gražos norma, tuo yra palankiau investuoti į projektą. Vidinė gražos norma yra vienoda įvairių tipų investicijoms, todėl gali būti naudojama kelioms būsimoms investicijoms ar projektams reitinguoti santykinai tolygiai. Apskritai, lyginant investavimo galimybes su kitomis panašiomis savybėmis, investicija su didžiausia IRR yra laikoma geriausia [38].

Vidinė gražos norma apskaičiuojama pagal formulę [38]:

$$0 = NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1 + IRR)^t} - C_0; \quad (9)$$

čia:

C_t – pinigų srautas laikotarpiu t ;

C_0 – investicijos;

IRR – vidinė gražos norma;

t – laiko periodų kiekis.

Atsipirkimo laikas. Tai laikas per kurį atsiperka investicijų suma į projektą. Kuo trumpesnis atsipirkimo laikas, tuo projektas yra patrauklesnis investuoti.

Formulė pagal kurią apskaičiuojamas atsipirkimo laikas:

$$\text{Projekto atsipirkimo laikas} = \frac{\text{Grynosios investicijos}}{\text{Grynosios pajamos per metus}}. \quad (10)$$

3. Tyrimas

Kaip pateikta tyrimo metodikoje, tyrimas atliekamas keliais etapais: modeliavimas „MATLAB“ modeliu, lankstumo paslaugos teikimo vertinimas „Excel“ skaičiuoklėje, ekonominių rodiklių apskaičiavimas kiekvienu atveju ir pagrindinių ekonominių parametų aprašymas.

3.1. Modeliavimo scenarijai

Modeliavimui atlikti, parenkama 18 modeliavimo scenarijų, kuriuose vertinamos skirtingų konfigūracijų privataus vartotojo namų ūkių elektros sistemos, nustatant ar yra teikiama lankstumo paslauga. Visi šie scenarijai yra aprašomi 4 lentelėje.

4 lentelė. Modeliavimo scenarijų aprašymas

Scenarijaus nr.	Vartotojo tipas	Baterijų kaupimo sistemos parametrai	Ar teikiamos lankstumo paslaugos skirstomojo tinklo operatoriui?
1	I	5 kW, 1h	NE
2	I	5 kW, 2h	NE
3	I	5 kW, 4h	NE
4	II	10 kW, 1h	NE
5	II	10 kW, 2h	NE
6	II	10 kW, 4h	NE
7	III	30 kW, 1h	NE
8	III	30 kW, 2h	NE
9	III	30 kW, 4h	NE
10	I	5 kW, 1h	TAIP
11	I	5 kW, 2h	TAIP
12	I	5 kW, 4h	TAIP
13	II	10 kW, 1h	TAIP
14	II	10 kW, 2h	TAIP
15	II	10 kW, 4h	TAIP
16	III	30 kW, 1h	TAIP
17	III	30 kW, 2h	TAIP
18	III	30 kW, 4h	TAIP

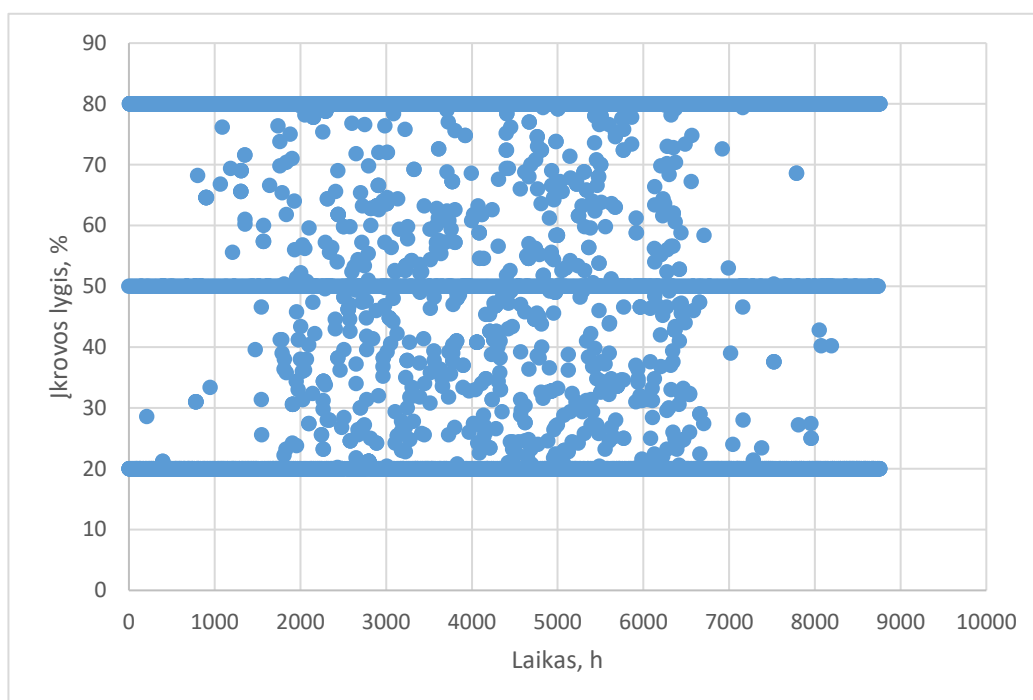
Pirmas modeliavimas atliekamas „MATLAB“ baterijų sistemos veikimo optimizacinio modelio pagalba. Gauti duomenys nuskaitomi ir perkeltami į „Excel“ skaičiuoklę, kur įvertinamas lankstumo paslaugos teikimo įgyvendinimas.

3.2. „MATLAB“ modeliavimo rezultatai

Tyrimas pradamas nuo skirtingų sistemų modeliavimo „MATLAB“ modelyje. Tolimesniuose skyreliuose pateikiami modeliavimo rezultatai kiekvienam iš modeliavimo scenarijų.

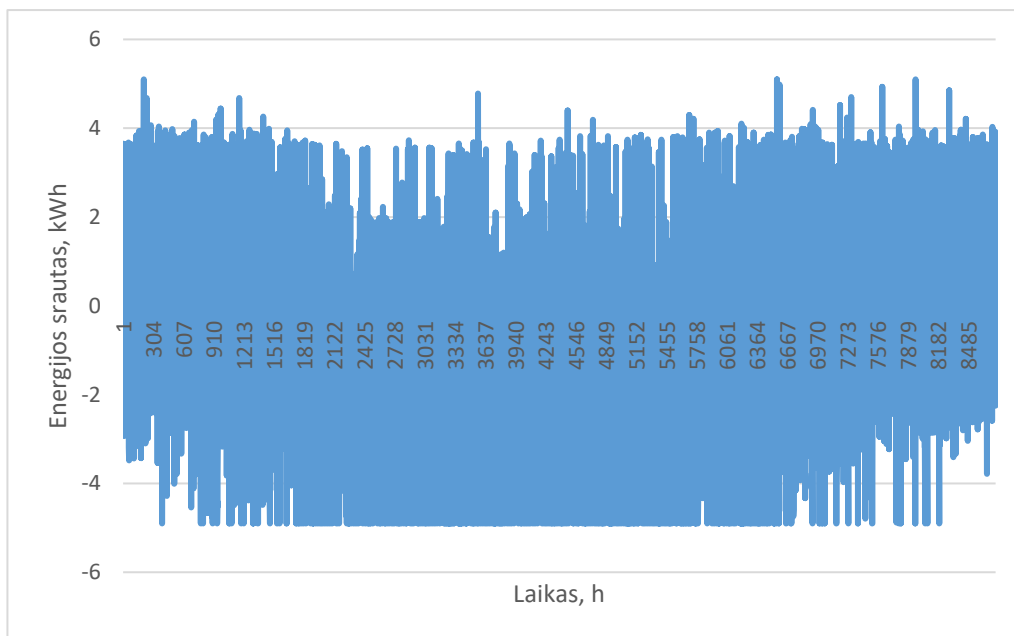
3.2.1. Pavyzdinės modeliavimo rezultatų kreivės

Šiame scenarijuje modeliuojama I vartotojo tipo su 5 kWh, 1 valandos baterijų kaupimo sistema atvejis. Toliau 21–24 paveiksluose pateikiami pavyzdiniai modeliavimo rezultatai.

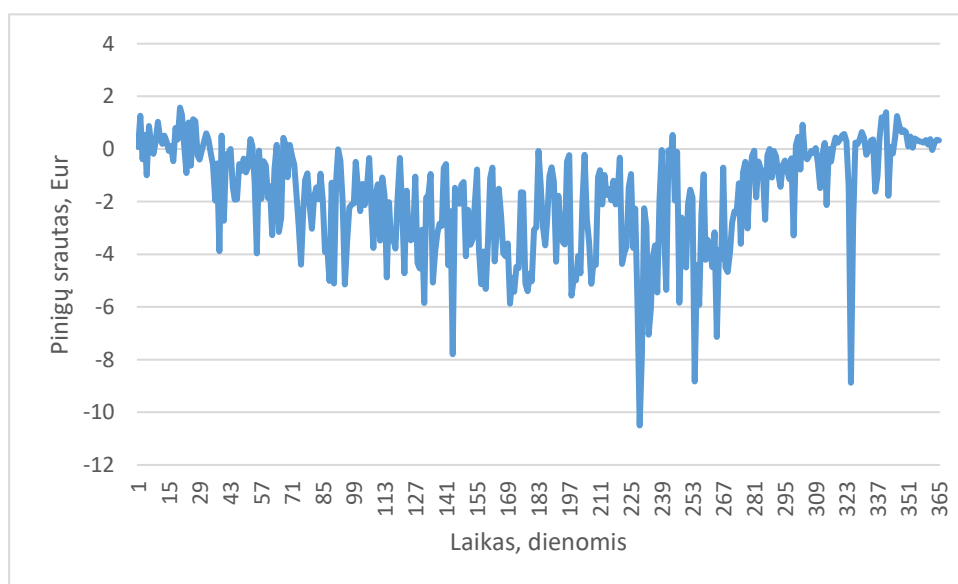


21 pav. Modeliavimo rezultatai, baterijos įkrovos lygis, 1 scenarijus

Kaip matoma iš pateikto grafiko, modeliavimo metu buvo išlaikyti apribojimai ir baterijos įkrovos lygis buvo palaikomas tarp 80 % ir 20 %.



22 pav. Modeliavimo rezultatai, tinklo elektros energijos srautas, 1 scenarijus



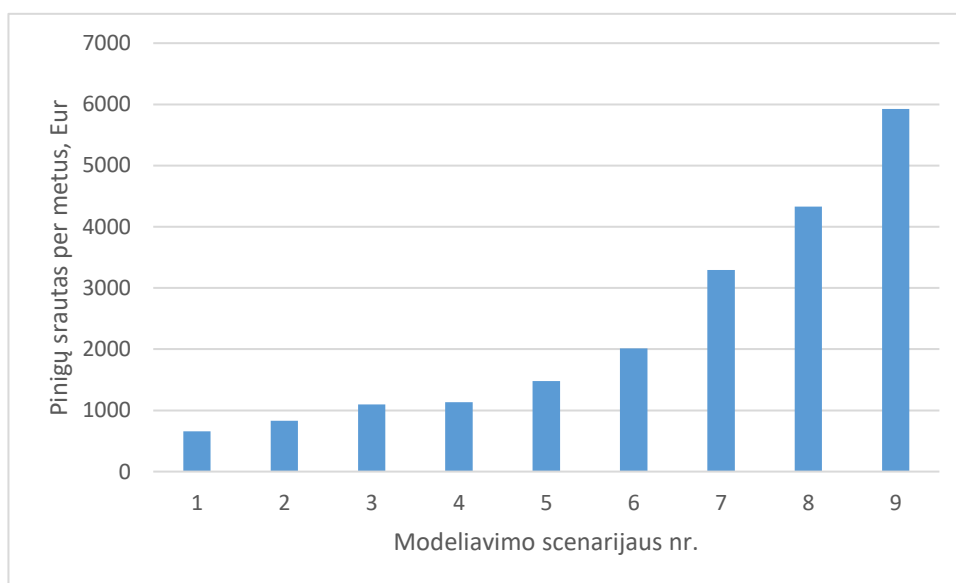
23 pav. Modeliavimo rezultatai, pinigų srautas per dieną, 1 scenarijus

3.2.2. 1–9 scenarijų modeliavimo rezultatai

1–9 scenarijų, modeliuotų „MATLAB“ modelyje, suminės metinių rezultatų reikšmės pateikiamos 5 lentelėje.

5 lentelė. 1–9 scenarijų suminės metinių rezultatų reikšmės

Scenarijus	Baterijų kaupimo sistemos parametrai	Metinė apkrova, kWh	Tinklo energijos srautas, kWh	Pinigų srautas per metus, Eur
1	5 kW, 1h	3899,22	-5556,98	655,45
2	5 kW, 2h	3899,22	-5979,80	828,73
3	5 kW, 4h	3899,22	-6784,37	1094,73
4	10 kW, 1h	9977,74	-8995,10	1133
5	10 kW, 2h	9977,74	-9832,26	1481,01
6	10 kW, 4h	9977,74	-11410,60	2014,31
7	30 kW, 1h	30578,18	-26886,11	3294,84
8	30 kW, 2h	30578,18	-29050,68	4329,46
9	30 kW, 4h	30578,18	-33599,61	5925,90



24 pav. Pinigų srautas per metus 1–9 scenarijumi

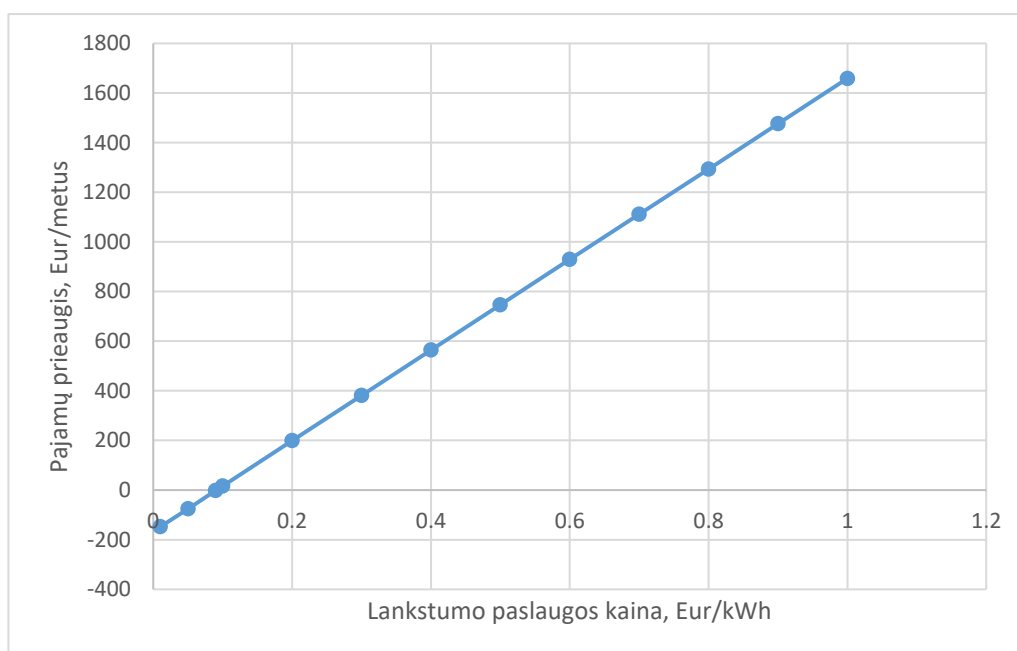
Iš rezultatų galima matyti, kad kuo didesnės talpos baterija yra naudojama, tuo didesnis yra pinigų kiekis per metus, gaunamas iš baterijų kaupimo sistemos panaudojimo.

3.3. Lankstumo paslaugos teikimo vertinimas

Gauti duomenys iš „MATLAB“ simuliacijos yra perkelti į „Excel“ skaičiuoklę. Joje vertinama, kad lankstumo paslaugos bus teikiamos 2 kartus per parą, per vartojimo pikus. Baterija privalo turėti galimybę būti iškraunama energijos dydžiu, lygiu pusei baterijos kaupimo sistemos talpos. Taip sumodeliuoti 10–18 scenarijai.

3.3.1. Pavyzdiniai lankstumo paslaugų kainos skaičiavimo rezultatai

Įvertinus 10–18 scenarijus, kai lankstumo paslaugos yra teikiamos buvo gauta minimali lankstumo kaina, už kurią vartotojui būtų finansiškai palanku teikti lankstumo paslaugas skirstomojo tinklo operatoriui. 10 scenarijaus pavyzdinis grafikas pateikiamas 25 paveiksle.



25 pav. 10 scenarijaus pajamų prieaugio priklausomybė nuo lankstumo paslaugos kainos

Grafike matoma, kad pajamų prieaugio kreivė kerta 0 ribą, kai lankstumo paslaugų kaina yra nustatoma apie 0,1 Eur/kWh. Tokiu atveju, per metus, už lankstumo paslaugų teikimą, vartotojas gali papildomai užsidirbti apie 16 eurų.

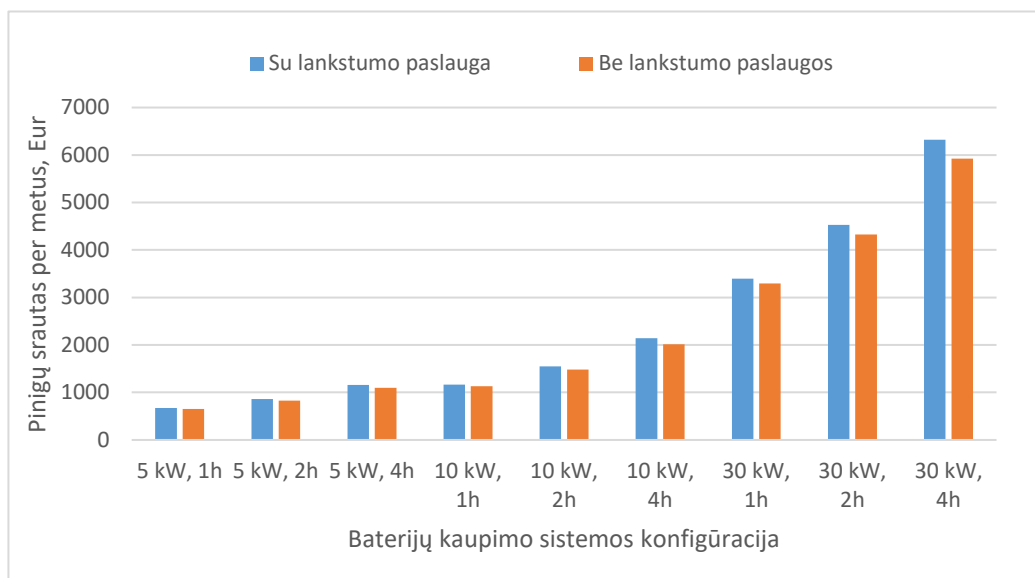
3.3.2. Lankstumo paslaugų kainos skaičiavimo rezultatai

Vartotojui norint uždirbti, reikėtų atsižvelgti ir į baterijų kaupimo sistemos naudojimo kaštus. Dėl šios priežasties, visiškai minimalaus uždarbio neužtenka ir reikia vertinti, kad vartotojui priimtina lankstumo paslaugų kaina bus didesnė nei kaina, prie kurios pajamų prieaugis tampa teigiamas. Priimama, kad vartotojui, būtų priimtina papildomai uždirbti bent 300 eurų per metus teikiant lankstumo paslaugas. 6 lentelėje yra pateikiami 10–18 scenarijų skaičiavimo rezultatai.

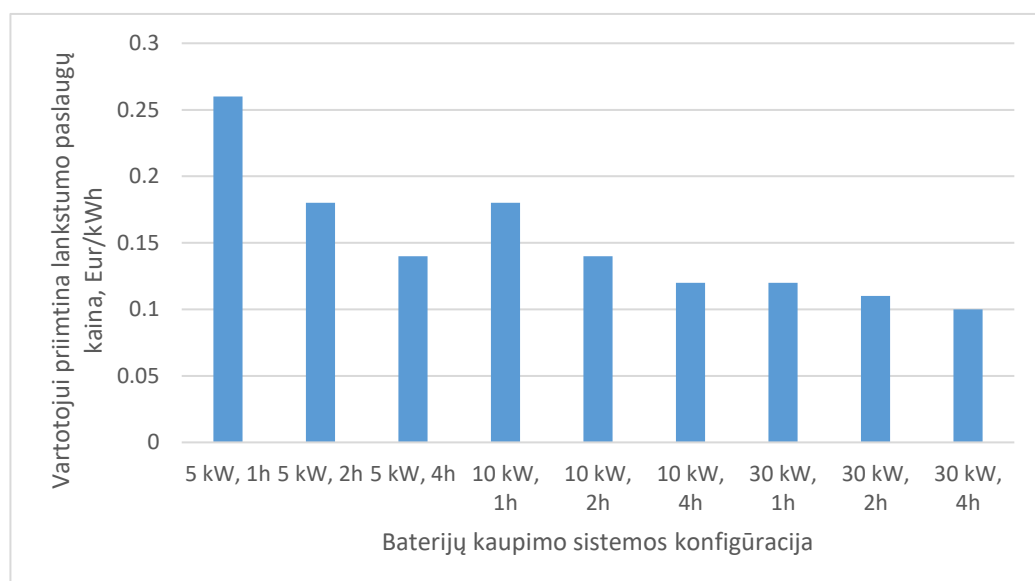
6 lentelė. 10–18 scenarijaus skaičiavimų rezultatai

Scenarijus	Baterijų kaupimo sistemos parametrai	Metinė apkrova, kWh	Pinigų srautas per metus be lankstumo paslaugos, Eur	Pinigų srautas per metus su minimalia lankstumo paslaugos kaina, Eur	Vartotojui priimtina lankstumo paslaugų kaina, Eur/kWh
10	5 kW, 1h	3899,22	655,45	671,84	0,26
11	5 kW, 2h	3899,22	828,73	861,51	0,18
12	5 kW, 4h	3899,22	1094,73	1160,29	0,14
13	10 kW, 1h	9977,74	1133	1165,79	0,18

14	10 kW, 2h	9977,74	1481,01	1546,66	0,14
15	10 kW, 4h	9977,74	2014,31	2145,44	0,12
16	30 kW, 1h	30578,18	3294,84	3393,19	0,12
17	30 kW, 2h	30578,18	4329,46	4526,15	0,11
18	30 kW, 4h	30578,18	5925,90	6319,28	0,10



26 pav. Pinigų srautas per metus, įvertinant lankstumo paslaugų teikimą



27 pav. Vartotojui priimtina lankstumo paslaugų kaina, atsižvelgiant į baterijų kaupimo sistemos konfigūraciją

Pagal gautus rezultatus, galima teigti, kad kuo mažesnė yra baterijų kaupimo sistema, tuo minimali priimtina kaina vartotojui, arba ta kaina, už kurią vartotojas gali per metus papildomai uždirbti bent 300 eurų, yra didesnė.

Visais analizuotais scenarijais, kaip ir aprašyta 10-ame scenarijuje, 3.2.1. skyrelyje, minimali lankstumo paslaugos kaina, už kurią vartotojas gali papildomai per metus užsidirbti, turi būti bent 0,1 Euro už kilovatvalandę.

3.4. Scenarijų ekonominių rodiklių skaičiavimas ir vertinimas

Ekonominiai rodikliai, kiekvieno scenarijaus atveju yra apskaičiuojami ir vertinami naudojantis 2.6. poskyryje aprašyta metodika. Pavyzdinis skaičiavimas atliekamas 1 scenarijui.

3.4.1. Pavyzdinis ekonominių rodiklių skaičiavimas

Prieš atliekant skaičiavimus, reikia nustatyti kokia diskonto norma turi būti naudojama. Pagal Lietuvos Banko naujausius duomenis [39], nustatoma diskonto norma lygi 7 procentams.

Nustatoma projekto gyvavimo trukmė skaičiavimams – 25 metai.

Taip pat reikia įvertinti sistemos įsidiegimo finansavimo galimybes. Priimama, kad yra galimybė susigrąžinti 30 procentų visos investicijos vertės, pasinaudojus valstybės parama. Pavyzdiniame skaičiavime vaizduojamas variantas be pasinaudojimo finansavimu.

Projekto kainos skaičiavimams, remiantis saulės elektrinių rangovų puslapiu [40], priimama, kad elektrinės įsirengimo kaina už 1 kW bus 700 eurų. Baterijų kaupimo sistemos kaina bus apskaičiuojama naudojantis 3 lentelėje surinktais duomenimis. Pirmojo scenarijaus atveju, sistemos kaina yra:

$$5 \cdot 700 + 5 \cdot 670 = 6850 \text{ Eur.}$$

Taip pat reikia numatyti, kad uždirbti pinigai už elektros energijos pardavimą, turi būti apmokestinami pelno mokesčiu. Jis priimamas lygus 15%:

$$6850 \cdot 0,85 = 5822,5 \text{ Eur.}$$

Pagal 8 formulę, apskaičiuojama diskontuotą pinigų srautą antriems metams:

$$\frac{5822,5}{(1 + 0,07)^1} = 5441,68 \text{ Eur.}$$

Toliau šis veiksmas atliekamas likusiam laiko periodui.

Gaunama NPV = 97,07 Euro.

Pagal 9 formulę apskaičiuojama IRR vertė. Gaunama, kad IRR, šiuo atveju, yra 7 procentai.

Investicijos į sistemą atsipirkimo laikas skaičiuojamas pagal 10 formulę:

$$\text{Atsipirkimo laikas} = \frac{6850}{5822,5} = 1,18 \text{ metų.}$$

Apskaičiavus rodiklius, galima teigti, kad į pirmo scenarijaus tipo sistemą investuoti yra rizikinga, nes gaunama maža NPV vertė ir IRR norma lygi diskonto normai.

3.4.2. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai visiems modeliavimo scenarijams

7 lentelėje yra pateikiami ekonominių rodiklių skaičiavimų rezultatai. Skaičiavimuose nebuvo vertinama naudojimosi parama galimybė.

7 lentelė. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai 1–18 scenarijams, be naudojimosi valstybės parama

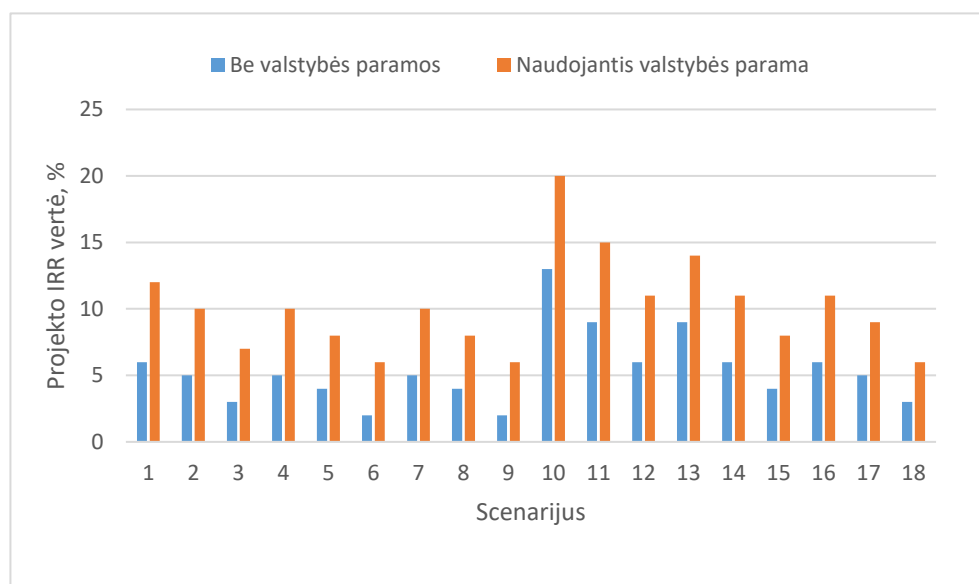
Scenarijus	Sistemos kaina, Eur	NPV, Eur	IRR, %	Investicijos atsipirkimo laikas, metais
1	6850	97,07	6	12,30
2	10200	-1416,35	5	14,48
3	16900	-5297,03	3	18,16
4	13700	-1691,41	5	14,22
5	20400	-4702,87	4	16,21
6	33800	-12450,46	2	19,74
7	41100	-6178,21	5	14,68
8	61200	-15312,34	4	16,63
9	101400	-38591,78	2	20,13
10	6850	3365,71	13	8,36
11	10200	2025,99	9	10,40
12	16900	-1507,28	6	13,69
13	13700	1750,98	9	11,06
14	20400	-912,12	6	13,05
15	33800	-7965,78	4	16,31
16	41100	-2814,66	6	13,39
17	61200	-10906,45	5	15,17
18	101400	-34422,33	3	18,88

8 lentelėje yra pateikiami ekonominių rodiklių skaičiavimų rezultatai. Skaičiavimuose buvo vertinama naudojimosi parama galimybė.

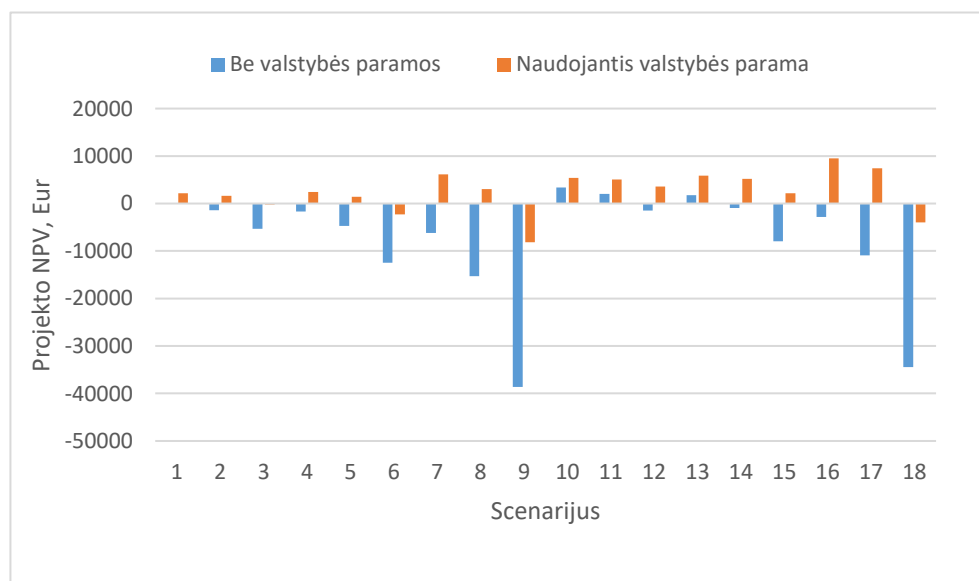
8 lentelė. Ekonominių rodiklių skaičiavimo rezultatai 1–18 scenarijams, su valstybės paramos panaudojimu

Scenarijus	Sistemos kaina, Eur	NPV, Eur	IRR, %	Investicijos atsipirkimo laikas, metais
1	4795	2152,07	12	8,6
2	7140	1643,65	10	10,14
3	11830	-227,03	7	12,71
4	9590	2418,59	10	9,96
5	14280	1417,13	8	11,34
6	23660	-2310,46	6	13,82
7	28770	6151,79	10	10,27

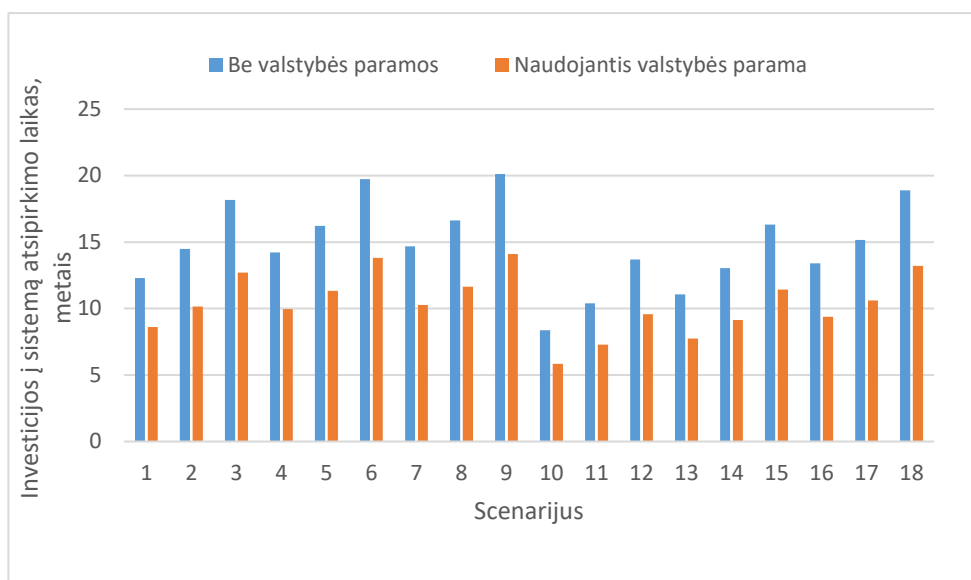
8	42840	3047,66	8	11,64
9	70980	-8171,78	6	14,09
10	4795	5420,71	20	5,85
11	7140	5085,99	15	7,28
12	11830	3562,72	11	9,58
13	9590	5860,98	14	7,74
14	14280	5207,88	11	9,14
15	23660	2174,22	8	11,42
16	28770	9515,34	11	9,37
17	42840	7453,55	9	10,62
18	70980	-4002,33	6	13,21



28 pav. IRR vertė kiekvienam scenarijui, įvertinant naudojamą valstybės paramą



29 pav. NPV vertė kiekvienam scenarijui, įvertinant naudojamą valstybės paramą



30 pav. Investicijos į sistemą atsipirkimo laikas, įvertinant naudojimąsi valstybės parama

Pagal ekonominių rodiklių skaičiavimų rezultatus, galima pastebėti, kad 10 scenarijus yra ekonomiškai patraukliausias tiek naudojantis parama, tiek be jos. 10 scenarijumi apskaičiuoti NPV, IRR rodikliai yra didžiausi, atsipirkimo laikotarpio trukmė yra mažiausia.

Lyginant 7-oje ir 8-oje lentelėje pateiktus rezultatus, matoma tendencija, kad naudojantis parama, teigiamos NPV vertės yra gaunamos dažniau (14 iš 18 scenarijų), o nesinaudojant parama, rečiau (tik 4 iš 18 scenarijų).

Įvertinus vartotojui tinkamą lankstumo paslaugos kainą, Eur/kWh, kuri kinta tarp 0,1 ir 0,26, gaunama, kad teikiant lankstumo paslaugą skirstomojo tinklo operatoriui, vartotojo atžvilgiu, investicijos į sistemą atsipirkimo laikotarpis vidutiniškai pagerėja 3-4 metais.

Išvados

1. Išanalizavus temos aktualumą politiniame kontekste, Europos sąjungos energetikos politinėse gairėse, matoma, kad vartotojų įtraukimo į energijos sistemos veikimą didinimas yra labai svarbus politikos aspektas, siekiant įgyvendinti Europos sąjungos energetikos direktyvų tikslus. Remiantis išanalizuota literatūra, vartotojo įtraukimo į lankstų elektros sistemos tinklo valdymą įgyvendinimui, turėtų būti pasitelkiamos atsinaujinančiais šaltiniais ir baterijų kaupyklomis paremtos sistemos, jas naudojant kartu su išmaniųjų tinklų koncepcijomis, kainomis grindžiamu reguliavimo apkrova procesu bei išmaniojo matavimo sistema. Apžvelgus lankstumo paslaugų projektus „Fusebox“, „OneNet“ ir ESO lankstumo paslaugų projektą, nustatyta, kad geriausia lankstumo paslaugų teikimo platforma buitiniam vartotojui būtų ESO lankstumo paslaugų teikimas.
2. Tyrimui pasirinkta nagrinėti skirtingų konfigūracijų namų ūkio mikrotinklus, kuriuos sudaro saulės elektrinė ir baterijų kaupimo sistema bei papildomi komponentai. Aprašyta 18 modeliavimo scenarijų, parinktų pagal vartotojo tipą, baterijų sistemos specifikacijas ir lankstumo paslaugos teikimo sąlygą bei surinkti reikalingi Lietuvos vartotojų, Lietuvos elektros energijos rinkos bei Lietuvos saulės apšvietos duomenys.
3. Tyrimas atliktas dviem modeliavimo etapais: modeliavimas „MATLAB“ optimizaciniu modeliu ir lankstumo paslaugos teikimo galimybių skaičiavimai sukurtoje „Excel“ skaičiuoklėje. Gauti metiniai pinigų srautai po pirmojo modeliavimo varijuoja tarp 655 ir 5926 Eurų per metus, priklausomai nuo modeliuoto scenarijaus. Gauta minimali lankstumo paslaugos kaina, už kurią vartotojas, suteikdamas lankstumo paslaugas skirstymo operatoriui, gautų papildomų metinių pajamų. Ši kaina modeliuotiems scenarijams lygi apie 0,1 Eur/kWh. Kiekvienam vartotojo tipui ir sistemos konfigūracijai parinkta minimali priimtina lankstumo paslaugos kaina, kurios vertė skirtingiems scenarijams varijuoja tarp 0,1 ir 0,26 Eur/kWh.
4. Atlikus skirtingų scenarijų ekonominių rodiklių skaičiavimus, įvertinta, kad geresni ekonominiai rodikliai yra gaunami, jei renkama naudoti valstybės finansavimu sistemos įsirengimui – naudojantis parama, teigiamos NPV vertės yra gaunamos dažniau (14 iš 18 scenarijų), o nesinaudojant parama, rečiau (tik 4 iš 18 scenarijų). 10 scenarijumi apskaičiuoti NPV, IRR rodikliai yra didžiausi, atsipirkimo laikotarpio trukmė yra mažiausia. Vartotojo įsitraukimas į lankstumo paslaugų teikimą, pagerina investicijos į sistemą atsipirkimo laiką vidutiniškai 3 – 4 metais.

Literatūros sąrašas

1. Between National Interests and the Greater Good: Struggling towards a Common European Union Energy Policy in the Context of Climate Change. In *JIA SIPA* [interaktyvus]. 2016. [žiūrėta 2023-06-11]. Prieiga per internetą: <https://jia.sipa.columbia.edu/national-interests-greater-good-struggling-towards-common-european-union-energy-policy-context-climate-change>.
2. CIAMBRA, A. *The policisation of EU Energy Policy: Instances of Instrumental Re-framing by the European Commission* [interaktyvus]. [s.l.]: University of Trento, 2013. [žiūrėta 2023-06-11]. Prieiga per internetą: <http://eprints-phd.biblio.unitn.it/992/>.
3. MENGOLINI, A.M. Prosumer behaviour in emerging electricity systems. In [interaktyvus]. 2017. [žiūrėta 2023-06-10]. . Prieiga per internetą: <http://porto.polito.it/id/eprint/2675327>.
4. [Interaktyvus]. . [žiūrėta 2023-06-11]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0202:FIN:EN:PDF>.
5. YAN, X. ir kt. A review on price-driven residential demand response. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2018. Vol. 96, p. 411–419. .
6. Grid Modernization and the Smart Grid. In *Energy.gov* [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-06-14]. Prieiga per internetą: <https://www.energy.gov/oe/grid-modernization-and-smart-grid>.
7. DARBY, S.J. - MCKENNA, E. Social implications of residential demand response in cool temperate climates. In *Energy Policy* . 2012. Vol. 49, p. 759–769. .
8. KILICCOTE, S. - PIETTE, M. Automation of Capacity Bidding with an Aggregator Using Open Automated Demand Response. In . 2008. .
9. BARTUSCH, C. ir kt. Introducing a demand-based electricity distribution tariff in the residential sector: Demand response and customer perception. In *Energy Policy* . 2011. Vol. 39, p. 5008–5025. .
10. KOIRALA, B.P. ir kt. Energetic communities for community energy: A review of key issues and trends shaping integrated community energy systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2016. Vol. 56, p. 722–744. .
11. Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) – Global Energy and Climate Model – Analysis. In *IEA* [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-06-13]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>.
12. Grid-Scale Storage – Analysis. In *IEA* [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-06-11]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>.
13. DIVYA, K.C. - ØSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. In *Electric Power Systems Research* . 2009. Vol. 79, no. 4, p. 511–520. .
14. DAS, C.K. ir kt. Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2018. Vol. 91, p. 1205–1230. .
15. [interaktyvus]. . [žiūrėta 2023-06-13]. Prieiga per internetą: <https://dl.icdst.org/pdfs/files/b334382400c223631bea924f87b0a1ba.pdf>.
16. YANG, C.-J. - JACKSON, R. Opportunities and barriers to pumped-hydro energy storage in the United States. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2011. Vol. 15, p. 839–844. .
17. ANTAL, B.A. Pumped Storage Hydropower: A Technical Review.

18. Figure 3: Schematic diagram of pumped hydro storage plant. In *ResearchGate* [interaktyvus]. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-pumped-hydro-storage-plant_fig3_320755664.
19. VONSIEN, S. - MADLENER, R. Li-ion battery storage in private households with PV systems: Analyzing the economic impacts of battery aging and pooling. In *Journal of Energy Storage* . 2020. Vol. 29, p. 101407. .
20. LUND, P.D. Capacity matching of storage to PV in a global frame with different loads profiles. In *Journal of Energy Storage* . 2018. Vol. 18, p. 218–228. .
21. AGNEW, S. - DARGUSCH, P. Consumer preferences for household-level battery energy storage. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* . 2017. Vol. 75, p. 609–617. .
22. LINSSEN, J. ir kt. Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles. In *Applied Energy* . 2017. Vol. 185, p. 2019–2025. .
23. KIM, Y. ir kt. A scalable and flexible hybrid energy storage system design and implementation. In *Journal of Power Sources* . 2014. Vol. 255, p. 410–422. .
24. Three diagrams with photovoltaics and energy storage – Hybrid, Off Grid, Grid-Tied with Batteries. [interaktyvus]. 2022. [žiūrėta 2023-06-15]. Prieiga per internetą: <https://voltaconsolar.com/blog/2022/06/09/three-diagrams-with-photovoltaics-and-energy-storage-hybrid-off-grid-grid-tied-with-batteries/>.
25. ESO lankstumo paslaugos. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-01]. Prieiga per internetą: https://www.eso.lt/lt/namams/elektra/paslaugos_1723/eso-lankstumo-paslaugos.html.
26. O3E-1771. Dėl AB „Energijos skirstymo operatoriaus“ Prekybos lankstumo paslaugomis tvarkos aprašo patvirtinimo. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-01]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/23c3dbd0878211ed8df094f359a60216>.
27. TIIMAN, J. [interaktyvus]. 2023. [žiūrėta 2024-05-18]. Prieiga per internetą: <https://fusebox.energy/flexible-energy-use-powering-a-cleaner-future/>.
28. OneNet brochure. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-18]. Prieiga per internetą: <http://www.onenet-project.eu/wp-content/uploads/2024/03/OneNet-Brochure.pdf>.
29. Lietuvos atvirų duomenų portalas. Buitinių vartotojų automatizuotų apskaitų neagreguoti valandiniai duomenys. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-05-01]. Prieiga per internetą: <https://data.gov.lt/datasets/1975/>.
30. Spot Market Prices. Energy-Charts. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-19]. Prieiga per internetą: https://energy-charts.info/charts/price_spot_market/chart.htm?l=en&c=LT&interval=year&legendItems=0000110000000&year=2023.
31. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-19]. Prieiga per internetą: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#HR.
32. Saulės baterijos. Parama baterijoms. Saulės Graža [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-20]. Prieiga per internetą: <https://www.saulesgraza.lt:443/saulės-baterijos>.
33. Saulės Graža. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-20]. Prieiga per internetą: <https://shop.saulesgraza.lt/parduotuve/saulės-elektrines/inverteriai/huawei-sun-2000-m1-6-kw-10-kw-optimizuotai-elektrinei/>.

34. MERMOUD, A. ir kt. SIMULATION OF GRID-TIED PV SYSTEMS WITH BATTERY STORAGE IN PVSYST. 2019.
35. LESAGE, J. [interaktyvus]. .2024. [žiūrėta 2024-04-27]. Prieiga per internetą: <https://github.com/jonlesage/Microgrid-EMS-Optimization>.
36. Verslo žinios. ŽODYNAS. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-07]. Prieiga per internetą: <https://zodynas.vz.lt/Diskonto-norma>
37. Net Present Value (NPV): What It Means and Steps to Calculate It. In Investopedia [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-07]. Prieiga per internetą: <https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>.
38. Internal Rate of Return (IRR) Rule: Definition and Example. In Investopedia [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-01-07]. Prieiga per internetą: <https://www.investopedia.com/terms/i/irr.asp>.
39. Paskolų palūkanų normos. [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-29]. Prieiga per internetą: <https://www.lb.lt/lt/paskolu-palukanu-normos>.
40. 10 kW saulės elektrinė (kaina su įrengimo darbais). Energija Man [interaktyvus]. [žiūrėta 2024-04-29]. Prieiga per internetą: <https://energijaman.lt/10kw-saules-elektrine/>.