



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros energijos kaupiklio panaudojimo gaminančiojo vartotojo energetinio autonomiškumo didinimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Darius Serva

Projekto autorius

Asist. Mindaugas Vaitkūnas

Vadovas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros energijos kaupiklio panaudojimo gaminančiojo vartotojo energetinio autonomiškumo didinimui tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Darius Serva

Projekto autorius

Asist. Mindaugas Vaitkūnas

Vadovas

Asist. Artūras Baronas

Recenzentas

Kaunas, 2025



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Darius Serva

Elektros energijos kaupiklio panaudojimo gaminančiojo vartotojo energetinio autonomiškumo didinimui 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.

Darius Serva

Patvirtinta elektroniniu būdu

Serva, Darius. Elektros energijos kaupiklio panaudojimo gaminančiojo vartotojo energetinio autonomiškumo didinimui tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Mindaugas Vaitkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: gaminantis vartotojas, savarankiško apsirūpinimo elektros energija rodiklis, energijos suvartojimas vietoje rodiklis.

Kaunas, 2025. 42 p.

Santrauka

Šio magistrinio tiriamojo darbo tikslas - įvertinti elektros energijos kaupiklių (EEK) taikymo galimybes ir jų įtaką gaminančio vartotojo energetiniam nepriklausomumui. Kadangi pastaraisiais metais Lietuvoje sparčiai auga gaminančių vartotojų skaičius ypač iš saulės elektrinių, darosi vis sunkiau tinkamai subalansuoti tinklų apkrovą ir tai lemia būtinumą efektyvinti elektros energijos vartojimą.

Tyrime remtasi realiais duomenimis surinktais gaminančio vartotojo namų ūkyje kuriame instaliuota 10kW saulės elektrinė. Duomenys fiksuoti kas vieną sekundę, kiekvienoje trifazio tinklo fazėje. Siekiant įvertinti kaupiklio naudą energijos srauto balansui, buvo sukurtas matematinis modelis, leidžiantis modeliuoti tiek saulės generacijos, tiek suvartojimo bei importo–eksporto srautus, laikant, kad baterija ideali ir gali būti įkrauta ar iškrauta be galios apribojimų. Modeliavimas buvo atliktas keičiant instaliuotą saulės elektrinės galią nuo 2 iki 10 kW ir kaupiklio talpą nuo 2 iki 14 kWh.

Modelio vertinimui buvo pasitelkti šie pagrindiniai rodikliai:

SSR - savarankiško apsirūpinimo elektros energija rodiklis,

SCR - energijos suvartojimas vietoje rodiklis,

P_{DSO} - suminiai paros energijos mainai su tinklu.

Rezultatai parodė, kad tinkamai parinkus kaupiklio talpą galima žymiai sumažinti energijos eksportą ir importą, ženkliai padidinant tiek SSR , tiek SCR rodiklius. Kai kuriais atvejais importo–eksporto srautas sumažėjo praktiškai iki nulio. Tai patvirtina reikšmingą EEK naudą siekiant didesnio energetinio savarankiškumo ir mažesnių sąskaitų už iš tinklo atsiimtą elektros energiją.

Tyrimo rezultatai gali būti pritaikomi tiek privačių individualių sprendimų planavimui, tiek didesnėms ar didelėms įmonėms įsivertinti EEK atsiperkamumą.

Serva, Darius. Research on Use of Energy Storage Device to Increase Prosumer's Energy Autonomy. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Mindaugas Vaitkūnas Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: prosumer, self-sufficiency rate, self-consumption rate.

Kaunas, 2025. 42 p.

Summary

The aim of this master's research work is to evaluate the application possibilities of electrical energy storage systems (EESS) and their impact on the energy independence of prosumers. In recent years, the number of prosumers in Lithuania, especially those with solar power plants, has been rapidly increasing. This growth has made it increasingly difficult to properly balance grid loads, highlighting the need to improve energy use efficiency.

The study is based on real data collected from a household with an installed 10 kW solar power system. Data was recorded every second for each phase of the three-phase grid. To assess the benefits of storage for energy flow balancing, a mathematical model was developed to simulate solar generation, consumption, and import–export flows, assuming an ideal battery that can be charged and discharged without power limitations. The simulation was carried out by varying the installed solar power capacity from 2 kW to 10 kW and the storage capacity from 2 kWh to 14 kWh.

The following key indicators were used to evaluate the model:

- *SSR* – self-sufficiency ratio,
- *SCR* – self-consumption ratio,
- P_{DSO} – total daily energy exchange with the grid.

The results showed that with properly selected storage capacity, energy import and export can be significantly reduced, substantially increasing both the *SSR* and *SCR* indicators. In some cases, import–export flows were reduced to nearly zero. This confirms the significant benefits of EESS in achieving greater energy independence and reducing electricity bills for grid-supplied power.

The results of the study can be applied both for planning private individual solutions and for helping medium or large enterprises evaluate the cost-effectiveness of implementing EESS.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Informacijos šaltinių analizė	12
1.1. Gaminančių vartotojų elektros energijos apskaitos modeliai	13
1.1.1. Dvipusė apskaita.....	13
1.1.2. Grynasis atsiskaitymas	14
1.2. Elektros energijos kaupikliai	15
1.3. Elektros energijos kaupiklio talpos parinkimo prielaidos	16
2. Tyrimo metodika	19
2.1. Namų tinklo energijos srautų parametrai	19
2.1.1. Suminis paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekis	19
2.1.2. Paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis	20
2.1.3. Paros suvartojimo vietoje rodiklis	20
2.2. Eksperimento duomenys	20
2.3. Modeliavimo algoritmas.....	21
3. Tyrimo rezultatai.....	27
Išvados	39
Literatūros sąrašas	40

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Elektros energijos kaupiklių technologijų palyginimas	15
2 lentelė. Pradiniai suminiai paros energijos srautų parametrai.....	31
3 lentelė. 24-04-05 suminis paros importo – eksporto srautas $\sum P_{DSO} $, Wh.....	32
4 lentelė. 24-04-05 paros rodiklis SSR, %	33
5 lentelė. 24-04-05 paros rodiklis SCR, %	33
6 lentelė. Skirtingų dienų optimizuoti tinklo parametrai	37

Paveikslų sąrašas

1pav. Gaminančiųjų vartotojų kiekio (a) ir bendrosios leistinosios generuoti galios (b) kitimas per pastaruosius 5 metus [9]. *Duomenys atnaujinti 2025-03-04.	13
2 pav. Li-ion baterijų kainų dinamika 2015-2024 m. [24].....	16
3pav. Tipinė paros elektros energijos generacijos ir vartojimo diagrama	17
4pav. Tipinė metų elektros energijos generacijos ir vartojimo diagrama	17
5pav. Gaminančio vartotojo namų tinklo schema.....	20
6pav. Namų tinklo modeliavimo algoritmas.....	26
7 pav. Pradiniai 10 dienų duomenys: keitiklio išėjimo galių fazėse suma ir vartojamoji galia atskirose namų tinklo fazėse	27
8pav. 10-ies pasirinktų dienų M1 skaitiklio išmatuota galia tinklo įvado fazėse	28
9pav. 24-04-05 paros SOC ir P_{DSO} grafikai sumodeliuoti prie skirtingų kaupiklio talpų, kai saulės elektrinės galia yra 2000 W (a) ir 10000 W (b).....	30
10pav. Suminė 24-04-05 paros importo – eksporto energija $\sum P_{DSO} $ prie skirtingų kaupiklio talpų, kai saulės elektrinės galia yra 2000W ir 10000W	31
11pav. Parametrų SSR ir SCR koreliacija su parametru G/C	32
12 pav. Suminis vienos paros importo – eksporto srautas $\sum P_{DSO} $	32
13pav. Vienos paros SSR rodiklis.....	33
14pav. Vienos paros SCR rodiklis.....	34
15pav. Suminės paros importo – eksporto energijos $\sum P_{DSO} $ priklausomybės nuo kaupiklio talpos skirtingomis dienomis palyginimas	34
16pav. Matricos $[N]$ grafinis atvaizdas	36
17pav. Matricos $[M]$ grafinis atvaizdas.....	36

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

EEK – elektros energijos kaupiklis.

SSR - paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis,

SCR - paros suvartojimo vietoje rodiklis ,

SOC – baterijos įkrovos lygis,

P_{DSO} - suminiai paros energijos mainai su tinklu,

C_{BAT} - baterijos talpa,

P_{INST} – instaliuota saulės elektrinės galia,

P_{cons} – suvartota energija,

P_{imp} – importuota energija,

P_{exp} – eksportuota energija,

$LiFePO_4$ - ličio geležies fosfato (angl. *Lithium Iron Phosphate*) baterija,

Li-on - ličio jonų baterija,

AEEŠ - atsinaujinantys elektros energijos šaltiniai.

Ivadas

Pastaraisiais metais Lietuvos energetikos sektoriuje vyksta spartūs pokyčiai, susiję su atsinaujinančių energijos šaltinių plėtra. Vienas ryškiausių veiksnių – sparčiai ir nuolat didėjantis gaminančių elektros vartotojų skaičius, ypač individualių namų ūkių kurie įsirengia saulės elektrines. Tokia plėtra išryškina naujas problemas ir išukus susijusius su tinklų stabilumu ir apkrovų balansavimu.

Esminė problema su kuria susiduria ne tik gaminantys vartotojai, bet ir tinklo operatoriai – tai gamybos ir suvartojimo neatitikimas laike. Saulės elektrinės energiją gaminą dienos metu, kai buitinių vartotojų vartojimas būna pats mažiausias, pagrindinis vartojimas pasireiškia ryte, ir vakare, kai jau saulės generacija būna minimali arba jos išvis jau nebėra. Dėl šios priežasties atsiradęs elektros perteklius eksportuojamas į tinklą, o vėliau atsiradus poreikiui importuojama, kai biržoje kainą būna didesnė, iš ko kyla papildomi kaštai tinklo operatoriams.

Siekiant šios problemos sumažinimo į pagalbą galima pasitelkti elektros energijos kaupiklius EEK. Tinkamai parinkus saulės elektrinės galią ir kaupiklio talpą galima sumažinti eksporto ar importo srautus, padidinti energetinį savarankiškumą, kaupiant perteklinę pagamintą elektros energiją EEK namų vartotojų sistemoje ir neeksportuojant į tinklus.

Šio magistrinio tiriamojo darbo tikslas - įvertinti elektros energijos kaupiklių (EEK) taikymo galimybes ir jų įtaką gaminančio vartotojo energetiniam nepriklausomumui. Kadangi pastaraisiais metais Lietuvoje sparčiai auga gaminančių vartotojų skaičius ypač iš saulės elektrinių, darosi vis sunkiau tinkamai subalansuoti tinklų apkrovą ir tai lemia būtinumą efektyvinti elektros energijos vartojimą.

Tyrime remtasi realiais duomenimis surinktais gaminančio vartotojo namų ūkio kuriame instaliuota 10kW saulės elektrinė. Duomenys fiksuoti kas vieną sekundę, kiekvienoje trifazio tinklo fazėje. Siekiant įvertinti kaupiklio naudą energijos srauto balansui, buvo sukurtas matematinis modelis, leidžiantis modeliuoti tiek saulės generacijos, tiek suvartojimo bei importo–eksporto srautus, laikant, kad baterija ideali ir gali būti įkrauta ar iškrauta be galios apribojimų. Modeliavimas buvo atliktas keičiant instaliuojamą saulės elektrinės galią nuo 2 iki 10 kW ir kaupiklio talpą nuo 2 iki 14 kWh.

Modelio vertinimui buvo pasitelkti šie pagrindiniai rodikliai:

SSR- savarankiško apsirūpinimo elektros energija lygis,

SCR - energijos suvartojimas vietoje,

P_{DSO} - suminiai paros energijos mainai su tinklu.

Rezultatai parodė, kad tinkamai parinkus kaupiklio talpą galima žymiai sumažinti energijos eksportą ir importą, ženkliai padidinant tiek *SSR*, tiek *SCR* rodiklius. Kai kuriais atvejais importo–eksporto srautas sumažėjo praktiškai iki nulio. Tai patvirtina reikšmingą EEK naudą siekiant didesnio energetinio savarankiškumo ir mažesnių sąskaitų už iš tinklo atsiimtą elektros energiją.

Tyrimo rezultatai gali būti pritaikomi tiek privačių individualių sprendimų planavimui, tiek didesnėms ar didelėms įmonėms įsivertinti EEK atsiperkamumą.

Darbo tikslas – ištirti EEK panaudojimo gaminančio vartotojo namų elektros tinklo energetinio nepriklausomumo parametrų gerinimui galimybes.

Darbo uždaviniai:

- apžvelgti sąlygas, lemiančias EEK poreikį ir tikslingumą individualių buitinių vartotojų namų tinkle;
- apsibrėžti pagrindinius parametrus, įvertinančius gaminančio vartotojo energetinį nepriklausomumą ir generuojamos energijos suvartojimą vietoje;
- pasiūlyti metodiką, kuri leistų individualiam gaminančiam vartotojui, įsirengusiam ar dar tik planuojančiam įsirengti saulės elektrinę, įsivertinti naudas, kurias suteiktų kartu su elektrine namų tinkle įrengiamas EEK;
- pasiūlyti namų tinklo su saulės elektrine ir EEK energijos srautų matematinio modeliavimo algoritmą;
- patikrinti matematinio modelio veikimo ir vertinimo metodikos efektyvumą praktiškai su realiais duomenimis.

1. Informacijos šaltinių analizė

Sparti atsinaujinančių elektros energijos šaltinių (AEEŠ) plėtra pastaraisiais metais Lietuvoje ir pasaulyje iš esmės keičia situaciją elektros energijos rinkoje [1,2]. Pagrindiniai šią plėtrą lemiantys veiksniai yra dėl klimato kaitos nuolat griežtėjantys aplinkosauginiai reikalavimai, valstybinės skatinančiosios plėtros investicijos, tobulėjančios ir pingančios AEEŠ technologijos. Lietuvoje yra gana palankios sąlygos vėjo, saulės, biokuro elektrinių plėtrai. Kiek prastesnės sąlygos hidroenergetikos vystymui. Iš esmės jau dabar situacija yra pasikeitusi tiek, kad kiekvienas šalies gyventojas ar įmonė gali tapti „žaliosios“ elektros energijos gamintoju ir tiekėju į bendrąjį elektros tinklą, o didžiosios tradicinės elektrinės yra praradusios savo pirminį aktualumą.

Ambicingoje Nacionalinėje energetinės nepriklausomybės strategijoje (NENS) yra numatyta, kad jau 2030 m. Lietuva potencialiai gali pasigaminti 100 % reikalingo elektros energijos kiekio vien iš AEEŠ. Tai grindžiama LR Energetikos ministerijos užsakymu atliktomis studijomis [3,4]. Prognozuojama, kad iki 2050 m. elektros energijos suvartojimas išaugs daugiau kaip 6 kartus – nuo 12 TWh 2024 metais iki maždaug 74 TWh 2050 metais. Įgyvendinant NENS nuostatas, bus padidinti atsinaujinančių energijos išteklių gamybos pajėgumai: 2030 m. įrengtoji vėjo elektrinių galia sieks 5,9 GW, o saulės šviesos energijos elektrinių – 4,1 GW, 2040 m. – vėjo elektrinių galia sieks 9,3 GW, o saulės šviesos energijos elektrinių – 7 GW, 2050 m. vėjo elektrinių galia sieks 14,5 GW, o saulės šviesos energijos elektrinių – 9 GW [5]. Ateityje didžioji dalis Lietuvoje suvartojamos elektros energijos turėtų būti pagaminama iš vėjo ir saulės šviesos mažosiose elektrinėse, išsidėsčiusiose visoje šalies teritorijoje. Svarbus vaidmuo šioje situacijoje tenka individualiems gaminantiems vartotojams, kurių veikla šiuo metu yra aktyviai skatinama finansinėmis ir kitomis priemonėmis [6].

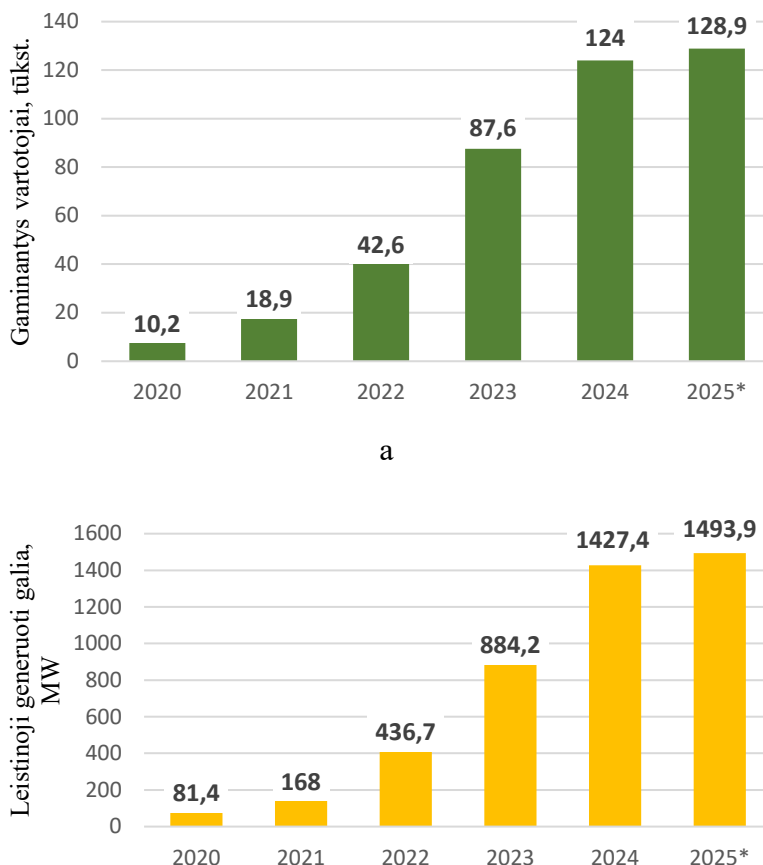
Augant bendrai paskirstytosios generacijos šaltinių instaliuotajai galiai, neišvengiamai didėja iššūkių, susijusių su viso elektros tinklo stabilumo ir tiekimo patikimumo užtikrinimu [7,8,9,10]. Tai susiję su tuo, kad atsinaujinančių šaltinių generuojamos energijos srautas yra nuolat kintantis ir sunkiai prognozuojamas. Kai atsinaujinančios energijos generacijos šaltinių dalis bendroje elektros sistemoje pasidaro ženklus, neišvengiamai prie tam tikrų meteorologinių sąlygų gali atsirasti dideli įtampos svyravimai tinkle. Šie svyravimai gali sukelti kritines situacijas, kai dėl masinio elektros linijų apsaugos prietaisų atsijungimo didelėse šalies teritorijose nutrūksta elektros tiekimas vartotojams. Paskutinis toks didelio masto įvykis buvo užfiksuotas šių metų balandžio 28 d., kai didelė dalis Ispanijos, Portugalijos ir Prancūzijos vartotojų liko be elektros tiekimo. Ši esminė atsinaujinančių šaltinių problema jau šiandien riboja dar spartesnę jų plėtrą.

Kitas atsinaujinančių šaltinių plėtrą ribojantis veiksnys yra skirstomojo ir perdavimo tinklų infrastruktūros nepakankamumas. Tradiciniai elektros tinklai buvo projektuojami tiekti energiją vartotojams iš didžiųjų pastoviosios generacijos jėgainių. Daugėjant gaminančių vartotojų visame tinkle, energijos srautai tampa nebe vienkrypčiai, bet dvikrypčiai, su dideliais generuojamos galios svyravimais, priklausančiais nuo vietinių gamtinių sąlygų. Be to, didėjant instaliuotajai galiai pas tokius vartotojus, pikinės generacijos metu nebekanka vietinio skirstomojo tinklo galingumo. Nepadidinus tinklo pralaidumo, pasiekama riba, kada nauji gaminantys vartotojai nebegali jungtis prie vietinių tinklų, o esami nebegali didinti generuojamos galios. Visoms šioms problemoms spręsti reikalingos didelės investicijos į tinklų plėtrą ir jų valdymo tobulinimą. Ne mažiau svarbus yra ir

tinkamas elektros rinkos valdymo modelio pasirinkimas, kuris leistų subalansuoti energijos generacijos ir vartojimo poreikius.

1.1. Gaminančių vartotojų elektros energijos apskaitos modeliai

Remiantis Lietuvos teisės aktais, kiekvienas fizinis arba juridinis asmuo Lietuvoje gali gamintis elektros energiją pats ir tapti energetiškai nepriklausomu. Tokie savarankiškai savo elektrines įsirengę ir energiją savo poreikiams gaminantys, o nesuvaldomą jos kiekį tiekiantys į tinklus ir atsiradus poreikiui ją susigrąžinantys vartotojai yra vadinami gaminančiais vartotojais. Lietuvoje nuolat auga tiek gaminančiųjų vartotojų skaičius, tiek bendroji jų leistina generuoti galia (1 pav.).



1pav. Gaminančiųjų vartotojų kiekio (a) ir bendrosios leistinosios generuoti galios (b) kitimas per pastaruosius 5 metus [11]. *Duomenys atnaujinti 2025-03-04.

Valstybės remiamos gaminančių vartotojų schemas esminis principas yra skatinti vartotojus investuoti į atsinaujinančios energijos generacijos pajėgumus, kurie patenkintų jų pačių poreikius, bet nebūtų skirti generuoti į tinklą. Idealiu atveju gaminantis vartotojas turėtų pasigaminti elektros energijos tik tiek, kiek suvaldoma pats ir generuoti tik tada, kada yra vartojimo poreikis. Realybėje to, aišku, neįmanoma pasiekti dėl nuolat kintančio vartojimo poreikio, kuris praktiškai niekada nesutampa su generacijos svyravimais tiek paros, tiek ir metų bėgyje. Vartotojui iškyla esminis klausimas: kur dėti sugeneruotą, bet nepanaudotą elektros energiją?

1.1.1. Dvipusė apskaita

Šiuo metu Lietuvoje galioja dvigubos apskaitos (angl. *net metering*) atsiskaitymo už į skirstomąjį tinklą patiektą ir vėliau atgautą elektros energiją modelis. Šio, dar vadinamo „pasaugojimo“ modelio

atveju, gaminantis vartotojas gali visą pagamintą ir nepanaudotą elektros energiją atiduoti į elektros tinklą, kur energija yra apskaitoma kilovatvalandėmis ir saugoma tam pačiam vartotojui panaudoti vėliau susimokant nustatyto dydžio mokestį. Už energijos apskaitą ir „pasaugojimą“ yra atsakinga įmonė Energijos skirstymo operatorius (ESO), o visa veikla yra reglamentuota Lietuvos teisės aktais [12]. Realiai gaminančių vartotojų į tinklą patiekiamą energiją superkama už tuo momentu biržoje esančią elektros kainą, tačiau gaminančiam vartotojui ji apskaitoma kilovatvalandėmis, t. y. susigražinti iš tinklo galima tiek kilovatvalandžių energijos, kiek jų buvo patiekta, nepriklausomai nuo susigražinimo metu esančios elektros biržos kainos. Tokia apskaitos tvarka yra palanki vartotojams, įsirengusiems saulės elektrines, nes elektros kaina biržoje dienos metu, kai generacija yra didžiausia, dažniausiai yra ženkliai mažesnė nei ryte ar vakare, kai saulės elektrinė generuoja mažiau ir, padidėjus vartojimo poreikiui, vartotojams trūkstamą elektros energiją tenka įsigyti iš elektros tiekėjo.

Dvipusės apskaitos modelis Lietuvoje visų pirma yra nukreiptas į švarios atsinaujinančios elektros energijos generacijos pajėgumų plėtros tarp buitinių elektros vartotojų skatinimą. Tačiau, ateityje tai gali tapti didele finansine našta elektros tinklų operatoriui ir nepriklausomiems elektros tiekėjams, kurie iš esmės ir padengia biržos kainos skirtumą tarp superkamos ir parduodamos elektros energijos. Tuo pačiu ši tvarka neskatina vartotojų sekti savo elektros suvartojimo ir keisti įpročių. Atvirkščiai, kadangi AEEŠ generuojama elektra yra santykinai pigi, jos suvartojimas gaminančių vartotojų namų ūkiuose netgi padidėja. Taip perkraunamas skirstymo tinklas bei išbalansuojama rinka, kas ilgainiui gali sąlygoti persiuntimo kainos didėjimą bei aukštas elektros energijos kainas biržoje. Dėl šių priežasčių kai kuriose Europos šalyse jau yra atsisakoma tokio apskaitos modelio [13,14].

1.1.2. Grynasis atsiskaitymas

Daugelyje Europos šalių šiuo metu galioja grynojo atsiskaitymo (angl. *net billing*) modelis. Šiuo atveju nesunaudotas elektros energijos kiekis yra parduodamas ESO arba nepriklausomiems elektros tiekėjams biržos kaina. Vėliau, atsiradus poreikiui, už sukauptus pinigus yra įsigyjama elektros energija iš tų pačių tiekėjų pagal tuo metu galiojančią biržos kainą. Lietuvoje nuo 2024 metų, pasikeitus atsiskaitymo tvarkai už „pasaugomą“ elektros energiją, toks atsiskaitymo modelis tapo privalomas visiems juridiniams gaminantiems vartotojams, kurie naujai jungia į tinklą savo atsinaujinančios energijos elektrines. Buitiniams vartotojams toks modelis yra neprivalomas, tačiau leidžiamas pasirinkti savanoriškai. Kaip rodo užsienio šalių praktika, ateityje grynojo atsiskaitymo modelis gali tapti privalomas visiems gaminantiems vartotojams. Tai yra logiška, nes valstybės skatinimo priemonės ir parama atsinaujinančios elektros energijos gamybai ir pasaugojimui yra labiausiai reikalinga pradiniam jos vystymo etape. Vėliau, pasiekus atitinkamą pagreitį „žaliosios“ energetikos plėtroje, ši parama ima mažėti ir pradeda veikti rinkos ekonomikos dėsniai. Vartotojams tai dažniausiai reiškia ilgesnį pradinių investicijų į generacijos pajėgumus atsiperkamumo laikotarpį ir atidesnio veiklos planavimo poreikį [15,16,17]. Apie tokį scenarijų jau turėtų pradėti galvoti ir planuoti tiek esami, tiek planuojantys tokiais tapti gaminantys vartotojai.

Įvairių ekspertų vertinimu, vienas perspektyviausių sprendimų gaminančiam vartotojui grynojo atsiskaitymo atveju būtų generuojamos perteklinės energijos kaupimas vietoje, įsirengiant individualius energijos kaupiklius, iš kurių energiją vėliau, atsiradus poreikiui, būtų galima suvartoti vietoje, arba, esant palankioms sąlygoms, perduoti į tinklą [18]. Tokiu atveju vartotojui atsiranda ženkliai platesnės galimybės valdyti savo energijos srautus ir net turėti papildomos finansinės naudos, aktyviai vykdant prekybą elektros biržoje.

1.2. Elektros energijos kaupikliai

Elektros energijos kaupikliai (EEK) individualiuose namų ūkiuose Lietuvoje dar tik pradeda įgauti populiarumą. Lig šiol pagrindinis veiksnys, ribojęs spartesnį jų diegimą, buvo aukšta kaupiklių kaina. Reaguodama į besikeičiančią situaciją, Lietuvos vyriausybė yra numačiusi skatinamąsias priemones kaupiklių įsigijimui buitiniams vartotojams. Atsižvelgiant į tai, kad kaupikliai pastaraisiais metais sparčiai pinga ir valstybės finansinė parama sudaro ženklia jų diegimo kaštų dalį, tikėtina kad ateinančiais metais jų diegimo tempas sparčiai augs.

Šiandien populiariausios elektros energijos kaupiklių technologijos namų ūkiuose ir mikrotinkluose su atsinaujinančiais energijos šaltiniais (dažniausiai saulės elektrinėmis) yra šios:

- ličio jonų (Li-ion) baterijos;
- LFP (LiFePO₄) – ličio geležies fosfato baterijos;
- švino-rūgštinės baterijos (AGM, GEL).

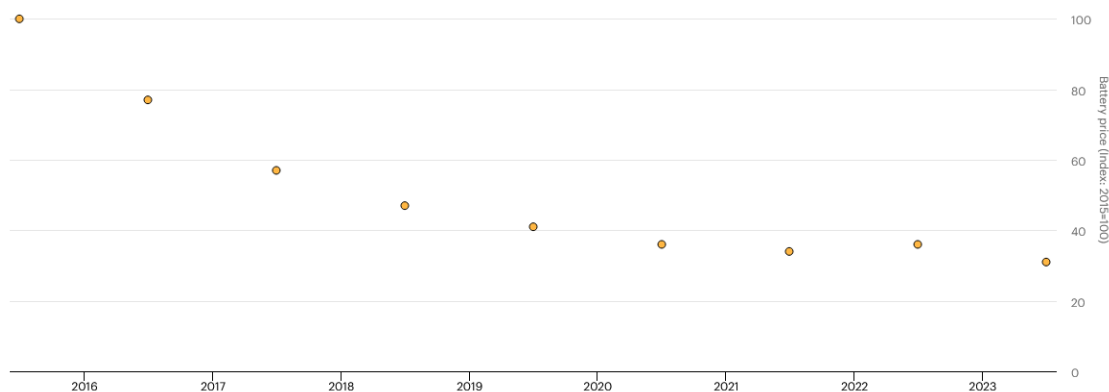
1 lentelėje pateikiamas šių technologijų pagrindinių savybių palyginimas, sudarytas remiantis literatūros šaltiniuose pateikiama informacija [19-25].

1 lentelė. Elektros energijos kaupiklių technologijų palyginimas

Savybė	Li-ion	LFP	Švino-rūgštinės
Energijos tankis	Aukštas (150–250 Wh/kg)	Vidutinis (90–160 Wh/kg)	Žemas (30–50 Wh/kg)
Tarnavimo ciklai	~3000–6000 ciklų	~4000–8000 ciklų	~500–1000 ciklų
Tarnavimo trukmė	~10–15 metų	~10–20 metų	~3–6 metai
Gilus iškrovimas	~90–95 %	~90–100 %	~50 % (pilnai iškrovus trumpėja tarnavimo laikas)
Efektyvumas (angl. <i>round-trip</i>)	90–95 %	92–98 %	70–85 %
Temperatūrinis stabilumas	Vidutinis	Aukštas (labai saugios)	Vidutinis–žemas
Saugumas	Gali perkaisti / užsidegti	Saugios, neužsidega	Gali ištekėti rūgštis
Kaina (už kWh)	Aukšta	Šiek tiek mažesnė nei Li-ion	Žema
Priežiūra	Be priežiūros	Be priežiūros	Reikalinga (ypač skystoms)
Svoris ir dydis	Kompaktiškos, lengvos	Kompaktiškos, šiek tiek sunkesnės nei Li-ion	Labai sunkios ir didelės

Atsižvelgiant į lentelėje pateiktas charakteristikas, ličio geležies fosfato baterijos galėtų būti laikomos geriausiu pasirinkimu kainos, ilgaamžiškumo ir saugumo santykio atžvilgiu individualiuose namų ūkiuose. Dėl savo cheminės sudėties (neturi degių metalų oksidų ir deguonį atpalaiduojančių cheminių junginių) LiFePO₄ baterijos yra termiškai atsparesnės už Li-ion baterijas. Jų aukštoji ribinio atsparumo temperatūra siekia iki 300 °C, kai tuo tarpu Li-ion – tik 200 °C. LiFePO₄ baterijų katodo kristalinė struktūra yra labai stabili net esant aukštai temperatūrai ar perkrovimo sąlygoms. Tai lemia

mažesnę savaiminio užsidegimo riziką ir didesnę jų saugumą eksploatacijos metu, kas yra svarbu daugumai vartotojų. Nors šios baterijos pradėtos masiškai gaminti ir pardavinėti dar visai neseniai, jų kaina yra žemesnė už plačiausiai paplitusių ličio jonų baterijų ir toliau krenta. 2 pav. pateikta standartinių Li-ion baterijų kainų dinamika nuo 2015 m. (Tarptautinės energetikos agentūros duomenys [26]). Nežiūrint kainos mažėjimo, kaupiklių baterijos vis dar išlieka nepigios: pavyzdžiui, buitiniams vartotojams su saulės elektrinėmis skirtas 15 kWh talpos LiFePO₄ baterijų komplektas šiuo metu Lietuvoje kainuoja apie 6-8 tūkst. eurų.



2 pav. Li-ion baterijų kainų dinamika 2015-2024 m. [26]

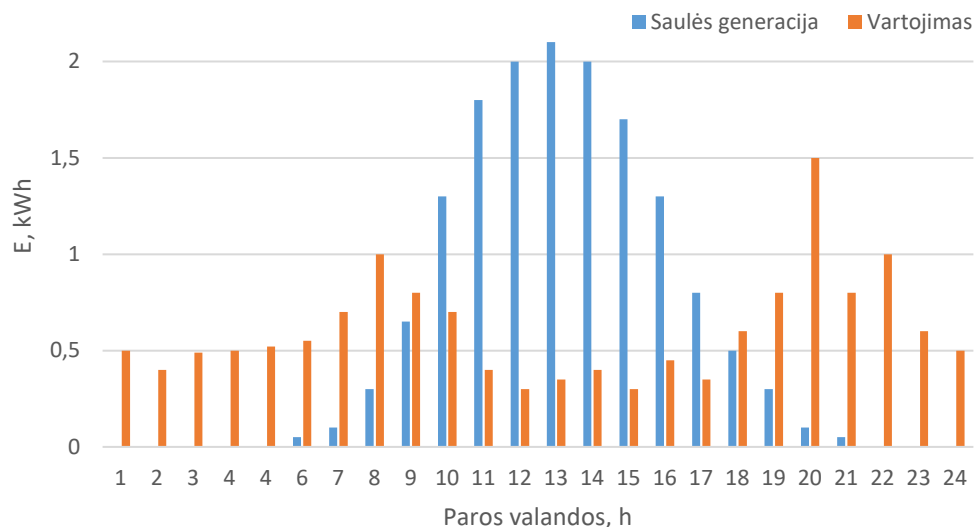
1.3. Elektros energijos kaupiklio talpos parinkimo prielaidos

Prieš priimdamas sprendimą dėl EEK diegimo savo namų ūkyje, vartotojas pirmiausiai turėtų įsivardinti tokio sprendimo tikslus ir siekiamas naudas. Pagrindinės naudos galėtų būti šios:

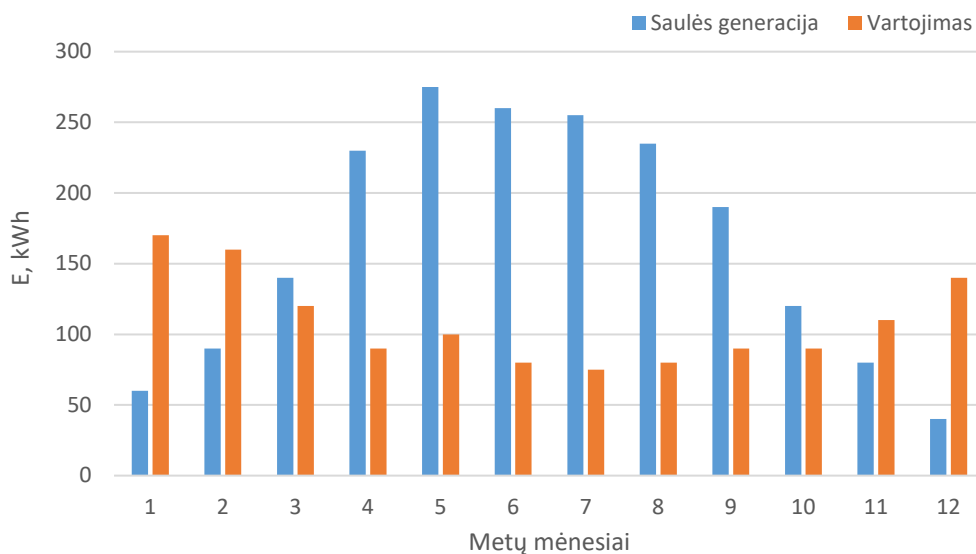
- didinamas generuojamos energijos suvartojimas vietoje;
- mažinamos išlaidos už elektros persiuntimą tinklais ir „pasaugojimą“ dvipusės apskaitos atveju;
- galimybė kaupti energiją, kai ji yra pigi, ir atiduoti į tinklą, kai ji yra brangi, grynojo atsiskaitymo atveju;
- didinamas energijos tiekimo patikimumas;
- didinama energetinė nepriklausomybė (autonomiškumas);
- mažinamos pikinės energijos perdavimo galios namų tinkle, dėl kurių sumažėja bendrosios instaliuotosios galios poreikis;
- galimybė instaliuoti didesnės galios saulės elektrinę, nei bendroji namų tinklo instaliuotoji galia;
- galimybė pasinaudoti paramos mechanizmais.

Didinti generuojamos energijos vartojimą vietoje yra svarbu visų pirma dėl visapusiškos finansinės naudos pačiam vartotojui. Tačiau ne mažiau svarbus yra ir skirstomojo tinklo apkrovos mažinimas. Šiuo metu daugelyje Lietuvos vietovių vartotojai susiduria su situacija, kai negaunama leidimo įsirengti pageidaujamo galingumo saulės elektrinę ar pasididinti esamos elektrinės galios dėl to, kad vietinio skirstomojo tinklo infrastruktūra (transformatoriai, linijos ir kita įranga) neturi pakankamos rezervinės galios priimti papildomus energijos kiekius.

Namų tinkle generuojamos energijos vartojimą vietoje labiausiai riboja generacijos ir vartojimo pikų ne vienalaikiškumas. 3 pav. pavaizduota tipinė paros saulės elektrinės generuojamos energijos ir vartojamos energijos tame pačiame namų ūkyje diagrama. Panašiai, 4 pav. pateikta metinė generacijos ir vartojimo diagrama.



3pav. Tipinė paros elektros energijos generacijos ir vartojimo diagrama



4pav. Tipinė metų elektros energijos generacijos ir vartojimo diagrama

Pateikti pavyzdžiai iliustruoja tipinį elektros energijos vartojimo padidėjimą ryte ir vakare, bei žiemos laikotarpiu, kai tuo tarpu didžiausi saulės generacijos pikai yra vidurdienį ir vasaros laikotarpiu. Didžiausias energijos deficitas visuomet yra nakties metu ir žiemos mėnesiais.

Vietinis energijos kaupiklis leistų dalį dienos metu generuojamos energijos „perkelti“ į vakarą ir naktį [27,28,29,30,31]. Didesnės talpos kaupiklis, esant pakankamai saulės generacijai, leistų užtikrinti ir rytinio vartojimo piko padengimą. Teoriškai, didinant kaupiklio talpą, galime pasiekti, kad visa saulės elektrinės sugeneruota energija bus suvartota namų tinkle, neperduodant jos į išorinį tinklą. Visgi įsirengti tokios talpos kaupiklį, kurio vasaros metu sukauptos energijos pakaktų maitinti vartotoją

žiemos mėnesiais, buitiniam vartotojui šiuo metu yra nerealų. Todėl šiame darbe yra orientuojamasi į galimai didesnę paros vartojimo poreikių tenkinimą su galimai mažesne baterijos talpa. Tuo tikslu bus tiriama baterijos talpos įtaka namų tinklo vienos paros energijos – generuojamos, vartojamos, importuojamos ir eksportuojamos – srautams.

2. Tyrimo metodika

Vienas pagrindinių šio darbo uždavinių yra pasiūlyti metodiką, kuri leistų individualiam gaminančiam vartotojui, įsirengusiam ar dar tik planuojančiam įsirengti saulės elektrinę, įsivertinti naudas, kurias suteiktų kartu su elektrine namų tinkle įrengiamas EEK. Turėdamas tokią informaciją, vartotojas gali priimti sprendimą dėl tinkamiausio kaupiklio tipo ir optimalios jo talpos.

Kaupiklio technologijos buvo apžvelgtos 1.3 skyriuje ir plačiau šiame darbe nebus nagrinėjamos. Pagrindinis dėmesys toliau bus skiriamas kaupiklio talpos įtakos energijos vartojimo efektyvumo didinimui tyrimui. Tyrimas bus grindžiamas matematinio modeliavimo rezultatais, panaudojant realius eksperimentinių matavimų duomenis.

2.1. Namų tinklo energijos srautų parametrai

Kiekybiniam energijos suvartojimo vietoje įvertinimui yra atliekama namų tinklo energijos srautų analizė. Vertinimui buvo pasirinkti trys parametrai:

- suminis paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekis;
- paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis (angl. Self-sufficiency rate (*SSR*));
- paros suvartojimo vietoje rodiklis (angl. Self-consumption rate (*SCR*)).

2.1.1. Suminis paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekis

Suminis paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekis $\sum P_{DSO}$ tiesiogiai parodo energijos mainų tarp namų tinklo ir skirstomojo tinklo apimtį, t.y., kiek sugeneruotos energijos buvo išsiųsta „pasaugojimui“ (eksportuota) ir kiek jos vėliau buvo susigrąžinta kartu su trūkstamu energijos kiekiu (importuota):

$$\sum P_{DSO} = \sum |P_{exp}| + \sum |P_{imp}|. \quad (1)$$

Šis parametras skirtingomis dienomis gali būti labai skirtingas ir priklauso nuo kiekvienos dienos saulės apšvietos intensyvumo kitimo, bei nuolat kintančių individualaus vartotojo energijos vartojimo poreikių. Tačiau ilgesniame periode visuomet išryškėja tam tikros vartojimo ir generacijos tendencijos, tad turint pakankamai statistinių duomenų, galima būtų šiuo procesus prognozuoti. Importuojamos ir eksportuojamos energijos apskaitą užtikrina namų elektros tinklo įvadinis elektros apskaitos prietaisas, kurio priežiūrą Lietuvoje vykdo ESO. Visgi toks prietaisas persiunčia duomenis nuotoliniu būdu ir gali juos atvaizduoti su ne didesne, nei 15 min didžiausia skiriamąją geba. Tokios skiriamosios gebos nepakanka pamatyti realios generacijos ir vartojimo dinamikos. Per 15 min saulės apšvietos intensyvumas gali ženkliai pakisti keletą kartų, o trumpų vartojimo pikų galima iš viso nepamatyti [32]. Dėl gretai kintančių sąlygų, elektros importo ir eksporto srautai gali keisti vienas kitą keletą kartų, o mes stebėsime tik suminį vidutinį vienos ar kitos krypties srautą per tą laikotarpį.

Kitas standartinio apskaitos prietaiso ypatumas yra tas, kad trifaziame namų tinkle toks prietaisas parodys tik suminę visų trijų fazių energiją. Atskirų fazių energijos jis neregistruoja. Ankstesnis KTU atliktas tyrimas [33] parodė, kad realiomis sąlygomis dėl fazių apkrovos ne balanso galimi atvejai, kai tuo pačiu metu per vieną namų tinklo įvado fazę elektra gali būti importuojama, o per kitą – eksportuojama. Į tai reikia atsižvelgti, siekiant tikslesnio energijos srautų įvertinimo. Remiantis ankstesnių tyrimų pavyzdžiu, šiame darbe buvo analizuojami namų tinklo atskirų fazių energijos srautai, naudojant 1 s skiriamąją gebą.

2.1.2. Paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis

Paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis SSR rodo, kokia dalis visos vartotojo sunaudojamos energijos buvo pagaminta vietinės saulės elektrinės. Šis parametras apskaičiuojamas kaip santykinis suminės suvartotos energijos $\sum P_{cons}$ ir suminės importuotos energijos $\sum P_{imp}$ skirtumas.

$$SSR = \frac{\sum P_{cons} - \sum P_{imp}}{\sum P_{cons}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

2.1.3. Paros suvartojimo vietoje rodiklis

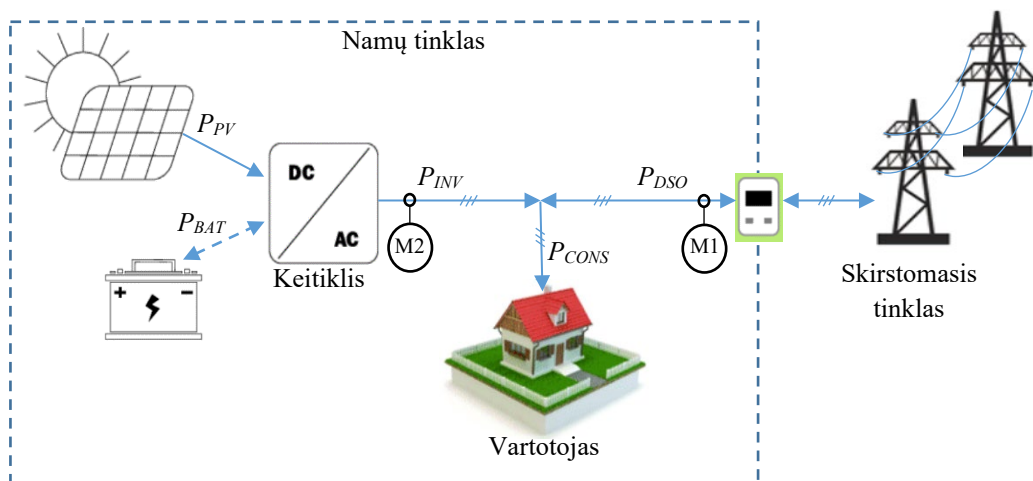
Paros suvartojimo vietoje rodiklis SCR rodo, kokią dalį savo pagamintos energijos vartotojas sunaudoja pats, tiesiogiai, neeksportuodamas į tinklą. Jis apskaičiuojamas kaip santykinis suminės saulės elektrinės (keitiklio) energijos $\sum P_{INV}$ ir suminės eksportuotos energijos $\sum P_{exp}$ skirtumas:

$$SCR = \frac{\sum P_{INV} - \sum P_{exp}}{\sum P_{INV}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Siekiant maksimalaus generuojamos energijos suvartojimo vietoje, reikia, kad suminės paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekis $\sum P_{DSO}$ artėtų į nulį, o SSR ir SCR artėtų prie 100%.

2.2. Eksperimento duomenys

Siekiant įvertinti energijos kaupiklio įtaką gaminančio vartotojo namų tinklo energijos srautams buvo atliekamas eksperimentas pradinių duomenų surinkimui. Tuo tikslu buvo pasirinktas vieno gaminančio vartotojo, įsirengusio 10 kW saulės elektrinę su standartiniu „string“ tipo keitikliu, namų ūkis, esantis Kauno rajone. EEK vartotojas neturėjo, bet planavo įsigyti. Eksperimentiniam duomenų kaupimui papildomai buvo sumontuoti du išmanūs elektros skaitikliai „Shelly Pro 3EM“ [34]: vienas (M2) – saulės keitiklio išėjime, kitas (M1) – greta įvadinio ESO apskaitos prietaiso (5 pav.). Šie skaitikliai registravo atskirai kiekvienos iš trijų tinklo fazių vidutinę aktyviają galią vienos sekundės intervalais ir realiu laiku persiųsdavo duomenis Wi-Fi ryšiu į nutolusį duomenų surinkimo serverį.



5pav. Gaminančio vartotojo namų tinklo schema

Keitiklio išėjime prijungto skaitiklio M2 duomenys buvo išsaugomi trijuose vienmačiuose masyvuose – $[P_{INV\ L1}]$, $[P_{INV\ L2}]$ ir $[P_{INV\ L3}]$ – atitinkančiuose tris atskirus keitiklio fazių išėjimus. Greta įvado prijungtas skaitiklis M1 registravo dvikryptį energijos srautą atitinkančią vidutinę galią, kuri į duomenų masyvą buvo įrašoma su teigiamomis ir neigiamomis reikšmėmis: teigiama galia buvo registruojama energijos eksporto į skirstomąjį tinklą metu, neigiama – importo iš skirstomojo tinklo metu. Šie duomenys buvo išsaugomi masyvuose $[P_{dso\ L1}]$, $[P_{dso\ L2}]$ ir $[P_{dso\ L3}]$. Tokiu būdu per parą buvo gaunama iš viso 777600 aktyviosios galios matavimo įrašų. Dėl didelio duomenų srauto ir pasitaikančių ryšio sistemos trikdžių dalis sekundinių matavimo duomenų būdavo neįrašoma ir prarandama. Tų parų, kada buvo gaunami nepilni duomenų rinkiniai, duomenys būdavo atmetami. Eksperimentinių duomenų kaupimas vyko 2024 m. kovo- rugsėjo mėnesiais. Iš gautųjų duomenų buvo atrinkti dešimties dienų duomenys, atspindintys viso eksperimento laikotarpio tipinius atvejus, ir su jais atliekamas tolimesnis tyrimas, modeliuojant įvairias tinklo situacijas.

2.3. Modeliavimo algoritmas

Namų tinkle generuojama energija pirmiausia yra nukreipiama į vietinį vartojimą, o jei yra jos perteklius, jis nukreipiamas į eksportą. Nepakankant generuojamos energijos, vartojimui trūkstamas energijos kiekis yra importuojamas. Tai yra standartinis energijos paskirstymo algoritmas, kai gaminantis vartotojas yra pastoviai prijungtas prie skirstomojo tinklo ir naudojamas „string“ tipo keitiklis be kaupiklio. Įvedus kaupiklį, energijos srautų paskirstymo algoritmas keičiasi. Visa perteklinė generuojama energija pirmiausia yra nukreipiama į kaupiklį. Užsipildžius kaupikliui, perteklinė energija yra eksportuojama. Sumažėjus generacijai ir negalint patenkinti vartojimo, trūkstama energija pirmiausiai yra imama iš baterijos ir tik visiškai jai išsikrovus, energija pradeda importuoti. Nuo baterijos technologijos priklauso iki kokio lygio ją galima saugiai įkrauti ir kaip giliai iškrauti, nesukeliant spartesnės jos degradacijos ar kitų eksploatacinių savybių pablogėjimo. Taip pat priklauso, kokia galima maksimali įkrovos iš iškrovos energija ir sparta (angl. *C-rate*). Kadangi šiame tyrime į technologinius baterijų aspektus plačiau nesigilinama, tai šie parametrai nėra vertinami ir laikoma, kad baterija yra ideali: baterijos įkrova gali kisti nuo 0 iki 100 % ir krovimo sparta neribojama.

Namų tinkle vartojama elektros energija P_{cons} yra apskaičiuojama kaip skirtumas tarp keitiklio išėjime išmatuotos energijos P_{INV} ir tuo pačiu laiko momentu tinklo įvade išmatuotos energijos P_{DSO} . Skaitikliai M1 ir M2 rodo vidutinę galią per 1 s, todėl jų rodmenis galima traktuoti ir kaip galią, matuojamą vatais (W), ir kaip energiją, matuojamą vatsekundėmis (Ws).

Toliau pateikiamas baterijos krovimo ir energijos srautų tinkle, bei pagrindinių jų parametrų skaičiavimo algoritmas, kurio pagrindu buvo atliekamas gaminančio vartotojo namų tinklo modeliavimas. Pradžioje pateikiamas algoritmo pseudokodas, o toliau (5 pav.) – grafinis algoritmas vaizdavimas.

Algoritmo pseudokodas.

1. Įvedami skaitiklio paros matavimo duomenys

Elektros įvado skaitiklio duomenys (W): $[P_{DSO\ L1\ t}]$, $[P_{DSO\ L2\ t}]$, $[P_{DSO\ L3\ t}]$, kai $t = 1 \dots 86400$;

Keitiklio skaitiklio duomenys (W): $[P_{INV\ L1\ t}]$, $[P_{INV\ L2\ t}]$, $[P_{INV\ L3\ t}]$, kai $t = 1 \dots 86400$.

2. Nustatomi pradiniai duomenys

Baterijos įkrovos lygis kiekvieną sekundę (%): $[SOC_t] = 0$, kai $t = 1 \dots 86400$;

Pradinis baterijos įkrovos lygis (Wh): $B = 0$;

Pradinė baterijos talpa (Wh): $C_{BAT} = 0$;

Pradinis baterijos talpos indeksas: $b = 1$;

Pradinė saulės elektrinės instaliuotoji galia (W): $P_{INST} = 1000$;

Pradinis elektrinės instaliuotosios galios indeksas: $e = 1$.

3. Nustatoma pradinė laiko atskaita (s): $t = 1$.

4. Apskaičiuojamas vartojamoji galia namų tinklo fazėse t -ąją sekundę (W):

$$P_{CONS\ L1\ t} = P_{INV\ L1\ t} - P_{DSO\ L1\ t};$$

$$P_{CONS\ L2\ t} = P_{INV\ L2\ t} - P_{DSO\ L2\ t}; \quad (4)$$

$$P_{CONS\ L3\ t} = P_{INV\ L3\ t} - P_{DSO\ L3\ t}.$$

5. Apskaičiuojama suminė keitiklio išėjimo galia:

$$P_{INV} = \frac{(P_{INV\ L1\ t} + P_{INV\ L2\ t} + P_{INV\ L3\ t}) \cdot P_{INST}}{10000}. \quad (5)$$

6. Apskaičiuojamas galios srautas per M1 skaitiklį t -ąją sekundę (W):

$$\Delta P = P_{DSO\ L1\ t} + P_{DSO\ L2\ t} + P_{DSO\ L3\ t}. \quad (6)$$

7. Jei $\Delta P \geq 0$ (daugiau eksportuojama nei importuojama), vykdomas kitas punktas. Priešingu atveju vykdomas 11 punktas.

8. Jei $B + \Delta P \leq C_{BAT}$ (baterija nepersipildys, papildžius ją pertekline (eksportuojama) energija), tai:

$$B = B + \Delta P / 3600; \quad (7)$$

(dalinama iš 3600, kad gauti vatvalandes (Wh))

$$P_{INV} = P_{INV} - \Delta P. \quad (8)$$

Priešingu atveju (baterija persipildys):

$$B = C_{BAT}; \quad (9)$$

$$P_{INV} = P_{INV} - (C_{BAT} - B). \quad (10)$$

9. Apskaičiuojamas baterijos įkrovos lygis (%):

$$SOC_t = \frac{B}{C_{BAT}} \cdot 100\%. \quad (11)$$

10. Perskaičiuojama keitiklio išėjimo galia t -ąją sekundę (W):

$$P_{INV\ L1\ t} = P_{INV\ L2\ t} = P_{INV\ L3\ t} = \frac{P_{INV}}{3}. \quad (12)$$

Toliau vykdomas 19 punktas.

11. (Daugiau importuojama nei eksportuojama $\Delta P < 0$.) Jei $B > 0$ (baterijoje yra energijos), tai vykdomas kitas punktas. Priešingu atveju (baterija tuščia) vykdomas 17 punktas.

12. Jei $B + \Delta P / 3600 > 0$ (baterija pilnai neiškraunama ir joje dar liks energijos), tai:

$$B = B + \Delta P / 3600. \quad (13)$$

Priešingu atveju (baterija pilnai iškraunama) vykdomas 15 punktas.

13. Apskaičiuojamas baterijos įkrovos lygis (%):

$$SOC_t = \frac{B}{C_{BAT}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

14. Perskaičiuojama keitiklio išėjimo galia t -ąją sekundę (W):

$$P_{INV L1 t} = P_{INV L2 t} = P_{INV L3 t} = \frac{P_{INV} + |\Delta P|}{3}. \quad (15)$$

Toliau vykdomas 19 punktas.

15. Baterijos įkrovos lygis (W,%):

$$B = 0;$$

$$SOC_t = 0.$$

16. Perskaičiuojama keitiklio išėjimo galia t -ąją sekundę (W):

$$P_{INV L1 t} = P_{INV L2 t} = P_{INV L3 t} = \frac{P_{INV} + B \cdot 3600}{3} \quad (16)$$

(dauginama iš 3600, kad gauti vatsekundes (Ws)).

Toliau vykdomas 19 punktas.

17. Baterijos įkrovos lygis (W,%):

$$B = 0;$$

$$SOC_t = 0.$$

18. Perskaičiuojama keitiklio išėjimo galia t -ąją sekundę (W):

$$P_{INV L1 t} = P_{INV L2 t} = P_{INV L3 t} = \frac{P_{INV}}{3}. \quad (17)$$

19. Perskaičiuojama galia įvado fazėse t -ąją sekundę (W):

$$P_{DSO L1 t} = P_{INV L1 t} - P_{CONS L1 t};$$

$$P_{DSO L2 t} = P_{INV L2 t} - P_{CONS L2 t}; \quad (18)$$

$$P_{DSO L3 t} = P_{INV L3 t} - P_{CONS L3 t}.$$

20. Didinama laiko atskaita: $t = t + 1$.

21. Jei $t \leq 86400$, vykdomas 4 punktas. Priešingu atveju vykdomas kitas punktas.

22. Apskaičiuojamas suminis absoliutinės galios srautas per parą tarp skirstomojo tinklo ir namų ūkio prie b -osios baterijos talpos ir e -osios instaliuotosios elektrinės galios:

$$[\sum P_{DSOeb}] = \sum_{t=1}^{86400} |P_{DSO L1 t}| + |P_{DSO L2 t}| + |P_{DSO L3 t}|. \quad (19)$$

23. Apskaičiuojama atskirai elektros importo ir eksporto galia kiekvieną paros sekundę atskirose namų tinklo fazėse (W):

$$[P_{imp L1t}] = [P_{DSO L1 t}], \text{ kai } P_{DSO L1 t} \leq 0;$$

$$[P_{imp L2t}] = [P_{DSO L2 t}], \text{ kai } P_{DSO L2 t} \leq 0;$$

$$[P_{imp L3t}] = [P_{DSO L3 t}], \text{ kai } P_{DSO L3 t} \leq 0; \quad (20)$$

$$[P_{\text{exp } L1t}] = [P_{DSO \ L1 \ t}], \text{ kai } P_{DSO \ L1 \ t} \geq 0;$$

$$[P_{\text{exp } L2t}] = [P_{DSO \ L2 \ t}], \text{ kai } P_{DSO \ L2 \ t} \geq 0;$$

$$[P_{\text{exp } L3t}] = [P_{DSO \ L3 \ t}], \text{ kai } P_{DSO \ L3 \ t} \geq 0.$$

24. Apskaičiuojamas paros savarankiško apsirūpinimo rodiklis (angl. Self-sufficiency rate (SSR)) (%):

$$[SSR_{eb}] = \frac{\sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{cons } L1t} + P_{\text{cons } L2t} + P_{\text{cons } L3t}) - \sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{imp } L1t} + P_{\text{imp } L2t} + P_{\text{imp } L3t})}{\sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{cons } L1t} + P_{\text{cons } L2t} + P_{\text{cons } L3t})} \cdot 100\%. \quad (21)$$

25. Apskaičiuojamas paros suvartojimo vietoje rodiklis (angl. Self-consumption rate (SCR)) (%):

$$[SCR_{eb}] = \frac{\sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{INV } L1t} + P_{\text{INV } L2t} + P_{\text{INV } L3t}) - \sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{exp } L1t} + P_{\text{exp } L2t} + P_{\text{exp } L3t})}{\sum_{t=1}^{86400} (P_{\text{INV } L1t} + P_{\text{INV } L2t} + P_{\text{INV } L3t})} \cdot 100\%. \quad (22)$$

26. Didinama baterijos talpa (Wh):

$$C_{BAT} = C_{BAT} + 2000;$$

$$b = b + 1.$$

27. Jei $C_{BAT} \leq 14000$, tai vykdomas 3 punktas. Priešingu atveju vykdomas kitas punktas.

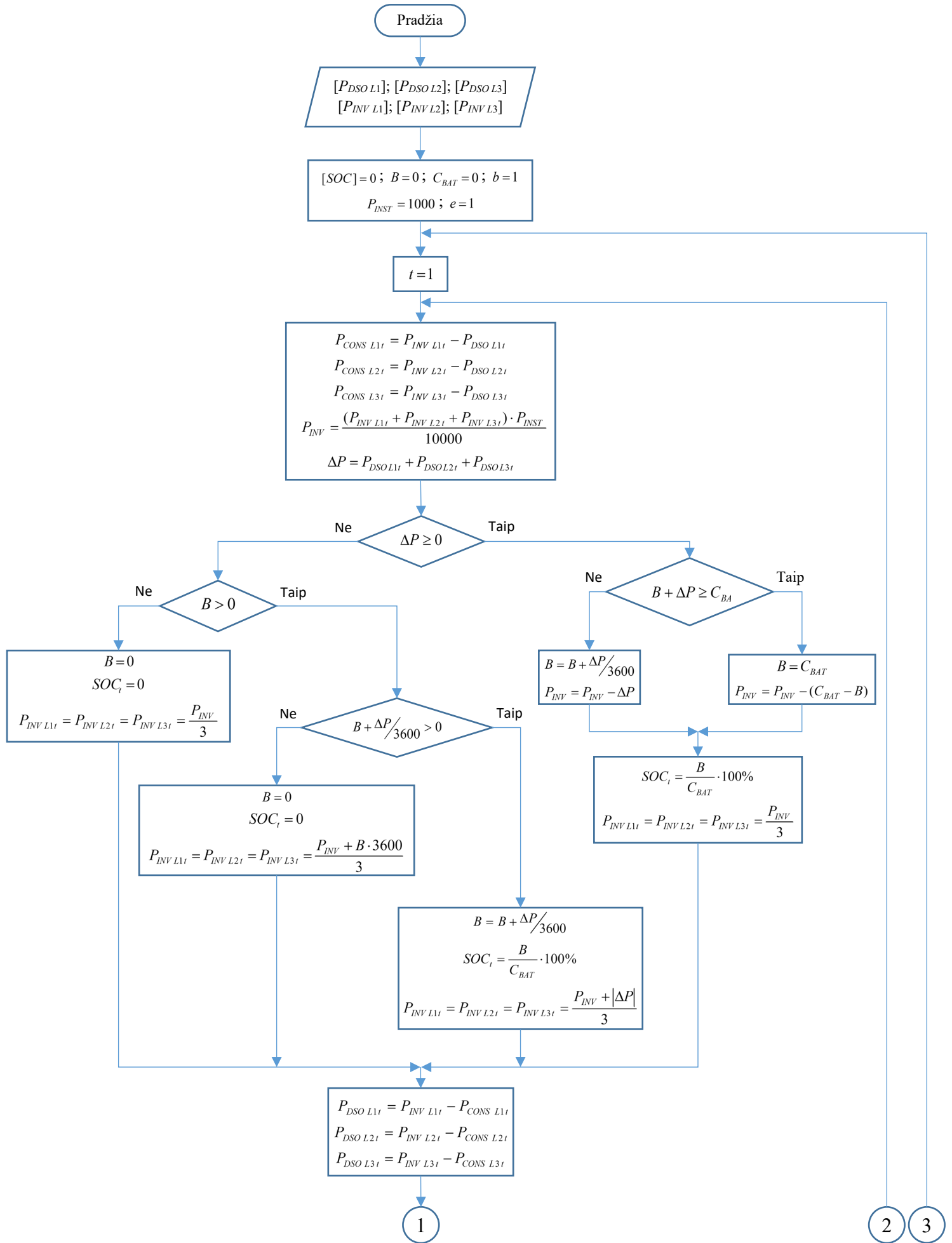
28. Didinama saulės elektrinės galia (W):

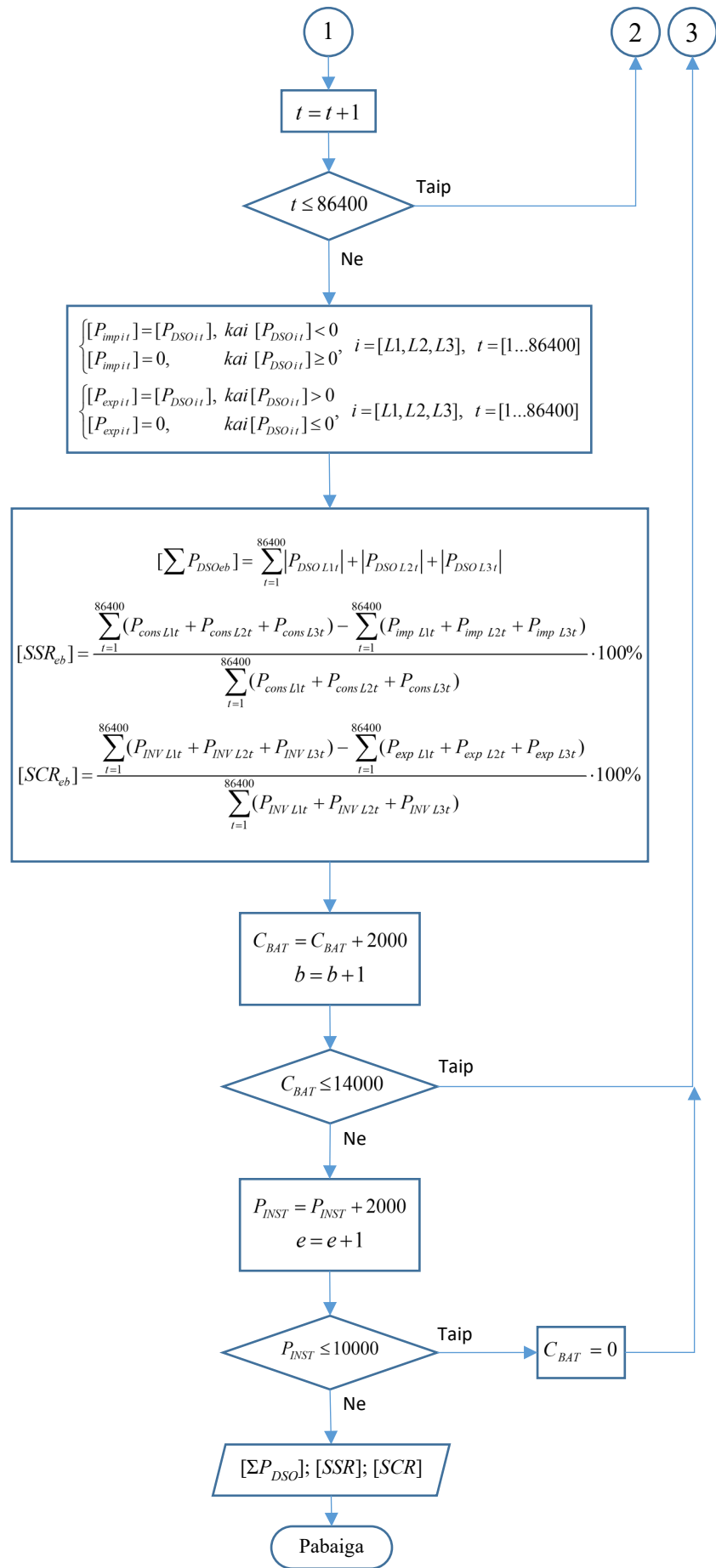
$$P_{INST} = P_{INST} + 2000;$$

$$e = e + 1.$$

29. Jei $P_{INST} \leq 10000$, tai $C_{BAT} = 0$ ir vykdomas 3 punktas. Priešingu atveju vykdomas kitas punktas.

30. Duomenų išvedimas: $[\sum P_{DSOeb}]; [SSR_{eb}]; [SCR_{eb}]$.





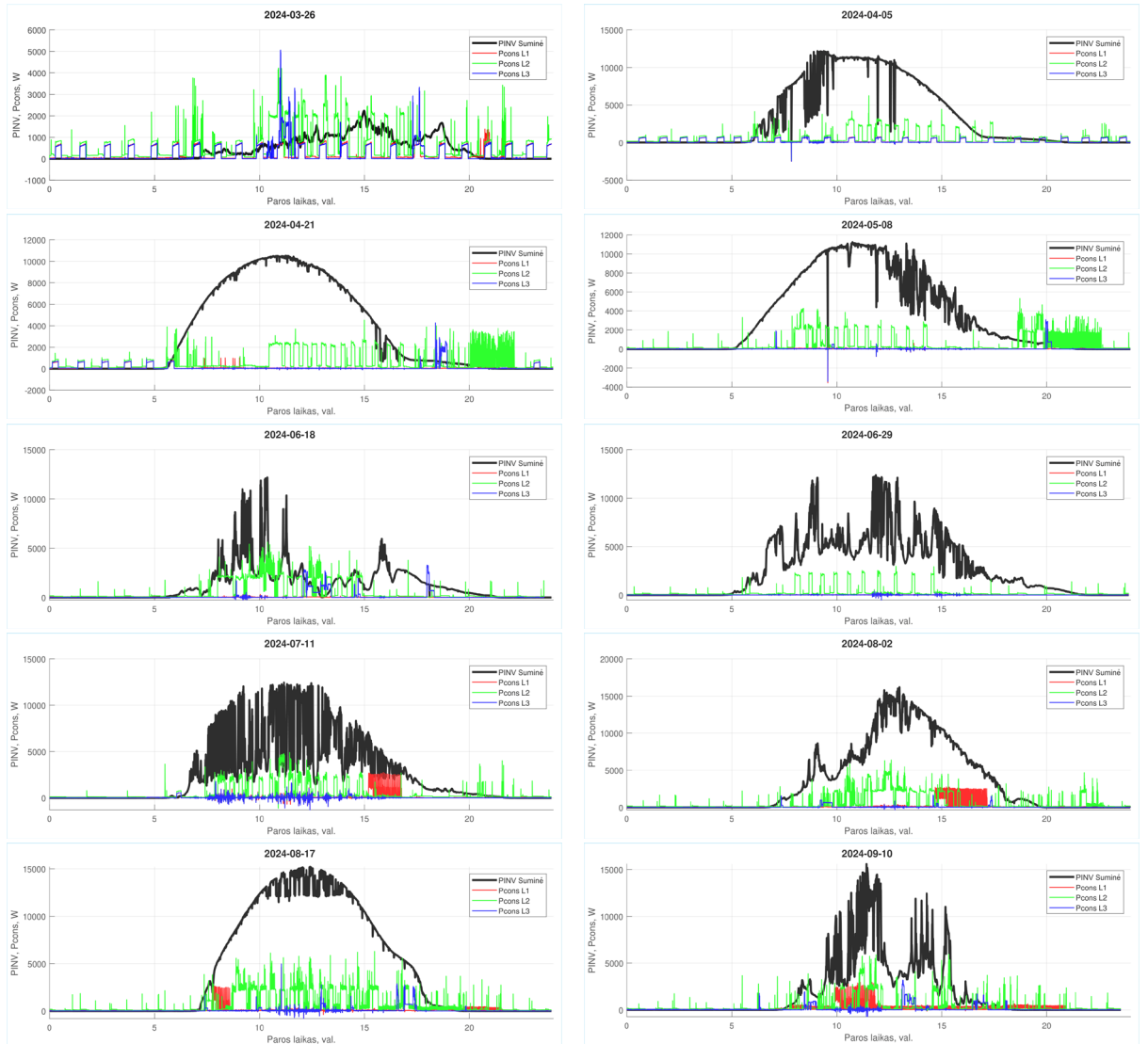
6pav. Namų tinklo modeliavimo algoritmas

3. Tyrimo rezultatai

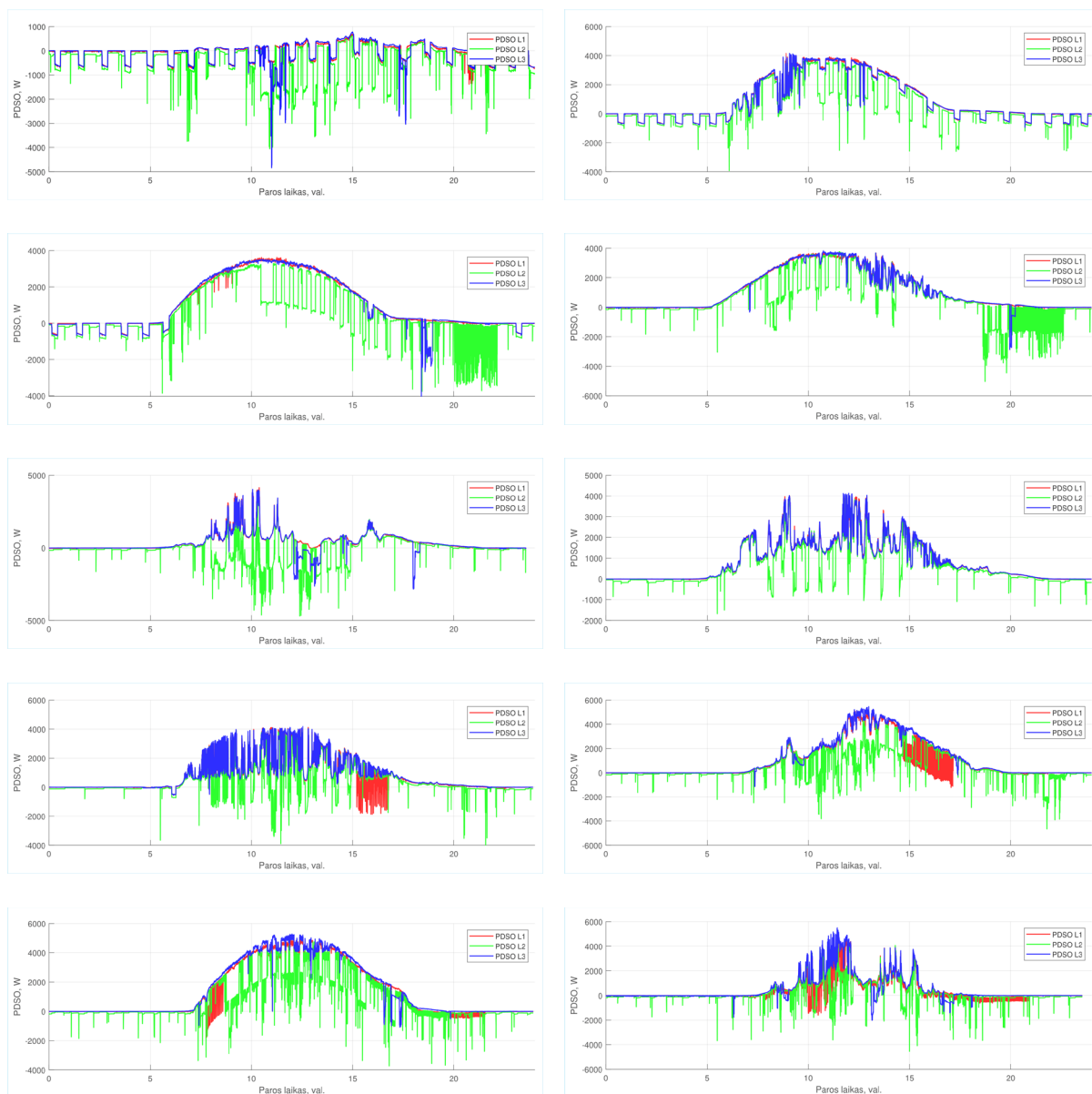
Gaminančio vartotojo namų tinklo energijos srautų modeliavimas ir rezultatų vizualizacija buvo atliekamas programinio paketo MATLAB v.R2024b aplinkoje. Naudojant pradinis eksperimento duomenis, buvo modeliuojami atskirų dienų tinklo energijos srautai, keičiant saulės elektrinės galią ir kaupiklio talpą. Saulės elektrinės galia buvo keičiama nuo 2 kW iki 10 kW dviejų kilovatų žingsniu. Kartu su kiekviena elektrinės galios iteracija buvo modeliuojamos 7 skirtingos kaupiklio talpos nuo 2 kWh iki 14 kWh dviejų kilovatvalandžių žingsniu.

7 ir 8 pav. pateikti dešimties pasirinktų dienų pradiniai duomenys:

- keitiklio išėjimo galių fazėse suma $\sum P_{INV} = P_{INV L1} + P_{INV L2} + P_{INV L3}$ (7 pav.),
- vartojamoji galia atskirose fazėse $P_{cons L1} = P_{INV L1} - P_{DSO L1}$, $P_{cons L2} = P_{INV L2} - P_{DSO L2}$ ir $P_{cons L3} = P_{INV L3} - P_{DSO L3}$ (7 pav.),
- M1 skaitiklio matuojama galia tinklo įvado fazėse $P_{DSO L1}$, $P_{DSO L2}$ ir $P_{DSO L3}$ (8 pav.).



7 pav. Pradiniai 10 dienų duomenys: keitiklio išėjimo galių fazėse suma ir vartojamoji galia atskirose namų tinklo fazėse



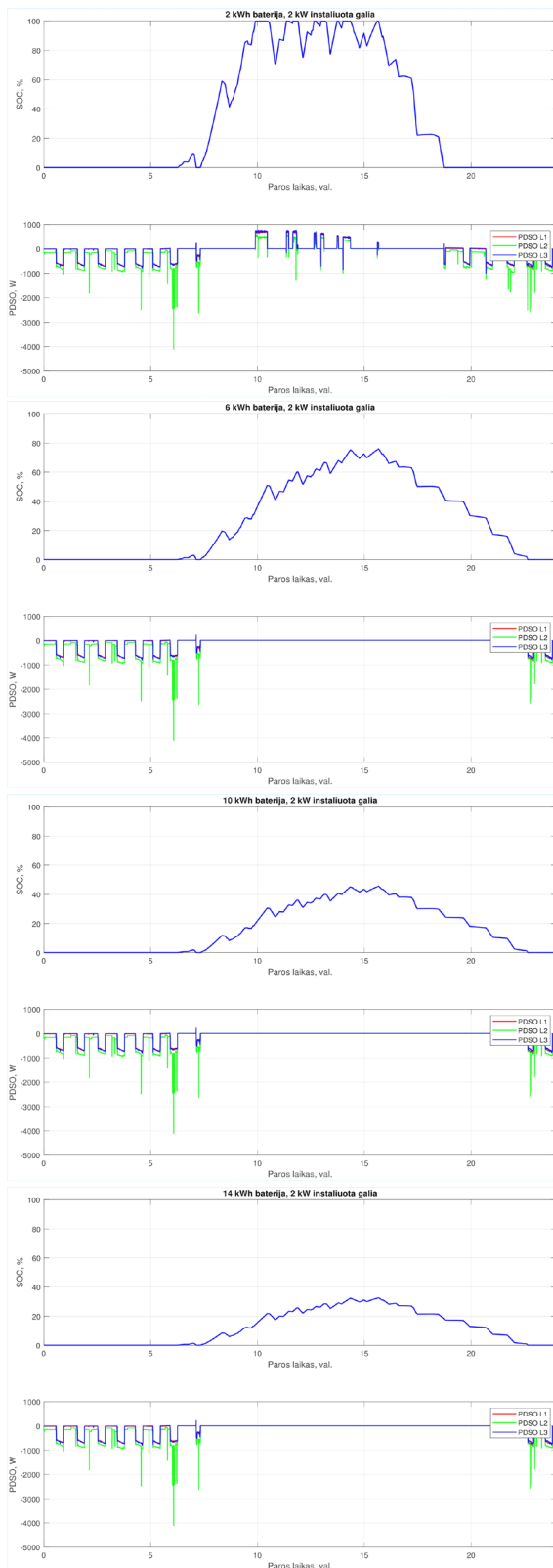
8pav. 10-ies pasirinktų dienų M1 skaitiklio išmatuota galia tinklo įvado fazėse

Kaip jau buvo minėta, tinklo matavimai buvo atliekami kovo – rugsėjo mėnesiais, tai yra, kai generacijos iš saulės elektrinės pakanka padengti visą, arba bent jau ženklią dalį vartojamos energijos. Žiemos mėnesiais, kai generacija vidutiniškai yra labai nedidelė, kaupiklio įtaka energijos srautų perskirstymui būtų taip pat nedidelė, todėl ir tyrimo rezultatai nebūtų tokie akivaizdūs. Iš pateiktų pavyzdžių matosi, kad vartojimas atskirose fazėse yra labai nevienodas. Visu laikotarpiu matomas didesnis vartojimas L2 fazėje (žalia linija), ypač dienos metu ir vakare. Kovo ir balandžio mėnesiais stebimas periodinis šilumos siurblio įsijungimas ir to pasėkoje atsirandantys vartojimo šuoliukai visose trijose fazėse. Taip pat visur matomi trumpalaikiai vartojimo šuoliai, kurių trukmė nuo keleto sekundžių iki keliolikos minučių. Iš pateiktų atvejų, mažiausia generacija buvo kovo 26 d. Tuo tarpu birželio 18, 29 dienos ir rugsėjo 10 diena buvo debesuotos ir generacija labai nepastovi. Liepos 11 d. generacijos sąlygos buvo ypač nepastovios, nors suminė generuota energija ir viršijo vartojimą. Visos šitos energijos srautų dinamikos nesimatyti, jei duomenys būtų gauti ir atvaizduoti 15 min ar 1 h laiko intervalų skiriamąja geba.

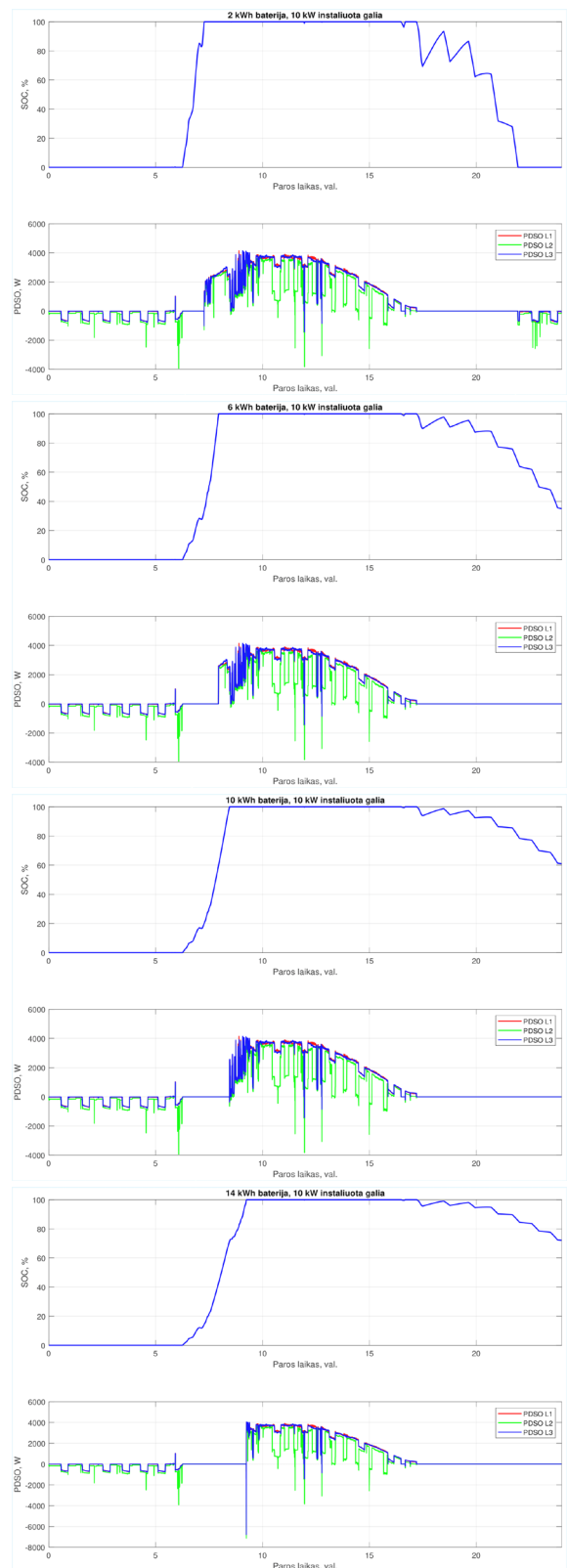
8 pav. pateikta tomis pačiomis dienomis tinklo įvade išmatuota galia. Teigiamos P_{DSO} vertės reiškia energijos eksportą, neigiamos –importą. Kaip ir vartojimas atskirose tinklo fazėse, taip ir energijos srautai per įvadą yra labai nevienodi. Praktiškai visur dienos metu stebimos situacijos, kai tuo pačiu metu energija per vieną fazę (L2) yra importuojama, o per kitas dvi (L1 ir L3) – eksportuojama.

Naudojant pradinius dienų duomenis buvo modeliuojamos namų tinklo situacijos pagal 2.4 skyriuje pateiktą algoritmą. 9 pav. pateikta vienos iš dienų (2024 m. balandžio 5 d.) energijos importo – eksporto (P_{DSO}) dinamika prie skirtingų kaupiklio talpų C_{BAT} , esant 2 kW ir 10 kW instaliuotajai elektrinės galiai P_{INST} . Viršutiniame paros grafike pateiktas baterijos įkrovos lygis (SOC) kiekvieną paros sekundę. Baterijos įkrova nėra ribojama ir gali kisti nuo 0 iki 100 %. Kaip matyti iš pateikto pavyzdžio, esant didesnei elektrinės generuojamai galiai, kaupiklis greitai užsipildo ir toliau, dienos metu, visa perteklinė generuojama energija yra eksportuojama. Importo – eksporto srautas sumažėja tik vakare, kai pradeda naudoti kaupiklio energija. Didėjant baterijos talpai, daugiau kaupiklio energijos „atidedama“ vakarui, todėl bendras suminis paros importo – eksporto srautas mažėja. Esant didesnei saulės elektrinės galiai ir prie didesnių kaupiklio talpų baterija nespėja išsikrauti paros pabaigoje ir dalis jos energijos lieka kitai dienai. Tuo tarpu prie mažesnės elektrinės galios gaunamas praktiškai nulinis energijos srautas dienos metu ir vakare tarp namų tinklo ir skirstomojo tinklo. Kuris variantas palankesnis vartotojui gali parodyti suminio paros importo – eksporto srauto skaičiavimas.

10 pav. pavaizduota tos pačios, balandžio 5-os, dienos suminio paros importo – eksporto srauto $\sum |P_{DSO}|$ tarp namų tinklo ir skirstomojo tinklo priklausomybė nuo kaupiklio talpos C_{BAT} , esant 2 kW ir 10 kW instaliuotajai saulės elektrinės galiai P_{INST} . Kaip matyti iš pavyzdžio, esant mažai elektrinės generuojamai galiai ir didinant kaupiklio talpą, energijos srautas su išoriniu tinklu iš pradžių mažėja, bet vėliau, kai jau pradeda nebepakakti generuojamos energijos, šis srautas stabilizuojasi ir nebemažėja (10 pav. geltona linija). Prie didelės instaliuotosios galios suminis paros energijos srautas (žalia linija) didinant baterijos talpą tolygiai mažėja, tačiau, šiuo konkrečiu atveju, jis yra keletą kartų didesnis, nei suminis srautas esant mažai saulės elektrinės galiai.

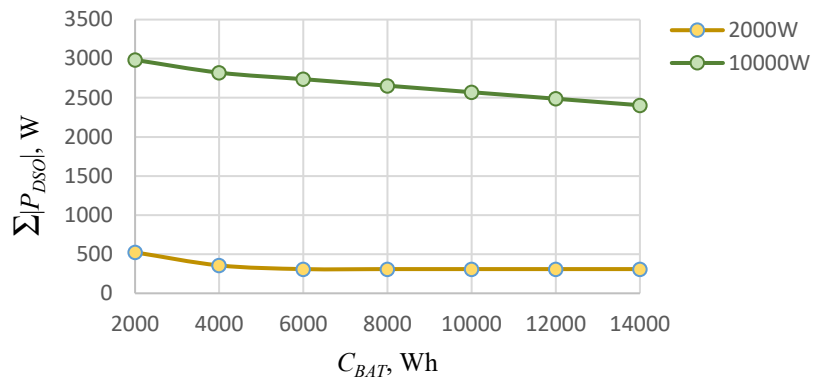


a



b

9pav. 24-04-05 paros SOC ir P_{DSO} grafikai sumodeliuoti prie skirtingų kaupiklio talpų, kai saulės elektrinės galia yra 2000 W (a) ir 10000 W (b)



10pav. Suminė 24-04-05 paros importo – eksporto energija $\sum |P_{DSO}|$ prie skirtingų kaupiklio talpų, kai saulės elektrinės galia yra 2000W ir 10000W

Pradiniai suminiai visų 10 dienų parametrai yra pateikti 2 lentelėje. Jie gauti sumuojant vienos dienos sekundinius duomenis. Šie parametrai buvo aprašyti 2 skyriuje. Papildomai buvo apskaičiuotas parametras

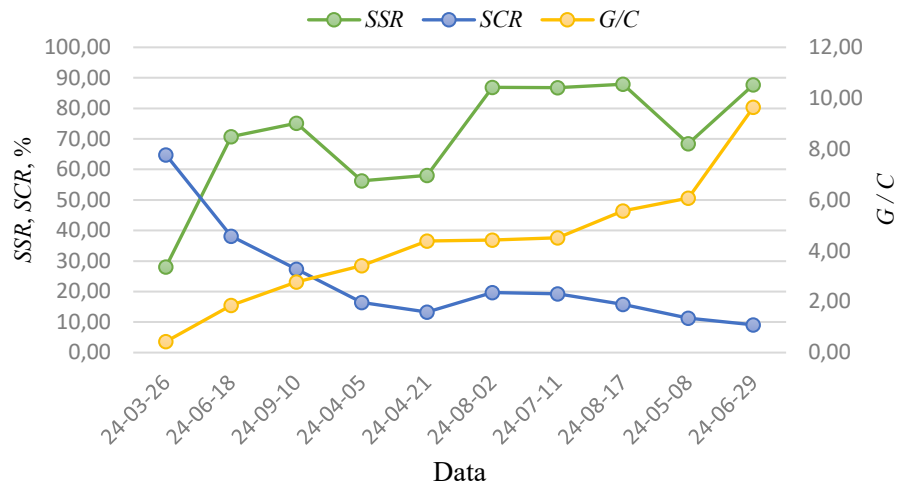
$$G/C = \frac{\sum P_{INV}}{\sum P_{cons}}, \quad (23)$$

parodantis santykį tarp paros sugeneruotos ir suvartotos energijos. Jei šis parametras yra didesnis už 1, tai tą dieną buvo daugiau energijos sugeneruota, nei suvartota. Jei parametras mažesnis už 1, tai priešingai – daugiau suvartota, nei sugeneruota.

2 lentelė. Pradiniai suminiai paros energijos srautų parametrai

Data	$\sum P_{INV}, Wh$	$\sum P_{cons}, Wh$	G/C	$\sum P_{DSO}, Wh$	$\sum P_{imp}, Wh$	$\sum P_{exp}, Wh$	$SSR, \%$	$SCR, \%$
24-03-26	10858.8	25094.8	0.43	21878.5	18057.4	3821.0	28.046	64.81
24-04-05	80490.8	23528.4	3.42	77555.3	10296.6	67258.6	56.24	16.44
24-04-21	81051.1	18464.4	4.39	78065.9	7739.6	70326.3	58.08	13.23
24-05-08	83336.0	13731.9	6.07	78277.6	4337.3	73940.6	68.41	11.27
24-06-18	30490.6	16417.1	1.86	23651.0	4801.1	18862.0	70.76	38.14
24-06-29	63221.9	6552.9	9.65	58282.0	806.7	57475.2	87.69	9.09
24-07-11	60163.6	13339.5	4.51	50352.5	1757.3	48580.8	86.83	19.25
24-08-02	82236.2	18605.2	4.42	68490.7	2430.1	66060.6	86.94	19.67
24-08-17	104182.5	18720.8	5.57	89974.8	2262.9	87711.9	87.91	15.81
24-09-10	41169.6	14861.8	2.77	33633.0	3698.4	29934.6	75.11	27.29

Iš gautųjų rezultatų suvestinės pastebima tam tikra koreliacija tarp santykio G/C ir rodiklių SSR bei SCR . 10 pav. atvaizduoti visi šie parametrai G/C mažėjimo tvarka. Kaip matome, didėjant G/C , rodiklis SCR mažėja, o rodiklis SSR auga.

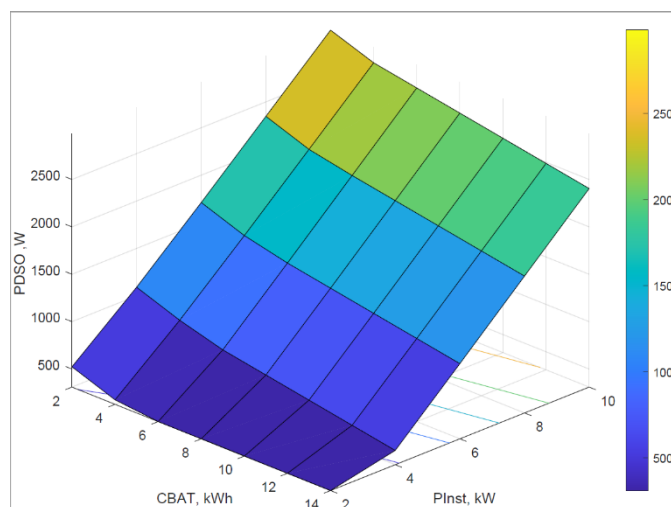


11pav. Parametrų SSR ir SCR koreliacija su parametru G/C

Toliau, naudojant aukščiau aprašytą modeliavimo algoritmą, buvo apskaičiuotos visų dienų parametrų $[\sum P_{DSO}]$, $[SSR]$ ir $[SCR]$ matricos, bei atliktos jų vizualizacijos. Vienos iš dienų (2024 m. balandžio 5 d.) parametrų matricos pateiktos 3, 4 ir 5 lentelėse, o atitinkamos jų vizualizacijos – 12, 13 ir 14 pav.

3 lentelė. 24-04-05 suminis paros importo – eksporto srautas $\sum |P_{DSO}|$, Wh

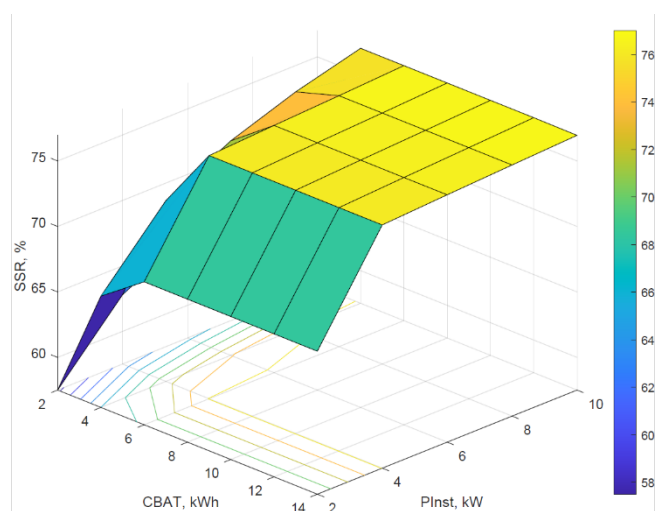
P_{INST} , W	C_{BAT} , Wh						
	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000
2000	12569.2	8567.4	7433.6	7433.6	7433.6	7433.6	7433.6
4000	26175.6	22173.8	19049.6	17048.7	15047.8	13046.9	11046.0
6000	41068.8	37067.0	34477.9	32477.0	30476.1	28475.2	26474.2
8000	56344.5	52342.7	50097.5	48096.6	46095.6	44094.7	42093.8
10000	71620.5	67718.2	65717.2	63716.3	61715.4	59714.5	57713.6



12pav. Suminis vienos paros importo – eksporto srautas $\sum |P_{DSO}|$

4 lentelė. 24-04-05 paros rodiklis SSR, %

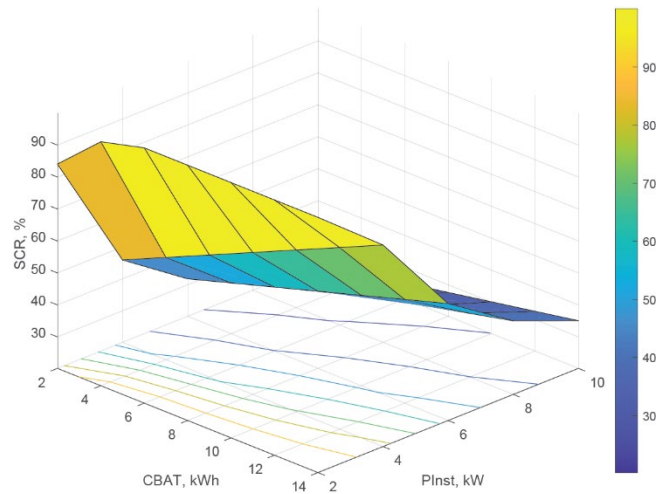
P_{INST}	C_{BAT} , Wh						
W	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000
2000	57.5	66.0	68.4	68.4	68.4	68.4	68.4
4000	62.8	71.3	76.1	76.1	76.1	76.1	76.1
6000	65.4	73.9	76.4	76.4	76.4	76.4	76.4
8000	67.1	75.6	76.7	76.7	76.7	76.7	76.7
10000	68.9	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0



13pav. Vienos paros SSR rodiklis

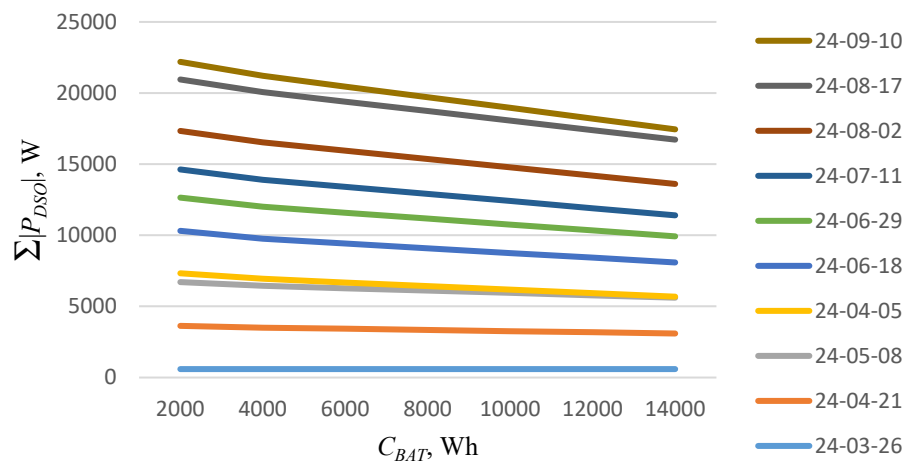
5 lentelė. 24-04-05 paros rodiklis SCR, %

P_{INST}	C_{BAT} , Wh						
W	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000
2000	84.1	96.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
4000	45.9	52.1	58.3	64.5	70.8	77.0	83.2
6000	31.9	36.0	40.1	44.3	48.4	52.6	56.7
8000	24.5	27.6	30.8	33.9	37.0	40.1	43.2
10000	20.1	22.6	25.1	27.6	30.1	32.6	35.1



14pav. Vienos paros SCR rodiklis

Kaip matyti iš pavyzdžio, SSR rodiklis didėja didinant elektrinės galią ir kiek mažiau priklauso nuo baterijos talpos. SCR rodiklis didžiausias yra prie minimalios instaliuotosios galios ir didėja didinant baterijos talpą. Importo – eksporto srautas $\sum |P_{DSO}|$ mažėja mažinant instaliuotąją elektrinės galią ir didinant baterijos talpą. Kokia šio parametro priklausomybė vien nuo kaupiklio talpos, detaliau parodyta 15 pav. Čia pateiktas atvejis, kai saulės elektrinės galia yra 10kW. Kaip matome, esant didesniai pradiniam srautui, baterijos efektas srauto mažinimui yra didesnis. Toliau didinant baterijos talpą, visi šie srautai turėtų priartėti prie tam tikro minimumo, apsprendžiamo kiekvienos dienos bendros sugeneruotos energijos kiekio, kaip parodyta 10 pav.



15pav. Suminės paros importo – eksporto energijos $\sum |P_{DSO}|$ priklausomybės nuo kaupiklio talpos skirtingomis dienomis palyginimas

Įvertinti, kuris iš modeliujamų variantų yra palankiausias vartotojui pagal energijos suvartojimą vietoje, apsirūpinimo elektros energija pakankamumą ir mažiausias investicijas į saulės elektrinės ir kaupiklio įrangą, buvo pasiūlytas optimizavimo uždavinio sprendimo būdas. Investicijos į įrangą yra tiesiogiai proporcingos kaupiklio talpai ir instaliuotajai elektrinės galiai, todėl čia bus siekiama minimizuoti būtent šiuos parametrus. Uždavinio sprendimui yra sudaroma tikslo funkcija:

$$TF = \max_{\substack{C_{BAT} \\ P_{INST}}} f\{[M], C_{BAT}, P_{INST}\}, \text{ kai} \quad (24)$$

$$\begin{cases} [M_{C_{BAT}, P_{INST}}] = 1, \text{ jei } [N_{C_{BAT}, P_{INST}}] > 0.95 \cdot \max([N]) \\ [M_{C_{BAT}, P_{INST}}] = 0, \text{ jei } [N_{C_{BAT}, P_{INST}}] \leq 0.95 \cdot \max([N]). \\ [N] = [SSRn] + [SCRn] - [\sum |P_{DSO}|n] \end{cases}$$

Čia $[SSRn]$, $[SCRn]$, $[\sum |P_{DSO}|n]$ – normalizuotos parametrų matricos, apskaičiuojamos pagal formules:

$$[SSRn_{C_{BAT}, P_{INST}}] = [SSRn_{C_{BAT}, P_{INST}}]/100, \quad (26)$$

$$[SCRn_{C_{BAT}, P_{INST}}] = [SCRn_{C_{BAT}, P_{INST}}]/100, \quad (27)$$

$$[\sum |P_{DSO}|n_{C_{BAT}, P_{INST}}] = \frac{[\sum |P_{DSO}|]_{C_{BAT}, P_{INST}}}{\max([\sum |P_{DSO}|])}. \quad (28)$$

Kaip pavyzdys, yra pateikiama 24-04-05 dienos optimizavimo uždavinio sprendimo eiga. Pirmiausia yra apskaičiuojamos normalizuotos matricos:

$$[SSRn] = \begin{bmatrix} 0.58 & 0.66 & 0.68 & 0.68 & 0.68 & 0.68 & 0.68 \\ 0.63 & 0.71 & 0.76 & 0.76 & 0.76 & 0.76 & 0.76 \\ 0.65 & 0.74 & 0.76 & 0.76 & 0.76 & 0.76 & 0.76 \\ 0.67 & 0.76 & 0.77 & 0.77 & 0.77 & 0.77 & 0.77 \\ 0.69 & 0.77 & 0.77 & 0.77 & 0.77 & 0.77 & 0.77 \end{bmatrix};$$

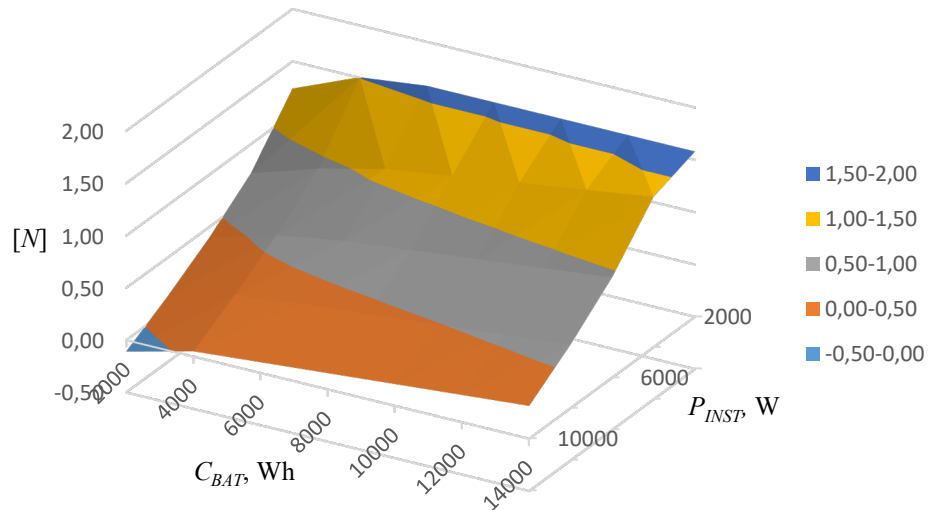
$$[SCRn] = \begin{bmatrix} 0.84 & 0.96 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.46 & 0.52 & 0.58 & 0.65 & 0.71 & 0.77 & 0.83 \\ 0.32 & 0.36 & 0.40 & 0.44 & 0.48 & 0.53 & 0.57 \\ 0.25 & 0.28 & 0.31 & 0.34 & 0.37 & 0.40 & 0.43 \\ 0.20 & 0.23 & 0.25 & 0.28 & 0.30 & 0.33 & 0.35 \end{bmatrix};$$

$$[\sum |P_{DSO}|n] = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.12 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 & 0.10 \\ 0.37 & 0.31 & 0.27 & 0.24 & 0.21 & 0.18 & 0.15 \\ 0.57 & 0.52 & 0.48 & 0.45 & 0.43 & 0.40 & 0.37 \\ 0.79 & 0.73 & 0.70 & 0.67 & 0.64 & 0.62 & 0.59 \\ 1 & 0.95 & 0.92 & 0.89 & 0.86 & 0.83 & 0.81 \end{bmatrix}.$$

Matricų stulpeliai atitinka baterijos talpas C_{BAT} nuo 2000Wh iki 14000 Wh, o eilutės – saulės elektrinės galią P_{INST} nuo 2000 W iki 10000 W. Sumuojant normalizuotas matricas, apskaičiuojama matrica $[N]$:

$$[N] = [SSRn] + [SCRn] - [\sum |P_{DSO}|n] = \begin{bmatrix} 1.24 & 1.51 & 1.58 & 1.58 & 1.58 & 1.58 & 1.58 \\ 0.72 & 0.92 & 1.08 & 1.17 & 1.26 & 1.35 & 1.44 \\ 0.40 & 0.58 & 0.58 & 0.75 & 0.82 & 0.89 & 0.96 \\ 0.13 & 0.30 & 0.37 & 0.43 & 0.49 & 0.55 & 0.61 \\ -0.11 & 0.05 & 0.10 & 0.16 & 0.21 & 0.26 & 0.31 \end{bmatrix}.$$

Ši matrica grafiškai atvaizduota 16 pav.

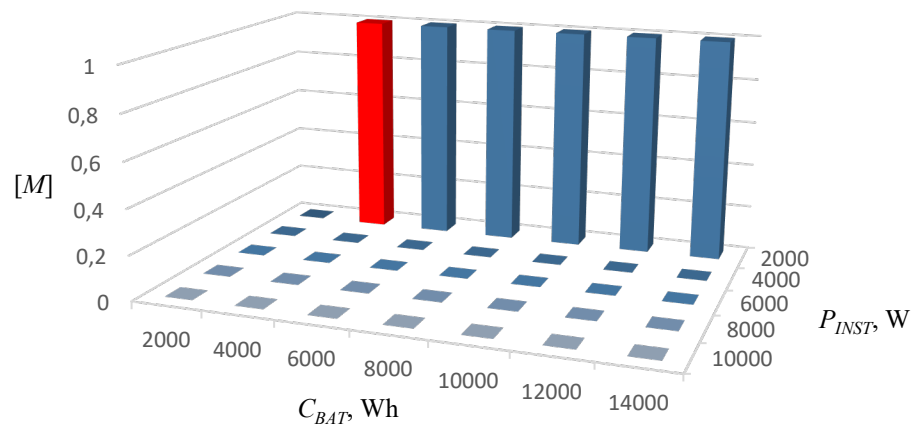


16pav. Matricos $[N]$ grafinis atvaizdas

Matrica $[M]$ apskaičiuojama visas matricos $[N]$ vertes, kurios didesnės už 95% maksimalios matricos vertės lygį, prilyginat 1, o likusias – 0:

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Ši matrica atvaizduota 17 pav.



17pav. Matricos $[M]$ grafinis atvaizdas

Energijos srautų pasiskirstymo tinkle prasme, visos $[M]$ matricos vienetinės kombinacijos duoda tą patį efektą. Tačiau pradinių investicijų į saulės elektrinę ir kaupiklį prasme, tarp vienodą energetinį efektą duodančių kombinacijų visuomet tikslinga rinktis tą, kuri atitinka minimalią kaupiklio talpą ir saulės elektrinės galią (jei nėra rezervo poreikio). Paskutinis optimizavimo etapas yra išrinkti minimalių parametrų C_{BAT} ir P_{INST} kombinaciją. Šiuo konkrečiu atveju, tai yra $C_{BAT} = 4000\text{Wh}$ ir $P_{INST} = 2000\text{W}$. Prie šių parametrų suminis paros importo – eksporto energijos srautas $\sum|P_{DSO}|$ sumažėja 89 % lyginant su pradine tinklo konfigūracija be kaupiklio (žr. 2 ir 3 lenteles).

Reikia atkreipti dėmesį, kad toks rezultatas gautas energetinio efektyvumo slenkstį nuleidus iki 95 %. Priešingu atveju, minimali kaupiklio talpa būtų reikalinga didesnė, t.y., $C_{BAT} = 6000\text{Wh}$. Slenksčio lygio pasirinkimas gali būtų kiekvieno vartotojo apsisprendimo reikalas, balansuojant tarp energetinės ir finansinės naudos: aukštesnis slenkstis reiškia geresnius energetinius parametrus, bet kartu padidina reikalavimus tinklo įrangai.

Taikant pasiūlytą optimizavimo metodiką, buvo suskaičiuoti optimalūs tinklo variantai visoms tiriamoms dienoms. Jie yra surašyti 6 lentelėje.

6 lentelė. Skirtingų dienų optimizuoti tinklo parametrai

Data	C_{BAT} , Wh	P_{INST} , W	SSR, %	SCR, %	$\sum P_{DSO} $, Wh	Santykinis $\sum P_{DSO} $ sumažėjimas, %
24-03-26	2000	10000	43.3	100	14242.0	36
24-04-05	4000	2000	66.0	96.5	8567.4	89
24-04-21	6000	2000	75.5	94.7	5380.0	93
24-05-08	8000	2000	94.7	98.9	918.1	99
24-06-18	10000	8000	95.8	99.9	686.2	97
24-06-29	8000	2000	91.1	100	583.2	99
24-07-11	2000	2000	90.2	100	1311.6	97
24-08-02	2000	2000	88.4	100	2159.6	97
24-08-17	6000	2000	91.3	99.2	1788.0	98
24-09-10	6000	4000	91.4	100	1392.9	96

Rezultatai visais atvejais rodo labai ženklų importo – eksporto energijos srautų sumažėjimą. Kai kuriais atvejais jis artėja į nulį. Šiame kontekste išsiskiria kovo 26 d., kada saulės buvo mažai ir generacija galėjo padengti tik nedidelę dalį vartojimo poreikio (žr. 7 pav.). Nors rezultatai atskiromis dienomis gaunami skirtingi, tendencija rodo, kad šiam vartotojui įsidiegtus kaupiklį, keletą kartų sumažėtų saulės elektrinės galios poreikis. Visgi reikia nepamiršti, kad pradiniai duomenys buvo gauti šiltaisiais metų mėnesiais. Žiemos mėnesiais rezultatai būtų panašiai, kaip kovo 26 d. ar dar prastesni. Tada vartotojui palankiau būtų turėti didesnės galios saulės elektrinę. Tą dalinai patvirtina ir birželio 18 d. atvejis, kai saulės generacija buvo sumažėjusi. Taikant pasiūlytą optimizavimo metodiką praktikoje, reikėtų naudoti ne atskirų parų pradinius duomenis, bet ilgesnio laikotarpio, pavyzdžiui, nepertraukiamai pusės metų ar visų metų. Tuomet sumažės atskirų dienų vartojimo ar meteorologinių sąlygų nuokrypių įtaka ir rezultatas labiau atspindės bendrąją tendenciją.

Išvados

1. Ribojimai, su kuriais susiduria Lietuvoje elektros vartotojai, norintys gauti leidimus jungti į skirstomąjį tinklą norimo galingumo savo saulės elektrinę, nuolat augantys elektros energijos persiuntimo tinklu tarifai, bei prognozuojamas vis platesnis grynojo atskaitymo už elektros energiją modelio taikymas Lietuvoje, verčia gaminančius vartotojus rinktis sprendimus, didinančius generuojamos energijos vartojimą vietoje ir leidžiančius lanksčiau išnaudoti turimus generacijos pajėgumus pikiniam vartojimui padengti. Vienas iš plačiausiai literatūroje minimų sprendimų tokioje situacijoje yra vietinio elektros energijos kaupiklio įdiegimas kartu su saulės elektrine arba kitu generacijos šaltiniu namų tinkle.
2. Darbe pasiūlyta metodika, leidžianti saulės elektrinę įsirengusiam ar dar tik planuojančiam įsirengti gaminančiam vartotojui įsivertinti naudas, kurias suteiktų kartu su elektrine namų tinkle įrengiamas EEK. Metodika yra paremta pradinių statistinių duomenų namų tinkle surinkimu ir skirtingų tinklo situacijų matematiniu modeliavimu jų pagrindu.
3. Darbe pasiūlytas matematinio modeliavimo algoritmas, leidžiantis įvertinti energijos srautų namų tinkle – generacijos, vartojimo, importo, eksporto – priklausomybę nuo kintamų tinklo parametrų – saulės elektrinės galios ir elektros energijos kaupiklio talpos.
4. Darbe taip pat pasiūlyta optimalios tinklo konfigūracijos parinkimo metodika, paremta tikslo funkcijos skaičiavimu su trimis matematinio modeliavimo metu gautais rodikliais: savarankiško apsirūpinimo elektros energija rodikliu (*SSR*), elektros energijos suvartojimo vietoje rodikliu (*SCR*), bei suminiu paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekiu. Metodikoje numatytas individualiai parenkamas energetinio efektyvumo slenkstis leidžia vartotojui balansuoti tarp didesnę energetinę naudą teikiančios tinklo konfigūracijos ir mažesnių pradinių investicijų į tinklo įrangą.
5. Metodikos efektyvumo patikrinimui buvo atliktas eksperimentas, kurio metu surinkti pradiniai duomenys vieno gaminančio vartotojo namų tinkle buvo panaudoti modeliuoti situacijas tinkle su skirtingomis EEK talpomis ir saulės elektrinės galiomis. Vertinant modeliuotas situacijas skirtingomis dienomis buvo gauta, kad kaupiklis leidžia suminį paros importuojamos ir eksportuojamos energijos kiekį sumažinti 99 %, o rodiklius *SSR* ir *SCR* ženkliai padidinti. Atskirais atvejais *SCR* padidėjo iki 100%.
6. Norint pasiūlytą optimizavimo metodiką taikyti praktikoje ir gauti patikimus rezultatus, rekomenduojama naudoti ne atskirai pavienių parų statistinius duomenis, bet ilgesnių laikotarpių, pavyzdžiui, pusės metų ar visų metų duomenis.

Literatūros sąrašas

1. Hassan, Q., Viktor, P., J. Al-Musawi, T., Mahmood Ali, B., Algburi, S., Alzoubi, H. M., Khudhair Al-Jiboory, A., Zuhair Sameen, A., Salman, H. M., & Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy Transformations. *Renewable Energy Focus*, 48(100545). <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100545>
2. Strielkowski, W., Civín, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., & Petrenko, Y. (2021). Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: a Review. *Energies*, 14(24), 8240. [mdpi. https://doi.org/10.3390/en14248240](https://doi.org/10.3390/en14248240)
3. JesHannie Jorgenson, Kate Doubleday, Ilya Chernyakhovskiy, Kodi Obika, Travis Williams, Evan Rosenlieb ir Victor Igwe. (2024). The Lithuania 100% Renewable Energy Study - Interim Results: Electricity System Scenarios for 2030. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/89564.pdf>
4. EPSO-G. (2023). Lithuania energy system transformation to 2050. EPSO-G užsakymu atlikta DNV studija. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: <https://www.epsog.lt/uploads/documents/files/Lietuvos%20energetikos%20vizija/DNV%20EPSOG%20Lithuania%20Energy%20System%20Transformation%20Strategy.pdf>
5. Lietuvos respublikos seimas. (2024). Seimas atnaujino Nacionalinę energetinės nepriklausomybės strategiją. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: https://www.lrs.lt/sip/portal.show?p_r=35403&p_k=1&p_t=289080
6. Lebedeva, K., Borodinecs, A., Palcikovskis, A., Wawerka, R., & Skandalos, N. (2025). Estimation of LCOE for PV electricity production in the Baltic States - Latvia, Lithuania and Estonia until 2050. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 7, 100110. <https://doi.org/10.1016/j.rset.2025.100110>
7. Smith, O., Cattell, O., Farcot, E., O'Dea, R. D., & Hopcraft, K. I. (2022b). The effect of renewable energy incorporation on power grid stability and resilience. *Science Advances*, 8(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj6734>
8. Bachanek, K. H., Drożdż, W., & Kolon, M. (2025). Development of Renewable Energy Sources in Poland and Stability of Power Grids—Challenges, Technologies, and Adaptation Strategies. *Energies*, 18(8), 2036. <https://doi.org/10.3390/en18082036>
9. Teferi, T. G., Tella, T. G., & Santoshkumar Hampannavar. (2024). Impact of large-scale renewable energy integration on the grid voltage stability. *Results in Engineering*, 23, 102398–102398. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102398>
10. Smith, O., Cattell, O., Farcot, E., O'Dea, R. D., & Hopcraft, K. I. (2022). The effect of renewable energy incorporation on power grid stability and resilience. *Science Advances*, 8(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abj6734>
11. Lietuvos energetikos agentūra. (2025). Atsinaujinantys energijos ištekliai. Aktuali AEI statistika. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: <https://www.ena.lt/gaminantys-vartotojai/>
12. Teisės aktų registras. (2025). Lietuvos respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.FC7AB69BE291>
13. Ziras, C., Calearo, L., & Marinelli, M. (2021). The effect of net metering methods on prosumer energy settlements. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 27, 100519. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100519>
14. Benalcazar, P., Kalka, M., & Kamiński, J. (2024). Transitioning from net-metering to net-billing: A model-based analysis for Poland. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 72, 104073. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104073>

15. Jasiński, J., Kozakiewicz, M., & Sołtysik, M. (2024). Analysis of the Economic Soundness and Viability of Migrating from Net Billing to Net Metering Using Energy Cooperatives. *Energies*, 17(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/en17061330>
16. Simoglou, C. K., Vagropoulos, S. I., & Biskas, P. N. (2025). A comparative techno-economic study of the Net-Metering and Net-Billing self-consumption schemes for industrial and residential consumers in Greece. *Sustainable Energy Grids and Networks*, 101726–101726. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2025.101726>
17. Krystian Janusz Cieślak. (2024). Profitability Analysis of a Prosumer Photovoltaic Installation in Light of Changing Electricity Billing Regulations in Poland. *Energies*, 17(15), 3618–3618. <https://doi.org/10.3390/en17153618>
18. Amjed Hina Fathima, & K. Palanisamy. (2016). Energy Storage Systems for Energy Management of Renewables in Distributed Generation Systems. <https://doi.org/10.5772/62766>
19. Abu, S. M., Hannan, M. A., Hossain Lipu, M. S., Mannan, M., Ker, P. J., Hossain, M. J., & Mahlia, T. M. I. (2023). State of the art of lithium-ion battery material potentials: An analytical evaluations, issues and future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 394, 136246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136246>
20. Diouf, B., & Podo, R. (2015). Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy*, 76, 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.058> X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081.
21. Kebede, A. A., Kalogiannis, T., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2022). A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>
22. Battery University, "BU-205: Types of Lithium-ion," 2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
23. Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2021). Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, 40, 102748. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748>
24. Brasil, C., & Melo, C. L. S. (2017). A comparative study of lead-acid batteries and lithium iron phosphate batteries used in microgrid systems. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257424>
25. Chen, T., Li, M., & Bae, J. (2024). Recent Advances in Lithium Iron Phosphate Battery Technology: A Comprehensive Review. *Batteries*, 10(12), 424–424. <https://doi.org/10.3390/batteries10120424>
26. IEA. (2025). Price of selected battery materials and lithium-ion batteries, 2015-2024. [žiūrėta 2025-03-31]. Prieiga per internetą: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/price-of-selected-battery-materials-and-lithium-ion-batteries-2015-2024>
27. Yan, Z., Chen, X., Li, J., & Cosimo Magazzino. (2025). Data-driven optimization of lithium battery energy storage for grid stability and renewable energy integration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 127, 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.019>
28. Shabbir, N., Kutt, L., Astapov, V., Jawad, M., Allik, A., & Husev, O. (2022). Battery Size Optimization With Customer PV Installations and Domestic Load Profile. *IEEE Access*, 10, 13012–13025. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3147977>

29. Jivaganont, P., Limthongkul, P., & Mongkoltanatas, J. (2024). Design of photovoltaic and battery energy storage systems through load demand characterization: A case study in Thailand. *Energy Reports*, 12, 4578–4593. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.10.025>
30. Boeckl, B., & Kienberger, T. (2019). “Sizing of PV storage systems for different household types.” *Journal of Energy Storage*, 24, 100763. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100763>
31. Ntube, N., & Li, H. (2021). Optimal sizing of Battery Energy Storage System in a PV-Battery system for a Net Zero Home. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), 1–5. <https://doi.org/10.1109/isgtlatinamerica52371.2021.9542997>
32. Šriupša, L., Vaitkūnas, M., Baronas, A., & Dosinas, J. (2023). Analysis of self-generated PV energy consumption profiles in prosumers microgrid. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 1583–1602. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2290302>
33. Laurynas Šriupša, Mindaugas Vaitkūnas, Baronas, A., Gytis Svinkūnas, Dosinas, J., Andrius Knyš, Saulius Gudžius, Jonaitis, A., & Serva, D. (2025). Enhancing the Efficiency of Photovoltaic Power Flows Management in Three-Phase Prosumer Grids. *Sustainability*, 17(5), 2134–2134. <https://doi.org/10.3390/su17052134>
34. 10Shelly Pro 3EM 120A. <https://www.shelly.com/products/shelly-pro-3em-x1>