



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinio modelio tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Mykolas Sereika

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinio modelio tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Energijos technologijos ir ekonomika (6211EX073)

Mykolas Sereika

Projekto autorius

Prof. Saulius Gudžius

Vadovas

Lekt. Aistija Vaišnorienė

Recenzentė

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Mykolas Sereika

Hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinio modelio tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mykolo Sereikos, baigiamasis projektas tema „Hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinio modelio tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Sereika, Mykolas. Hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinio modelio tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: energijos kaupiklis, hibridinės energijos gamybos sistema, saulės energetika, optimizacija.

Kaunas, 2020. 74 p.

Santrauka

Šiame magistro baigiamajame projekte apžvelgiamos hibridinės elektros energijos gamybos sistemos, jų sudedamosios dalys. Plačiau aptariamos HRES sistemos teikiamos naudos, įvairios plėtros kliūtys, bei vystymosi ir paramos analogijos su atsinaujinančia energetika.

Aptariami optimizacinio modelio sprendimo metodai, bei aprašomos optimizacinio modelio sąlygos. Sudarytas hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinis modelis pasirinktai realiai skirstomojo tinklo daliai. Sukurta galimybė kaupikliuose sukauptą elektros energiją reikiamu metu tiekti į tinklą ir ją pardavinėti. Modeliavimo rezultatais siekiama išsiaiškinti HRES naudą bei jų poreikį.

Apžvelgiamos elektros energijos kainos, elektros energijos supirkimo būdai ir galimybės naudojant HRES sistemas. Paskaičiuota parinktos sistemos ekonominė nauda ir atsiperkamumas keliais atvejais. Pateikiamos išvados.

Sereika, Mykolas. Research of Optimization of Hybrid Energy Production System. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Saulius Gudžius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: energy storage, hybrid energy production system, solar energy, optimization.

Kaunas, 2020. 74 p.

Summary

In this master's final project hybrid energy production systems and their components are reviewed. The benefits of the HRES system, various obstacles to development and analogies of development and support with renewable energy are discussed in more detail.

The methods of solving the optimization model are discussed and the conditions of the optimization model are described. An optimization model of a hybrid power generation system for a selected real part of the distribution network has been developed. An option was created to supply and sell electric energy stored in batteries to the grid at the right time. The modeling results try to find out the benefits of HRES and their need.

Electricity prices, electricity purchase methods and possibilities using HRES systems are reviewed. The economic benefits and payback of the chosen system in several cases were calculated. The conclusions are presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. Hibridinės sistemos	11
1.2. Saulės energija pagrindinis HRES šaltinis	12
1.3. Fotovoltinis saulės elementas.....	13
1.4. Kaupiklių rūšys	14
1.4.1. Hidroakumuliacinės energijos kaupyklos.....	15
1.4.2. Superkondensatoriai	16
1.4.3. Baterijos.....	18
1.5. Paskirstytas energijos kaupimas naudojant elektromobilių baterijas.....	19
1.6. Mokymasis iš atsinaujinančios energetikos	20
1.7. Energijos saugojimo iššūkiai.....	21
1.8. Energijos kaupyklų teikiamos naudos.....	21
1.9. Hibridinės energijos sistemos optimizacija.....	22
2. Hibridinės sistemos optimizacinis modelis	24
2.1. Optimizavimo sprendinys ir uždavinio sąlygos	24
2.2. Uždavinio sprendimo metodai	25
2.3. Pavyzdinė optimizacinio modelio schema	26
2.4. Rezultatų atvaizdavimas.....	27
2.5. Reali optimizacinio modelio schema	30
2.6. Baterijų parinkimas	33
2.7. Saulės elektrinės parinkimas	34
2.8. Modeliavimas	36
3. Hibridinės sistemos optimizacinio modelio rezultatai ir ekonominė analizė	40
3.1. Elektros kaina ir gamintojų sąlygos	40
3.2. Ekonominė nauda.....	41
3.3. Modeliuojamos sistemos atvejai	42
3.3.1. Gaminantis vartotojas	42
3.3.2. Gamintojas.....	45
3.3.3. Fiktyvus atvejis.....	46
Išvados	48
Literatūros šaltiniai	49
Priedai.....	52
1 priedas. Modelio kodas.....	52

Lentelių sąrašas

1 lentelė. AXMK kabelio parametrai	31
2 lentelė. Linijos L–KS28063 parametrai	33
3 lentelė. Elektros energijos kaupiklių kapitalo sąnaudos bei techninės charakteristikos [15,32] ...	34
4 lentelė. Populiariausio plano kainos Lietuvoje	40
5 lentelė. Gaminančių vartotojų atsiskaitymo kainos ir būdai [37]	40
6 lentelė. Persiuntimo paslaugos įkainiai	41
7 lentelė. Apibendrinti gaminančio vartotojo duomenys	43
8 lentelė. Apibendrinti gamintojo atvejo duomenys	46
9 lentelė. Apibendrinti fiktyvaus atvejo duomenys	47

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pavyzdinė HRES sistema [2]	11
2 pav. Saulės skleidžiamos spinduliuotės intensyvumas pasaulyje	13
3 pav. Supaprastintas P – N sandūros veikimo principas	14
4 pav. <i>Ragone</i> grafikas [10]	15
5 pav. Visa instaliuota elektros energijos kaupyklų galia nuo 1900 m. iki 2017 m. [11].....	16
6 pav. Superkondensatoriaus krūvių pasiskirstymas.....	17
7 pav. Įvairių baterijų tipų energijos tankis.....	18
8 pav. Modelio radialinis tinklas [31]	26
9 pav. Kaupiklių įkrovos būsenų profiliai.....	28
10 pav. Kaupiklių galios profiliai	28
11 pav. Įtampos lygis tinklo mazguose	29
12 pav. Septynių tinklų dienos profilių palyginimas naudojant OpenDSS ir linijinį modelį	29
13 pav. Vr-290 tinklas.....	30
14 pav. Vartotojų paros apkrovos grafikas	31
15 pav. Vr-290 L–KS28063 perbraižytas tinklas.....	32
16 pav. Modelio tinklas su pažymėtomis HRES sistemomis.....	36
17 pav. Kaupiklių būsenos paros grafikas	37
18 pav. Kaupiklių įkrovos ir iškrovos spartos grafikas.....	37
19 pav. Linijos L–KS28063 mazgų įtampos.....	38
20 pav. Linijos L–KS28063 apkrovos	38
21 pav. Kaupiklio būsenos paros grafikas	44
22 pav. Kaupiklio iškrovos galios grafikas.....	45

Santrumpų sąrašas

HRES – hibridinė atsinaujinančios energijos sistema (angl. *hybrid renewable energy system*)

PV – fotoelektros energija (angl. *photovoltaics*)

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė

SC – superkondensatorius (angl. *supercapacitor*)

Redox – oksidacijos redukcijos reakcija (angl. *oxidation reduction*)

V2G – iš elektromobilio į tinklą technologija (angl. *vehicle to grid*)

ESS – energijos kaupimo sistemos

NPV – grynoji dabartinė vertė (angl. *net present value*)

IEEE – elektros ir elektronikos inžinierių institutas (angl. *institute of electrical an electronics engineers*)

IRR – vidinė pelno norma (angl. *internal rate of return*)

GIS – geografinė informacinė sistema

SOC – įkrovos būseną (angl. *state of charge*)

APVA – Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerijos aplinkos projektų valdymo agentūra

Įvadas

Ekonomikos ir urbanizacijos augimas neįsivaizduojamas, be elektros energijos poreikio augimo, tad nieko stebėtino, kad elektros energijos poreikis tiek Lietuvos, tiek pasaulio mastu didėja. Iškastinio kuro atsargos mažėja ir brangsta, o oro taršos ir kiti aplinkosaugos reikalavimai griežtėja. Tad siekiant padidinti elektros energijos gamybą, bei pagerinti gamtosaugos sąlygas vis daugiau elektros energijos gaminama naudojant atsinaujinančius elektros energijos šaltinius.

Elektros sistemos pagrindiniai tikslai yra patikimumas, saugumas ir efektyvumas, o norint elektros energiją gaminti iš atsinaujinančių šaltinių reikia įvertinti, kad jie yra priklausomi nuo gamtos sąlygų ir kintantys. Norint užtikrinti patikimumą ir saugumą paranku naudoti hibridines energijos gamybos sistemas, kurios sudarytos iš energijos kaupimo prietaiso, atsinaujinančių ir neatsinaujinančių elektros energijos gamybos šaltinių. Čia patikimumą bei saugumą užtikrina elektros energijos kaupimo prietaisais pvz.: srautinės baterijos, akumuliatoriai ir pan.

Kaupimo elementas yra itin svarbus hibridinės elektros energijos gamybos sistemos komponentas, kuris parenkamas pagal generuojamą elektrinės galią, tarnavimo laiką ir kitas technines charakteristikas. Tad jų ryšys su elektros energiją generuojančiu šaltiniu yra esminis, nustatant hibridinės sistemos parametrus.

Kita hibridinės sistemos sudedamoji dalis yra atsinaujinantys elektros šaltiniai, kurie prieš 20 m. buvo ekonomiškai nenaudingi, bet valstybei pradėjus skatinti tokį generacijos būdą bei skirti subsidijas, jie pradėjo atsipirkti ir daugelio manymu, panaši ateitis numatoma ir elektros energijos kaupikliams.

Darbo tikslas – nustatyti optimalią hibridinės energijos gamybos sistemos sudėtį ir įvertinti technologinius parametrus bei rasti ribines atsipirkimo sąlygas.

Darbo uždaviniai:

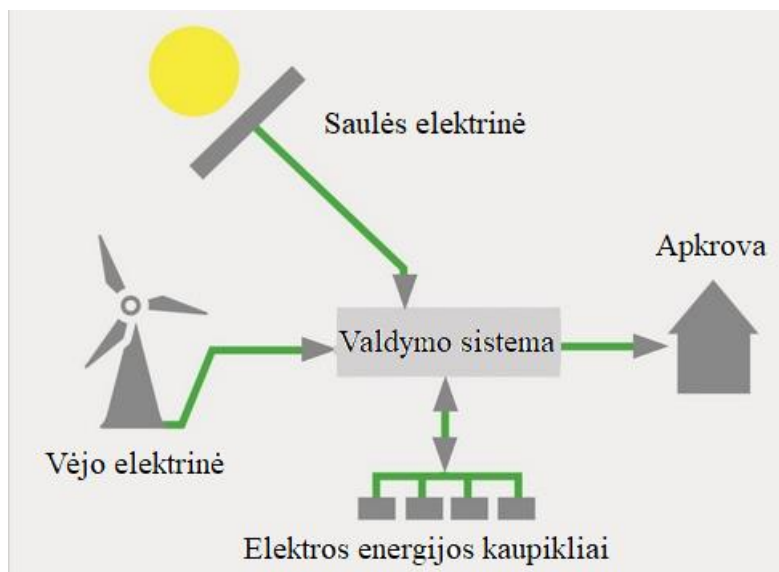
1. atlikti hibridinių sistemų ir su ja susijusių duomenų literatūros apžvalgą;
2. sudaryti hibridinės energijos gamybos sistemos optimizacinį modelį;
3. nustatyti optimalius hibridinės sistemos parametrus;
4. atlikti hibridinės sistemos ekonominę analizę ir nustatyti jos atsipirkimo laiką.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Hibridinės sistemos

Iškastinis kuras yra naudojamas energijai gaminti ir tiekti pagal energijos vartojimo poreikius, o kai poreikio nėra arba jis sumažėja, kurą galima lengvai sandėliuoti. Tačiau energija gaunama iš atsinaujinančių šaltinių priklauso nuo gamtos sąlygų, kurių žmogus nekontroliuoja, todėl ją pravartu kaupti kai tik yra galimybė ir atiduoti į tinklą kai jos labiausiai reikia t.y., piko metu. Tokia gamybos ir saugojimo idėja gali būti realizuojama naudojant hibridines atsinaujinančios energijos sistemas (angl. *hybrid renewable energy system – HRES*). Tokiomis sistemomis įprasta vadinti sistemas, kurias sudaro vienas atsinaujinantis ir vienas įprastas energijos šaltinis arba daugiau nei vienas atsinaujinantis šaltinis kartu su įprastu elektros energijos šaltiniu arba be jo. Pavyzdinė HRES sistema pavaizduota 1 pav. Ją sudaro minėti energijos šaltiniai (vėjo turbinos, saulės moduliai), energijos kaupimo įrenginys (dažniausiai kažkokio tipo baterijos) ir energijos valdymo centras.

Naudinga HRES savybė yra sujungti dvi ar daugiau atsinaujinančias energijos gamybos technologijas, kad būtų kuo geriau panaudotos jų charakteristikos ir pasiekiamas didesnis efektyvumas [1].



1 pav. Pavyzdinė HRES sistema [2]

Hibridinės energijos gamybos sistemos pagrindiniai energijos šaltiniai yra saulės ir vėjo elektrinės. Jos dažniausiai užtikrina elektros energijos gamybą, tačiau tai vis tiek priklauso nuo gamtos sąlygų bei vietovės ir elektros gamyba kartais gali nutrūkti. Norint pašalinti šį trūkumą į sistemą įvedami atsarginiai energijos įtaisai – elektros energijos kaupikliai, kurie tiekia deficitinę galią ir rūpinasi trumpalaikėmis apkrovos reikmėmis. Pagrindiniai ir atsarginiai šaltiniai yra prijungiami prie valdymo centro per nuolatinės srovės keitiklius. Keitikliai reikalingi norint sumažinti energijos nuostolius, bei tam, kad kai kurie HRES komponentai gali veikti tik su jais. Saulės elektrinės yra vienos iš tokių, nes jos į tinklą tiekia nuolatinės elektros srovę. Kitas elementas yra kaupikliai, dažniausiai kažkokio tipo baterijos, jos taip pat įkrovimo ir iškrovimo metu tiekia nuolatinę srovę. Valdymo sistema reguliuoja energijos gamybą iš visų šaltinių ir užtikrina nepertraukiamą elektros energijos tiekimą vartotojui. Priklausomai nuo jos valdymo funkcijos ji gali dirbti įvairiais režimais.

Į HRES visada įtraukiamos atsarginės energijos kaupimo sistemos, kurios bet kuriuo metu patenkina apkrovos poreikį. Atsarginių energijos kaupimo sistemų elementai gali būti akumuliatoriai, dyzeliniai generatoriai, kondensatoriai arba šių šaltinių derinys. Bet dažniausiai šiam tikslui naudojami akumuliatoriai [1]. Taip yra dėl to, kad juos gana patogiu sandėliuoti bei jų sukauptos galios pakanka poreikiams patenkinti.

Atsižvelgiant į hibridinės sistemos efektyvumą, ekonomiškumą, patikimumą ir lankstumą jos gali įveikti atskirų gamybos technologijų apribojimus. Ši sistema leidžia išlyginti apkrovą, reguliuoti dažnį, slopinti energijos virpesius ir gerinti energijos kokybę bei patikimumą. Vienas iš pagrindinių rūpesčių yra fotovoltinių (angl. *photovoltaics* – PV) ir vėjo energijos išteklių nepastovumas. Vėjo generuojama energija dažnai nesusijusi su vartotojų apkrovos grafikai ir vėjo pikai prasilenkia su vartotojų elektros energijos vartojimo piku, o saulės energija gaminama tik dienos metu [3]. Būtent hibridinė energijos sistema gali sušvelninti energijos svyravimus ir išspręsti kitas su atsinaujinančiais ištekliais iškilusias problemas.

1.2. Saulės energija pagrindinis HRES šaltinis

Pasaulio energijos poreikis kyla dėl populiacijos augimo ir industrijos pažangos. Vien tik per pastarąją žmonių kartą, gyventojų kiekis išaugo dviem milijardais. Pramonės augimas žymus tiek Europoje, tiek Azijos bei Amerikos regionuose, o jos augimas prognozuojamas ir ateityje. Nuo 2015 m. įsigalėjus Paryžiaus susitarimui dėl klimato kaitos, aplinkosaugos reikalavimai elektrinėms ir jų taršai dar labiau išaugo ir sugriežtėjo. Tad ateityje gyvybiškai svarbu gaminti kuo didesnę elektros energijos dalį iš ekologiškų energijos šaltinių. Tokie yra atsinaujinantys energijos šaltiniai: saulės, vėjo, vandens kinetinė ir geoterminė energija. Būtent saulės energetika iš minėtų šaltinių labiausiai siejama su HRES, taip yra dėl kelių priežasčių.

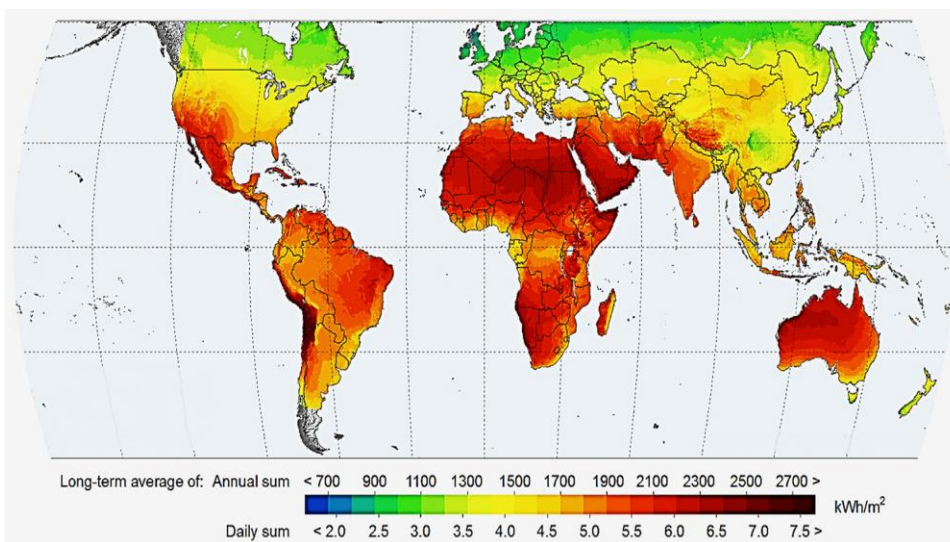
Pirma, saulė yra pagrindinis neišsenkančios, laisvos energijos šaltinis planetai [4] ir jos išspinduliuota energija yra didžiausia lyginant su kitais atsinaujinančiais elektros energijos šaltiniais. Išspinduliuotos energijos pagrindiniai matavimo vienetai yra vatai kvadratiniam metrui (W/m^2), saulė jų gali išspinduliuoti apie $2500 kW/m^2$, kai kuriuose pasaulio vietovėse. Tačiau, kai ši energija keliauja žemės link, dalis jos yra atspindima ir sugerama debesų, todėl žemei tenka tik dalis šios spinduliuotės.

Antra priežastis yra tai, kad saulė kaip energijos šaltinis pasaulyje daug žadantis, nes jis nėra iki galo išnaudojamas. Tobulėjant elektrinių technologijoms naudingumas didės, tad ir dėl kainos bei efektyvumo, ji taps pirmaujančia technologija lyginant su kitomis alternatyvomis.

Trečia, saulės sistema gali būti efektyviai naudojama kaimo vietovėse, pramoninėse gamyklose ir namų ūkiuose, nes ji yra lengvai prieinama ir diegiama. Be to, mokslininkai vis dar tyrinėja ir bando patobulinti saulės elektrinių technologijas. Tinkamai naudojant šią technologiją, ateityje būtų galima išvengti nepageidaujamų pasekmių, atsirandančių dėl energijos krizės. Daugelis tyrimų šiuo metu atliekami siekiant padidinti saulės energijos pramonės efektyvumą, kad ateities pasaulis geriau išnaudotų ir įsisavintų šią energiją [5].

Ketvirta priežastis yra susijusi su aplinkosauga, nes saulės energijos panaudojimas neturi jokio žalingo poveikio ekosistemai, kurioje natūrali pusiausvyra yra suderinama su gyvų organizmų gyvenimu [6].

Saulės spinduliuotės pasiskirstymas ir intensyvumas yra du pagrindiniai veiksniai, lemiantys saulės energijos pramonės efektyvumą. Šie parametrai priklauso nuo šalies ir yra gan skirtingi, tai galima pamatyti paveikslėlyje Nr. 2.



2 pav. Saulės skleidžiamos spinduliuotės intensyvumas pasaulyje

Įdomu tai, kad per pastaruosius 10 metų elektros energija, naudojant saulės energijos technologiją, kaina sumažėjo 80 proc. [7], tai parodo kaip saulės energetika tobulėjo ir kaip ateityje tobulės.

1.3. Fotovoltinis saulės elementas

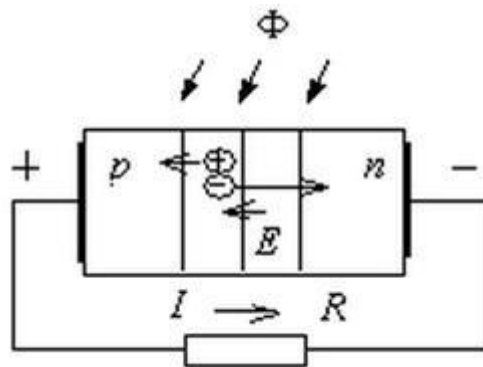
Fotovoltinės saulės elementas sudarytas iš puslaidininkių medžiagų, dažniausiai silicio, sumaišyto su kažkoku puslaidininkiu. Puslaidininkiuose visi elektronai yra susiję su atomais, todėl laisvųjų krūvininkų juose nėra. Tačiau suteikus energijos, pavyzdžiui, apšvietus, dalis elektronų gali išsilaisvinti iš kovalentinių ryšių ir tapti laisvaisiais krūvininkais (laidumo elektronais). Atomas, iš kurio pasišalino elektronas taps teigiamu jonu ir galės prisijungti kitą elektroną ir ciklas kartosis. Tokie pasikeitimai sąlygoja skylių – teigiamą krūvį turinčių dalelių, atsiradimą. Taigi puslaidininkyje galimi dviejų tipų laisvieji krūvininkai: neigiamą krūvį turintys laidumo elektronai ir teigiamą krūvį turinčios skylės.

P–N sandūra vadinamas pereinamasis sluoksnis, susidarantis puslaidininkyje suformuotų N ir P sričių kontaktų aplinkoje. P–N sandūros savybėmis yra pagrįstas daugumos puslaidininkinių prietaisų veikimas. Pirmasis puslaidininkių P–N sandarą saulės elementuose aprašė R. Ohl'as iš „Bell“ laboratorijos 1941 m.[8]. Dauguma iki šiol pagamintų fotovoltinių saulės elementų remiasi silicio P–N sandūromis.

Kai priemaišos valentingumas didesnis už pagrindinio puslaidininko valentingumą, papildomi elektronai, kurie nedalyvauja valentiniuose ryšiuose lengvai atitrūksta nuo savo atomų ir tampa laisvaisiais krūvininkais, vadinamais laidumo elektronais. Todėl puslaidininkis, su didesnio

valentingumo priemaišomis, vadinamas elektroninio laidumo arba N tipo puslaidininkiais. Kai priemaišos valentingumas yra mažesnis, jos prisijungia papildomą elektroną ir sukuria skyles, puslaidininkiai, su tokiomis priemaišomis, vadinami skylinio laidumo arba P puslaidininkiais. Taip gaunami P arba N puslaidininkiai

Kryptingą krūvininkų judėjimą puslaidininkyje gali sukelti išorinis elektrinis laukas arba nevienoda krūvininkų koncentracija skirtingose puslaidininkio srityse (krūvininkų difuzija). Būtent krūvininkų difuzija ir paremtas fotovoltinės elektrinės veikimo principas. Kai šviesos srautas Φ pasiekia P–N sandūrą, šviesos fotonai lengvai patenka į sandūrą per ploną puslaidininkio sluoksnį 4 pav. Šviesos fotonai sandūroje sukuria elektronų ir skylių poras. Tada sandūros elektrinis laukas išstumia skyles ir elektronus iš sandūros. Laisvieji elektronai migruoja į N – tipo puslaidininkio pusę, o skylės į P – tipo pusę. Taip skirtingose P ir N tipo puslaidininkio pusėse susidaro potencialų skirtumas. Sujungus tas puses elektroniškai pradės kryptingai judėti, taip sudarydami nuolatinę elektros srovę. Tai iliustruota ketvirtame paveiksle.



3 pav. Supaprastintas P – N sandūros veikimo principas

1.4. Kaupiklių rūšys

Didėjant atsinaujinančių energijos šaltinių pagamintos energijos kiekiui, labai svarbu ieškoti metodų ir būdų, kaip saugoti šią energiją. Pagrindinės energijos kaupimo technologijos gali būti klasifikuojamos kaip:

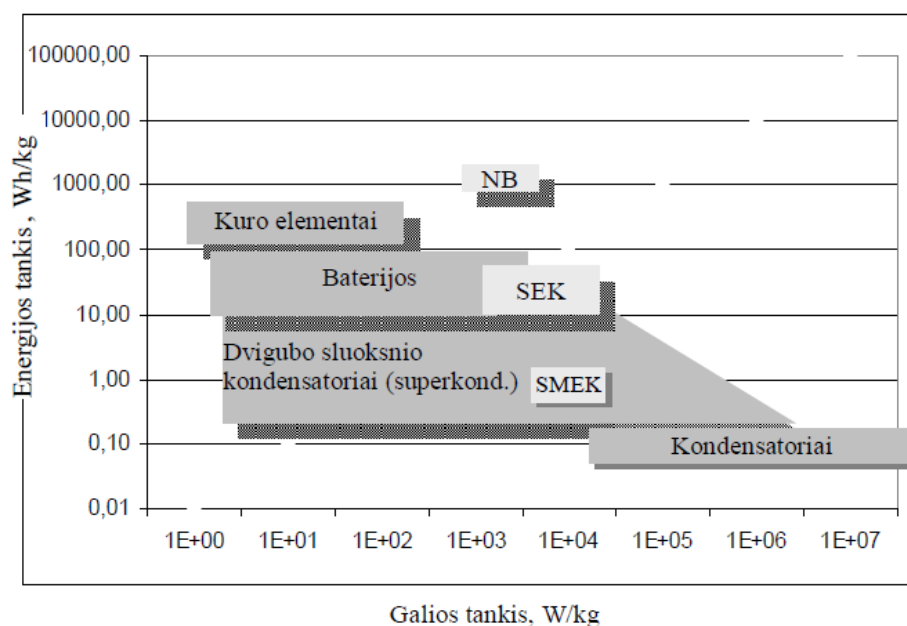
- magnetinės sistemos (superlaidininkų magnetinės energijos kaupikliai);
- elektrocheminės sistemos (baterijos, kuro elementai, superkondensatoriai);
- hidrosistemos (hidroakumuliacinės kaupyklos);
- pneumatinės sistemos (suslėgto oro energijos kaupyklos);
- mechaninės sistemos (gravitacinės energijos kaupyklos).

Kalbėdami apie energijos kaupimo sistemas, reikia apsvarstyti šio energijos saugojimo metodo ir technikos parinkimo kriterijus. Mokslininkai klasifikuoja skirtingus kriterijus, renkantis energijos kaupimo technologijas, pagrindiniai aspektai, į kuriuos reikia atsižvelgti:

- turimi energijos ištekliai;
- energijos poreikis ir taikymas;
- energijos kaupimo efektyvumas;

- energijos saugojimo išlaidos;
- energijos kaupimo infrastruktūra [9].

Nors energijos kaupimo sistemos buvo naudojamos šimtmečius ir buvo nuolat tobulinamos, kad pasiektų dabartinį išsivystymo lygį, tačiau manoma, kad energijos kaupimas HRES sistemose bus baterijose bei akumuliatoriuose. 5 pav. pavaizduota *Ragone* grafikas, kuris parodo energijos kaupimo tipų charakteristikas. Iš jo galima matyti, kad naujo tipo baterijos (NB) pasižymi gan geru energijos bei vidutiniu galios tankiu. Čia energijos tankis yra energija sukaupta tūrio vienetui ar masei, o galios tankis – energijos perdavimo greitis tūrio arba masės vienetui. *Ragone* grafiko abi ašys yra logaritminės, o tai leidžia palyginti labai skirtingų prietaisų veikimą. Svarbu paminėti ir tai, kad *Ragone* diagrama tradiciškai naudojama tik baterijoms, kondensatoriams ir kuro elementams.



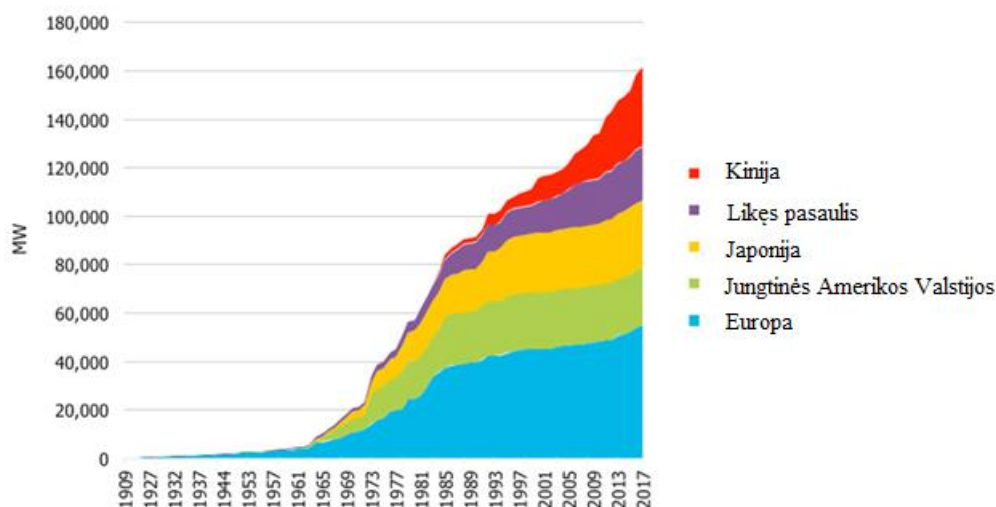
4 pav. *Ragone* grafikas [10]

Kaupiklių energetikoje labai svarbus parametras yra energijos iškrovos laikas. Į jį reikia atsižvelgti projektuojant HRES, nes vėjo elektrinės galiai balansuoti reikia turėti didelės galios ir ilgo iškrovos laiko energijos kaupiklius. Tačiau kaip taisyklė, jeigu kaupiklis yra ilgos iškrovos ir didelės galios, jis bus arba labai didelių gabaritų arba itin brangus, o kartais abu variantai.

1.4.1. Hidroakumuliacinės energijos kaupyklos

Geriausios ir didžiojoje energetikoje taikomos energijos kaupimo technologijos yra hidroakumuliacinės elektrinės. Hidroakumuliacinės elektrinės (HAE) yra viena iš seniausių elektros energijos kaupimo ir regeneravimo technologijų, kurios naudojamos jau daugiau kaip 100 m. Nuo XX a. pradžios energijos kaupimas hidroakumuliacinėse elektrinėse suteikė lankstumo elektros energijos tiekimo tinklams. Šiuo metu HAE užima daugiau kaip 94 proc. suminės pasaulinės elektros energijos kaupiklių talpos ir siekia 160 GW [11]. Lietuvoje irgi yra įrengta Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė. Tai vienintelė tokio tipo elektrinė Baltijos šalyse. Kaip ir dauguma hidroakumuliacinių elektrinių, taip ir Kruonio, skirta subalansuoti elektros gamybą ir suvartojimą, taip pat avarijų energetikos sistemoje prevencijai bei jų likvidavimui. Kruonio hidroakumuliacinė

elektrinė taip pat užtikrina antrinį avarinį Lietuvos elektros energetikos sistemos rezervą, jos galia siekia 900 MW.



5 pav. Visa instaliuota elektros energijos kaupyklų galia nuo 1900 m. iki 2017 m. [11]

Hidroakumuliacinės elektrinės gali veikti siurblio ir generatoriaus režimu. Kai energetinės sistemos apkrova maža ir yra daug pigios perteklinės energijos, HAE agregatai, įjungti siurblio režimu, kelia vandenį iš žemesnio vandens telkinio į aukštesnį. Dieną, kai išauga energijos poreikis, HAE gali dirbti kaip įprasta hidroelektrinė. Tai reiškia, kad iš aukštutinio telkinio krintantis vandens srautas, suka turbinas, o šios – generatorius, kurie ir gamina elektros energiją.

1.4.2. Superkondensatoriai

Atsinaujinanti energija gali būti transformuojama į energijos saugojimo formą ir superkondensatorių pagalba, o kai reikia, ją vėl galima transformuoti į elektros energiją. Kondensatoriai kaupia ir tiekia energiją elektrochemiškai, todėl juos galima priskirti elektrostatiniais, elektrolitiniams ir elektrocheminiams kondensatoriams. Tarp šių trijų tipų elektrocheminiai kondensatoriai, dar vadinami superkondensatoriais arba ultrakondensatoriais, turi didžiausią tūrį tūrio vienetu, nes turi porėtą elektrodo struktūrą.

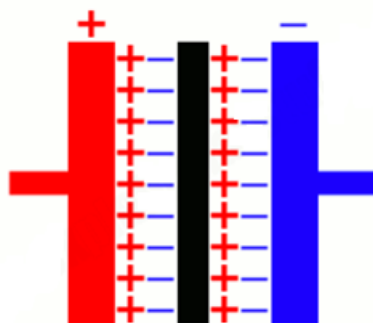
Baterijos, superkondensatoriai (angl. *supercapacitor* – SC) ir kuro elementai yra energijos įrenginiai, dirbantys elektrocheminės energijos konversijos principu. Elektrocheminė energija gali būti priskiriama švarios energijos daliai, nes ši technologija gali būti saugiai perdirbta ir nesukuria jokių taršos šaltinių. Dėl didelės specifinės talpos, ilgo tarnavimo ciklo ir didelės galios tankio tai gana paranki energijos kaupimo technologija.

Superkondensatoriai vis plačiau naudojami transporte ir rezerviniuose maitinimo šaltiniuose taip pat gali būti naudojami kaip maitinimo šaltiniai nešiojamiems prietaisams, pvz., Mobiliesiems telefonams, nešiojamiems kompiuteriams, skaitmeniniams fotoaparatais ir pan. Ateityje manoma, kad bus pradėti naudoti ir elektros energetikoje kaip paskirstytieji energijos kaupikliai. Šių kaupiklių įkrova galėtų būti ir nedidelė, jei jų skaičius būtų pakankamai didelis, kad galėtų sukaupti energetikos sistemai reikšmingus energijos kiekius. Taip pat superkondensatoriai puikiai dirba esant dideliame

energijos suvartojimui, jų atsparumas galingumui yra iki 100 kartų didesnis nei ličio jonų baterijų, bei jų gyvavimo ciklas yra gerokai ilgesnis. Todėl manoma, kad ateityje jie pakeis ličio jonų baterijas elektromobiliuose [12].

Kaip ir paprastas kondensatorius, superkondensatoriuje yra dvi atskirtos plokštės. Plokštelės yra pagamintos iš metalo, padengto aktyvia medžiaga, pvz., miltelių pavidalo, aktyvuota anglimi, kuri veiksmingai jiems padeda išlaikyti daug didesnę krūvį. Įprasto kondensatoriaus plokštės yra atskiriamos santykinai storu dielektriku, pagamintu iš žėručio, plonos plastikinės plėvelės arba tiesiog oru. Kai kondensatorius yra įkrautas, teigiamas krūvis formuojasi ant vienos plokštelės, o neigiamas ant kitos, sukuriant elektrinį lauką tarp jų. Laukas poliarizuoja dielektriką, todėl jo molekulės pasisuka laukui priešinga kryptimi ir sumažina jo stiprumą.

Superkondensatoriuje abi plokštės yra pamerktos elektrolite ir atskiriamos labai plonu izoliatoriumi, kuris gali būti pagamintas iš anglies, popieriaus ar plastiko. Kai plokštelės įkraunamos, abiejose izoliatoriaus pusėse formuojasi priešingas krūvis, sukuriantis vadinamąjį dvigubą elektrinį sluoksnį, manoma, kad kartais tik vienos molekulės storio [13]. Štai todėl superkondensatoriai dažnai vadinami dvigubo sluoksnio kondensatoriais.



6 pav. Superkondensatoriaus krūvių pasiskirstymas

Superkondensatoriai pasižymi labai didele talpa. Jie yra vieni iš efektyviausių energijos kaupiklių, kurių viso ciklo, nuo elektros energijos sukauptimo iki jos grąžinimo į šaltinį, naudingo veikimo koeficientas yra apie 95 %.

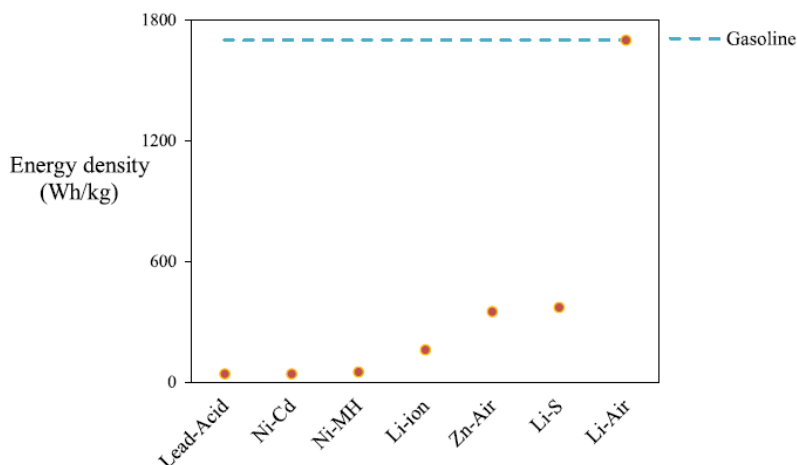
Energetikoje naudojami superkondensatoriai įkraunami nuolatine srove, todėl elektros energijos kaupimo sistemoje reikalingas lygintuvas, kuris kintamąją srovę paverčia nuolatine srove. Kai sukauptą elektros energiją reikia grąžinti į elektros sistemą, tuomet reikalingas inverteris, kuris atlieka atvirkščią veiksmą – nuolatinės srovės energiją paverčia į standartinių kintamosios srovės energiją, tinkamą tiekti į elektros tinklą.

Nors jų efektyvumas ir gyvavimo ciklas yra labai didelis, elektrocheminiai kondensatoriai yra savaime išsikraunantys, o jų darbinė įtampa negali viršyti potencialo, kuriam esant elektrolitas patiria chemines reakcijas. Aukštos įtampos įrenginiams juos galima naudoti kartu su baterijomis. Daug tyrimų ir plėtros yra sutelkta į šias energijos kaupimo galimybes ir jų komercializavimą.

1.4.3. Baterijos

Baterijos plačiaja prasme yra uždaras cheminis maitinimo blokas, kuris gali gaminti kažkokį ribotą elektros energijos kiekį. Baterijos konvertuoja chemines medžiagas esančias baterijos viduje į elektros energiją, kuri paprastai išeikvojama per kelias dienas, savaites ar netgi mėnesius [14]. Jos pasižymi dideliu energijos tankiu. Be senai žinomų rūgštinių švino baterijų, energetikoje pradėtos naudoti ličio-jonų (Li-jonų), natrio-sieros (NaS), nikelio-kadmio (NiCd), nikelio-metalų hidridų (NiMH), srautinės baterijos, o pastaruoju metu kalbama apie kietojo kūno baterijas. Kietojo kūno akumuliatorių technologija yra ta, kad vietoje skysto elektrolito, naudoja kietus elektrodus ir kietą elektrolitą.

Tarp įvairių baterijų, ličio baterijos vaidina vis svarbesnį vaidmenį elektros energijos kaupime, nes joms būdinga didelis galios tankis (energija vienam svorio vienetui) ir energijos tankis (energija tūrio vienetui). Viena iš ličio baterijų tipų yra *Li-Air* baterija, su šio tipo baterija manoma, kad elektromobiliai galės konkuruoti su tradiciniais automobiliais. *Li-Air* energijos tankis pavaizduotas 8 pav. Tačiau, kad *Li-Air* baterijos galėtų pasiekti aukštą našumą ir tapti komerciškai perspektyviomis, reikia išspręsti daugelį techninių iššūkių: suprojektuoti tinkamą katodo struktūrą, optimizuoti elektrolitų kompozicijas bei išaiškinti sudėtingas chemines reakcijas įkrovimo ir iškrovimo metu [15].



7 pav. Įvairių baterijų tipų energijos tankis

Dėl plačiai prieinamų natrio išteklių ir žemos jo kainos bei ličio ir natrio intarpų panašumo, Na-jonų akumulatoriai galėtų tapti būsimomis nebrangiomis išmaniųjų elektros tinklų, integruojančių atsinaujinančius energijos šaltinius, baterijomis. Norint pasivyti Li-jonų technologiją, Na-jonų srityje reikia optimizuoti katodines ir anodines medžiagas, o manoma, kad nauji elektrolitai bus raktas į Na-jonų sėkmę.

Ru ir kt. [16] siūlo aliuminio jonų baterijas, kaip tinkamiausią kandidatą, pakeisti ličio jonų baterijas dėl jų gausių išteklių, ekonomiškumo ir ekologiškumo, taip pat dėl greito įkrovimo greičio ir ilgo tarnavimo laiko. Dėl tokių pranašumų jie gali būti tinkami kaupti elektros energiją gaunamą iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Tačiau prieš pradėdant prekybą, jų energijos tankį, celių talpą ir ciklo stabilumą vis tiek reikia patobulinti.

Kitas tipas baterijų yra srautinės baterijos, jas sudaro du elektrolitų rezervuarai, kuriuose elektrolitai cirkuliuoja per elektrocheminį elementą. Elektrocheminį elementą sudaro katodas, anodas ir membraninis separatorius. Tokių sistemų energijos tankis daugiausia priklauso nuo elektrolito tūrio ir nelabai priklauso nuo elektrocheminio elemento, jo dydžio ir konstrukcijos. Oksidacijos redukcijos arba redox (angl. *oxidation reduction* – redox) srautinės baterijos yra tinkamos naudoti atsinaujinančiosios energijos kaupimui. Pagrindinės srautinių baterijų konstrukcijų medžiagos yra polisulfido bromidas (PSB), cinko bromidas (ZnBr). Šios ir kitos medžiagų iš kurių gaminamos srautinės baterijos yra gan brangios, todėl srautinių baterijų kaina gan aukšta. Kita priežastis dėl ko šios baterijos yra brangios, tai jų veikimas apima siurblių sistemas ir srauto valdymą su išorine saugykla, o tai padidino kapitalo ir eksploatavimo išlaidas, palyginti su kito tipo baterijomis.

Manoma, kad baterijų energijos kaupiklių technologijos jau yra pakankamai brandžios, bet nepaisant to jos dar tebėra tobulinamos. Vienas tokių pavyzdžių yra Amerikos mokslininkų kuriama sistema, kurios pavadinimas yra „saulė dėžėje“. Masačusetso technologijos instituto (MIT) mokslininkai sukūrė naują energijos kaupimo sistemą, kuri remiasi išlydytų druskų baterijų pagrindu. Su druska, kuri naudojama, kaip energijos kaupimo medžiaga – viena iš pagrindinių problemų yra korozija. Kita problema yra pati druska, kuri gali sukaupti apie 538 °C, tačiau vėliau jos keliamas žalingas poveikis yra pernelyg didelis. Todėl MIT komanda pasiūlė silicį, kuris gali išlaikyti daugiau šilumos ir taip padidinti sistemos efektyvumą. Be to silicio išteklių yra gausūs.

Ši sistema sudaryta iš dviejų tvirtai izoliuotų talpyklų, kurios pagamintos iš grafito. Viena talpykla saugo skystą silicį 1900 °C temperatūroje. Šildant, silicis būtų pumpuojamas iš šios talpyklos per vamzdžius, kuriuose yra šildymo elementai, o pastaruosius maitina išoriniai energijos šaltiniai. Tada išilęs silicis patektų į antrąją talpyklą, kurioje silicis būtų saugomas jau 2400 °C temperatūroje. Naudojant šią sistemą, karštas silicis užvirina vandenį, o pagamintas garas suka turbiną, kuri ir gamina elektros energiją. Tačiau ši sistema tuo neapsiriboja. Įkaitęs silicis pradeda labai ryškiai šviesti, jis yra pumpuojamas per vamzdelius, kurie išskiria šviesą, o ją sugeria specialūs saulės elementai, kurie šią šviesą paverčia elektros energija. Idealu, jei ši energija būtų gauta iš atsinaujinančių energijos šaltinių, pavyzdžiui, vėjo ar saulės energijos. Toks energetinės sistemos projektas galėtų būti įgyvendintas bet kokioje vietovėje ir būtų gerokai pigesnis teigia vienas iš projekto kūrėjų A. Henry. Skaičiuojama, kad šios sistemos kaštai būtų dvigubai mažesni nei hidroakumuliacinių elektrinių [17].

1.5. Paskirstytas energijos kaupimas naudojant elektromobilių baterijas

Manoma, kad kai elektromobilių skaičius ženkliai padidės, jų baterijos galės būti naudojamos kaip paskirstytas, didelės galios ir didelės elektros energijos kaupiklis. Ši energijos kaupimo technologija vadinama iš elektromobilio į tinklą technologija (angl. V2G – *Vehicle to Grid*). Ši energijos kaupimo technologija išsiskiria tuo, jog dideliems energijos kiekiams sukaupti nereikės statyti kaupyklos. Elektromobiliai dažniausiai kraunami nakties metu, kai elektros kaina yra maža ir jos poreikis nedidelis. Kai elektros tinkle energijos poreikis padidėja, baterijos per inverterius dalinai iškraunamos ir energija atiduodama į tą patį elektros tinklą. Kai į tinklą prijungiame didelį kiekį elektromobilių, tuomet visos elektromobilių baterijos sudaro paskirstytą didelės talpos elektros energijos kaupyklą. Ši kaupykla, kaip ir kitos elektros energijos kaupimo technologijos, gali atlikti galios rezervavimo ir energijos balansavimo bei kitas funkcijas. Ateityje baterinėms elektros energijos kaupykloms įrengti

taip pat numatoma naudoti elektromobiliuose 8-10 metų atidirbusias ir šiek tiek restauruotas baterijas, kurių energijos talpa per tą laikotarpį, bus sumažėjusi tik apie 20 % [18].

Panaši kaupimo samprata gali būti naudojamos ir namų ūkiuose. Gyvenamųjų namų kvartalai sudaryti iš daugelio individualių namų ūkių. Jeigu toks kvartalas turi bendrą energijos kaupimo sistemą, sukaupta energija gali būti parduota kitiems namams. Reikia tik pateikti pasiūlymus aukciono rengėjui, kad būtų išpirkti saugojimo pajėgumai bendroje energijos kaupimo sistemoje [19]. Tai savotiškas verslas, kur sukauptą energiją galima parduot ar pirkti kai yra poreikis ar finansinė nauda.

1.6. Mokymasis iš atsinaujinančios energetikos

Didelės kapitalo sąnaudos ir finansavimo trūkumų galimybės apsunkina didelės galios energijos kaupimą, bet pasak profesorės Lindsay Miller, nauji projektų finansavimo modeliai ir palanki reguliavimo aplinka bus pagrindiniai veiksniai transformuojant ir atlaisvinant energijos saugojimo rinką. L. Miller apibendrina kelis finansavimo mechanizmus pvz.: įmonių elektros energijos pirkimo susitarimai, hibridinės obligacijos ir kooperatyvai, kurie atliko pagrindinį vaidmenį finansuojant atsinaujinančios energijos projektus ir jų plėtrą. Todėl manoma, kad jie gali būti pritaikyti ir kaupimo sistemų plėtrai.

Istoriškai, kaip ir atsinaujinančios energijos technologijų atveju, ekonominės priemonės buvo perspektyviausios sprendžiant energetikos sprendimus. Mokesčių lengvatos buvo naudingos mažinant atsinaujinančių energijos išteklių sąnaudas ir tai leido konkuruoti su tradiciniais energijos šaltiniais. Investicijų mokesčių lengvatos tiesiogiai mažina energijos projektų plėtros sąnaudas. Mokesčių lengvatos padeda projektui įveikti dideles kapitalo sąnaudas, su kuriomis susiduria atsinaujinančiosios energijos šaltinių ir elektros energijos kaupimo projektai. Tuo pačiu metu jos leidžia vyriausybei stebėti ir riboti, kiek išlaidų išleidžiama energetikos politikai. Šiuo metu energijos kaupimas sektorius susiduria su didelėmis kapitalo sąnaudomis, todėl labai reikalingas panašios mokesčių paskatos, kad sumažėtų projekto išlaidos.

Taip pat atsinaujinančios energijos pramonės politikos trūkumai yra programos trukmė, dalyvavimo reikalavimai, vykdymo mechanizmai ir sąnaudų paskirstymas. Kuriant saugojimo įstatymus ir įpareigojimus, veiksmingumas gali būti pagerintas užtikrinant, kad programos būtų pakankamai ilgos, kad būtų suteiktos sąlygos ilgalaikiai sutarčiai sudaryti ir finansuoti ir kad vykdymas būtų griežtai reguliuojamas bei išlaidos teisingai paskirstytos.

Kita pamoka, kurią galima išmokti iš atsinaujinančios energetikos pramonės yra tai, kad reikia skatinti vyriausybės įtraukti energijos saugojimo sistemų projektus į savo ilgalaikius planus. Tokiu būdu bus užtikrintas finansavimas. Pirmoji valstybė įstatymiškai įgaliojusi saugoti energiją buvo Kalifornija. 2013 m. Kalifornijos viešųjų paslaugų komisija patvirtino įgaliojimus, reikalingus iki 2020 m. saugoti 1,3 GW [20]. Finansavimas šiam tikslui pasiekti yra tiekiamas per valstybės savarankiško skatinimo programą.

Taigi energijos saugojimo pramonė yra palankioje padėtyje, nes daug ką galima išmokti iš atsinaujinančių energijos išteklių pramonės istorijos, atsižvelgiant į skatinimo ir finansavimo mechanizmus. Atsinaujinančių energijos šaltinių pramonė susidūrė su labai panašiomis problemomis,

pvz., didelėmis kapitalo sąnaudomis ir sugebėjo jas įveikti, o dabar gali konkuruoti su tradicine gamyba.

1.7. Energijos saugojimo iššūkiai

Dėl didelių kapitalo sąnaudų ir finansavimo galimybių, bei paskatų stokos sunku realizuoti didelės apimties energijos kaupimą. Tą patį iššūkį patyrė atsinaujinančiosios energijos sektorius ir nuo to laiko daugelis šių kliūčių buvo įveikta mažinant išlaidas ir prisiimant riziką, taip pat naudojant paskatas ir subsidijas. Kai kurios atsinaujinančiosios energijos pramonės pamokos gali būti laikomos energijos saugojimo pramonės analogijomis, norint įveikti panašias kliūtis. Tačiau taip pat yra tam tikrų skirtumų tarp šių pramonės šakų ir tai nebus tik paprastas priemonių perkėlimas, nes iškyla papildomų iššūkių.

Pirmasis iššūkis yra tinkamai apibrėžti energijos saugojimo naudą ir kiekybiškai ją įvertinti. Yra žinoma, kad energijos kaupimo sistemos (ESS) gali teikti vertingas paslaugas tinklui. Tačiau kaupimo sistemos, kurias reikia diegti, paslaugų vertė per visą jos naudojimo laiką turi viršyti sistemos išlaidas. Tai įveda pirmąjį iššūkį, susijusį su energijos kaupimo finansavimu – kiekybiškai įvertinama ESS naudą.

Antrasis iššūkis energijos kaupimo pramonei yra tinkamai įvertinti finansavimo modelius ir politiką, kurie leido atsinaujinančiosios energijos pramonei plėstis. Pagrindinis tikslas būtų pakartoti tai, kas gerai veikė, ir eliminuoti trūkumus. Tai padarius turėtų būti suformuotas pagrindinis energijos kaupiklių sektoriaus ekonominis plėtros variklis, kas leis konkuruoti su tradiciniu elektros energijos gamybos sektoriumi.

Pavyzdžiui 2017 m. Arizonoje ir Havajuose buvo sudarytos sutartys, kuriuose elektros energija buvo gaminama saulės elektrinių pagalba ir perteklius saugomas kaupikliuose. Šiose sutartyse energijos sąnaudos, įskaitant paklausos mokesčius, naudojami kaip elektros energijos kainos pagrindas. Tai leidžia kūrėjams geriau kontroliuoti elektros energijos generavimą ir gali sudaryti geresnes pirkimo pardavimo sąlygas. Tai yra dar viena galimybė energijos kaupimo sektoriui bendradarbiauti su atsinaujinančiais energijos ištekliais siekiant gauti finansavimą [21,22].

1.8. Energijos kaupyklų teikiamos naudos

Energijos saugojimo technologijos yra unikalios, jos leidžia įsisavinti elektros energiją gaminamą iš atsinaujinančių energijos šaltinių ir tai yra laikoma pagrindiniu sprendimu, leidžiančiu pertraukiamiesiems šaltiniams, pvz., vėjo ir saulės elektrinėms, stabiliai patenkinti bazinę apkrovą (D. Ton ir kt., 2016 m.). Kaip jau buvo minėta atsinaujinančiųjų išteklių nepastovumo valdymas yra pagrindinis iššūkis siekiant didesnio tinklo patikimumo. Energijos saugojimo technologijos pasiruošusios išspręsti šią problemą, kartu didindama tinklų lankstumą bei ekonomiškumą. Dėl to kaupikliai ir jų technologijos yra diegiamos visame pasaulyje. „GTM Research“ duomenimis manoma, kad JAV energijos saugojimo rinka išaugs nuo 221 MW 2016 m. iki maždaug 2,6 GW 2022 m. ir tikimasi, kad pajamos viršys 11 mlrd. dolerių. Tai gana didelės investicijos, bet vis dėl to šiuo metu energijos kaupimas yra labiau slopinamas projektų finansavimo, nei pačių technologijų.

Kitos kaupiklių sukuriamos naudos yra ekonominės. Pavyzdžiui energijos saugojimas gali sumažinti arba atidėti poreikį statyti naują elektrinę, tuo pačiu metu patenkinant didėjančius energijos poreikius.

Taip pat energijos kaupimo nauda gali būti kiekybiškai įvertinama arbitražo pagalba. Sistemos gali kaupti elektros energiją kai jų kaina yra žemiausia, dažniausiai tai nakties metas ir atiduoti į tinklą elektros energiją kai kaina už ją yra didžiausia. Pavyzdžiui, Masačusetse, kalbant apie valandinį kainų nustatymą, piko metu 10% valandų sudarė 40% visos elektros kainos [23].

Galiausiai, energijos kaupimo sistemos gali užtikrinti saugumą, kad avarijos metu elektros energija nebus nutraukta, taip sumažindamas išlaidas dėl nepagamintos produkcijos nutrūkusių elektros energijos tiekimui. Pavyzdžiui N.D. Laws ir kt. 2018 m. atliktas tyrimas parodė, kad įvertinus išvengtus nuostolius, skirtumas tarp patirtos žalos ir kaupimo sistemos įsirengimo kaštų yra patikima fiskalinė investicija. Tai buvo įrodyta atlikus atvejo tyrimą, kuris parodė, kad gamyklos grynoji dabartinė vertė (NPV) padidėjo 160%, kai buvo išvengta sąnaudų, dėl nepateiktos elektros energijos [24].

Nacionalinė atsinaujinančios energijos laboratorija neseniai išleido išsamų tyrimą, kuriame apžvelgė kaip kaupiama energija daro įtaką jų mokamiems mokesčiams. Ataskaitoje padaryta išvada, kad 25 proc. komercinių klientų visoje JAV galėtų efektyviai sumažinti savo komunalines paslaugas, naudodami baterijas [25]. Ekonominė galimybė saugoti elektros energiją buvo nuspėjama tokiose valstijose, kuriose vyksta progresyvi energetikos politika, pvz., Kalifornijoje ir Niujorke. Taip pat ir tose valstijose, kuriuose mažesnės elektros energijos kainos susijusios su dideliu poreikiu pvz. Koloradas, Nebraska, Arizona. Šis tyrimas parodė, kad daugelis komercinių klientų galėtų pasinaudoti energijos kaupimu teikiamais privalumais, tačiau kiekvienu atveju reikia daryti individualų tyrimą.

Taigi energijos saugojimas suteikia realios ir kiekybiškai įvertinamos ekonominės naudos, tačiau vertės nustatymas yra sudėtingas ir priklausys nuo technologijų, vietų, paklausos mokesčių, rinkos dinamikos ir kitų veiksnių.

1.9. Hibridinės energijos sistemos optimizacija

Tam, kad efektyviausiai parinktume hibridinių sistemų komponentus, būtų įgyvendinti ekonominiai ir techniniai tikslai, reikia sukurti optimizacinį modelį. Kurdami HRES, reiktų apsvarstyti jos komponentų sudėtį, parametrus ir kitus kintamuosius, kurie tiesiogiai daro įtaką modelio rezultatams.

Optimizacinio modelio pagrindinis tikslas – gauti kuo geresnius rezultatus su kuo mažesniais išlaidomis. Šiuos tikslus galima pasiekti optimaliai modeliuojant sistemą. Trys dažniausiai naudojami hibridinių sistemų modeliavimo ir optimizavimo metodai yra klasikiniai algoritmai, metaeuristiniai metodai ir dviejų ar daugiau optimizavimo metodų hibridas [26].

Tradiciškai optimizavimo uždavinių esant ribojimams sprendimo teorija ir metodai vadinami matematinio programavimu [27]. Klasikiniai optimizavimo algoritmai arba matematinis programavimas naudoja diferencinį skaičiavimą, kad rastų optimalius sprendimus diferencijuotoms ir nuolatinėms funkcijoms. Klasikiniai metodai turi ribotas galimybes, tačiau hibridinėms energetinėms sistemoms yra naudojami keli tradiciniai optimizavimo metodai. Pavyzdžiui linijinio programavimo modelis (LPM), dinaminis programavimas (DP) ir netiesinis programavimas (NLP).

Daugelis praktikoje, ypač ekonomikoje, kylančių uždavinių yra tiesiniai. Jei tikslo funkcija yra tiesinė, o leistinoji sritis apibrėžta tiesinėmis lygybėmis ir nelygybėmis, tai uždavinys vadinamas

tiesinio, linijinio programavimo uždaviniu. Jei leistinoji sritis baigtinė, tai uždavinys vadinamas diskretaus programavimo uždaviniu, o jei kintamieji nėra diskretūs, tai bendru atveju uždavinys vadinamas netiesinio programavimo uždaviniu.

Viena iš aktualių informatikos mokslo sričių yra optimizavimo metodai ir algoritmai, jų sudarymas ir tyrimas. Reikšmingą optimizavimo metodų grupę sudaro modernieji euristiniai algoritmai, dar vadinami metaeuristiniais metodais. Metaeuristiniai metodai apima labai platų optimizavimo uždavinių sprendimo būdų spektrą, pradedant paprastais klasikiais algoritmais ir baigiant sudėtingais adaptyvių, apsimokančių sistemų modeliavimo metodais. Euristiniu algoritmu priimta laikyti tokį optimizavimo uždavinių sprendimo metodą, kuriuo siekiama surasti aukštos kokybės, bet nebūtinai optimalų sprendinį per priimtina skaičiavimų laiką. Euristiniai algoritmai (kaip ir metaeuristiniai metodai) negarantuoja gautų sprendinių optimalumo, o surasti sprendiniai paprastai yra tik lokaliai optimalūs duotos aplinkos atžvilgiu [28]. Tačiau metaeuristinės paieškos metodai buvo plačiai naudojami sudėtingoms sistemoms modeliuoti, viena tokių – HRES.

Dviejų ar daugiau optimizavimo metodų derinimas gali įveikti pirmiau minėtų atskirų metodų apribojimus, kad būtų užtikrintas efektyvesnis ir patikimesnis HRES sprendimas. Šis derinys vadinamas hibridiniu metodu.

Kadangi HRES optimizacinio modelis yra gana sudėtingai skaičiuojamas, jam sukurti reikia tam pritaikytos programos. Tokios dažniausiai sutinkamos programos yra: „HOMER Pro“, „GAMS“, „ESyst“, „MATLAB“ ir kt.

„HOMER Pro“ programinė įranga turbūt plačiausiai žinoma, joje naudojami standartai yra pripažinti pasauliniu mastu. Ši programa įvairias tinklų konfigūracijas leidžia optimizuoti tiek perdavimo, tiek skirstomuosiuose tinkluose. Programa „HOMER“ sukurta nacionalinėje atsinaujinančios energijos laboratorijoje [29].

Bendra algebrinė modeliavimo sistema „GAMS“ yra aukšto lygio matematinės programavimo ir optimizavimo modeliavimo sistema. „GAMS“ pritaikyta sudėtingoms, didelio masto modeliavimo programoms ir leidžia sukurti didelius modelius, kuriuos galima greitai pritaikyti naujoms situacijoms. „GAMS“ yra specialiai sukurta linijinių, netiesinių ir mišrių sveikųjų skaičių optimizavimo problemų modeliavimui. Ši programa leidžia vartotojams suformuluoti matematinius modelius tokiu būdu, kuris yra labai panašus į jų matematinį aprašymą.

„Geli“, programinės įrangos kompanija, siūlo „ESyst“ įrankį analizuoti investicinio lygio energijos saugojimo projektus ir leidžia kūrėjams įvertinti ekonominę naudą, kurią gauna energijos kaupimo sistema [30].

„MATLAB“ yra programavimo sistema, kuri tiesiogiai išreiškia matricos ir matricos matematiką. Su šia programa galima puikiai aprašyti klasikinius optimizavimo metodus, o „MATLAB“ programinė įranga yra lengviausiai prieinama studentams iš visų anksčiau minėtų programų.

2. Hibridinės sistemos optimizacinis modelis

2.1. Optimizavimo sprendinys ir uždavinio sąlygos

Norint optimizuoti sistemą, pirmiausia reikia rasti jos sprendinį. Optimalus sprendinys dažniausiai yra maksimali arba minimali tikslo funkcijos reikšmė, kai siekiama maksimizuoti pajamas, minimizuoti išlaidas, sąnaudas ir pan. Sprendžiant optimizavimo uždavinius dažniausiai siekiama minimizuoti tikslo funkcijos reikšmę ir rasti argumentus, kuriems esant tos funkcijos reikšmė būtų mažiausia [27].

Būtent tą Andrés Ovalle ir kt. [31] bando padaryti. Jie pasitelkę klasikinio optimizavimo metodus tiria tinklą ir į jį integruotas baterijas. Šiame tyrime siekiama optimizuoti, energijos sąnaudas, reikalingos pakrauti kaupiklius ir lygiagrečiai to bando energijos kaupimo pajėgumus panaudoti įtampos svyravimams sumažinti.

Galima galvoti, kad pradinis visų kaupiklių tikslas yra energijos suvartojimo sąnaudų sumažinimas, tuo pačiu išlaikant įkrovos greičio (galios) ir įtampos palaikymo apribojimus. Tikslinė funkcija apibrėžiama, kaip kiekvieno sujungto kaupiklio paženklinto indeksu $i = \{1, 2, \dots, J\}$, visų energijos sąnaudų sumažinimas iki minimumo, per diskredituotus laiko žingsnius $k = \{1, 2, \dots, K^i\}$.

$$\min_{w^i \in W^i, s^i \in S^i} \sum_{i=1}^J \sum_{k=1}^{K^i} c_k \tau (w_k^i - s_k^i) ; \quad (10.1)$$

čia parametras c_k žymi energijos sąnaudas kiekviename k žingsnyje, τ žymi laiko žingsnių trukmę (valandomis), J yra prijungtų kaupiklių skaičius, o K_i yra kaupiklio i prisijungimo laiko žingsnių suma. Kintamieji w_k^i ir s_k^i yra pagalbinių vektorių w^i ir s^i elementai, kurių skirtumas parodo kiekvieno prijungto kaupiklio i įkrovimo / iškrovimo greitį x_k^i :

$$x_k^i = w_k^i - s_k^i ; \quad (10.2)$$

čia pagalbiniai vektoriai W^i ir S^i naudojami tik norint parodyti kiekvieno kaupiklio galios kintamuosius kiekviename žingsnyje kaip dviejų teigiamų vertinamų kintamųjų w_k^i ir s_k^i skirtumą. Šie pagalbiniai vektoriai yra W^i ir S^i aibėse, apibrėžtose tam tikromis ribomis.

Elektros energijos kaupiklis turi ribotą energijos suvartojimo ir atidavimo greitį, į kurį turi būti atsižvelgiama sprendžiant optimizavimo problemas. Jį galima išreikšti:

$$-p^i \leq x_k^i \leq p^i ; \quad (10.3)$$

čia p^i yra kaupiklio i vardinė kroviklio galia.

Taip pat yra sukuriami įkrovimo būsenų apribojimai soc_k^i . Tai daroma tam, kad nepakenktų baterijų būklei bei jų tarnavimo laikui. Taip pat šie apribojimai apibrėžia norimą baterijos įkrovos lygį tam

tikru paros momentu. Pavyzdžiui, kaupiklio savininkas nori, kad septintą valandą ryto kaupiklis būtų pilnai pakrautas. Tuomet valdymo centras bando rasti optimaliausią būdą kaip įkrauti kaupiklį iki nurodyto termino.

Kitas apribojimas reikalingas palaikyti įtampos lygį tam tikrose ribose. Jo ribas galima aprašyti:

$$v_{min} \leq v_k^n \leq v_{max} ; \quad (10.4)$$

čia v_k^n žymi įtampą tinklo mazge n, kuriame yra N mazgų. Jo praktinė reikšmė modelyje yra išlaikyti įtampą $\pm 10\%$ ribose nuo vardinės įtampos. Tai dar vienas savotiškas krovimo funkcijos apribojimas, nes krintant įtampai daugiau negu 10% , kaupiklis nebegali būt kraunamas iš tinklo, jis turi atsijungti nuo jo arba net atiduoti savo sukauptą galią, kad stabilizuotų įtampos kritimą.

Norint supaprastint kodą, išlaikant jo tikslumą reikia priimti dar kelias prielaidas. Pirmoji prielaida ta, kad aukštos įtampos energijos sistemų skaičiavimų modeliuose paprastai nepaisoma aktyviosios varžų dalies, nes reaktyvioji dalis yra daug didesnė. Žemos įtampos tinkle yra priešingai, aktyvioji linijų varžų dalis paprastai yra didesnė nei reaktyvioji dalis. Tad daroma prielaida, kad aktyvioji dalis yra daug didesnė už reaktyviąją dalį $R \gg X$ ir reaktyviosios varžos nepaisome.

Antrąją prielaidą siūloma nepaisyti reaktyvios galios Q ir vertinti tik aktyviąją P. Tai gali atrodyti netikslinga, tačiau manoma, kad reaktyvioji galia sudaro mažą dalį visos galios, nes už reaktyvios galios generaciją yra mokama brangiau, todėl elektros energijos vartotojai nėra suinteresuoti ją gaminti.

Galiausiai paskutinė prielaida yra ta, kad transformatoriaus mazgas modeliuojamas kaip fiksuotos įtampos šaltinis, jis nekinta ir visą laiką tiekia nominalią įtampą. Įvertinus šias prielaidas ir žinant grandinės varžos parametrus, transformatoriaus įtampą ir srovės šaltiniams priskirtas vertes, galima rasti kiekvieno mazgo apytikslę įtampą.

2.2. Uždavinio sprendimo metodai

Kaupiklio įkrovimo/iškrovimo optimizacinio modelio uždavinys aprašytas MATLAB terpėje. Pati MATLAB programa yra aukšto našumo programavimo kalba, kuri skirta techniniams skaičiavimams atlikti, joje duomenys išreiškiami matricių ir masyvų matematika. Kadangi MATLAB programa skirta aprašyti būtent inžinerinius ir mokslinius skaičiavimus ja paranku spręsti ir optimizavimo uždavinius. Šiame tinklo optimizavimo uždavinyje naudojami klasikiniai metodai, jame tinklo įtampos, varžos, galios ir kitos tinklo charakteristikos tampa linijinės optimizacinės problemos suvaržymai. Tada šie apribojimai modeliuojami taip, kad sprendinys būtų gautas taikant linijinio programavimo metodus.

Šiame darbe pasitelkiamas Niutono arba liestinių metodas, tai vienas iš klasikinių metodų lygčių sistemoms spręsti. Jo esmė ta, kad kairiosios lygčių sistemos pusės esančios funkcijos ištiesinamos taške X_i ir, išsprendus tiesinę lygčių sistemą, turėtasis taškas pakeičiamas tiesinės lygčių sistemos sprendiniu X_{i+1} . [27]. Niutono lygtis pagrindinė išraiška:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}; \quad (11.1)$$

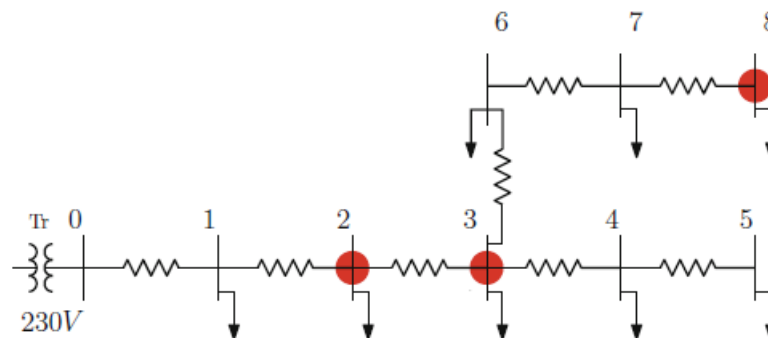
Jei skaičiavimo pabaigos sąlyga netenkinama tai x_n suteikiama x_{n+1} vertė ir skaičiuojama toliau, priešingu atveju atsakymas x_{n+1} .

Lygtys dažnai sprendžiamos šiuo metodu, nes jis sparčiai konverguoja. Didžiausias Niutono metodo trūkumas yra tas, kad reikia nurodyti pradinę vertę, artimą tiksliai vertei. Dėl šios priežasties Niutono metodas paprastai taikomas su kitais metodais, kurie susiaurini atsakymo intervalą.

Šiame darbe Niutono metodas yra taikomas kartu su vidinių baudų funkcijų metodu arba dar kitaip vadinamu barjerų metodu. Baudos metodas gana plačiai vartojamas techniniams optimizavimo uždaviniams spręsti. Jis efektyvus tada, kai baudos funkcija natūraliai išplaukia iš techninio uždavinio formuluotės.

2.3. Pavyzdinė optimizacinio modelio schema

Pavyzdinis tinklo modelis parodytas 8 pav. Šis tinklas turi aštuonis mazgus, kiekvienas mazgas turi savitą apkrovos charakteristiką. Pradinė prielaida ta, kad trys kaupikliai prijungiami prie tinklo tam tikrą valandą ir jie gali turėti vienodą arba skirtingą įkrovimo laikotarpį. Kaupikliai pažymėti raudonais taškais 8 pav. Kaip jau buvo minėta transformatoriaus mazge įtampa yra fiksuota ir gali būti lygi 230 ar 400 V. Įkrovikliai gali būti įkraunami ne daugiau kaip 3 kW, o akumuliatorių vardinė galia yra 20 kWh. Šie parametrai gali būti keičiami priklausomai nuo tinklo konfigūracijos, bei baterijų tipo. Taip pat siekiant sumažinti poveikį akumuliatorių gyvavimo trukmei galima jų pilnai nepakrauti, o nustatyti optimalią 80 % ar 90 % įkrovimą.



8 pav. Modelio radialinis tinklas [31]

Kai elektros energijos kaupikliai jungiami į tinklą, be jokio įkrovimo valdymo būdo, įkrovikliai naudoja maksimalų įkrovimo greitį, kad kuo greičiau būtų pakrauti kaupikliai. Kai jie visiškai pakraunami, įkrovikliai nutraukia energijos tiekimą. Tokiu atveju akumuliatoriai yra visiškai pakraunami per maksimaliai trumpiausią laiką, bet dažnu atveju toks krovimo būdas tampa brangiausias, nes tai vyksta energijos piko valandomis, kai elektros kaina yra pati didžiausia.

Pavyzdžiui jeigu elektros energijos tarifas būtų 1 EUR/kWh, tai pakrauti tris kaupiklius po 20 kW kainuotų 60 EUR. Tai proporcinga bendram energijos kiekiui, kurio reikia akumulatoriams įkrauti 60 kWh.

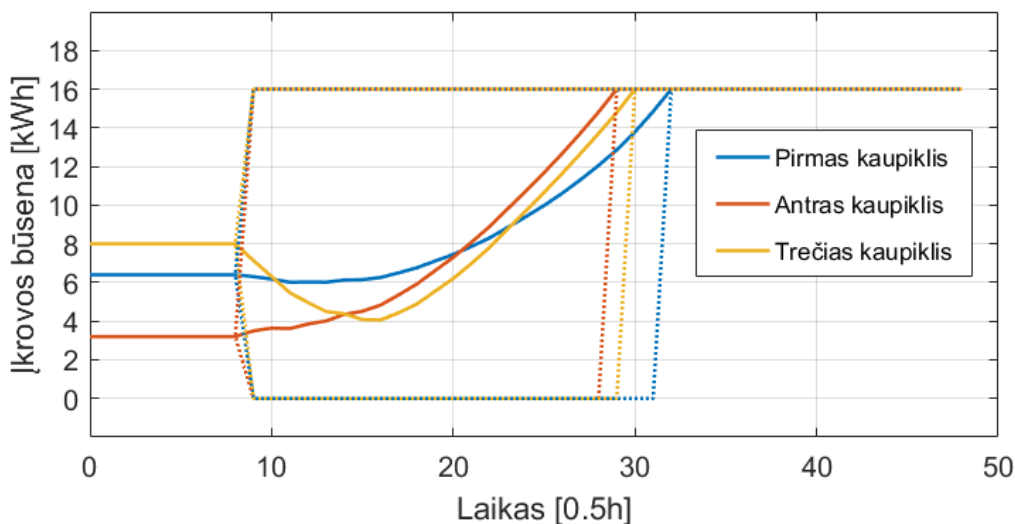
Jeigu būtų taikomas kaupiklių apkrovos valdymo metodas, tuomet vartojimas perskirstomas per visą įkrovimo laikotarpį. Įdomu tai, kad tinkamai sukonfigūravus optimizacinį uždavinį, elektros energijos suvartojimas gali didėti tik mažos paklausos valandomis. Tada kaupikliai turimą galią atiduota per apkrovos piką, taip kompensuodamos galios trūkumą ir šiek tiek pakeldamos įtampos lygį.

Dviejų tarifų scenarijuje, elektros energijos kaina yra 1 EUR / kWh nuo 22 iki 06 h, o 1,5 EUR/kWh likusiu laiku. Neoptimaliu atveju (kai kaupikliai jungiami į tinklą be jokio įkrovimo valdymo būdo) suvartojimas dažniausiai sukoncentruojamas didžiausios kainos laikotarpiu, taigi visų kaupiklių pakrovimo kaina, be valdymo, yra 90 EUR. Tai proporcinga bendram energijos kiekiui, kurio reikia akumulatoriams įkrauti 60 kWh ($1,5 \text{ EUR/kWh} \times 60 \text{ kWh} = 90 \text{ EUR}$). Taikant apkrovos valdymo metodą, vartojimas taip pat paskirstomas per visą įkrovimo laikotarpį. Dabar kaupikliai stengiasi parduoti kuo daugiau savo pradinės energijos, brangiausios energijos valandomis, kad sumažintų baterijų įkrovimo išlaidas. Pasibaigus brangioms piko valandoms, kaupikliai būna visiškai iškrauti, tada jie visiškai pakraunami kai elektros kaina būna maža. Taip pat taikant šį valdymo būdą, kiekvieno mazgo įtampos išlaikomos norimose ribose.

Kai taikomas apkrovos valdymo metodas kaupiklių įkrovimo kaina gali tapti neigiama, savininkui kaupikliai pradeda nešti pelną. Pavyzdžiui, jeigu pradiniu momentu baterijos būna pilnai pakrautos, tai jos piko metu atiduos visą savo turimą energiją, tuomet jų atiduota energija į tinklą kainuos $1,5 \text{ EUR/kWh} \times 60 \text{ kWh} = 90 \text{ EUR}$. Čia daroma prielaida, kad supirkimo kaina lygi pirkimo kainai, realybėje žinoma supirkimo kaina bus mažesnė, tačiau norint supaprastinti pavyzdį priimama tokia prielaida. Tad išsikrovę kaupikliai pasikraus naktį, kai elektros energijos kaina yra 1 EUR/kWh ir pilnas įkrovimas kainuos 60 EUR. Taigi atėmus pelną, gautą pardavus iš pradžių sukauptą energiją gaunama 30 EUR grąža.

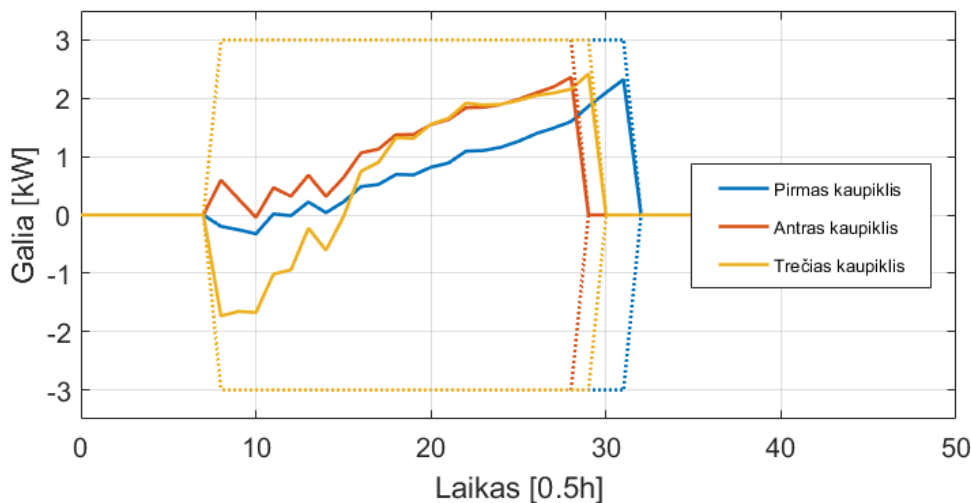
2.4. Rezultatų atvaizdavimas

Modelio rezultatai išvedami į darbo sritį skaitine išraiška, o iš jų yra nubraižomi grafikai. Pavyzdiniai grafikai atvaizduoti 9,10 ir 11 pav. Juose matome kaip keičiasi kaupiklių įkrovos būseną, į tinklą paduodama galia ir įtampos vertė keičiantis laikui. Šių grafikų modelio tinklas parodytas 8 pav., priimame, kad kaupikliai yra prijungiami vienu metu, bet atjungiami skirtingu laikotarpiu. Taip pat kaupikliai yra skirtingai įkrauti, pirmas kaupiklis 40 %, antras 20 % ir trečias 50 % savo nominalios galios. Kaupikliai pagal užduotas sąlygas gali būti kraunami ne daugiau kaip 3 kW, o jų vardinė galia yra 20 kWh. Nepaisant to, jie įkraunami tik 80 % talpos (16 kWh), taip siekiama sumažinti poveikį kaupiklių gyvavimo trukmei.



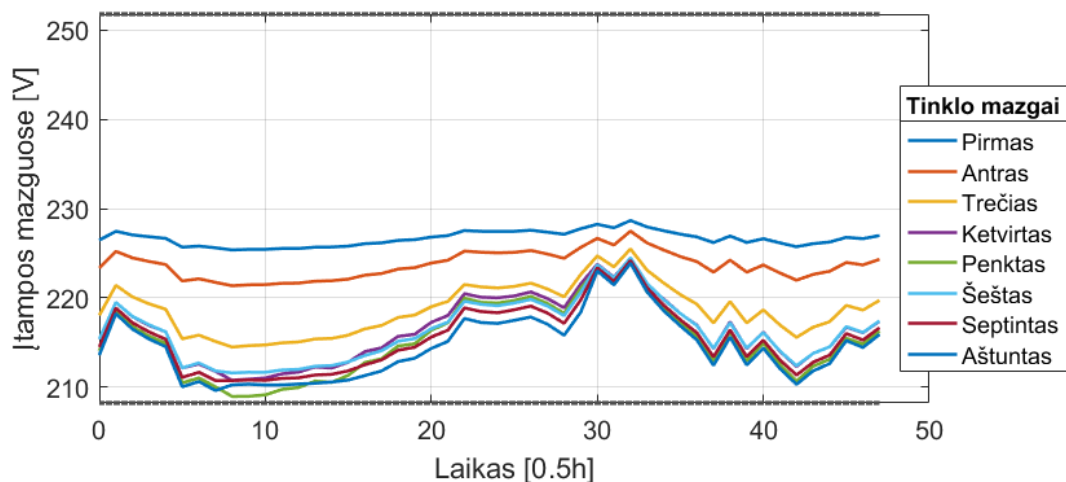
9 pav. Kaupiklių įkrovos būsenų profiliai

Viršuje esančiame paveiksle punktyrine linija pažymėta viršutinės ir apatinės ribos, viršutinės ribos peržengti negalima, tai yra vienas iš optimizacinio modelio barjerų, o apatinės ribos peržengti realybėje fiziškai neįmanoma. 10 pav. grafikas atvaizduoja kaupiklius su valdymo funkcija. Matome, kad trečias ir pirmas kaupiklis atiduoda savo galią į tinklą taip išlaikydamas norimas įtampos ribas. Kai elektros energijos vartojimo pikas nuslūgsta kaupikliai pradeda krauti. Svarbu pastebėti, kad kaupikliai būna pilnai pakrauti iki norimo atjungimo laikotarpio.



10 pav. Kaupiklių galios profiliai

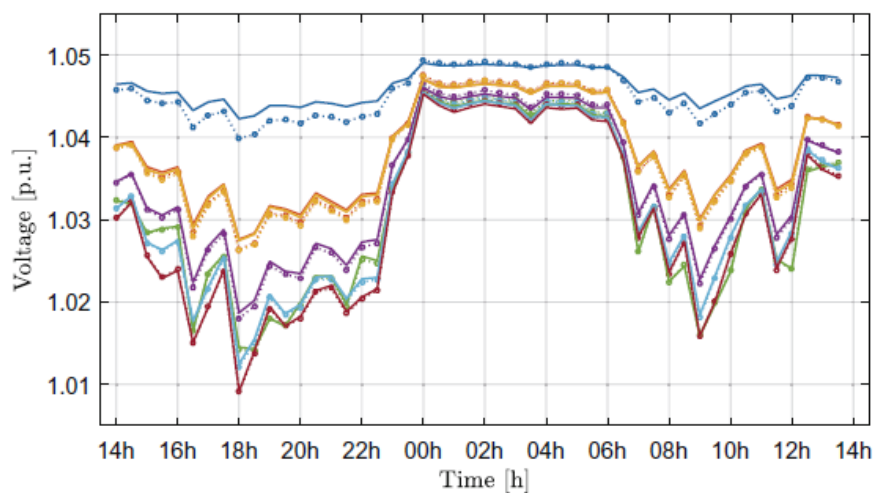
Punktyrine linija taip pat pažymėtos viršutinės ir apatinės ribos, jas apsprendžia kroviklio tipas. Šis modelio kroviklis gali įkrauti ar iškrauti ne daugiau kaip 3 kW. Galima pastebėti, kad kaupikliai tai įkraunami, tai iškraunami, taip yra dėl to, kad bandoma kompensuoti galios trūkumą tinkle.



11 pav. Įtampos lygis tinklo mazguose

11 pav. pavaizduotos įtampos vertės tinklo mazguose, matome, kad nė apatinės, nė viršutinės ribos nebuvo peržengtos. Prie apatinės ribos buvo priartėta, tačiau kaupiklių atiduota galia šiek tiek stabilizavo įtampą ir apatinė 207 V riba nebuvo peržengta.

Šis optimizacinis linijinis modelis buvo palygintas su OpenDSS programiniu paketu. Buvo paimtas žemos įtampos skirstomasis tinklas, kuris atitinka tipišką Europos skirstomojo tinklo sistemos topologiją. Ši tinklo struktūra buvo pasiūlyta elektros ir elektronikos inžinierių instituto IEEE (angl. *institute of electrical an electronics engineers – IEEE*). Tai didžiausia techninė ir profesinė organizacija pasaulyje. Gauti rezultatai parodė, kad šis linijinis modelis sukuria nedideles paklaidas, o mažo apkrovimo valandomis jos siekia tik kelis procentus. Paklaidų vertes iliustruoja 12 pav. grafikas.



12 pav. Septynių tinklų dienos profilių palyginimas naudojant OpenDSS ir linijinį modelį

12 paveiksle ištisine linija žymimi duomenys gauti su OpenDSS, o punktyrine linija žymimi duomenys gauti MATLAB programa pritaikius linijinį modelį.

2.5. Reali optimizacinio modelio schema

Modeliavimo schemai pasirinkta šiaurinė Vilniaus dalis pietvakariniame Gulbino ežero krante, ten įsikūrę Didieji Gulbinai. Ši vieta pasirinkta neatsitiktinai, o dėl to, kad tai yra palyginti nauja besikurianti gyvenvietė, kurioje yra viena iš realiausių galimybių įrengti HRES sistemą. Taip yra dėl to, kad ši gyvenvietė yra arti Vilniaus, o Vilniuje statistiškai didžiausi atlyginimai šiuo metu, kas suteikia daugiau vilčių žaliosios energetikos plėtrai bei HRES įrengimui, nes tam reikia pakankamai didelių pradinių investicijų. Kita priežastis, dėl ko pasirinkta ši vietovė, tai gana didelis saulės spinduliuotės intensyvumas, o kuo jis didesnis, tuo daugiau elektros energijos galima pagaminti ir tuo naudingesnė bus HRES sistema.

Realii 0,4 kV skirstomojo tinklo dalis pavaizduotas 13 pav. Duomenys paimti iš GIS (geografinė informacinė sistema) sistemos, kuria naudojasi AB „Energijos skirstymo operatorius“ (trumpiau – ESO).

Kadangi rajonas palyginti naujas, jis nėra visiškai apgyvendintas, todėl ne visose pavaizduotose komercinės apskaitos spintos (KS arba KAS) yra elektros energijos apskaitos prietaisai. Tai reiškia, kad kai kuriuose sklypuose nėra gyventojų bei apkrovos, nors KS ir yra pastatyta.



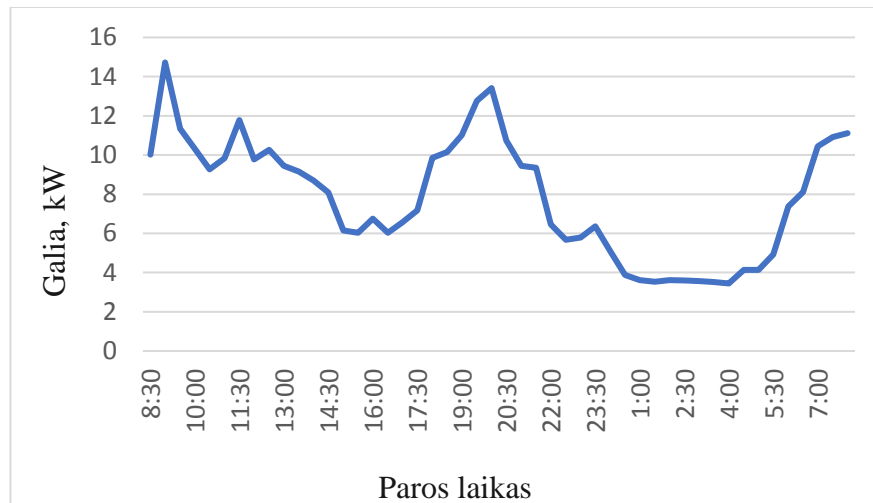
13 pav. Vr-290 tinklas

Nagrinėjama bus viena transformatorinės Vr-290 linija L-KS28063. Šios linijos kabelio charakteristikos pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. AXMK kabelio parametrai

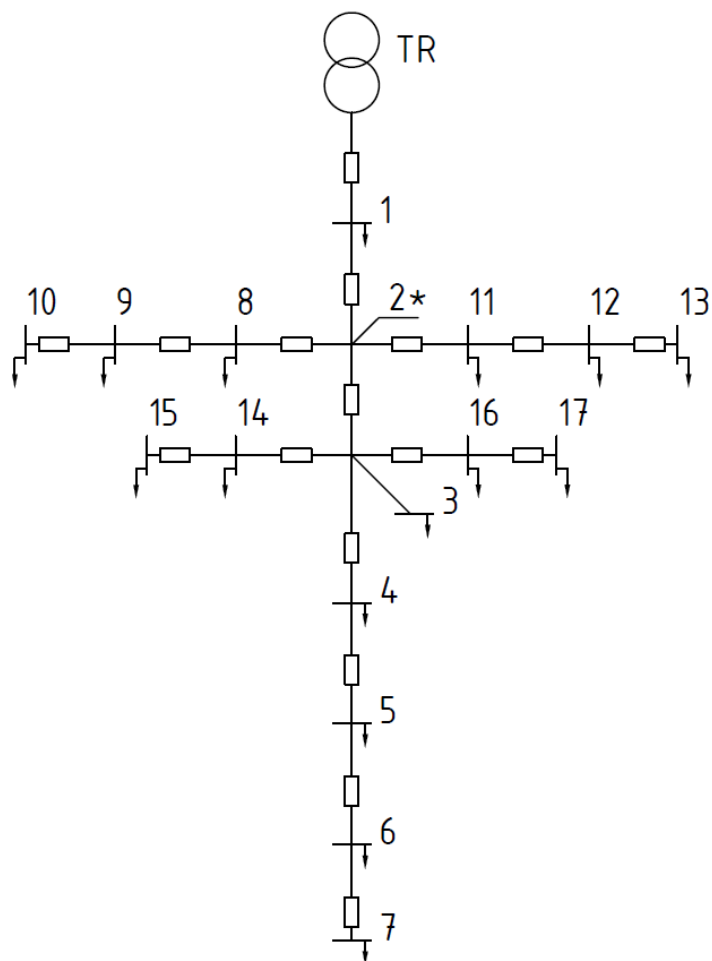
Kabelio tipas	AXMK
Laidininkas	Sutankintas aliumininis
Gyslų skaičius	4
Skerspjūvis	120 mm ²
Varža	0,31 Ω/km
Bendras ilgis	1250 m
Eksplotacijos pradžia	2017 06 16

Norint sumodeliuoti schemą pavaizduotą 13 pav. reikės linijos L–KS28063 apkrovos grafiko. Apkrovos grafikas parodys koku metu ir kiek galios vartoja gyventojai, o tai padės parinkti elektros energijos kaupimo prietaisus bei saulės elektrines. Šis grafikas pateiktas žemiau.



14 pav. Vartotojų paros apkrovos grafikas

Apkrovos duomenys paimti iš skirstomojo tinklo operatoriaus naudojantis programa „EMCOS“. Ši programa yra automatizuota komercinės energijos apskaitos informacinė matavimo sistema, skirta operatyvaus duomenų surinkimui iš elektros prietaisų. Pagal ESO duomenis, vartotojų prijungtų prie L–KS28063 linijos yra 23, kadangi kai kurios komercinės apskaitos spintos laisvos t.y. be apkrovos, tad 13 pav. pavaizduota schema persibraizo ir gaunasi tokia:



15 pav. Vr-290 L–KS28063 perbraižytas tinklas

Čia skaičiais pažymėti taškai, kuriuose yra apkrova, vienam taške gali būti keli gyventojai, bet tokiu atveju elektros energija bus tiekama iš vienos KS spintos. Simboliu 2* žymima linijų sankirta, kurioje yra KS-27726, joje nėra prijungtų vartotojų, todėl schemoje ji pažymėta tašku su žvaigždute. Stačiakampiais žymimos linijų varžos, jos pateiktos 2 lentelėje kartu su kitais linijų parametrais.

2 lentelė. Linijos L–KS28063 parametrai

Schemos dalis		Ilgis, km	Varža, Ω/km	Laidis, S
Nuo	Iki			
VR-290	1	0,075	0,023	43,011
1	2*	0,075	0,023	43,011
2*	3	0,156	0,048	20,678
3	4	0,076	0,024	42,445
4	5	0,084	0,026	38,402
5	6	0,024	0,007	134,409
6	7	0,106	0,033	30,432
2*	8	0,132	0,041	24,438
8	9	0,09	0,028	35,842
9	10	0,02	0,006	161,290
2*	11	0,088	0,027	36,657
11	12	0,013	0,004	248,139
12	13	0,027	0,008	119,474
3	14	0,123	0,038	26,226
14	15	0,05	0,016	64,516
3	16	0,095	0,029	33,956
16	17	0,016	0,005	201,613

2.6. Baterijų parinkimas

Pasak programos „EMCOS“ duomenų, klientai vidutiniškai suvartoja 320 kWh per mėnesį. Tai maždaug apie 10~11 kWh per parą. Pagal šiuos duomenis galima parinkti elektros energijos kaupimo prietaisus bei saulės elektrines.

Galios tankis (W/kg) ir energijos tankis (Wh/kg) yra dvi pagrindinės charakteristikos apibūdinančios elektros energijos saugyklų technologijas. Galios tankis yra galios kiekis tūrio ar masės vienetui. Jis parodo kaip greitai energija gali būti atiduodama, o energijos tankis yra energija sukaupta tūrio vienetui ar masei. Palyginimui, akumulatoriai turi didesnę energijos tankį nei kondensatoriai, tačiau kondensatorių galios tankis yra didesnis nei akumuliatorių. Šis skirtumas atsiranda dėl to, kad akumulatoriai gali kaupti daugiau energijos, tačiau kondensatoriai gali greičiau atiduoti energiją. Deja nei viena iš esamų saugojimo technologijų negali patenkinti galios ir energijos tankio tuo pačiu metu.

Energijos kaupikliai pasižymintys mažu galios tankiu, tačiau dideliu energijos tankiu, pavyzdžiui baterijos ir kuro elementais sukelia galios valdymo iššūkius, nes dinamiškas šių technologijų atsakas yra lėtas. Ir priešingai, tokios technologijos kaip superkondensatoriai gali patenkinti didelį energijos poreikį, todėl sutrumpėja saugojimo sistemos eksploatavimo laikas [1]. Kaip matome universalios elektros energijos kaupimo sistemos nėra, tačiau įvertinus pasirinktą vietą patogiausia būtų naudoti baterijas dėl kelių priežasčių. Pirma, baterijos yra laikomos vienu iš veiksmingiausių būdų elektros tinklams stabilizuoti. Antra jos yra patrauklios, nes yra gan ekonomiškos, kompaktiškos ir lengvai diegiamos.

Baterijų tipų yra įvairių, tai priklauso nuo medžiagų iš kurių yra gaminamos baterijos. Apačioje pateikti baterijų tipai, kainos bei kitos charakteristikos palyginimui.

3 lentelė. Elektros energijos kaupiklių kapitalo sąnaudos bei techninės charakteristikos [15,32]

Baterijų tipas	Kapitalo sąnaudos, \$/kWh	Energijos tankis, Wh/kg	Ciklo efektyvumas, %	Gyvenimo trukmė ciklais
Ličio jonų	100–2500	100–300	85–98	500–10 ⁴
NiCd	800–1500	10–80	60–90	300–10 ⁴
NaS	300–500	100–250	70–85	2500–4000
Švino rūgšties	200–400	30–45	65–80	250–1500

Galima pastebėti, kad ličio jonų baterijos yra santykinai brangiausios, lyginant su mums įprastomis švino rūgšties baterijomis jų kaina gali būti net 10 kartų didesnė. Taip yra ne be priežasties, o dėl to, kad jos turi didžiausią energijos tankį, geriausią ciklo efektyvumą bei yra ilgaamžiškiausios, todėl skaičiavimuose jos ir bus naudojamos.

2.7. Saulės elektrinės parinkimas

Hibridinėse atsinaujinančios energijos sistemose dažniausiai būna vieno tipo atsinaujinančio energijos šaltinio elektrinė, tokia kaip saulės, vėjo, o retesniais atvejais hidroelektrinė. Modeliuojant nuosavų namų kvartalo HRES hidroelektrinės atkrenta, jeigu šalia nėra tekančios upės. Mažosios vėjo elektrinės dar nėra taip gerai išstobulintos, kad jų efektyvumas prilygtų saulės jėgainėms, o ir jų įrengimas yra sudėtingesnis. Taip pat vėjo elektrinės gali skleisti nepageidaujamą triukšmą, o kaimynystėje gyvenantiems žmonėms tai trukdytų. Tad optimaliausias variantas yra saulės elektrinės, kurios yra gana populiarios bei joms gali būti teikiama valstybės parama. Šiuo metu paramos dydis yra 323 EUR už 1kW instaliuotos galios. Parama teikiama elektrinėms iki 10 kW, tad maksimali paramos suma gali siekti 3230 EUR.

Pasak Lietuvos energetikos ministro įsakymo atsinaujinančių išteklių energiją naudojančių technologijų minimalūs techniniai reikalavimai yra toki:

- saulės moduliai turi atitikti Europos Sąjungos standartus įskaitant ekologinius ženklus, energijos duomenų etiketes ir kitas Europos Sąjungos standartizacijos įstaigų nustatytas techninių normatyvų sistemas, jiems turi būti suteikta 10 m. produkto garantija ir 25 m. 80 proc. efektyvumo garantija. Moduliai privalo turėti CE ženklą ir turėti pakankamą apsaugą nuo dulkių ir drėgmės (bent IP 65);
- įtampos keitiklis (toliau - inverteris) turi būti tinkamas saulės elektrinių įrengimui ir atitikti Europos Sąjungos standartus įskaitant ekologinius ženklus, energijos duomenų etiketes ir kitas Europos Sąjungos standartizacijos įstaigų nustatytas techninių normatyvų sistemas, jam turi būti suteikta 5 m. produkto garantija. Įtampos keitiklis turi turėti pakankamą apsaugą nuo dulkių ir drėgmės (bent IP 65).
- Atsinaujinančių išteklių energiją naudojanči technologija (toliau taip pat vadinama įranga arba elektrine) turi būti nauja (nenaudota), atitikti įprastai tokiai įrangai taikomas normas ir standartus. APVA pareikalavus, Fizinis asmuo privalo pateikti įrangos atitikties sertifikatus [33].

Tad saulės elektrinės turi būti naujos ir efektyvios, bei jų tarnavimo laikas ne trumpesnis negu 10 metų. Šie reikalavimai yra palankūs HRES sistemoms, nes jų atsipirkimo laikotarpis gana ilgas, o esant didesniam elektrinės efektyvumui jis trumpėja.

Patys saulės moduliai nėra itin brangūs, jie gali kainuoti ir keli šimtai už 1 kW, tačiau perkant saulės elektrinę į kainą įeina ne tik saulės moduliai. Standartinė saulės elektrinės sudedamosios dalys yra:

- Saulės moduliai
- Inverteris
- Saulės modulių tvirtinimo konstrukcija
- Laidai saulės elektrinėms bei įžeminimui
- Virštampio ribotuvas
- Elektros skydelis su automatiniais jungikliais ir kitais reikiama komutaciniais aparatais
- Įrengimo darbai

Todėl saulės elektrinės kaina išauga. Skaičiuojama, kad saulės elektrinės kaina su įrengimo darbais svyruoja nuo 800 iki 1100 už 1 kW.

Deja saulės moduliai Lietuvoje niekada nepasiekia nominalios galios, kuri nurodyta saulės modulio specifikacijoje. Taip yra dėl to, kad saulės spinduliuotė Lietuvoje saulėtą dieną yra apie 20% mažiau už tą spinduliuotę, kuri skleidžiama laboratorijoje testuojant saulės modulius. Kita priežastis yra saulės modulių temperatūra, kuri karšta dieną gali siekti apie 70 °C, dėl to sumažėja saulės elektrinės gaminama galia apie 10 %. Tad renkantis saulės elektrines reikia atsižvelgti į šiuos nuostolius. O saulės elektrinės pagaminta elektros energija gali būti apskaičiuojama [34]:

$$E = A \cdot r \cdot H \cdot PR ; \quad (17.1)$$

čia A – bendras saulės panelių plotas; r – saulės panelės efektyvumas; H – vidutinė metinė saulės spinduliuotė; PR – nuostoliai.

Bendras saulės panelių plotas priklauso nuo jų efektyvumo ir norimos įsirengti galios. Vidutiniškai skaičiuojama, kad 1 kW galios reikia maždaug 6 m² ploto. Saulės panelių efektyvumas pateikiamas jų techninėje specifikacijoje. Pavyzdžiui saulės panelės MSE300SQ5K efektyvumas siekia 18 % [35].

Vidutinė metinė saulės spinduliuotė Lietuvoje svyruoja nuo 900 iki 1200 kWh/m². Pagal Europos Komisijos fotovoltinę geografinę sistemą Didžiuosiuose Gulbinuose metinė spinduliuotė yra 1150 kWh/m² [36]. O gaminant elektros energiją saulės elektrinėse nuostoliai susidaro dėl inverterio nuostolių, taip pat dėl temperatūros, laidų varžos, šešėlių, dulkių ir pan. Skaičiavimuose įprasta priimti, kad nuostoliai vidutiniškai siekia 15 %.

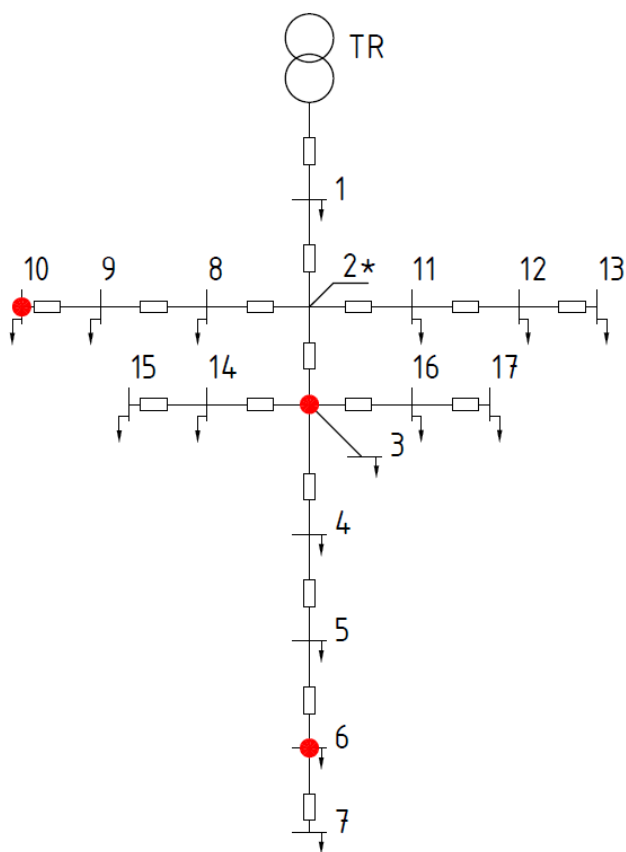
Pagal programos „EMCOS“ duomenis vartotojai per metus vidutiniškai sunaudoja 3900 kWh. Pagal tokį energijos vartojimą rekomenduojama 4 kW saulės elektrinė. Tačiau modeliuojant HRES sistemą bus parenkamos kelių skirtingų galių elektrinės, bet to pačio MSE300SQ5K modelio. Taip daroma dėl to, kad būtų optimizuojama sistemos sudėtis ir galia esant skirtingoms sąlygoms.

2.8. Modeliavimas

Kaip ir buvo minėta anksčiau modelis bus sudarytas naudojantis „MATLAB“ programa. Norint programoje aprašyti transformatorinės VR-290 linijos L–KS28063 schemą reikės šios linijos techninių parametrų, apkrovų grafikų bei kaupiklių galios ir jų vietos tinkle.

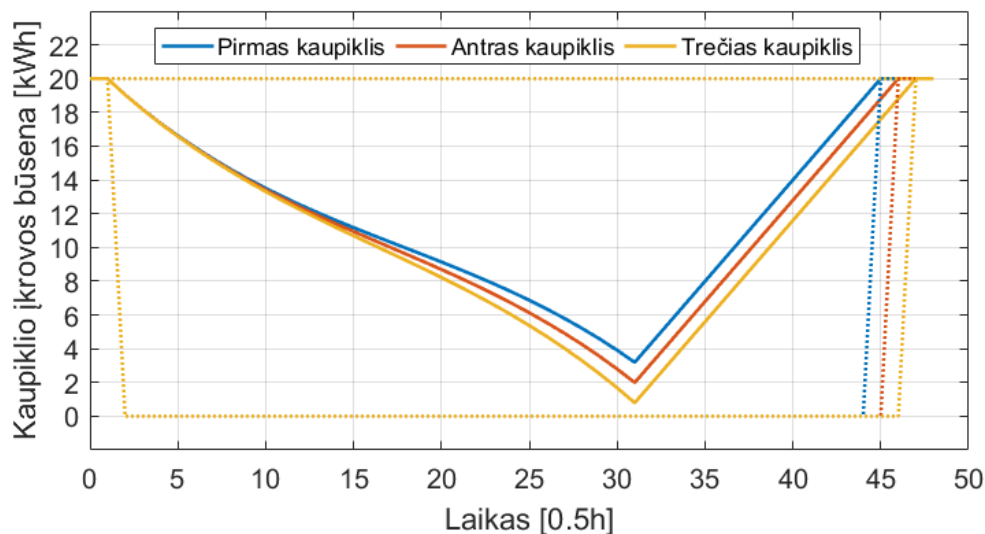
Kaupiklių galia parenkama pagal vartotojų sunaudotą elektros energiją. Kadangi jie per parą sunaudoja apie 10 ~11 kWh, tad kaupiklio galia parenkama 20 kWh. Avarijos metu, nutrūkus energijos tiekimui, šio elektros energijos kaupiklio pakaks dviem paroms, o per šį laiką ESO turi atstatyti įprastą elektros energijos tiekimą.

HRES sistemų skaičius ir jų pastatymo vietos parenkamos atsitiktinai. Pastatomos trys sistemos 3, 6, 10 tinklo taškuose, jos schemoje žymimos raudonais taškais.



16 pav. Modelio tinklas su pažymėtomis HRES sistemomis

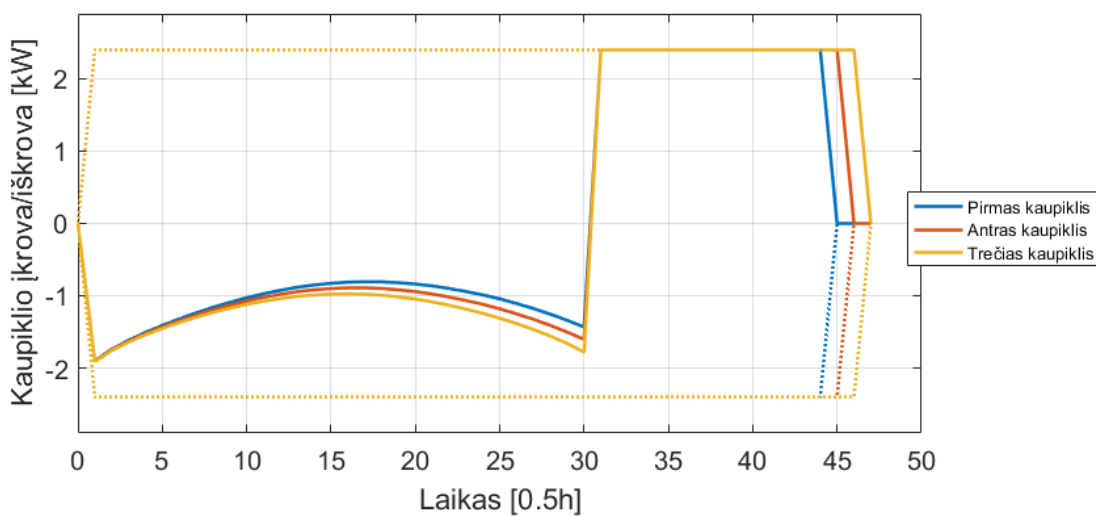
Tad bendrai sistemos maksimaliai gali sukaupti 60 kWh elektros energijos. Žinoma sistemos kaupiklių galią galima keisti atsižvelgiant į elektros energijos poreikį, įtampos svyravimus, elektros energijos kainą bei kitus parametrus. Pati modelio programa optimizuoja kaupiklio įkrovos bei iškrovos sąnaudas, tad prie tinklo prijungti kaupikliai krausis kai elektros energija pigi, o išsikraus kai ji brangi. Šiuo atveju saulės elektrinės tiekia elektros energiją gyventojui, o perteklinę energiją atiduos į tinklą pasaugojimui arba parduos. Kaupikliai tuo metu krausis elektros energija tiekiamą iš tinklo. Žemiau pateikiami grafikai, kurie iliustruoja kaupiklių, bei linijos charakteristikas šiomis sąlygomis.



17 pav. Kaupiklių būsenos paros grafikas

Kaupikliai prie tinklo prijungiami tuo pačiu metu, 9:00 valandą ryto, o atjungiami skirtingu metu, 6:00, 6:30 ir 7:00 valandą ryto. Visų kaupiklių talpos yra 20 kWh, pradiniu momentu jie yra pilnai pakrauti, o atjungimo metu jie turi būti pilnai įkrauti.

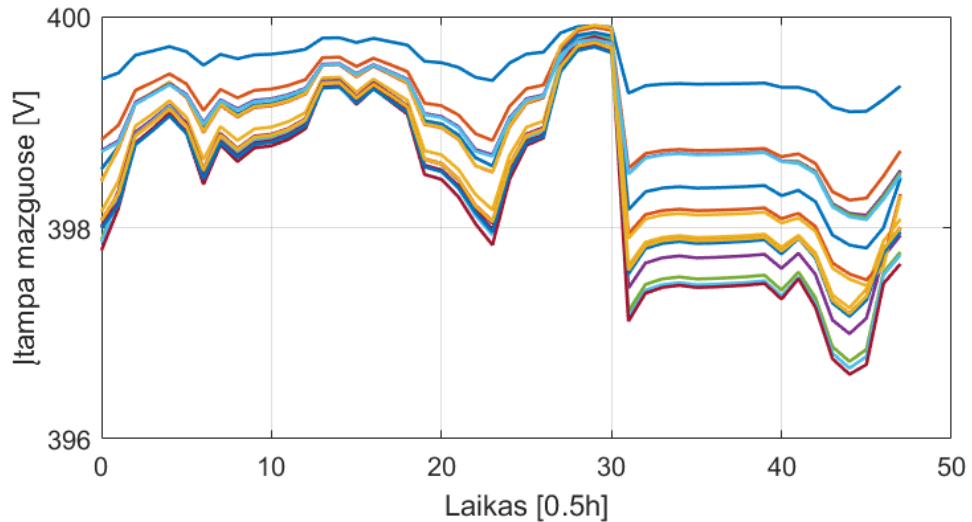
Tad 17 pav. matome kaupiklių paros būsenos grafiką, čia 1 laiko žyma atitinka 9:00 valandą ryto. Kaupikliai pradeda atiduoti savo sukauptą energiją tuo pačiu metu, kada jie yra prijungiami prie tinklo. Tuo metu elektros energijos kaina yra sąlyginai brangi (0,168 EUR/kWh), o kai elektros energija tampa pigi (17 pav. 32 laiko žyma) jie pradeda įsikrauti, kad nurodytu laiku jie būtų pilnai pakrauti. Tad pagal elektros energijos kainą, bei atjungimo laiką ir galutinės įkrovos būseną jie prognozuoja savo įkrovimą/iškrovimą.



18 pav. Kaupiklių įkrovos ir iškrovos spartos grafikas

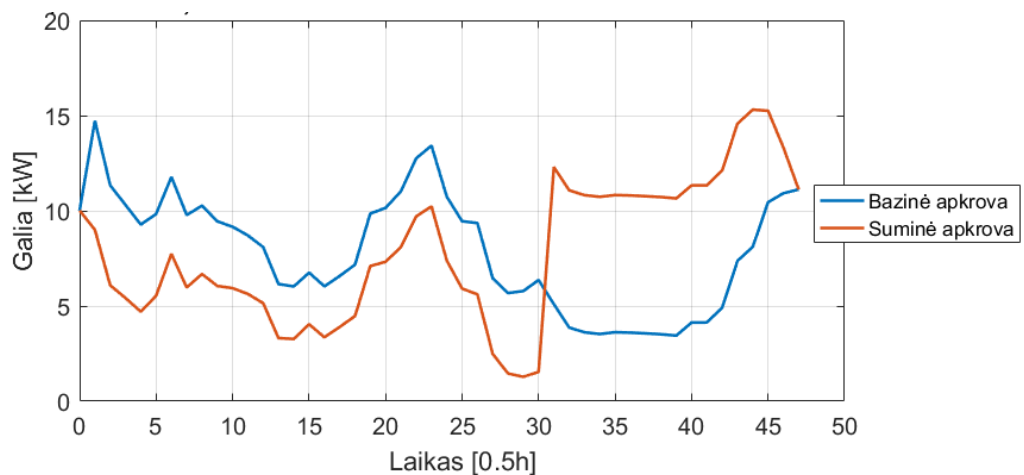
18 pav. galima matyti kokia sparta kaupikliai tiekia savo sukauptą energiją į tinklą, tai priklauso nuo apkrovos, įtampos tinkle, kaupiklio techninių parametrų. Kuo apkrova didesnė, tuo greičiau

kaupikliai atiduoda savo galią, tačiau atiduodami į tinklą savo sukauptą energiją jie neturi pakelti įtampos tinkle daugiau negu 10 %. Žinoma bendra kaupiklių talpa sudaro tik 60 kWh ir jie didelės reikšmės tinklo stabilumui nedaro, bet jei jų talpa būtų keliolika kartų didesnė, tuomet šie apribojimai taptų svarbūs. Taip pat jie negali viršinti savo maksimalios 2,4 kW iškrovos ir įkrovos galios, nes juos apriboja valdiklio modelis bei baterijų technologija.



19 pav. Linijos L–KS28063 mazgų įtampos

19 pav. matome įtampą mazguose, kadangi modeliuojamas tinklas nėra ilgas, o ir gyventojų apkrovos nėra didelės, tad ir įtampos svyravimai yra maži. Galima matyti, kad nuo 32 laiko žymos įtampa tinkle krenta, taip yra dėl to, kad kaupikliai pradeda krautis.



20 pav. Linijos L–KS28063 apkrovos

20 pav. matome suminę ir bazinę apkrovą. Bazinė apkrova yra tik gyventojų apkrova, o suminė yra jau bendra apkrova su kaupiklių patiekta arba įsisavinta galia. Iš šio grafiko galima matyti, kad atiduodami savo energiją kaupikliai sumažina viso tinklo apkrovą, o nakties metu, kada jie kraunasi padidina ją.

Šis modelis parodo kaip kaupikliai gali reguliuoti įtampos svyravimus tinkle, bei užtikrinti galios rezervą reikiamu metu realiomis sąlygomis. Tačiau realybėje HRES sistemų yra nedaug ir ne todėl kad jos nenaudingos, bet, todėl, kad yra pakankamai brangios, o ir elektros energija negali būti taip paprastai parduota. Tad toliau bus nagrinėjami keli atvejai, kurie parodys kaupiklių finansinę naudą realiomis sąlygomis, bei sąlygas, kurioms esant jie atsiperka.

3. Hibridinės sistemos optimizacinio modelio rezultatai ir ekonominė analizė

3.1. Elektros kaina ir gamintojų sąlygos

Prieš skaičiuojant projekto ekonominę naudą reikia išsamiau pakalbėti apie elektros energijos kainas, kurios itin svarbios projekto atsiperkamumui. Pati elektros energijos kaina yra sudėtinė, ją sudaro įsigijimo, perdavimo, skirstymo, viešuosius interesus atitinkančių paslaugų (VIAP), sisteminių paslaugų ir visuomeninio tiekimo kainos. Įsigijimo kaina nėra reguliuojama, ji priklauso nuo rinkos kainos. Kitas kainos dedamąsias reguliuoja valstybinė energetikos reguliavimo taryba – VERT. Būtent ši organizacija ir nustato elektros energijos kainą vartotojams.

Gyventojai, vartojantys elektros energiją, gali atsiskaityti už ją pagal kelis tarifus. Pasak didžiausio elektros ir dujų tiekėjo Lietuvoje UAB „Ignitis“, populiariausias elektros tarifo planas yra „standartinis“. Šiame plane dar galimi vienos arba dviejų laiko zonos tarifai, kur dviejų laikų zona tarifas sudarytas iš dieninės energijos dedamosios ir naktinės. Standartinio plano elektros energijos kainos pateikiamos žemiau lentelėje.

4 lentelė. Populiariausio plano kainos Lietuvoje

Vienos laiko zonos tarifas	0,149 EUR/kWh	
Dviejų laiko zonos tarifas	Dieninė energijos dedamoji	Naktinė, šeštadienio ir sekmadienio energijos dedamoji
	0,168 EUR/kWh	0,107 EUR/kWh

Jeigu gyventojai įsirengia savo elektrinę ir gaminasi energiją patys, o nesuvargotą elektros dalį tiekia į tinklą, tai jie vadinami gaminančiais vartotojais. Toki gamintojai už atgautą elektros energiją moka pagal pasirinktą atsiskaitymo būdą, jų yra keturi, bet populiariausi yra šie:

5 lentelė. Gaminančių vartotojų atsiskaitymo kainos ir būdai [37]

ATSISKAITYMO BŪDAS	MOKAMA UŽ	KAINA ŽEMOJOJE ĮTAMPOJE SU PVM
Atsiskaitymas už atgautą energiją	Už patiektos į tinklą ir vėliau atgautos elektros energijos kilovatvalandę (kWh)	0,05203 Eur/kWh
Atsiskaitymas už elektrinės instaliuotą galią	Už instaliuotą elektrinės generuojamos galios kilovatą (kW)	2,6378 Eur/kW/mėn

Tad jei elektrinė per mėnesį pagamino 100 kWh, o gyventojas sunaudojo 60 kWh, tai už 60 kWh bus atsiskaitoma 5 lentelės kainomis. O perteklinis kiekis (40 kWh) perkeliamas į ateities mėnesius. Svarbu paminėti, kad čia elektros energijos apskaita vykdoma tik pagal vienos laiko zonos skaitiklių rodmenis, tad už trūkstamą elektros energiją gyventojas mokės 0,149 EUR/kWh.

Jeigu gyventojas įsirengia savo elektrinę ir gaminasi energiją pats, o nesuvargotą elektros dalį tiekia į tinklą, bei turi leidimą gaminti elektros energiją ir sudaro elektros supirkimo sutartį, tai jis vadinamas elektros gamintoju. Iki 2019 m. elektros energijos gamintojams, įsirengusiems saulės jėgaines, kurių galia iki 10 kW, perteklinės energijos supirkimo tarifas buvo 0,164 EUR/kWh. Atsižvelgiant į tai, kad Lietuvos Respublikos atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymo 13 straipsnio 3 dalyje

numatytos skatinimo kvotos yra išnaudotos, šiuo metu fiksuoti tarifai naujoms elektrinėms nebėra taikomi [38]. Taip bus kol vyriausybė parengs ir patvirtins tolesnės saulės elektrinių plėtros tvarkos aprašą. Šiuo metu gamintojams, kuriems nėra taikomos skatinimo priemonės (pvz.: fiksuotas tarifas), elektros energijos pardavimo kaina nėra reglamentuota. Energijos skirstymo operatorius iš tokių gamintojų elektros energiją perka rinkos sąlygomis. Taip pat elektros gamintojai gali sudaryti sutartis su nepriklausomais tiekėjais ir pagal sutartą tarifą parduoti elektros energiją. Tačiau bet koku atveju gamintojai turi pasirašyti elektros energijos persiuntimo sutartį su ESO ir mokėti už persiuntimo paslaugą pagal pasirinktą planą. Papildomai gamintojai pagal elektros energetikos įstatymą privalo atsiskaityti už viešuosius interesus atitinkančias paslaugas, kurios nėra įtrauktos į persiuntimo kainą. Šios paslaugos kaina 0,826 ct/kWh su PVM, o persiuntimo paslaugos I plano įkainiai pateikti apačioje 6 lentelėje.

6 lentelė. Persiuntimo paslaugos įkainiai

Vienos laiko zonos tarifas	Kaina su PVM
Galios dedamoji	1,15 EUR/kW/mėn.
Vienos laiko zonos energijos dedamoji	0,046 EUR/kWh

Tad jei gamintojas turi įsirengęs 100 kW elektrinę, jis atitinkamai mokės 115 EUR galios dedamosios mokesčių, bei už pagamintą ir patiektą energiją į tinklą po 0,046 EUR/ kWh kas mėnesį.

3.2. Ekonominė nauda

Vertinant investicinius projektus būtina atsižvelgti ne tik į prognozuojamus pinigų srautus, bet ir į jų perkamosios galios mažėjimą. Tam apskaičiuoti yra naudojama metodika, kuri paremta diskontavimu. Pačią diskonto normą būtų galima apibūdinti kaip savotišką palūkanų normą, kuri taikoma apskaičiuoti ateities pinigų srautų dabartinę vertę. Šiame darbe bus skaičiuojami keli dydžiai paremti minėta metodika, tai dabartinė grynoji vertė ir vidinė pelno norma. Bus skaičiuojamas ir projekto atsiperkamumas. Nors atsiperkamumas ir neparemtas diskontavimu, bet jis gana plačiai taikomas ir yra gan paprastas būdas pamatyti kaip greitai atsipirks projektas.

Dabartinė grynoji vertė (angl. *net present value* – NPV) tai viršpelnio, gauto per visą projekto gyvavimo laiką, dabartinės vertės matas. NPV akivaizdžiai keičiasi keičiantis diskonto normai, kuo ji aukštesnė, tuo mažesnė dabartinė grynoji vertė. Projektas laikomas priimtinas jei $NPV > 0$. Šis dydis apskaičiuojamas:

$$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{CF_t}{(1+i)^t} - I_0; \quad (20.1)$$

čia CF_t – pinigų srautas laiko momentu t ; i – diskonto norma; I_0 – pradinės investicijos.

Vidinė pelno norma (angl. *internal rate of return* – IRR) tai finansinis rodiklis, kurį galima apibūdinti kaip diskonto koeficiento reikšmę, prie kurios projekto grynoji dabartinė vertė bus lygi 0. Šis dydis parodo kokias diskonto normas esant projektas atsipirks. IRR apskaičiuojamas:

$$IRR = i_1 + \left((i_2 - i_1) \left(\frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \right); \quad (20.2)$$

čia i_1 – žemesnė diskonto norma; i_2 – aukštesnė diskonto norma; NPV_1 – grynoji dabartinė vertė prie žemesnės diskonto normos; NPV_2 – grynoji dabartinė vertė prie aukštesnės diskonto normos.

Atsipirkimo laikas tai laiko periodas per kurį atsiperka pirminės investicijos. Kuo šis laiko periodas trumpesnis, tuo projekto likvidumas didesnis ir projektas priimtinesnis. Tai vienas iš paprasčiausių, bet tuo pačiu metu ir plačiausiai taikomų metodų projekto vertei nustatyti. Atsiperkamumas apskaičiuojamas:

$$T_s = \frac{I}{P}; \quad (20.3)$$

čia I – investicijos; P – pajamos.

Tad investiciniai projektai bus vertinami naudojant šiuos finansinės analizės metodus.

3.3. Modeliuojamos sistemos atvejai

Kaip buvo minėta modeliavimo dalyje kaupiklių patiektos energijos niekas nesuperka, bet jos naudą galima apskaičiuoti ir kitaip. Bus aptariami trys atvejai, du iš jų realiomis sąlygomis, o trečiasis fiktyvus. Bus žiūrima kaip kaupikliai ir visa HRES sistema atsiperka ir kokią naudą ji gali suteikti.

Tad pirmasis atvejis – gaminantis vartotojas. Čia kaupikliai krausis dieną, kai elektros energiją pagamina saulės elektrinės, o naktį jie savo sukauptą galią atiduoda klientui. Saulės elektrinė tuo tarpu tenkina vartotojo poreikius dienos metu.

Antras atvejis – gamintojas. Šiuo atveju gyventojas pagamintą elektros energiją jau gali parduoti. Tad saulės elektrinės dieną tenkina vartotojo poreikius, pakrauna kaupiklius, o perteklinę energiją parduoda. Kaupikliai tiekia energiją naktį, kai saulės elektrinės nebegamina elektros energijos ir užtikrina galios rezervą gedimo atveju.

Trečias atvejis – Fiktyvus. Kaupikliai prijungti prie tinklo, jie perka elektros energiją kai ji yra pigi ir parduoda, kada ji tampa brangi. Saulės elektrinės taip pat parduoda savo perteklinę energiją.

3.3.1. Gaminantis vartotojas

Norint tapti gaminančiu vartotoju reikia įsirengti saulės elektrinę, o ši parenkama pagal metinį elektros energijos suvartojimą. Pasirinktos Didžiųjų Gulbinų dalies vidutinis gyventojas suvartoja apie 3900 kWh per metus, tad saulės elektrinė turi patenkinti šį poreikį. Pagal 17.1 formulę parenkama preliminarai 5 kW saulės elektrinė:

$$E = 30 \cdot 0,18 \cdot 1150 \cdot 0,75 = 4657,5 \text{ kWh};$$

Taigi 5 kW saulės elektrinė per metus pasirinktoje vietovėje pagamina 4657,5 kWh, o tai yra daugiau už vidutinį 3900 kWh suvartojimą, todėl tokia elektrinės galia yra tinkama. Didesnės galios saulės elektrinės parinkimas nėra racionalus, nes perteklinės elektros energijos nebus galimybės panaudoti,

o mažesnės galios saulės elektrinė nepatenkins vartotojo poreikių. Kaip buvo minėta anksčiau saulės panelės gali kainuoti tik keli šimtus už 1 kW, tačiau su įrengimo darbais ir visa reikiama įranga vidutinė kaina yra apie 900 eurų už 1 kW. Tad 5 kW saulės elektrinė kainuos 4500 EUR.

Elektros energijos kaupimui bus naudojamos ličio jonų baterijos, jų kaina priklauso nuo gamintojų, efektyvumo ir kitų parametru, tačiau vidutinė kaina svyruoja apie 1300 EUR už 1 kWh. Šiuo atveju kaupikliai bus reikalingi vartotojo elektros energijos poreikiams nuo 8 val. vakaro iki 8 val. ryto, kai saulės elektrinės nebegamina elektros energijos. Pagal programą EMCOS gyventojas šiuo metu maksimaliai sunaudojo apie 8 kWh. Vasaros ir žiemos metu šie rodikliai gali skirtis, todėl parenkama 10 kWh talpos kaupiklių sistema, kuri užtikrins elektros energijos tiekimą nurodytu laikotarpiu. Tad šių kaupiklių sistema kainuos 13000 eurų.

Sistemos valdymo bloką vėl gi yra įvairių, jų kainos taip pat skiriasi, pavyzdžiui modelio SSP3118C 2,4 kW kaina siekia 2230 eurų [39]. Į šią kainą jau yra įskaičiuota visa reikiama įranga valdymo sistemos įrengimui. Tad galima pastebėti, kad didžiąją HRES sistemos kainos dalį sudaro kaupiklių kaina.

Gaminantys vartotojai už trūkstamą elektros energiją moka standartiniu 0,149 EUR už kWh tarifu. Tad HRES nauda ir atsiperkamumas skaičiuojamas sutaupytais kaštais už elektros energiją. Su šia sistema mokama tik už elektros energijos pasaugojimą, kurio kaina yra 2,6378 EUR/kWh/mėn. Šiuo atveju priimama, kad gyventojai iš tinklo trūkstamos energijos neperka, nes pakanka pagamintos energijos, kuri tiekama per valdiklį iš saulės elektrinės, o nakties metu iš kaupiklių. Duomenys reikalingi HRES sistemos naudai paskaičiuoti pateikti žemiau lentelėje.

7 lentelė. Apibendrinti gaminančio vartotojo duomenys

HRES sistemos kaina	Saulės elektrinė	4500 EUR
	Kaupikliai	13000 EUR
	Valdymo sistema	2230 EUR
	Viso	19730 EUR
Elektros energijos pasaugojimo kaina per metus	158,27 EUR	
Metinės elektros energijos išlaidos be HRES sistemos	581,1 EUR	
Diskonto norma	4 %	

Čia pasaugojimo kaina gaunama dauginant saulės elektrinės galią (5 kW) iš pasaugojimo įkainio (2,6378 EUR/kWh/mėn) ir dvylika mėnesių. Diskonto norma parinkta pagal projektų diskontuotų grynujų pajamų skaičiavimo ir priežiūros metodiką [40].

Taigi jeigu klientas įsirengia HRES sistemą, jis per metus sutaupo 422,83 eurus. Tuomet šios sistemos atsipirkimo laikotarpis pagal 20.3 formulę būtų:

$$T_s = \frac{19730}{422,83} = 46,66 \text{ metai};$$

Jeigu būtų taikomos subsidijos saulės elektrinėms, tokiu atveju sistema atsipirktų per:

$$T_s = \frac{187115}{422,83} = 42,84 \text{ metai};$$

Taigi hibridinės energijos gamybos sistemos atsipirkimo laikotarpis yra itin ilgas, bei neracionalus.

Šio atvejo dabartinė grynoji vertė yra lygi :

$$NPV = -19730 + \frac{422,83}{(1 + 0,04)^1} + \dots + \frac{422,83}{(1 + 0,04)^{30}} = -12418,4 \text{ EUR};$$

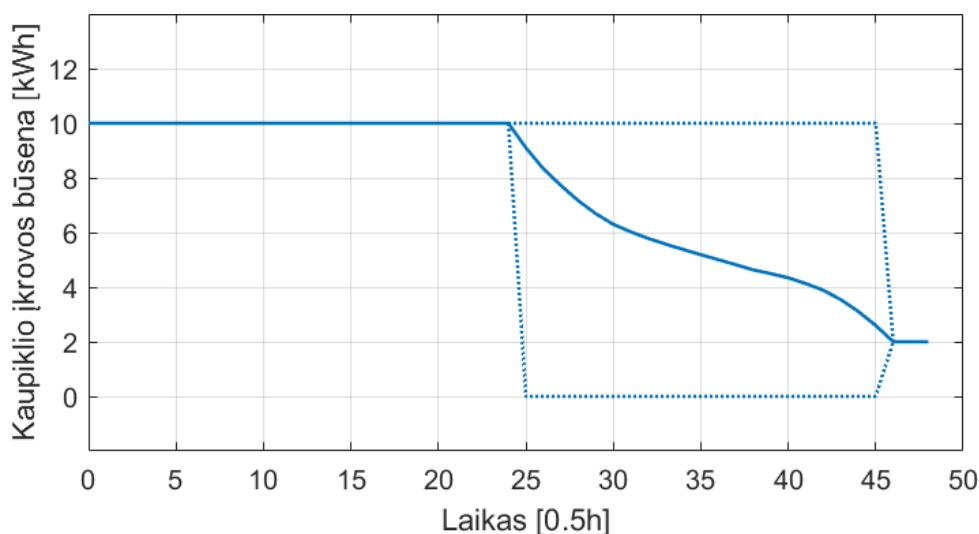
Vidinė pelno norma:

$$IRR = -2 + \left((-3 - (-2)) \left(\frac{-2114,12}{-2114,12 - 1323,11} \right) \right) = -2,64 \%;$$

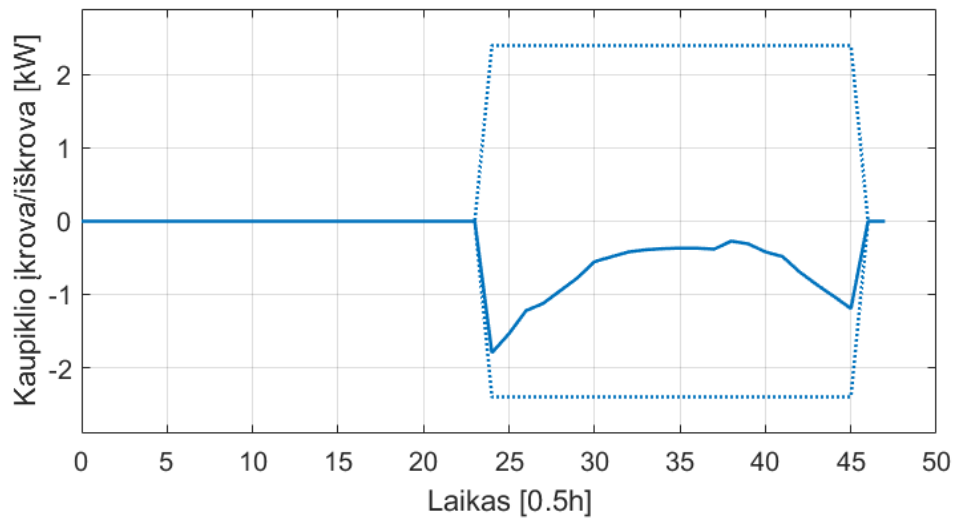
Taigi dabartinė grynoji vertė esant 4 % diskonto normai gaunama neigiama, o tai parodo, kad projektas nėra priimtinas ir jis per 30 metų laikotarpį neatsipirks. O ilgesnis laikotarpis nėra racionalus, nes tiek kaupiklių, tiek saulės elektrinės eksploatavimo laikas yra trumpesnis, o ir sudėtingėja projekto prognozavimas. Vidinė pelno norma gaunama -2,64 %, tad tik esant neigiamai diskonto normai projektas atsipirks, o tai nėra realu, tad šiuo atveju sistema finansiškai neatsiperka. Šis atvejis taptų finansiškai naudingas jeigu elektros energijos kaina taptų 0,34 EUR/kWh.

Jeigu HRES sistema nebūtų prijungta prie AB „Energijos skirstymo operatoriaus“ tinklo, tada už elektros energiją nereikėtų mokėti pasaugojimo mokesčio. Tokiu atveju vartotojas sutaupytų 581,1 EUR už elektros energiją. Bet gedimo atveju jis būtų izoliuotas nuo sistemos ir elektros energijos užtektų kol kaupiklių sukauptą energiją išsieikvotų. Per šį laikotarpį reikėtų pašalinti gedimą. Tokiu atveju sistema atsipirktų per 33,9 metų jeigu kiti parametrai išliktų toki patys.

Gaminančio vartotojo atveju, kaupikliai iškraunami tamsiu paros metu, kuomet saulės elektrinė nebegamina elektros energijos. Įkraunami atvirkščiai, dieną kai pagamina pakankamai energijos ir gyventojų poreikiams, ir kaupiklių įkrovimui. Šio atvejo kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo charakteristikas galima matyti žemiau pateiktuose grafikuose.



21 pav. Kaupiklio būsenos paros grafikas



22 pav. Kaupiklio iškrovos galios grafikas

Iš 21 pav. matyti, kad kaupiklis išsikrauti pradeda tik nuo 24 laiko žymos, kas atitinka 8 valandą vakaro (čia pirma laiko žyma atitinka 8:30 valandą ryto). Taip pat galima pastebėti, jog kaupiklis išsikrauna netolygiai, taip yra dėl to, kad gyventojas vartoja elektros energiją irgi netolygiai. 10 kWh kaupiklio pakanka patenkinti vakaro ir nakties meto energijos poreikius, o dieną kaupikliai vėl pakraunami nuo saulės elektrinės sugeneruotos elektros energijos.

3.3.2. Gamintojas

Jeigu gyventojas įsirengia savo elektrinę ir gamina energiją pats, o nesuvartotą elektros dalį tiekia į tinklą, bei turi leidimą gaminti elektros energiją ir sudaro elektros supirkimo sutartį, tai jis vadinamas elektros gamintoju. Šiuo atveju įrengiama 10 kW saulės elektrinė, kuri turi patenkinti gyventojų elektros energijos poreikius, o pagaminta perteklinė energija bus parduodama. Taip pat šiuo atveju kaupiklio talpa yra didesnė, ji siekia 20 kWh, taip daroma tam, kad gedimo atveju vartotojas turėtų pakankamai sukauptos elektros energijos, kol sutaisomas gedimas. Priimsime, kad perteklinės energijos supirkimo tarifas 0,164 EUR/kWh, nes būtent toks tarifas buvo taikomas, kol skatinimo kvotos nebuvo išnaudotos. Šiuo metu galima elektros energijos prekyba rinkos kaina, tačiau vidutinė kaina už 1 kWh pasak elektros energijos biržos „Nord Pool“ duomenų yra 0,04 EUR/kWh. Ši kaina yra per maža norint pardavinėti elektros energiją, nes vien tik ESO įkainiai už persiuntimo paslaugą yra didesni ir siekia 0,046 EUR/kWh.

Pagal 17.1 formulę 10 kW saulės elektrinė pagamina per metus 9315 kWh, vidutinis gyventojas suvartoja 3900 kWh, tad perteklinės energijos pardavimui lieka 5415 kWh. Būtent pagal šios likutinės energijos pardavimus ir skaičiuosime ekonominę naudą. Susisteminti duomenys reikalingi ekonominei analizei apskaičiuoti pateikiami žemiau lentelėje.

8 lentelė. Apibendrinti gamintojo atvejo duomenys

HRES sistemos kaina	Saulės elektrinė	9000 EUR
	Kaupikliai	26000 EUR
	Valdymo sistema	2230 EUR
	Viso	37230 EUR
Parduota elektros energija per metus	888 EUR	
ESO persiuntimo paslaugos išlaidos	431,82 EUR	
Metinės elektros energijos išlaidos be HRES sistemos	581,1 EUR	
Diskonto norma	4 %	

Taigi jeigu klientas įsirengia HRES sistemą ir pardavinėja elektros energiją, per metus jis uždirba 456,24 eurus už parduotą elektros energiją, o 581,1 eurą sutaupo, nes neperka elektros energijos, o ją pasigamina pats. Tuomet šios sistemos atsipirkimo laikotarpis pagal 20.3 formulę būtų:

$$T_s = \frac{37300}{1037,34} = 35,95 \text{ metai};$$

Šio atvejo dabartinė grynoji vertė yra lygi:

$$NPV = -37300 + \frac{1037,34}{(1 + 0,04)^1} + \dots + \frac{1037,34}{(1 + 0,04)^{30}} = -19292,2 \text{ EUR};$$

O vidinė pelno norma yra:

$$IRR = -1 + \left((-1,5 - (-1)) \left(\frac{-726,1}{-726,1 - 2442,66} \right) \right) = -1,11 \%;$$

Taigi matome, kad ir šiuo atveju projektas irgi nėra finansiškai naudingas, nes dabartinė grynoji vertė gaunama neigiama, o tai parodo, kad projektas neatsipirks. Taip pat projekto grynoji dabartinė vertė kinta priklausomai nuo diskonto normos, juo mažesnė diskonto norma, tuo aukštesnė grynoji vertė. Tačiau pasak vidinės pelno normos, tik su neigiama diskonto reikšme projektas atsipirks, o tai nėra realu. Nors šiuo atveju rodikliai ir yra geresni, bet HRES sistema vis dar nėra finansiškai naudinga, taip yra dėl to, kad sistemos kaina yra per didelė. Šiuo atveju sistema atsipirktų, jeigu elektros energijos kaina būtų 0,44 EUR/kWh, o kiti parametrai nekistų.

Šio atvejo kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo charakteristikų grafikai yra analogiški kaip ir gaminančio vartotojo atveju, tik skiriasi kaupiklio galia.

3.3.3. Fiktyvus atvejis

Šiuo atveju įrengiama 30 kW saulė elektrinė, kuri sugeneruoja pakankamai elektros energijos aprūpinti gyventoją, o perteklinę energiją parduoda. Sistemos kaupikliai kraunasi naktį kai elektros energija pigi, o parduoda dieną, kai energija brangi. Tad susidaro kainų skirtumas dėl kurio sistemai greičiau atsiperka. Saulės elektrinės kaip ir kaupikliai perka ir parduoda nakties, bei dienos tarifais. Duomenys reikalingi ekonominės analizės skaičiavimams pateikti 9 lentelėje.

9 lentelė. Apibendrinti fiktyvaus atvejo duomenys

HRES sistemos kaina	Saulės elektrinė	27000 EUR
	Kaupikliai	26000 EUR
	Valdymo sistema	2230 EUR
	Viso	55230 EUR
Parduota elektros energija per metus	4039,56 EUR	
ESO persiuntimo paslaugos išlaidos	1580,68 EUR	
Kaupiklio sukurta nauda	445,3 EUR	
Metinės elektros energijos išlaidos be HRES sistemos	581,1 EUR	
Diskonto norma	4 %	

Šio atvejo dabartinė grynoji vertė yra lygi:

$$NPV = -55230 + \frac{3485,27}{(1 + 0,04)^1} + \dots + \frac{3485,27}{(1 + 0,04)^{30}} = 5037,54 \text{ EUR};$$

O vidinė pelno norma yra:

$$IRR = 4 + \left((5 - 4) \left(\frac{5037,54}{5037,54 - (-1652,73)} \right) \right) = 4,74\%;$$

Atsipirkimo laikotarpis:

$$T_s = \frac{55230}{3485,27} = 15,84 \text{ metai};$$

Taigi šiuo atveju projekto dabartinė grynoji vertė yra teigiama, o vidinė pelno norma gaunama aukštesnė, negu esama diskonto norma, tad projektas yra priimtinas. Tačiau tokios sistemos įrengimui reikia palyginti daug ploto, o individualių gyvenamųjų namų kvartale jo gali nepakakti.

Iš 9 lentelės duomenų galima pamatyti, kad didžiausią finansinę naudą suteikia saulės elektrinės parduodamos savo perteklinę energiją. Kaupikliai tuo tarpu sukuria palyginti mažą finansinę naudą. Tačiau tai gali pasikeisti jeigu skirstomųjų tinklų operatorius pradėtų mokėti už tinklo įtampos kokybės palaikymą arba rezervinės galios užtikrinimą. Tas gali tapti itin aktualu nuo 2025 m. kuomet Baltijos šalys atsijungs nuo Rusijos kontroliuojamos sistemos ir prisijungs prie kontinentinės Europos elektros tinklų sistemos. Žinoma toki mažos galios kaupikliai didelės reikšmės neturės, bet jeigu jų būtų daug arba didesnių talpų, tuomet poveikis būtų pastebimas.

Išvados

1. Atlikta literatūros analizė parodė, kad hibridinės sistemos ir elektros energijos kaupikliai yra realią naudą suteikiantys įrenginiai, kuriuos dažnu atveju riboja ne pačios technologijos, o projektų finansavimas. Vien Jungtinėse Amerikos Valstijose kaupikliai sparčiai diegiami ir manoma, kad iki 2022 m. bus jau įdiegta 2,6 GW talpos galios kaupyklų.
2. Aprašytas optimizacinis modelis MATLAB programoje ir paaiškinti sprendimo metodai bei gauti rezultatai. Pasirinktoje Didžiųjų Gulbinų vietovėje hibridinė energijos gamybos sistema buitiniams vartotojams neatsiperka, tačiau jei elektros energijos kaina gaminančio vartotojo atveju pasiektų 0,34 EUR/kWh, o gamintojo atveju 0,44 EUR/kWh, ši sistema atsiperktų.
3. Nustatyti optimalūs hibridinės sistemos parametrai pasirinktoje vietovėje trimis atvejais. Tik fiktyviu atveju, kuomet sistema sudaryta iš 30 kW galios saulės elektrinės ir 20 kWh talpos kaupiklio, ji per 30 metų suteikia finansinę naudą.
4. Atlikta ekonominė analizė parodė, kad didžiąją HRES kainos dalį sudaro kaupikliai, o jų teikiama finansinė nauda yra sąlyginai maža. Jeigu skirstymo operatorius pradėtų mokėti už įtampos balansavimo ar rezervinės galios paslaugas gyventojams, tai kaupiklių ir HRES sistemų finansinė nauda išaugtų, o ir atsiperkamumas sutrumpėtų. Tas gali tapti itin aktualu 2025 m. kuomet Baltijos šalys atsijungs nuo Rusijos kontroliuojamos IPS/UPS sistemos ir prisijungs prie kontinentinės Europos elektros tinklų sistemos.

Literatūros šaltiniai

1. HAJIAGHASIA, Salman, Ahmad SALEMNIA ir Mohsen HAMZEHB. Hybrid energy storage system for microgrids applications: A review. *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. Tehran, Elsevier, 2019, 21(1), 543-570 [žiūrėta 2019-11-05]. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.017>
2. Optimum energy [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-11-05]. Prieiga per: <https://optimumenergy.am/solutions/hybrid-systems/>
3. GHOFRANI, Mahmoud ir HOSSEINI Negar Niromand. Optimizing Hybrid Renewable Energy Systems:A Review [interaktyvus]. Bothell: Intech, 2016,9-16 [žiūrėta 2019-11-08]. Prieiga per: doi: <http://dx.doi.org/10.5772/65971>
4. KABIRA, Ehsanul, Pawan KUMARB, Sandeep KUMAR, Adedeji A. ADELODUND ir Ki-Hyun KIM. Solar energy Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, 82 (1), 894-900 [žiūrėta 2019-05-13]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>
5. KANNAN, Nadarajah ir Divagar VAKEESAN. Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. Elsevier, 2016, 62 (1), p. 1092–1105 [žiūrėta 2019-06-11]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
6. CIRIMINNA, Rosaria, Francesco MENEGUZZO, Mario PECORAINO ir Mario PAGLIARO. Rethinking solar energy education on the dawn of the solar economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. Elsevier, 2016, 63 (1), 13–18 [žiūrėta 2019-06-11]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.008>
7. PANVAR, N.L., S. KAUSHIK, ir S. KOTHARI. Role of renewable energy sources in environmental protection: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [interaktyvus]. Elsevier, 2011, 15(1), 1513-1524 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: doi:10.1016/j.rser.2010.11.037
8. GREEN, Martin A. Photovoltaic principles. *Physica E* [interaktyvus]. Elsevier, 2011, 14 (1), 11-17 [žiūrėta 2019-06-11]. PII: S 1386-9477(02)00354-5. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
9. OLABI, A.G. Renewable energy and energy storage systems. *Energy* [interaktyvus]. Elsevier, 2017, 136 (1), 1 – 6 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>
10. ADOMAVIČIUS, Vytautas. Šiuolaikiniai elektros energijos kaupikliai [interaktyvus]. Kaunas, Technologija, 2011 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: <http://gjstudija.net/ltma/ltma-darbai/LTMAMD-7-VA-ElektrKaup.pdf>
11. International Hydropower Association [interaktyvus]. 2019 m. [žiūrėta 2019-06-15]. Prieiga per: <https://www.hydropower.org/publications/the-world's-water-battery-pumped-hydropower-storage-and-the-clean-energy-transition>
12. HORN, Michael, Jennifer MACLEOD, Meinan LIU, Jeremy WEBB ir Nunzio MOTTA. Supercapacitors: A new source of power for electric cars? *Economic Analysis and Policy* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 61 (1), 93–103 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2018.08.003>
13. POONAMA, Kriti SHARMA, Anmol ARORA ir S.K. TRIPATHI. Review of supercapacitors: Materials and devices. *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. Elsevier,

- 2019, 21 (1), 801–825 [žiūrėta 2019-06-16]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.010>
14. Explainthatstuff [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-16]. Prieiga per: <https://www.explainthatstuff.com/how-supercapacitors-work.html>
15. KOOHI-FAYEGH, S. ir M.A. ROSEN. A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 27 (1), 1-23 825 [žiūrėta 2019-11-09]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101047>
16. RU, Y., S. ZHENG, H. XUE ir H. PANG. Different positive electrode materials in organic and aqueous systems for aluminium ion batteries. *Royal journal of chemistry* [interaktyvus]. 2019, 7 (1), [žiūrėta 2019-06-11]. Prieiga per: DOI: 10.1039/c9ta01550g
17. AMY, Caleb, Hamid Reza SEYFS, Myles A. STEINER, Daniel J. FRIEDMAN ir Asegun HENRY. Thermal energy grid storage using multi-junction photovoltaics. *Energy Environmental Science* [interaktyvus]. 2019, 12 (1), 334 [žiūrėta 2019-06-16]. Prieiga per: 10.1039/c8ee02341g
18. ADOMAVIČIUS, Vytautas, Linas PUŠINAITIS, Mantas KAMINSKAS. Elektros energijos kaupimo priemonių šiuolaikinė būklė ir plėtros perspektyvos. *Energetika* [interaktyvus]. 2016 [žiūrėta 2019-06-14]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/303315906_Elektros_energijos_kaupimo_priemoniu_siuolaikine_bukle_ir_pletros_perspektyvos
19. ZAIDI, Bizzat Hussain, Dost Muhammad Saqib BHATTIB ir Ihsan ULAHC. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst the households. *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 19 (1), 291–301 [žiūrėta 2019-04-06]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.010>
20. California Public Utilities Commission, Self-Generation Incentive Program (SGIP) [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-12]. Prieiga per: <http://www.cpuc.ca.gov/sgip/>
21. Utilitydive [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-07]. Prieiga per: <http://www.utilitydive.com/news/updated-tucson-electric-signs-solar-storage-ppa-for-less-than-45kwh/443293/>
22. Microgrid knowledge [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-14]. Prieiga per: <https://microgridknowledge.com/solarplus-storage-ppas/>
23. Massachusetts Department of Energy Resources [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-09-07]. Prieiga per: <http://www.mass.gov/eea/docs/doer/state-of-charge-executive-summary.pdf>.
24. LAWS, Nicholas D., Kate ANDERSON, Nicholas A. DIORIO, Xiangkun LI ir Joyce MCLAREN. Impacts of valuing resilience on cost-optimal PV and storage systems for commercial buildings. *Renewable Energy* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, 127 (1), 896–909 [žiūrėta 2019-09-07]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.011>
25. MILLER, Lindsay ir Rupp CARRIVEAU. A review of energy storage financing— Learning from and partnering with the renewable energy industry. *Journal of Energy Storage* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, 19 (1) 311–319 [žiūrėta 2019-09-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.007>
26. GOYAL, Shweta, Sachin MISHRA ir Anamika BHATIA. Optimization Strategies for Hybrid Energy System: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018, 13 (9), 7010-7018 ISSN 0973-4562.

27. ŽILINSKAS, A. Matematinis Programavimas [interaktyvus]. Prieiga per: <https://www.scribd.com/document/152102344/Matematinis-programavimas>
28. MISEVIČIUS, Alfonsas, Vytautas BUKŠNAITIS ir Jonas BLONSKIS. Kombinatorinis optimizavimas ir metaeuristiniai metodai: teorinei aspektai [interaktyvus]. 2007, 7 [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://www.zurnalai.vu.lt/informacijos-mokslai/article/view/3417>
29. Homer energy [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-05]. Prieiga per: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
30. Geli [ineraktyvus]. 2019 [žiūrėta 2019-06-07]. Prieiga per: <https://geli.net/geli-platform/>
31. OVALLE, Andres, Ahmed HABLY ir Seddik BACHA. Grid Optimal Integration of Electric Vehicles: Examples with Matlab Implementation, Studies in Sysytems, Decision and Control. Springer, 2018, ISBN 978-3-319-73177-3.
32. MEISHNER, Fabian ir Dirk Uwe SAUER. Wayside energy recovery systems in DC urban railway grids. *eTransportation* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 1, 1-17 [žiūrėta 2020-04-12]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2019.04.001>
33. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. Dėl 2014–2020 metų Europos Sąjungos fondų investicijų veiksmų programos 4 prioriteto „Energijos efektyvumo ir atsinaujinančių išteklių energijos gamybos ir naudojimo skatinimas“ 04.1.1-LVPA-V-114 priemonės „Elektros energijos iš atsinaujinančių išteklių gamybos įrenginių įrengimas namų ūkiuose“ projektų finansavimo sąlygų aprašo Nr. 1 patvirtinimo: Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas: 2019 m. sausio 22 d. Nr. 914 [interaktyvus] [žiūrėta 2020-04-02]. Prieiga per: [https://www.epa.gov/greenpower/green-power-equivalency-calculator-calculations-and-references](https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/3c0c8a201e8111e9bd28d9a28a9e9ad9?jfwid=z>wemec8no34. EPA: United States Enviromental Protection Agency [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-03-15]. Prieiga per: <a href=)
35. Mission Soalr energy [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: https://thesolarstore.com/manuals/MSE295305SQ5K_Data_Sheet.pdf?osCsid=a1aav382v23scc6ve1j2211941
36. European Commission [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
37. ESO [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-03-16]. Prieiga per: <https://www.eso.lt/lt/namams/elektra/tarifai-kainos-atsiskaitymas-ir-skolos/gaminanciu-vartotoju-kainos.html>
38. VERT: Valstybės Energetikos Reguliavimo taryba [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-04-15]. Prieiga per: <https://www.regula.lt/atsinaujinantys-istekliai/Puslapiai/tarifai.aspx>
39. ENF [interaktyvus]. 2020 [žiūrėta 2020-04-16]. Prieiga per: <https://www.enfsolar.com/pv/inverter-datasheet/10350>
40. EUROPOS SOCIALINIS FONDAS. 2014–2020 metų Europos Sąjungos struktūrinių fondų investicijų veiksmų programos valdymo komiteto 2014 m. spalio 13 d. posėdžio sprendimu protokolas Nr. 35 [interaktyvus] [žiūrėta 2020-04-16]. Prieiga per: <https://www.esinvesticijos.lt/lt/dokumentai/veiksmu-programos-valdymo-komitetas>


```

0.667 0.967 0.744 0.677 0.609 0.646 0.773 0.642 0.674 0.62 0.601 0.571 0.531 0.404
0.396 0.443 0.396 0.432 0.471 0.647 0.666 0.723 0.979 0.881 0.705 0.62 0.614 0.424
0.373 0.38 0.418 0.334 0.254 0.238 0.232 0.238 0.236 0.234 0.231 0.226 0.271 0.394
0.48 0.72 0.792 1.03 1.112 1.168;
0.451 0.653 0.503 0.457 0.412 0.436 0.523 0.434 0.456 0.419 0.406 0.386 0.359
0.273 0.267 0.3 0.268 0.292 0.318 0.437 0.45 0.489 0.662 0.596 0.477 0.419 0.415
0.286 0.252 0.257 0.282 0.226 0.172 0.161 0.157 0.161 0.16 0.158 0.156 0.153 0.183
0.427 0.24 0.359 0.395 0.514 0.555 0.583;
1.026 1.487 1.145 1.041 0.937 0.993 1.189 0.987 1.037 0.954 0.925 0.879 0.817
0.621 0.609 0.682 0.609 0.664 0.724 0.995 1.025 1.113 1.506 1.355 1.084 0.954
0.945 0.652 0.574 0.584 0.643 0.514 0.391 0.365 0.356 0.366 0.364 0.36 0.355 0.348
0.417 0.052 0.383 0.574 0.631 0.821 0.887 0.931;
0.024 0.035 0.027 0.025 0.022 0.024 0.028 0.024 0.025 0.023 0.022 0.021 0.02 0.015
0.015 0.016 0.015 0.016 0.017 0.024 0.024 0.027 0.036 0.032 0.026 0.023 0.023 0.023
0.016 0.014 0.014 0.015 0.012 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.009 0.008 0.008 0.01
0.592 0.493 0.739 0.813 1.057 1.142 1.199;
1.086 1.573 1.211 1.101 0.991 1.051 1.259 1.045 1.097 1.009 0.979 0.93 0.865 0.657
0.644 0.721 0.645 0.703 0.766 1.053 1.085 1.177 0.938 1.434 1.148 1.01 1 0.69
0.607 0.618 0.68 0.544 0.413 0.387 0.377 0.387 0.385 0.381 0.376 0.368 0.442 0.273
0.008 0.011 0.012 0.016 0.017 0.018;
0.409 0.593 0.457 0.415 0.374 0.396 0.475 0.394 0.414 0.381 0.369 0.351 0.326
0.248 0.243 0.272 0.243 0.265 0.289 0.397 0.409 0.444 0.601 0.541 0.433 0.381
0.377 0.26 0.229 0.233 0.256 0.205 0.156 0.146 0.142 0.146 0.145 0.144 0.142 0.139
0.167 0.015 0.366 0.549 0.604 0.785 0.848 0.891;
0.626 0.907 0.698 0.635 0.571 0.605 0.725 0.602 0.632 0.582 0.564 0.536 0.498
0.379 0.371 0.416 0.372 0.405 0.442 0.607 0.625 0.679 0.718 0.827 0.661 0.582
0.576 0.398 0.35 0.356 0.392 0.314 0.238 0.223 0.217 0.223 0.222 0.219 0.217 0.212
0.255 0.056 0.289 0.433 0.477 0.619 0.669 0.703;
0.46 0.667 0.513 0.467 0.42 0.445 0.533 0.443 0.465 0.428 0.415 0.394 0.366 0.279
0.273 0.306 0.273 0.298 0.325 0.446 0.46 0.499 0.675 0.608 0.486 0.428 0.424 0.292
0.257 0.262 0.288 0.231 0.175 0.164 0.16 0.164 0.163 0.161 0.159 0.156 0.187 0.225
0.135 0.203 0.223 0.29 0.313 0.329];
% sistemas matrica
A_tilde_1 = ...
[-86.022 43.011 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
43.011 -124.784 20.678 0 0 0 0 24.438 0 0 36.657 0 0 0 0 0;
0 20.678 -123.305 42.445 0 0 0 0 0 0 0 0 26.226 0 33.956 0;
0 0 42.445 -80.847 38.402 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 38.402 -172.811 134.409 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 134.409 -164.841 30.432 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 30.432 -30.432 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 24.438 0 0 0 0 -60.28 35.842 0 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 35.842 -197.133 161.29 0 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 161.29 -161.29 0 0 0 0 0 0 0;

```

```

0 36.657 0 0 0 0 0 0 0 0 -284.796 248.139 0 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 248.139 -367.613 119.474 0 0 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 119.474 -119.474 0 0 0 0;
0 0 26.226 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -90.742 64.516 0 0;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 64.516 -64.516 0 0;
0 0 33.956 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -235.569 201.613;
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 201.613 -201.613 ];
% Transformatoriaus įtampa ir varža
v_0 = 400;
R_0 = 0.02325;
% įtampos apribojimai kiekvienam tinklo mazgui
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% dienos tarifas
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*0.168;
% naktinis tarifas
tariffs(32:48) = 0.107;
% transformatoriaus įtampos vektorius
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
% bazinė įtampa
v_k_base = repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))...
+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Kaupiklių parametrai
soc_cap = [20 20 20]'; % saugojimo talpa [kWh]
soc_d = [20 20 20]'; % norimos galutinės įkrovos būsenos[kWh]
soc_0 = [20 20 20]'; % pradinės įkrovos būsenos [kWh]
p_max_c = [3 3 3]'; % % maksimalios įkrovimo normos[kW]
p_max_i = [3 3 3]'; % % maksimalios iškrovos normos [kW]
Ki = [46 45 44]'; % paskutinis prisijungimo laikas
dt = 0.5; % laiko žingsnis [h]
t_0 = 1; % t_0+dt
nodes = [3 6 10]'; % taškai kuriuose prijungtos baterijos Lhat_ = sum(load_nodes); % Bendras
apkrovos profilis
watch_evolution = 1;
[pow_traj_ast,s] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,...
v_min,Lhat_',nodes,watch_evolution);
if s > 0 % jei maksimalus nesuderinamumas nesiekia nulio (visi %įtampos apribojimai yra įmanomi,
o II fazės problema gali %rasti optimalius tvarkaraščius)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_',nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);

```

end

```
function [pow_traj_ast,s] = ...
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_c,soc_d,soc_0,p_max_c,...
p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat,nodes,...
watch_evolution)
% soc_c : akumulatoriaus talpa [kWh]
% soc_d : galutinės norimos įkrovos būsenos [kWh]
% soc_0 : pradinės įkrovos būsenos [kWh]
% p_max_c : maksimalios įkrovimo normos [kW]
% p_max_i : maksimalios iškrovos normos [kW]
% t_0: laiko žingsnis, atitinkantis soc_0
% Ki : viso laiko žingsniai
% dt : laiko žingsnis
% A : sistemos matrica
% v_0 : transformatoriaus įtampa
% v_k_base: transformatoriaus sukurtos įtampos ir bazinės
% apkrovos tinkle
% v_max : viršutinė kiekvieno mazgo įtampos riba
% v_min : apatinė kiekvieno mazgo įtampos riba
% Lhat_ : visos transformatoriaus apkrovos prognozė
% nodes : tinklo mazgai, kur yra prijungtos baterijos (EVS)
% watch_evolution : (1) nubraižo vidinę evoliuciją, (kitaip)
% ignoruoja

% PEV skaičius
N = length(Ki);
Lhat_=Lhat';

% soc_k apribojimų konstravimas evoliucijai vizualizuoti
soc_min = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0-1e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+2e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki+t_0+1)) = +soc_d-2e-3;
soc_min = cumsum(soc_min,2);
soc_min=soc_min(:,2:end);
soc_max = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0+1e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c-2e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki+t_0+1)) = -soc_c+soc_d+2e-3;
soc_max = cumsum(soc_max,2);
soc_max=soc_max(:,2:end);

% konstravimo soc_k apribojimus rutina
```

```

soc_lo = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+1)) = +1e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0-2e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_lo = cumsum(soc_lo,2);
soc_lo=soc_lo(:,2:end);
soc_lo(:,1:t_0)=[];
soc_lo(:,max(Ki):end)=[];
soc_lo=soc_lo(:);
soc_lo(soc_lo==Inf)=[];
soc_up = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki*0+1)) = -1e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c+2e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_up = cumsum(soc_up,2);
soc_up=soc_up(:,2:end);
soc_up(:,1:t_0)=[];
soc_up(:,max(Ki):end)=[];
soc_up=soc_up(:);
soc_up(soc_up==Inf)=[];

```

% įkrovimo greičio apribojimų konstravimas kiekvienam EV

```

u_up = zeros(N,length(Lhat_));
u_up(sub2ind(size(u_up),(1:N)',Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = -p_max_c*(t_0>0);
u_up(sub2ind(size(u_up),(1:N)',Ki+t_0)) = p_max_c;
u_up = cumsum(u_up,2,'reverse')+1e-3;
u_lo = zeros(N,length(Lhat_));
u_lo(sub2ind(size(u_lo),(1:N)',Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = +p_max_i*(t_0>0);
u_lo(sub2ind(size(u_lo),(1:N)',Ki+t_0)) = -p_max_i;
u_lo = cumsum(u_lo,2,'reverse')-1e-3;

```

% apmokestinimo normų pradinio spėjimo konstravimas: ši I fazės pradinį spėjimą nusako greičiausio įkrovimo grafikai

```

p_max_until = floor((soc_d-soc_0)./(p_max_c*dt));
p_to_goal = ((soc_d-soc_0)./(p_max_c*dt)-p_max_until).*p_max_c;
u = zeros(N,length(Lhat_)+1);
u(sub2ind(size(u),(1:N)',p_max_until+t_0+1)) = p_max_c;
u(sub2ind(size(u),(1:N)',p_max_until*0+t_0+1)) = ...
u(sub2ind(size(u),(1:N)',p_max_until*0+t_0+1))- p_max_c;
u = cumsum(u,2,'reverse');
u(sub2ind(size(u),(1:N)',p_max_until+t_0+2)) = p_to_goal;
u=u(:,2:end);

```



```

% kaukės pastatymas, siekiant išvengti įtakos neegzistuojančiai kontrolei
mask = zeros(N,length(Lhat_)+1);
mask(sub2ind(size(mask),(1:N)',Ki+t_0+1)) = 1;
mask(sub2ind(size(mask),(1:N)',Ki*0+t_0+1)) = -1;
mask = cumsum(mask,2,'reverse');
mask=mask(:,2:end);
mm =(mask(:)==1)';

% apribojimai A_ev * u, apibrėžti kiekvieno mazgo įtampos apribojimais
v_up = (v_0/1000)*(v_max(:,sum(mask,1)>0)-v_k_base(:,sum(mask,1)>0))+1e-3;
v_lo = (v_0/1000)*(v_min(:,sum(mask,1)>0)-v_k_base(:,sum(mask,1)>0))-1e-3;

% lygių apribojimų matricos „A_soc_end“ konstravimas galutinėms % įkrovos būsenoms
A_soc_end = zeros(N,N*max(Ki));
for tt = 1 : max(Ki)
A_soc_end(:,(tt-1)*N+1:(tt)*N) = diag(mask(:,t_0+tt))*dt;
End

% nelygybės apribojimų matricos „A_soc“ konstravimas dalinai
% krūvio būsenos kiekviename žingsnyje „k“
A_soc = repmat(A_soc_end,max(Ki)-1,1);
for nn = 1 : max(Ki)-1
A_soc((nn-1)*N+1:nn*N,(nn)*N+1:end) = ...
0*A_soc((nn-1)*N+1:nn*N,(nn)*N+1:end);
end
Indices=zeros(1,sum(max(Ki)-Ki));
prev_count = 0;
for ii = 1:length(Ki)
Indices_Ki = (Ki(ii)):(max(Ki)-1);
Indices(prev_count+1:prev_count+length(Indices_Ki)) = ...
(Indices_Ki-1)*N+ii;
prev_count = prev_count +length(Indices_Ki);
end
A_soc(Indices,:)=[];
A_soc(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,end+1) = A_soc_end(:,end)*0;

% Mazgų (sistemos A matricos stulpelių) pašalinimas be PEV.
A_ev = A(:,nodes);

% A_ev“ matricos kartojimas kiekvienam laiko žingsniui iki
% paskutinio PEV atjungimo.
A_ev_re = zeros(length(A)*max(Ki),sum(Ki));

```

```

prev_row = 0;
prev_col = 0;
for tt = 1:max(Ki)
N_connected = sum(mask(:,t_0+tt));
A_ev_re(prev_row+1:prev_row+length(A),...
prev_col+1:prev_col+N_connected) ...
= A_ev(:,mask(:,t_0+tt)==1);
prev_row = prev_row+length(A);
prev_col = prev_col+N_connected;
end

% Dalinė įkrovos nelygybės apribojimų matrica žemiausiems ir
%ribiniams elementams, įskaitant maksimalų neįmanomumą ribojamą % „s“ kintamąjį - krūvio
apribojimų būsenoms („s“ įtakos
% neturi):
A_soc_s_lo = [A_soc zeros(sum(Ki-1),1)];
A_soc_s_up = [A_soc -zeros(sum(Ki-1),1)];

% Apmokestinimo tarifų apribojimai („s“ įtakos neturi):
A_u_s_lo = [eye(sum(Ki)) zeros(sum(Ki),1)];
A_u_s_up = [eye(sum(Ki)) -zeros(sum(Ki),1)];

% - Dėl įtampos apribojimų:
A_v_s_lo = [A_ev_re ones(size(A_ev_re,1),1)];
A_v_s_up = [A_ev_re -ones(size(A_ev_re,1),1)];

% Nusileidimo parametrai ir atgalinės linijos paieška
alpha = 0.5;
beta = 0.8;
mu = 10;
t = 1;
t_pre = t;
num_constraints = 2*sum(Ki)+2*size(A_soc,1)+2*size(A_ev_re,1);
Epsilon_lambda = 1e-20;
Epsilon_Barrier = 1e-50;

% Maksimalus pakartojimų skaičius
Max_Iter=1000;
for ii = 1:Max_Iter

% apskaičiuoja krūvio trajektorijų būsenas
x_k = A_soc*u(mm)';

% apskaičiuoja EV įtampą

```

```

v = A_ev_re*u(mm)';
if ii == 1 % inicijuoti s
s = 1e-3 + max([-v+v_lo(:); v-v_up(:)]);
end
% apskaičiuoja išplėstinės tikslo funkcijos dabartinę vertę
% (įskaitant netiesioginę nelygybę)
H = t*s...
- sum(log(-v_lo(:)+v+s)+log(v_up(:)-v+s))...
- sum(log(-soc_lo+x_k)+log(soc_up-x_k))...
- sum(log(-u_lo(mm)'+u(mm)')+log(u_up(mm)'-u(mm)')));

% apskaičiuoja išplėstinės objekto funkcijos gradientą
dH_dus = A_v_s_lo*(1./(v_lo(:)-v-s))...
+ A_v_s_up*(1./(v_up(:)-v+s))...
+ A_soc_s_lo*(1./(soc_lo-x_k))...
+ A_soc_s_up*(1./(soc_up-x_k))...
+ A_u_s_lo*(1./(u_lo(mm)'-u(mm)'))...
+ A_u_s_up*(1./(u_up(mm)'-u(mm)'));
dH_dus(end) = dH_dus(end)+t;

% apskaičiuoja de Hessiano matricą, atsižvelgiant į numanomą nelygybių įtraukimą į tikslo funkciją
I_x_lo = diag(1./(soc_lo-x_k).^2);
I_x_up = diag(1./(soc_up-x_k).^2);
I_u_lo = diag(1./(u_lo(mm)'-u(mm)')).^2);
I_u_up = diag(1./(u_up(mm)'-u(mm)')).^2);
I_v_lo = diag(1./(v_lo(:)-v-s).^2);
I_v_up = diag(1./(v_up(:)-v+s).^2);
Hessian = + A_v_s_lo*I_v_lo*A_v_s_lo + A_v_s_up*I_v_up*A_v_s_up ...
+ A_soc_s_lo*I_x_lo*A_soc_s_lo ...
+ A_soc_s_up*I_x_up*A_soc_s_up ...
+ A_u_s_lo*I_u_lo*A_u_s_lo + A_u_s_up*I_u_up*A_u_s_up;
% gradiento normalizavimas
dH_dus_normalized = dH_dus/norm(dH_dus);

% apskaičiuoja nusileidimo kryptį Niutono metodu su
lygybės apribojimais
if rcond([Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))])>1e-15
Delta_x_w = ...
-[Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))]\...
[dH_dus_normalized;zeros(size(A_soc_end,1),1)];
else % Jei išplėsta lygybės suvaržytos problemos matrica yra blogai sąlygota, rutina sustoja
break
end
end

```

```

% Ištraukia elementus, kurie atitinka nusileidimo kryptį
Delta_x = Delta_x_w(1:length(dH_dus_normalized));
% w = Delta_x_w(length(dH_dus_normalized)+1:end);
% Apskaičiuoja nuosmukį
lambda = (Delta_x'*Hessian*Delta_x)^2;
% Jei sumažinimas yra mažesnis už ribą, pakeitus „t“, rutina sustoj
if t > t_pre && lambda < Epsilon_lambda
break
else
end
t_pre = t;
% Pradinis žingsnio dydis ieškant eilučių
Ts = 100000;
H_ir = Inf;
% atgalinės eilutės paieškos paprogramė
while (H_ir > (H+alpha*Ts*(dH_dus_normalized'*Delta_x)))
u_ir = u;
u_ir(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x(1:end-1)';
s_ir = s + Ts*Delta_x(end);
% apskaičiuoja galimas krūvio trajektorijas
x_k_ir = A_soc*u_ir(mm)';
% apskaičiuoja galimą EV įtampą
v_ir = A_ev_re*u_ir(mm)';
% patikrinimai yra galimi kintamos vertės yra tam tikruose diapazonuose
if (sum(v_ir < (v_lo(:)-s_ir))+ sum(v_ir > (v_up(:)+s_ir))+ ...
sum(x_k_ir < soc_lo) + sum(x_k_ir > soc_up) + ...
sum(u_ir(mm)' < u_lo(mm)') + sum(u_ir(mm)' > u_up(mm)'))>0
Ts=beta*Ts;
else
H_ir = t*s_ir...
- sum(log(-v_lo(:)+v_ir+s_ir)+log(v_up(:)-v_ir+s_ir))...
- sum(log(-soc_lo+x_k_ir)+log(soc_up-x_k_ir))...
- sum(log(-u_lo(mm)'+u_ir(mm)')+log(u_up(mm)'+u_ir(mm)')));
Ts=beta*Ts;
end
% Jei sumažinama mažiau už slenkstį „t“ atnaujinama
if lambda < Epsilon_lambda
t=mu*t;
break
end
end
% Grafikai
% Jei watch_evolution == 1, svarbiausi kintamieji nubraižomi brėžinyje norint patikrinti algoritmo
raidą

```

```

if ii == 1 && watch_evolution == 1

% Nustatoma figūra (10), kad būtų galima stebėti I fazės evoliuciją
figure(10)
clf(figure(10),'reset')
set(gcf,'color','w');
fig = gcf;
fig.PaperPositionMode = 'auto';
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title('Phase I: Press any key to continue');
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause
end
if watch_evolution == 1 && sum(ii == [1 0:5:Max_Iter])==1
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
TotalLoad = Lhat_+sum(u,1);
voltages_total = (v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)';
power_lim_up = (mask.*u_up)';
power_lim_lo = (mask.*u_lo)';
figure(10)
% Įkrovimo grafiko būklė
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x],'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-2 max(soc_c)+4])
set(gca,'YTick',0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'SoC [kWh]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');

```

```

set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
% bendros apkrovos grafikas

subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_,'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Base load')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1>TotalLoad,'LineWidth',1.5,'DisplayName',...
'+ total EV load')
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','southwest','FontSize',10);

% Įtampos grafikas
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,voltages_total,'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1:)+s*1e3/v_0,':','...
'Color',[.31 .31 .31],'LineWidth',2)
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1:)-s*1e3/v_0,':','...
'Color',[.31 .31 .31],'LineWidth',2)
hold off
set(gca,'YLim',[min(v_min(1:)-s*1e3/v_0) ...
max(v_max(1:)+s*1e3/v_0)])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'Voltage per node [V]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
% Įkrovimo / iškrovimo greičio grafikai
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);

```

```

plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_up,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_lo,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase I: Iteration: ', num2str(ii), ', s: ',...
num2str(s) ', lamda: ', num2str(lambda/2) ', Ts: '...
num2str(Ts) ', m/t: ', num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause(0.01)
end
% Nusileidimo skaičiavimas
u_pre = u;
u_pre(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x(1:end-1)';
s_pre = s + Ts*Delta_x(end);

% Stabdymo kriterijai (ypač sustoti, jei „s“ nesiekia nulio, o tai reiškia, kad įmanomi įtampos
apribojimai)
if s < 0 || num_constraints/t < Epsilon_Barrier % Sustojimo kriterijus
break
else
u = u_pre;
s = s_pre;
end
end

% Galutinės iteracijos brėžinys
if watch_evolution == 1
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
TotalLoad = Lhat_+sum(u,1);
voltages_total = (v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)';
power_lim_up = (mask.*u_up)';

```

```

power_lim_lo = (mask.*u_lo)';
figure(10)

% Įkrovimo būklės grafikas
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x],'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-2 max(soc_c)+4])
set(gca,'YTick',0:2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'SoC [kWh]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
% Bendros apkrovos grafikas
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_,'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Base load')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,TotalLoad,'LineWidth',1.5,'DisplayName',...
'+ total EV load')
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','southwest','FontSize',10);
% Įtampos grafikas
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,voltages_total,'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Voltages')

```



```

hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1:)+s*1e3/v_0,':',...
'Color',[.31 .31 .31],'LineWidth',2)
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1:)-s*1e3/v_0,':',...
'Color',[.31 .31 .31],'LineWidth',2)
hold off
set(gca,'YLim',[min(v_min(1:)-s*1e3/v_0) max(v_max(1:)+s*1e3/v_0)])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h'])
ylabel(gca,'Voltage per node [V]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
% Įkrovimo / iškrovimo greičio grafikai
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_up,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_lo,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h'])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase I: Iteration: ', num2str(ii), ', s: ',...
num2str(s) ', lamda: ' num2str(lambda/2) ', Ts: ' ...
num2str(Ts) ', m/t: ' num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);
pause(1)
end
% Užduoties išvestis

```

```

pow_traj_ast = u;
end

```

```

function [pow_traj_ast,soc_traj_ast] = ...
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII(soc_c,soc_d,soc_0,p_max_c,...
p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat,nodes,tariffs,...
u_0_phaseI,watch_evolution)
N = length(Ki);
Lhat_ =Lhat';
% soc_k apribojimų konstravimas
soc_min = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0-1e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+2e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki+t_0+1)) = +soc_d-2e-3;
soc_min = cumsum(soc_min,2);
soc_min=soc_min(:,2:end);
soc_max = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0+1e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c-2e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki+t_0+1)) = -soc_c+soc_d+2e-3;
soc_max = cumsum(soc_max,2);
soc_max=soc_max(:,2:end);
soc_lo = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+1)) = +1e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0-2e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_lo = cumsum(soc_lo,2);
soc_lo=soc_lo(:,2:end);
soc_lo(:,1:t_0)=[];
soc_lo(:,max(Ki):end)=[];
soc_lo=soc_lo(:);
soc_lo(soc_lo==Inf)=[];
soc_up = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki*0+1)) = -1e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c+2e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up),(1:N)',Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_up = cumsum(soc_up,2);
soc_up=soc_up(:,2:end);
soc_up(:,1:t_0)=[];
soc_up(:,max(Ki):end)=[];
soc_up=soc_up(:);
soc_up(soc_up==Inf)=[];
% Kiekvieno kaupiklio įkrovimo normos suvaržymų dalis
u_up = zeros(N,length(Lhat_));

```

```

u_up(sub2ind(size(u_up),(1:N)',Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = -p_max_c*(t_0>0);
u_up(sub2ind(size(u_up),(1:N)',Ki+t_0)) = p_max_c;
u_up = cumsum(u_up,2,'reverse')+1e-3;
u_lo = zeros(N,length(Lhat_));
u_lo(sub2ind(size(u_lo),(1:N)',Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = +p_max_i*(t_0>0);
u_lo(sub2ind(size(u_lo),(1:N)',Ki+t_0)) = -p_max_i;
u_lo = cumsum(u_lo,2,'reverse')-1e-3;
% pradinio įkrovimo greičio spėjimas
u = u_0_phaseI;
mask = zeros(N,length(Lhat_)+1);
mask(sub2ind(size(mask),(1:N)',Ki+t_0+1)) = 1;
mask(sub2ind(size(mask),(1:N)',Ki*0+t_0+1)) = -1;
mask = cumsum(mask,2,'reverse');
mask=mask(:,2:end);
mm =(mask(:)==1)';
% apibrėžti kiekvieno mazgo įtampos apribojimai
v_up = (v_0/1000)*(v_max(:,sum(mask,1)>0)-v_k_base(:,sum(mask,1)>0))+1e-3;
v_lo = (v_0/1000)*(v_min(:,sum(mask,1)>0)-v_k_base(:,sum(mask,1)>0))-1e-3;
% krūvio būseną
A_soc_end = zeros(N,N*max(Ki));
for tt = 1 : max(Ki)
A_soc_end(:,(tt-1)*N+1:(tt)*N) = diag(mask(:,t_0+tt))*dt;
end
% Krūvio būsenos žingsnis
A_soc = repmat(A_soc_end,max(Ki)-1,1);
for nn = 1 : max(Ki)-1
A_soc((nn-1)*N+1:nn*N,(nn)*N+1:end) = ...
0*A_soc((nn-1)*N+1:nn*N,(nn)*N+1:end);
end
Indices=zeros(1,sum(max(Ki)-Ki));
prev_count = 0;
for ii = 1:length(Ki)
Indices_Ki = (Ki(ii)):(max(Ki)-1);
Indices(prev_count+1:prev_count+length(Indices_Ki)) = ...
(Indices_Ki-1)*N+ii;
prev_count = prev_count +length(Indices_Ki);
end
A_soc(Indices,:)=[];
A_soc(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_ev = A(:,nodes);
% matricos kartojimas
A_ev_re = zeros(length(A)*max(Ki),sum(Ki));
prev_row = 0;

```

```

prev_col = 0;
for tt = 1:max(Ki)
N_connected = sum(mask(:,t_0+tt));
A_ev_re(prev_row+1:prev_row+length(A),...
prev_col+1:prev_col+N_connected) = ...
A_ev(:,mask(:,t_0+tt)==1);
prev_row = prev_row+length(A);
prev_col = prev_col+N_connected;
end
% Nusileidimo parametrai
alpha = 0.5;
beta = 0.8;
mu = 10;
t = 1;
t_pre = t;
num_constraints = 2*sum(Ki)+2*size(A_soc,1)+2*size(A_ev_re,1);
Epsilon_lambda = 1e-20;
Epsilon_Barrier = 1e-50;
% maksimalus iteracijų skaičius
Max_Iter=1000;
for ii = 1:Max_Iter
% įkrovos būvio trajektorija
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
x_k = A_soc*u(mm)';
v = A_ev_re*u(mm)';
% Dabartinės vertės skaičiavimai
H = t*sum(tariffs*u') ...
- sum(log(-soc_lo+x_k)+log(soc_up-x_k))...
- sum(log(-u_lo(mm)'+u(mm)'+log(u_up(mm)'+u(mm)')))...
- sum(log(-v_lo(:)+v)+log(v_up(:)-v));
dH_du0 = repmat(tariffs,N,1);
dH_du = t*dH_du0(mm)' ...
+ A_soc*(1./(soc_lo-x_k)+1./(soc_up-x_k))...
+ eye(sum(Ki))*(1./(u_lo(mm)'+u(mm)'+...
1./(u_up(mm)'+u(mm)')))...
+ A_ev_re*(1./(v_lo(:)-v)+1./(v_up(:)-v));
I_x_lo = diag(1./(soc_lo-x_k).^2);
I_x_up = diag(1./(soc_up-x_k).^2);
I_u_lo = diag(1./(u_lo(mm)'+u(mm)')^2);
I_u_up = diag(1./(u_up(mm)'+u(mm)')^2);
I_v_lo = diag(1./(v_lo(:)-v).^2);
I_v_up = diag(1./(v_up(:)-v).^2);
Hessian = A_ev_re'*I_v_lo*A_ev_re + A_ev_re'*I_v_up*A_ev_re +...

```

```

I_u_lo + I_u_up + A_soc'*I_x_lo*A_soc + A_soc'*I_x_up*A_soc;
% gradiento stabilizavimas
dH_du_normalized = dH_du/norm(dH_du);
% Niutono metodus su apribojimais
if rcond([Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))])>1e-15
Delta_x_w = ...
-[Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))]\...
[dH_du_normalized;zeros(size(A_soc_end,1),1)];
else
break
end
% Randa atitinkančius elementus
Delta_x = Delta_x_w(1:length(dH_du_normalized));
lambda = (Delta_x'*Hessian*Delta_x)^2;
if t > t_pre && lambda < Epsilon_lambda
break
else
end
t_pre = t;
% ieškančių eilučių dydis
Ts = 100000;
H_ir = Inf;
while (H_ir > (H+alpha*Ts*(dH_du_normalized'*Delta_x)))
u_ir = u;
u_ir(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x';
x_k_ir = A_soc*u_ir(mm)';
v_ir = A_ev_re*u_ir(mm)';
% tikrinamos ar vertės yra diapazone
if (sum(u_ir(mm)' < u_lo(mm)') + sum(u_ir(mm)' > u_up(mm)') ...
+ sum(x_k_ir < soc_lo) + sum(x_k_ir > soc_up) ...
+ sum(v_ir < v_lo(:)) + sum(v_ir > v_up(:)))>0
Ts=beta*Ts;
else
H_ir = t*tariffs*sum(u_ir,1)' ...
- sum(log(-soc_lo+x_k_ir)+log(soc_up-x_k_ir))...
- sum(log(-u_lo(mm)'+u_ir(mm)')+log(u_up(mm)'+u_ir(mm)'))...
- sum(log(-v_lo(:)+v_ir)+log(v_up(:)-v_ir));
Ts=beta*Ts;
end
if lambda < Epsilon_lambda
t=mu*t;
break
end
end
end

```

```

% Grafikai
if ii == 1 && watch_evolution == 1
figure(11)
clf(figure(11),'reset')
set(gcf,'color','w');
fig = gcf;
fig.PaperPositionMode = 'auto';
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title('Phase II: Press any key to continue');
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause
end
if watch_evolution == 1 && sum(ii == [1 0:5:Max_Iter])==1
figure(11)
% kaupiklių įkrovos
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x],'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-2 max(soc_c)+4])
set(gca,'YTick',0:2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'SoC [kWh]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
% bendra apkrova
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_,'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Base load')
hold on

```

```

plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_+sum(u,1),'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','+ total EV load')
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','southwest','FontSize',10);
% įtampų grafikas
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,(v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)',...
'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'Voltage per node [V]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
% iškrovos grafikas
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_up)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_lo)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid
set(gcf,'NextPlot','add');

```

```

axes;
h = title(['Phase II: Iteration: ' num2str(ii) ', lamda: '...
num2str(lambda/2) ', Ts: ' num2str(Ts) ', m/t: '...
num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause(0.01)
end
u_pre = u;
u_pre(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x';
if num_constraints/t<Epsilon_Barrier
break
else
u = u_pre;
end
end
if watch_evolution == 1
figure(11)
% Įkrovos būsenos grafikas
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x],'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-2 max(soc_c)+4])
set(gca,'YTick',0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h]'])
ylabel(gca,'SoC [kWh]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
% Bendras apkrovos grafikas
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_,'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...

```



```

'Base load')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_+sum(u,1),'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','+ total EV load')
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','southwest','FontSize',10);
% įtampų grafikas
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,(v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)',...
'LineWidth',1.5, 'DisplayName','Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
hold off
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'Voltage per node [V]')
set(gca,'FontSize',12)
grid
% iškrovos grafikas
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_up)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_lo)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,['Time [',num2str(dt),'h']])
ylabel(gca,'Power [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid

```

```
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase II: Iteration: ' num2str(ii) ', lamda: '...
num2str(lambda/2) ', Ts: ' num2str(Ts) ', m/t: '...
num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause(1)
end
pow_traj_ast = u;
soc_traj_ast = cumsum([soc_0 u*dt],2);
end
```