



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Paulius Paškevičius

**ADMINISTRACINIŲ PASTATŲ KOMPLEKSO SU SAULĖS
ELEKTRINE IR KAUPIKLIŲ SISTEMA APKROVOS
VALDYMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Vytautas Sučila

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

ADMINISTRACINIŲ PASTATŲ KOMPLEKSO SU SAULĖS
ELEKTRINE IR KAUPIKLIŲ SISTEMA APKROVOS
VALDYMO TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)

Vadovas

2017-06-05 lekt. dr. Vytautas Sučila

Recenzentas

2017-06-05 lekt. dr. Dainius Slušnys

Projektą atliko

2017-06-05 Paulius Paškevičius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Paulius Paškevičius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija, 621H63003

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Administracinių pastatų komplekso su saulės elektrine
ir kaupiklių sistema apkrovos valdymo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 25 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Pauliaus Paškevičiaus baigiamasis projektas tema „Administracinių pastatų komplekso su saulės elektrine ir kaupiklių sistema apkrovos valdymo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o 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)

Paškevičius, Paulius. Administracinių pastatų komplekso su saulės elektrine ir kaupiklių sistema apkrovos valdymo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Vytautas Sučila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *energijos apkrovos valdymas, energijos kaupiklių sistema, saulės elektrinė, mikrotinklas, iškrovos lygis*

Kaunas, 2017 – 57 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe tiriamas KTU miestelyje rengiamos saulės elektrinės ir kaupiklių sistemos mikrotinklas. Aptarti energijos apkrovos valdymo būdai. Apžvelgtos kaupiklių sistemos technologijos, jų privalumai ir trūkumai bei šėšėliavimo įtaka generuojamam saulės elektrinės energijos kiekiui bei baterijų įkrovimui. Atlikta tiriamų pastatų, KTU IX rūmų ir E. mokymosi centro, apkrovos grafiko kreivės analizė. Įvertinus saulės apšvietos vertę į plokštumą apskaičiuotas planuojamas saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis. Atlikta saulės elektrinės ir pastatų komplekso grafiko padengiamumo analizė. Įvertinus perteklinį saulės elektrinės generuojamą energijos kiekį, apskaičiuota kaupiklių sistemos talpa. Matlab Simulink programiniame pakete atliktas analizuojamos sistemos modelis. Ištirtas saulės elektrinės ir kaupiklių sistemos bendras veikimas skirtingais metų laikais. Modeliavimo aplinkoje atlikta meteorologinių sąlygų įtaka generuojamam energijos kiekiui bei elektros energijos, reikalingos pastato apkrovai padengti, laiko intervalų analizė.

Paškevičius Paulius, Research on Load Management of Office Building Complex with Solar Power Plant and Storage System: Master's thesis in *Electrical Power Engineering* / supervisor lekt. dr. Vytautas Sučila. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *demand side management, energy storage system, solar power plant, microgrid, state of charge.*

Kaunas, 2017 – 57 p.

SUMMARY

The aim of this thesis is to investigate microgrid of the solar power plant and energy storage system, installed at the KTU campus. Methods of demand side management are discussed. The thesis includes an overview of energy storage system technologies, their advantages and disadvantages, as well as the influence of shading on the amount of the generated energy and the charge of batteries. Analysis of the load curve of the investigated buildings, Chamber IX and e-learning centre of KTU, was carried out. Evaluation of the sun's illumination value of the surface resulted in the calculation of the amount of expected energy to be generated in the solar power plant. Schedule coverage analysis of the solar power plant and the building complex was performed. Evaluation of the excess solar energy was followed by calculation of the capacity of the collector system. 'Matlab Simulink' programming environment was used to develop the model of the analysed system. The joint operation of the solar power plant and the energy storage system was investigated for various times of the year. The modelling environment was used to analyse the impact of weather conditions on the amount of the generated energy as well as analysis of the time intervals necessary to cover the power consumption of a building.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
ĮVADAS	9
1. APŽVALGINĖ DALIS	11
1.1 VARTOTOJO APKROVOS VALDYMAS	11
1.2 ELEKTROS ENERGIJOS KAUPIMO TECHNOLOGIJOS	16
1.3 ŠEŠĖLIAVIMO ĮTAKA SAULĖS FOTOELEMENTO VOLTAMPERINEI CHARAKTERISTIKAI IR BATERIJOS ĮKROVIMO CIKLUI	19
2. TIRIAMOJO DARBO DALIS	24
2.1 SISTEMOS APRAŠYMAS	24
2.2 ELEKTROS ENERGIJOS POREIKIS PASTATŲ KOMPLEKSE	25
2.3 SAULĖS ELEKTRINĖS GENERUOJAMO ENERGIJOS KIEKIO PLANAVIMAS.....	26
2.4 GENERACIJOS IR APKROVOS VERTINIMAS	28
2.5 ENERGIJOS KAUPIKLIŲ TALPOS NUSTATYMAS.....	33
2.6 SISTEMOS ELEKTROS TINKLO MODELIAVIMAS	34
3. MODELIOJAMOS SISTEMOS TYRIMŲ REZULTATAI	40
IŠVADOS	54
LITERATŪROS SĄRAŠAS	55
PRIEDAI	57
1 PRIEDAS. Analizuojamos sistemos modeliavimo algoritmas.....	58

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Skirtingų energijos kaupiklių panaudojimo galimybių palyginimas	18
2.1 lentelė. Saulės fotoelemento techniniai parametrai.	27
2.2 lentelė. Prognozuojamas saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis.....	28
2.3 lentelė. Saulėtų ir debesuotų dienų skaičius kiekvieną mėnesį ir metų ketvirtį 2015 m.....	30
2.4 lentelė. Pastatų komplekso ir saulės elektrinės energijos kiekiai per vieną saulėtą ir debesuotą mėnesio dieną.	32
3.1 lentelė. Kaupiklių sistemos efektyvumo vertinimas skirtingiems metų laikams	52
3.2 lentelė. Autonominio darbo režimai skirtingais metų laikais.....	53

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Elektros energijos poreikio prognozavimas pagal pasaulio regionus	12
1.2 pav. Energijos apkrovos poreikio valdymo programos	14
1.3 pav. Energijos kaupiklių galios ir energijos atidavimo priklausomybė nuo laiko	19
1.4 pav. Saulės fotoelemento srovės tekėjimo krypties pokytis nulemtas modulio šėšėliavimo	20
1.5 pav. Šėšėliavimo įtaka modulio voltamperinei charakteristikai	21
1.6 pav. Idealios baterijos principinė schema ir voltamperinė charakteristika	21
1.7 pav. Baterijos įkrovimo (a) ir iškrovimo (b) ciklas	22
1.8 pav. Baterijos įkrovimo srovės priklausomybė nuo fotoelemento šėšėliavimo	23
2.1 pav. Principinė elektros energijos tinklo schema.....	24
2.2 pav. 2015 metų KTU IX rūmų ir E. mokymosi centro suvartojamas el. energijos kiekis	26
2.3 pav. SE ir pastatų generuojamas/suvaldomas el. energijos kiekis 2015 m.	29
2.4 pav. SE generuojamos energijos paros kreivės priklausomybė nuo meteorologinių sąlygų ..	30
2.5 pav. Modelio jungimo schema <i>Matlab Simulink</i> programiniame pakete.....	34
2.6 pav. 2015 m. balandžio 16 d. apkrovos paros grafikas, pritaikius judančių vidurkių metodą ..	35
2.7 pav. Rugsjūčio 3 dienos modeliavimas (kaupiklių talpa – 2 233 Ah).....	38
3.1 pav. Balandžio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas.....	40
3.2 pav. Balandžio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	41
3.3 pav. Balandžio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas....	42
3.4 pav. Balandžio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	42
3.5 pav. Rugsjūčio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas	43
3.6 pav. Rugsjūčio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	43
3.7 pav. Rugsjūčio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas ...	44
3.8 pav. Rugsjūčio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	45
3.9 pav. Lapkričio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas	46
3.10 pav. Lapkričio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	46
3.11 pav. Lapkričio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas ..	47
3.12 pav. Lapkričio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	48
3.13 pav. Sausio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas	48
3.14 pav. Sausio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	49
3.15 pav. Sausio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas	50
3.16 pav. Sausio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas	50

IVADAS

Elektros energetikos sistema yra viena iš sudėtingiausių ir labiausiai išvystytų sistemų pasaulyje. Elektros energijos valdymas pagal energijos generavimą bei skirstymą tokioje sistemoje yra optimizuotas, tačiau elektros energijos poreikio optimizavimas dėmesio susilaukė tik paskutiniaisiais dešimtmečiais. Tai lėmė energijos poreikio valdymo įgyvendinimą. Šis procesas apima įvairius metodus, siekiant pagerinti sistemos efektyvumą. Vartotojo apkrovos valdymo proceso įgyvendinimas svyruoja nuo apkrovos efektyvumo didinimo, naudojant geresnes medžiagas, įgyvendinti pažangius energetikos tarifus įvairiems vartojimo modeliams, iki sudėtingų sistemų ir įrenginių panaudojimo, skirtų kontroliuoti paskirstytosios energijos šaltinius.

Aplinkosaugos reikalavimai ir aukštos iškastinio kuro kainos, gali padidinti atsinaujinančių šaltinių panaudojimą išmaniuosiuose tinkluose [14].

Atsinaujinantys energijos šaltiniai padeda sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį ir taip prisideda prie Europos Sąjungos tikslo mažinti išmetamų teršalų kiekį iki 80 proc. Tačiau atsinaujinantys energijos šaltiniai tampa vis didesniu iššūkiu elektros tinklams. Taip pat elektros perdavimo ir skirstymo operatoriams darbą apsunkina elektromobilių krovimo stotelės. Jų apkrovos didelės, o panaudojimo laikas – nenuspėjamas. Elektros tinklai turi būti stabilūs, o elektros energijos vartotojai, bet kuriuo paros metu, privalo būti aprūpinti elektros energija. Dėl šios priežasties, elektros tinklai nuolatos turi išlaikyti pusiausvyrą tarp elektros energijos paklausos ir pasiūlos. Tačiau, atsinaujinantys šaltiniai bei nenuspėjamos elektromobilių krovimo stotelių apkrovos sukelia tiek elektros energijos generavimo, tiek vartojimo disbalansą. Ypač tai pasakytina apie fotovoltinių elementų ar vėjo elektrinių energijos gamybą, kuri nesutampa su vartotojų energijos paklausos modeliu. Šiems energijos generavimo šaltiniams didelę įtaką turi ir aplinkos sąlygos, o tai dar labiau pasunkina elektros energijos generavimo numatymą.

Darbo tikslas – ištirti vartotojo elektros energijos valdymo įtaką energijos, gaunamos iš atsinaujinančių energijos šaltinių, panaudojimo efektyvumą.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti saulės elektrinės ir pastatų komplekso apkrovos valdymo technologijas;
2. elektros energijos kaupiklių tyrimas:
 - kaupiklių sistemų technologijos;
 - skirtingų technologijų privalumų ir trūkumų palyginimas.
3. surinkti informaciją ir sudaryti KTU IX rūmų ir E. mokymosi centro elektros energijos apkrovos grafiko analizę;
4. nustatyti saulės elektrinės sugeneruoto energijos kiekio įtaką baterijos įkrovimo ciklui;
5. sudaryti analizuojamos sistemos modelį;
6. pasinaudojus modeliavimu, analizuojamam pastatui parinkti kaupiklių sistemos talpos dydį ir įvertinti jo įtaką analizuojamai sistemai.

1. APŽVALGINĖ DALIS

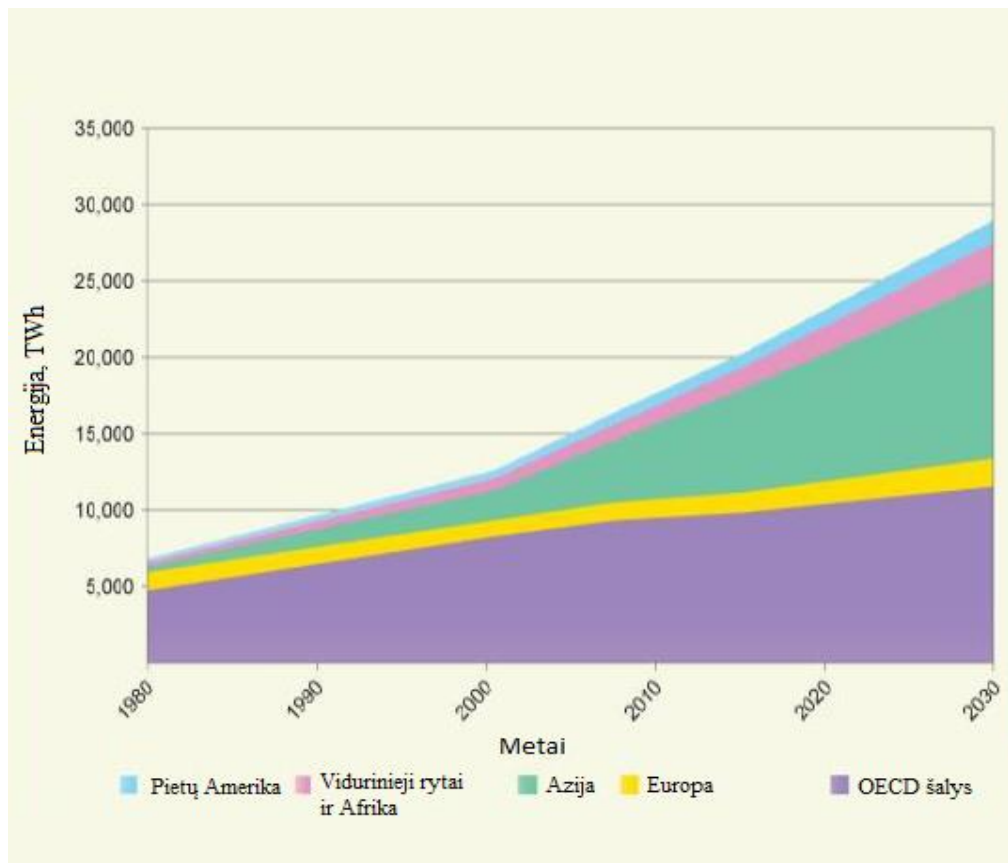
Kompensuoti nepastovaus pobūdžio atsinaujinančių energijos šaltinių generavimą galima panaudojant greitaveika pasižyminčias dujų turbinas ar dyzelinius generatorius. Vienas iš alternatyvių problemos sprendimo būdų yra papildomai suderinti vartojimo poreikius. Kaip atitinkamos programos, dažnai yra siūlomas ir nurodomas energijos apkrovos valdymas ir paklausos reguliavimas. Energijos paklausos valdymas yra komunalinių paslaugų veiklos planavimas, įgyvendinimas ir stebėseną, kuriomis siekiama sąlygoti klientų elektros energijos vartojimą taip, kad būtų pasiekti norimi apkrovos grafiko pokyčiai [3].

1.1 VARTOTOJO APKROVOS VALDYMAS

Tradiciniai elektros energijos tiekimo metodai vartotojui yra tuomet, kai elektros energija tiekama iš riboto skaičiaus elektrinių. Šis metodas buvo sėkmingas iki paskutinio dešimtmečio, kai atsinaujinantys energijos šaltiniai bei elektromobilių pramonė pradėjo skverbtis į elektros energetikos sistemą. Šie alternatyvūs modeliai padarė elektros energijos tiekimą dvikryptį. Toks elektros energijos tiekimas reikalauja naujų, sudėtingesnių kontrolės metodų, kurie galėtų stebėti ir vertinti elektros energijos gamybos ir suvartojimo kiekius [3].

Statiško pobūdžio elektros apkrovos formos keitimo į dinamišką koncepcija jau buvo analizuojama seniai, tačiau ši sąvoka nebuvo įgyvendinta tol, kol nebuvo prieinama pasaulinė ryšių tinklų sistema ir įterptosios sistemos, kurios būtų pakankamai stiprios paskirstyti reikalingas elektros energijos apkrovas. Elektros energijos poreikio didėjimas, nepaisant elektros apkrovų padidėjusio efektyvumo, lėmė vartotojo energijos poreikio valdymo (angl. *Demand side management*) plėtrą [2].

Padengti didėjantį elektros energijos poreikį galima kartu didinant elektros energijos gamybos apimtį. Tačiau pagrindinė problema, su kuria susiduriama yra tai, kad elektros tinklo pralaidumas tuoj pasieks savo minimumą. Tai įvyksta dėl didelės galios atsinaujinančios energetikos projektų – tokių kaip jūrinių vėjo elektrinių parkų Šiaurės jūroje integravimas į elektros tinklą, kurie apsunkina visos esamos elektros energijos sistemos darbą. Norint padidinti esamo tinklo panaudojimo efektyvumą, reikalinga įdiegti sumanų elektros energijos paklausos reguliavimą [4].



1.1 pav. Elektros energijos poreikio prognozavimas pagal pasaulio regionus [14]

Elektros tinklai, kuriuose integruota tokia galimybė, dažnai įvardijami kaip išmanieji tinklai. Mokslinėje literatūroje dažnai yra minimi ir pastatai, kurie įvertina atsinaujinančių energijos šaltinių generavimą ir vartojimą. Tolimesnis sistemos tobulinimas yra energijos poreikio atidėjimas, atsižvelgiant į paskirstytą atsinaujinančių šaltinių darbą. Tai prieštarauja elektros sistemai, kuri buvo sukurta remiantis technologija: energijos srautai iš aukštesnės įtampos lygio (nuo centralizuotų elektrinių) į žemesnį (vartotojams). Paskirstytosios energijos šaltiniai – įprastai dirba žemuose įtampos lygiuose, tačiau jie potencialiai gali sukelti dvikryptį elektros energijos srautą, kuriam elektros tinklai nebuvo pritaikyti [3].

Energijos vartojimo valdymas gali padėti realizuoti modelį, kai išanalizuojami energijos poreikiai praeityje ir pagal tai prognozuojami energijos poreikiai ateityje. Šis modelis padėtų spręsti tiek atsinaujinančių šaltinių gamybos svyravimus, tiek jų pasiskirstymus.

Elektros energijos poreikio reagavimas į paklausą (angl. *Demand response*) leidžia vartotojams aktyviai dalyvauti energetikos sistemoje. Šis aktyvus dalyvavimas rinkoje pasireiškia energijos poreikio reguliavimui, priklausomai nuo realiu laiku kintančios elektros energijos kainos. Tokiu būdu stengiamasi palaikyti tinklo stabilumą. Elektros energijos apkrovos reguliavimas gali būti skirstomas į du pagrindinius tipus. Pirmasis tipas – kai vartotojas dalyvauja elektros energetikos rinkoje tiesiogiai, t. y. vartotojas, sekdamas elektros kainą bei jos pokytį, skirtingu paros režimu reguliuoja valdomo objekto apkrovą. Tokiu būdu didesni

energijos kiekiai suvartojami esant mažesniai elektros energijos tarifui. Vartotojas, naudodamasis šiuo apkrovos reguliavimo tipu, gali sumažinti mėnesines išlaidas energijai, o elektros energetikos sistema – sumažina energijos vartojimą pikiniu metu [3][9].

Antrasis tipas yra paremtas skatinimo ir paramos programa. Tokia programa, o kartu ir apkrovos galios valdymas priklauso nebe nuo vartotojo, o nuo energijos skirstymo ir perdavimo operatorių. Elektros energijos vartotojams, įsirengusiems kaupimo sistemas suteikiama kompensacija už energijos saugojimą. Įsirengdamas elektrinę su kaupiklių sistema, energijos vartotojas sudaro sutartį su energijos skirstymo operatoriumi, jog kaupiklių sistemoje palaikys tam tikrą rezervinį energijos kiekį, kurį esant tinklo svyravimams ir perteklinės energijos poreikiui, tinklo operatorius galės panaudoti sistemai stabilizuoti ir tiekiamos energijos kokybei užtikrinti. Tokiu būdu vartotojas, įsirengiantis saulės ar vėjo elektrinę, gali ne tik atpiginti diegiamos sistemos kainą, bet ir panaudoti perteklinę energiją. Tokio tipo skatinimo programa naudinga stambiems klientams, įsirengusiems didelės galios elektrinę [13].

Viena iš elektros energijos poreikio reguliavimo skatinimo ir paramos programos kryptių yra energijos susigrąžinimo, atsiėmimo efektas (angl. *the payback / rebound effect*). Elektrinę įsirengęs vartotojas ir perteklinį energijos kiekį patiekęs į tinklą, gali susigrąžinti visą arba dalimis patiektą kiekį (priklausomai nuo sutarties sąlygų) kitomis dienos valandomis. Kadangi nėra jokio apribojimo, priklausančio nuo vartotojo tipo (rezidentinis, juridinis komercinis ar juridinis pramoninis), toks energijos susigrąžinimo efektas gali sukelti naują pikinio režimo ir smailių formavimosi tašką paros ciklo apkrovos grafike [16].

Energijos apkrovos valdymo plėtojimo trikdžiai

Elektros energijos poreikio valdymo ir poreikio reakcijos sistemų planas Europoje pastaruosius penkerius metus buvo stipriai plėtojamas, tačiau jis vis dar nėra paruoštas tinkamai funkcionuoti. Europos Sąjungoje nėra parengta įstatymų pilnaverčiam sistemos naudojimui. Pagrindiniai elektros energijos poreikio reakcijos panaudojimo trikdžiai:

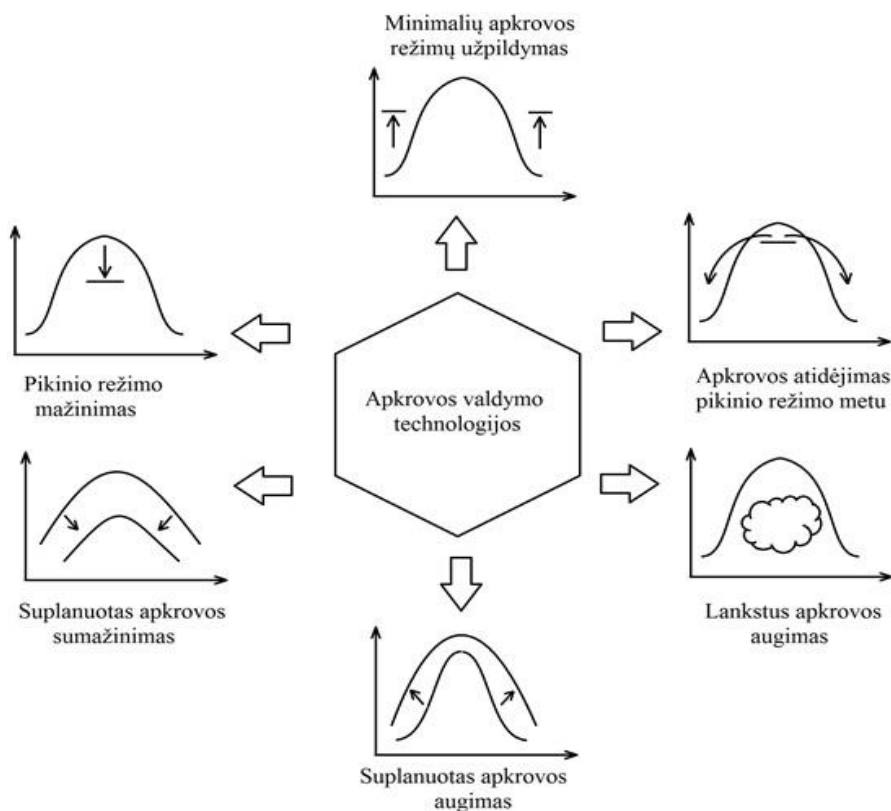
- trūksta pažangaus tinklo protokolų, nurodančių vartotojų bendravimą su išoriniu tinklu dėl apkrovų;
- nenustatytos energijos rinkos taisyklės, kurios nurodo dinamiškas elektros energijos kainas, nesudaryti nuo paros laiko priklausomi elektros energijos režimai (pikinis ir nepikinis tarifas);
- aukšta energijos kaupimo sistemų kaina (baterijų, šilumos rezervuarų), kurią sunku paprastam vartotojui įsigyti;
- sudėtingas elektros energijos, gaunamos iš atsinaujinančių energijos šaltinių (saulės, vėjo) prognozavimas;

- trūksta švietėjiškos informacijos dėl elektros energijos valdymo ir poreikio reakcijos privalumų tiek galutiniams vartotojams, tiek elektros tinklų operatoriams bei tiekėjams [16].

Energijos apkrovos valdymas susijęs su veikla, kuri orientuota į planuotą elektros apkrovos grafiko kreivės keitimą. Tokiu būdu siekiama sumažinti arba suskirstyti apkrovos poreikį bei gauti ekonominę naudą. Energijos apkrovos valdymas taip pat padidina sistemos naudingumo koeficientą, kuris lemia elektros tinklo nuostolius. 1.2 paveiksle pateikiamos energijos apkrovos valdymo technologijos: pikinio režimo užpildymas, minimalių apkrovos režimų pildymas, srateginis apkrovos padidėjimas ir sumažėjimas, apkrovos planavimas bei lankstus apkrovos augimas [5].

Elektros skirstymo ir tiekimo operatoriai, pasinaudodami energijos apkrovos valdymu, klientams ir vartotojams gali daryti įtaką energijos poreikio skirstymui ir elektros naudojimo laiko atidėjimui. Apkrovos valdymas yra pritaikytas taip, kad energijos vartotojas galės tęsti energijos vartojimą kitomis paros valandomis, o tinklui nauda pasiekama modifikuojant apkrovos kreivę. Apkrovos valdymo metodų tipai:

1. apkrovos išlyginimas;
2. apkrovos kontroliavimas;
3. tarifų lengvatos arba nuobaudos [5][13].



1.2 pav. Energijos apkrovos poreikio valdymo programos [5]

Apkrovos išlyginimas. Apkrovos išlyginimas padeda optimizuoti nusistovėjusį apkrovos lygį. Gyvenamuosiuose namuose, esant didesniam energijos poreikiui, apkrovos išlyginimą galima atlikti nenaudojant jokių rezervinių generavimo šaltinių. Klasikinės apkrovos išlyginimo kreivės yra pateikiamos 1.2 paveiksle (a, b ir c kreivės) ir skirstomos į: pikinio režimo mažinimą, minimalių apkrovos režimų užpildymą, apkrovos atidėjimą pikinio režimo metu [13].

Pikinio režimo mažinimas (angl. *Peak Clipping*) – apkrovos sumažinimas didelio energijos poreikio metu. Lyginant paros grafiko kreivę ir pikinio režimo trukmę, pastaroji trunka greitai, todėl ši apkrovos valdymo forma turi mažai įtakos visai apkrovos kreivei, didžiausią dėmesį skiria pikinio režimo mažinimui [13].

Minimalių apkrovos režimų užpildymas (angl. *Valley Filling*) t. y. – ne pikinio režimo metu susidarančių apkrovos kreivių įdubų užpildymas, gali būti atliekamas pritaikant terminės energijos technologijas – karšto vandens ruošimas ir kaupimas vandens talpose ar požeminiuose kaupikliuose. Energijos panaudojimas išlygintų apkrovos kreivę bei pakeistų iškastinio kuro panaudojimą. Dėl šios priežasties, toks energijos panaudojimas priskiriamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažinimo programoms [5] [13].

Apkrovos atidėjimas (angl. *Load Shifting*) – tai toks energijos valdymo būdas, kuris sudarytas iš pikinio režimo mažinimo bei minimalių apkrovos režimų užpildymo, kuomet padidėjusios energijos poreikio vertės, grafike yra perstumiamos į minimalių poreikių vertes. Panaudojimo pavyzdžiai apima saugojamo vandens šildymą, patalpų šildymą ar vėdinimą ir vartotojo apkrovos perkėlimą. Apkrovos atidėjimas skiriasi nuo pikinio režimo technikos mažinimo tuo, kad apkrovos atidėjimo technologijoje pikinės dienos vertės patenka į bendrą apkrovos paklausą, o pikinio režimo mažinimo metu – jos pašalinamos [6] [13].

Apkrovos kontroliavimas. Apkrovos kontroliavimas perteikiamas 1.2 paveikslo d, e ir f kreivėmis. Šiam energijos valdymui priskiriamos strateginės apkrovos didinimo ir mažinimo programos [5].

Apkrovos didėjimo programos įgyvendinamos siekiant pagerinti energijos vartotojo produktyvumą laikantis aplinkos apsaugos reikalavimų. Pagrindinis programos tikslas – sumažinti energijos tiekimą ir apkrovos padengimą naudojant iškastinį kurą. Taip pat sumažėja energijos poreikis iš „tradicinių“ energijos tiekėjų (Lietuvoje pvz. Lietuvos elektrinė, Kruonio Hidroakumuliacinė elektrinė, Vilniaus elektrinė – 3 ir t.t.), padidėja rezervinių energijos tiekėjų skaičius, skatinama energijos rinka. Tokia energijos valdymo technologija turi ir neigiamų padarinių. Esant prastai valdomai elektros energijos rinkai, toks sistemos panaudojimas gali privesti prie viso tinklo disbalanso [13].

Apkrovos augimas (angl. *Strategic Load Growth*) padidina energijos poreikį, kuris skatina energijos pardavimo rinką. Padidėjusi energijos paklausa, sudaro sąlygas pritraukti naujų

rinkos dalyvių. Jų įsitraukimas, o kartu ir paskirstytųjų energijos šaltinių steigimas plečia ir stiprina energetikos sistemą. Apkrovos augimas gali būti siejamas su elektrifikacija. Elektrifikacija – tai elektros energijos taikymas ūkio reikalams. Šiuo metu elektrifikacija pritaikoma naujai diegiamoms ir vis labiau populiarėjančioms pramonės technologijoms, transporto priemonėms, pramoniniams procesams ar šildymo ir automatikos technologijoms [13].

Strateginis apkrovos mažinimas (angl. *Strategic Load Conservation*) yra įvardijamas kaip įrankis, nukreiptas į galutinio vartojimo sąnaudų mažinimą, o kartu ir energijos panaudojimo būdo keitimą, pavyzdžiui, naudojamų prietaisų efektyvumo didinimas ar pastatų terminės būklės gerinimas (izoliacijos ar sandarinimo didinimas, našesnių langų ir jų paketų diegimas). Taigi, strateginis apkrovos mažinimas susideda iš gyvenamojo namo būklės gerinimo siekiant padidinti namo ekonominį efektyvumą [13].

Tarifų lengvatos arba nuobaudos. Energijos perdavimo arba skirstymo operatorius taikydamas šį energijos valdymo tipą gali skatinti tam tikrą energijos naudojimo būdą pagal tarifines lengvatas, kad klientai panaudodami elektros energiją apkrovai padengti tam tikru laiku pasiektų geresnes energijos kainas. Tarifų lengvatos arba nuobaudos apima:

1. Vartojimo laiko tarifai – energijos perdavimo arba skirstymo operatorius numato skirtingus mokesčius už elektros energijos panaudojimą skirtingu metu. Piko metu, elektros energijos kainos didėjimas paskatintų vartotoją didelės apkrovos reikalaujančius įrenginius paleisti ne piko metu, kai kainos yra mažesnės.
2. Galios faktoriaus mokesčiai. Įprastai energijos naudingumo koeficientas yra 0,90 arba 0,95. Vartojamos energijos naudingumo koeficientui nukritus žemiau nustatytos vertės – vartotojai baudžiami papildomais mokesčiais. Tokiu būdu vartotojai yra įpareigoti įsirengti ir naudoti aukštos energetinės klasės įrenginius.
3. Realus laiko kainodara – sukuriama elektros energijos rinka, kuri veikia kaip pirkimų – pardavimų (akcijų) rinka. Šios sukuriamos el. energijos rinkos požymis: nuolatinis arba valandinis energijos kainos kitimas, priklausantis nuo tinklo apkrovos [5] [13] [16].

1.2 ELEKTROS ENERGIJOS KAUPIMO TECHNOLOGIJOS

Išmanieji tinklai sudarys dvipusio ryšio tinklus. Šių besiformuojančių tinklų paskirtis – efektyviam sistemos darbui sujungti paskirstytuosius energijos šaltinius ir energijos kaupiklių sistemas su tradiciniais energijos gamybos, perdavimo ir paskirstymo įrenginiais. Energijos kaupimo sistemos, kuriant pažangius elektros tinklus, sklandžiam sistemos darbui gali suteikti tokias funkcijas kaip:

1. Palaikyti momentinę galios pusiausvyrą, siekiant išvengti didelės galios disbalanso tarp energijos apkrovos ir generacijos, išlaikyti kokybiškos įtampos tiekimą, stabilizuoti tinklo dažnį ir fazę.
2. Gerinti maitinimo kokybę, patenkinti įvairių vartotojų poreikius ir mažinti nestabilių tinklų nuostolius.
3. Sumažinti besisukančių rezervinių energijos šaltinių skaičių (dėl momentinės galios) ir kartu stiprinti ekonomiką.
4. Greitai paleidžiami sistemos persikrovimo ir maitinimo atkūrimo metu po gedimų [1] [6] [16].

Efektyviam energijos panaudojimui galima pasinaudoti energijos kaupiklių sistema. Pirminiame procese, energija paverčiama į kitą formą (gali būti talpinama mechaninėje, cheminėje arba terminėje), kurioje yra kaupiama. Esant energijos poreikiui, kaupikliuose sukaupta energija konvertuojama atgal ir panaudojama padengti atsiradusiai apkrovai [8].

Atliekamas įvairių kaupiklių technologijų aptarimas, atsižvelgiant į skirtingą energijos kaupimo poreikį ir paskirtį. Išvardinami pagrindiniai baterijų trūkumai ir privalumai. Elektros energijos kaupiklių panaudojimo technologijos skirstomos į tris kategorijas [1].

Elektros kokybės užtikrinimo. Šio tipo kaupiklių paskirtis – energija aprūpinti trumpu laiko intervalu, kuomet reikalingas nepertraukiamas elektros energijos tiekimas. Kaupiklių veikimo trukmė iki vienos sekundės [1].

Trumpalaikės perjungimo energijos. Kaupiklių veikimo trukmė siekia nuo kelių sekundžių iki minučių. Jie skirti vartotojus aprūpinti energija, kuomet elektros energijos tiekimas yra perjungiamas nuo vieno šaltinio prie kito [1].

Energijos valdymo. Tokio tipo kaupikliuose energija kaupiama tam, kad elektros energijos gamyba nepriklausytų nuo jos vartojimo. Įprastai, kaupikliai įkraunami tuomet, kai energija pigi, o sukaupta energija panaudojama esant didesniai poreikiui. Vartotojas, naudojantis šio tipo kaupiklius gali atsiriboti nuo energetikos sistemos keletą ar daugiau valandų [1].

Energijos kaupiklių savybės priklauso nuo jų technologijos. Kaupiklių privalumai ir trūkumai, atsižvelgiant į jų technologiją, pateikiami

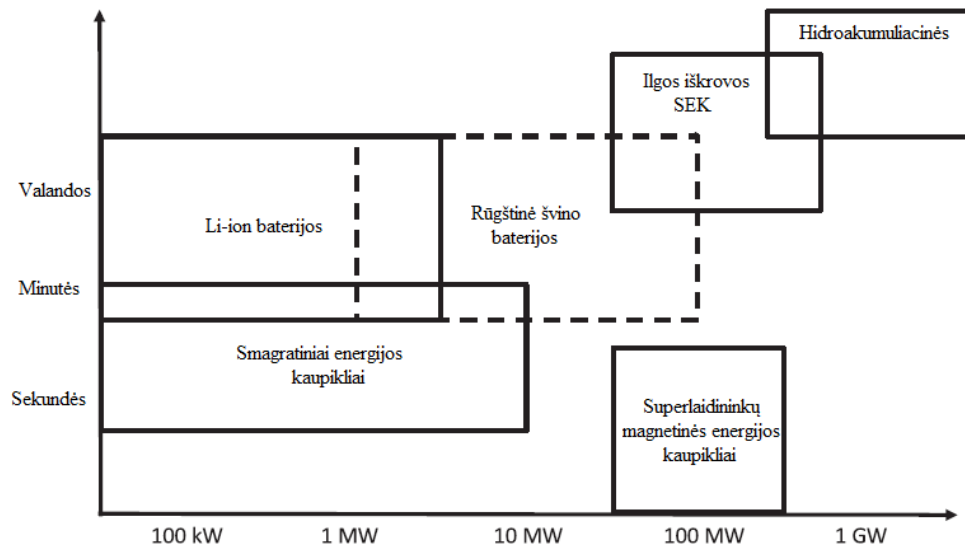
1.1 lentelėje. Lentelėje energijos kaupiklių naudojimo tinkamumas suskirstytas į keturias grupes ir pažymėtas:

- be žymės – naudoti neįmanoma arba ekonomiškai nenaudinga,
- – naudoti galima ir tikslinga,
- – šiam tikslui naudoti galima,
- – naudoti įmanoma, bet praktiškai ar ekonomiškai netikslinga.

1.1 lentelė. Skirtingų energijos kaupiklių panaudojimo galimybių palyginimas [1]

Kaupimo technologija	Pagrindiniai pranašumai	Pagrindiniai trūkumai	Ciklo n. k., %	Taikoma galiai	Taikoma energijai
HAE	Didelė galia, maža kaina	Reikia tinkamos vietovės	67 – 73		■
Suspausto oro	Didelė galia, maža kaina	Reikia tinkamos vietovės ir dujinio kuro	65 – 70		■
Srautinės baterijos	Didelė galia, galia nepriklauso nuo energijos	Mažas energijos tankis	60 – 75	■□	■
Metalo-oro baterijos	Labai didelis energijos tankis	Sunki elektros įkrova	~50		■
NaS baterijos	Dideli galios ir energijos tankiai, didelis efektyvumas	Brangi gamyba, pavojus saugumui	80 – 90	■	■
Li-jonų baterijos	Dideli galios, energijos tankiai ir efektyvumas	Brangi gamyba, reikia specialios įkrovimo schemas	90 – 95	■	■□
NiCd baterijos	Dideli galios, energijos tankiai ir efektyvumas		60 – 70	■	■□
NiMH baterijos	Didelis efektyvumas ir galios tankis, maža kaina	Nedidelis energijos tankis	80 – 90	■	■□
Rūgštinės švino bat.	Maži kapitaliniai kaštai	Mažas įkrovos/iškrovos ciklų skaičius, esant giliam iškrovimui	50 – 75	■	□
SEK	Didelė galia	Mažas energijos tankis	85 – 95	■	□
SMEK	Didelė galia	Mažas energijos tankis, brangi gamyba	95	■	
Superkondensatoriai	Didelis įkrovos / iškrovos ciklų skaičius, didelis efektyvumas	Mažas energijos tankis	95 – 97	■	■□
Vandenilio kaupikliai	Neribotas sukauptos energijos kiekis	Dar brangios ir nebrandžios technologijos, mažas ciklo efektyvumas	35 – 50	■	■□

Energijos kaupiklių galios ir energijos atidavimo (išsikrovimo) priklausomybė pavaizduota 1.3 paveiksle. Renkantis energijos kaupiklių sistemą, būtina atsižvelgti į jos pritaikymo sritį, t. y. ar sistema bus naudojama pikiniams režimams sumažinti, apkrovai reguliuoti, patikimui padidinti ar įtampai reguliuoti [7].

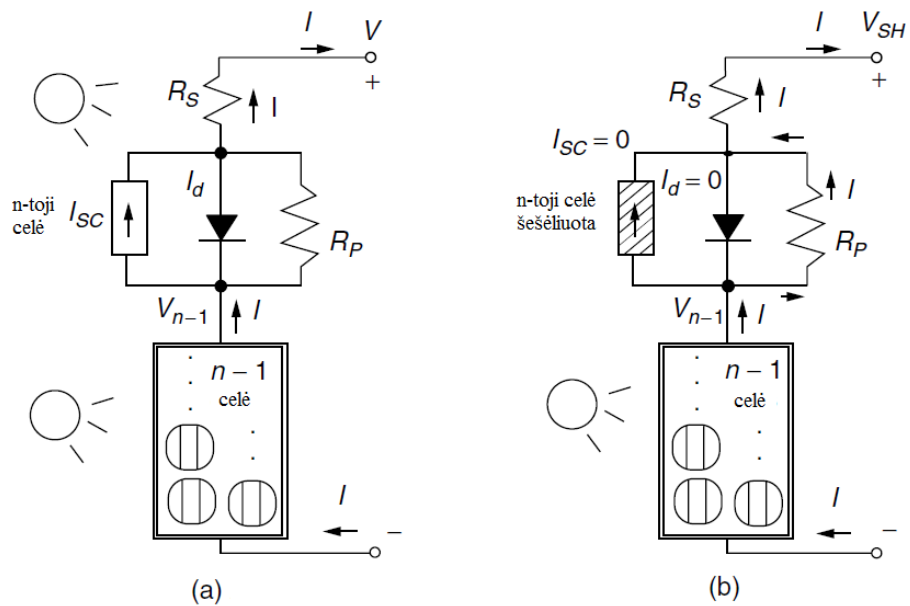


1.3 pav. Energijos kaupiklių galios ir energijos atidavimo priklausomybė nuo laiko [7]

1.3 ŠEŠĖLIAVIMO ĮTAKA SAULĖS FOTOELEMENTO VOLTAMPERINEI CHARAKTERISTIKAI IR BATERIJOS ĮKROVIMO CIKLUI

Saulės fotoelemento generuojamas energijos kiekis gali būti stipriai sumažinamas net tuomet, kai maža viso elemento dalis yra padengiama šešėliu. Vienas iš šešėliavimo neigiamos įtakos mažinimo sprendimo būdų yra papildomų diodų panaudojimas saulės fotoelementų gamyboje. Tokie diodai dažnai pridedami lygiagrečiai moduliui arba tam tikram vieno fotoelemento celių blokui [7].

Šešėliavimo reiškinio įtakos pagaminamam energijos kiekiui išanalizuoti pasiremiama 1.4 paveiksle pateikta schema. Supaprastintą fotoelemento atstojamąją schemą sudaro srovės šaltinis su lygiagrečiai prijungtu diodu, lygiagrečia bei nuoseklia varžomis. Elektriniu požiūriu šios varžos daro neigiamą įtaką. Nuosekloji varža R_S priklauso nuo silicio plokštelės, kontaktų ir sujungimo laidų varžos, o R_P – silicio paviršiaus medžiagos nehomogeniškumo ir elemento kraštų efekto įtakos. Paveiksle analizuojamas saulės fotoelementas sudarytas iš n celių. Viena celė su srove I ir išėjimo įtampa U , skirtingai nei kitos, yra šešėliuojama. Viršutinėje dalyje pateikiamas principinis saulės elemento su diodu vaizdavimas, o likusi apatinė dalis – celės sujungtos į eilę, kurios srovė yra I , o išėjimo įtampa V_{n-1} [7].



1.4 pav. Saulės fotoelemento srovės tekėjimo krypties pokytis nulemtas modulio šešėliavimo [7]

1.4 paveikslo a dalyje tiek n celė, tiek likusi $n - 1$ celių dalis yra apšviesta saulės ir sujungta nuosekliai, todėl kiekviena iš jų teka vienoda srovė I . Paveikslo b dalyje n celė yra padengiama šešėlio ir jos, kaip srovės šaltinio, I_{SC} sumažinimas iki nulio. Įtampos kritimas visoje R_p , kai srovė teka per ją, sukelia įtampos tekėjimą per diodą atgaline puse. Dėl šios priežasties diodo srovė taip pat yra lygi nuliui. Tai reiškia, kad visa srovė, tekanti per saulės fotoelementą turi tekėti per R_p ir R_s šešėliuotoje celėje. Taigi n -toji celė vietoj to, kad padidintų išėjimo įtampą, ją iš tikrųjų mažina [7].

Esant apatinei $n - 1$ celės daliai pilnai apšviestai saulės, jos srovė išlieka I , o įtampa – V_{n-1} . Tuomet viso modulio, su viena šešėliuota cele, išėjimo įtampos V_{SH} kritimas išreiškiamas :

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_p + R_s) . \quad (1.1)$$

Apatinės dalies, pilnai apšviestos saule, $n - 1$ celės įtampa bus lygi:

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot V; \quad (1.2)$$

Sujungus 1.1 ir 1.2 formules gaunama:

$$V_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot V - I(R_p + R_s) . \quad (1.3)$$

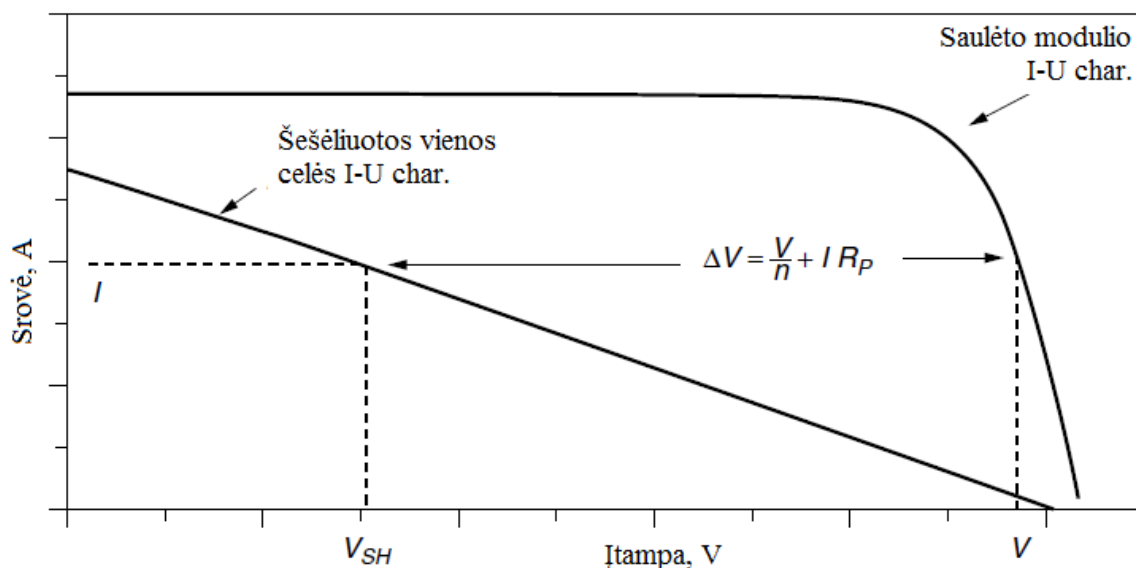
Tuomet įtampos kritimas ΔV , sukeltas celės šešėliavimo prie bet kurios dotosios srovės I , yra išreiškiamas:

$$\Delta V = V - V_{SH} = V - \left(\frac{n-1}{n}\right) \cdot V + I(R_p + R_s) = \frac{V}{n} + I(R_p + R_s). \quad (1.4)$$

Kadangi lygiagrečiai varža daug kartų didesnė už nuosekliają, jos įtakos galima nevertinti ir įtampos kritimas išreiškiamas:

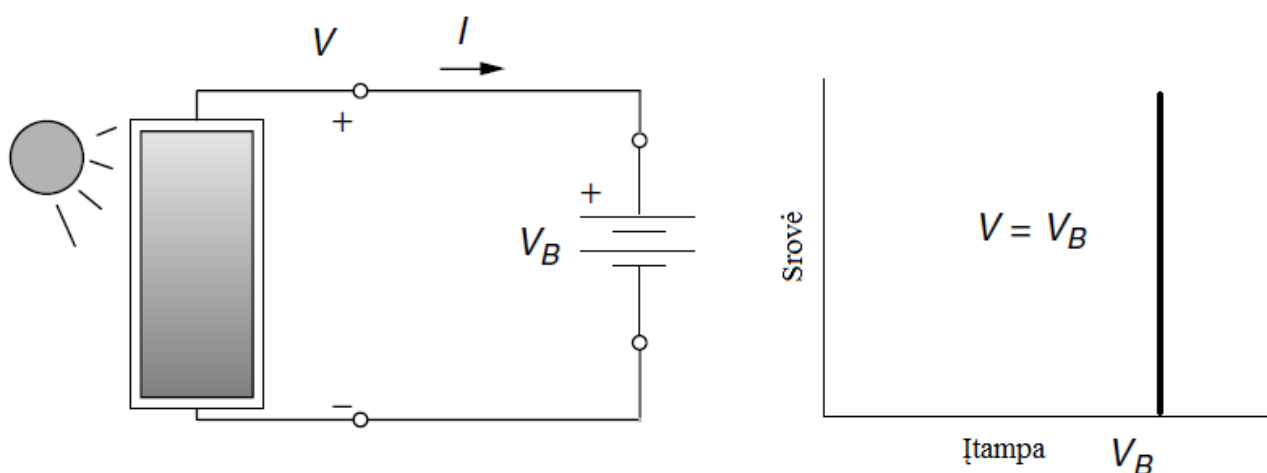
$$\Delta V \cong \frac{V}{n} + I \cdot R_p. \quad (1.5)$$

Vienos celės šėšėliavimo įtaka modulio voltamperinei charakteristikai pateikta 1.5 paveiksle.



1.5 pav. Šėšėliavimo įtaka modulio voltamperinei charakteristikai [7]

Ideali baterija yra tokia, kurios įtampa išlieka pastovi, nepaisant srovės kitimo. Tai reiškia, jog idealios baterijos voltamperinė charakteristika yra statmena tiesė (1.6 pav.).



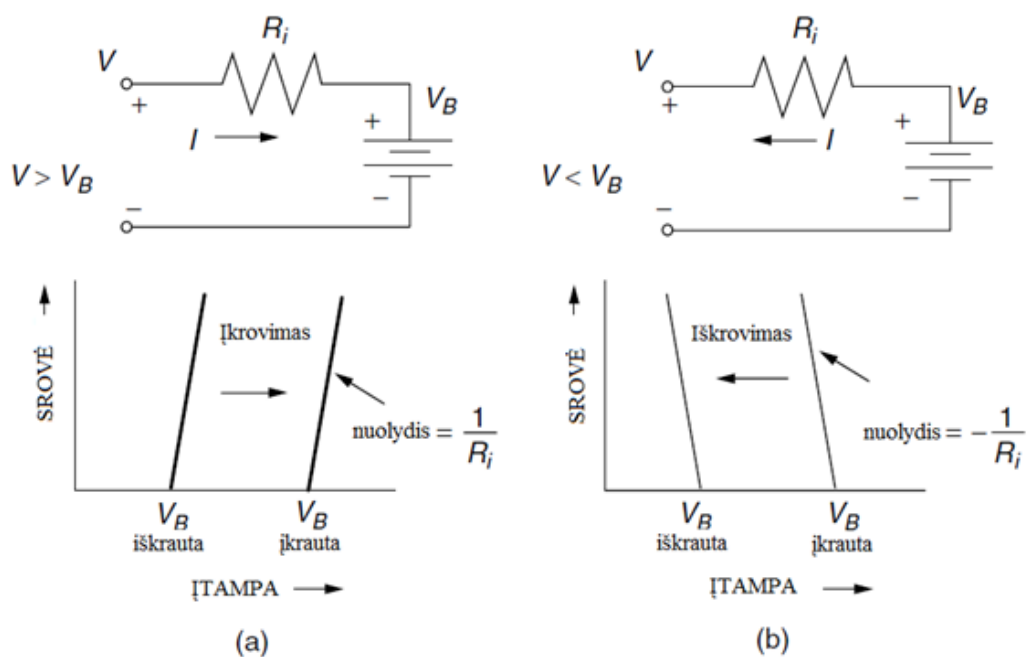
1.6 pav. Idealios baterijos principinė schema ir voltamperinė charakteristika [7]

Reali baterija turi vidinius nuostolius ir dažnai ekvivalentinėje schemoje nurodoma kaip idealus įtampos šaltinis nuosekliai sujungtas su varža (1.7 pav.).

Baterijos įkrovimo ciklą galima aprašyti tokia išraiška:

$$V = V_B + I \cdot R_i. \quad (1.6)$$

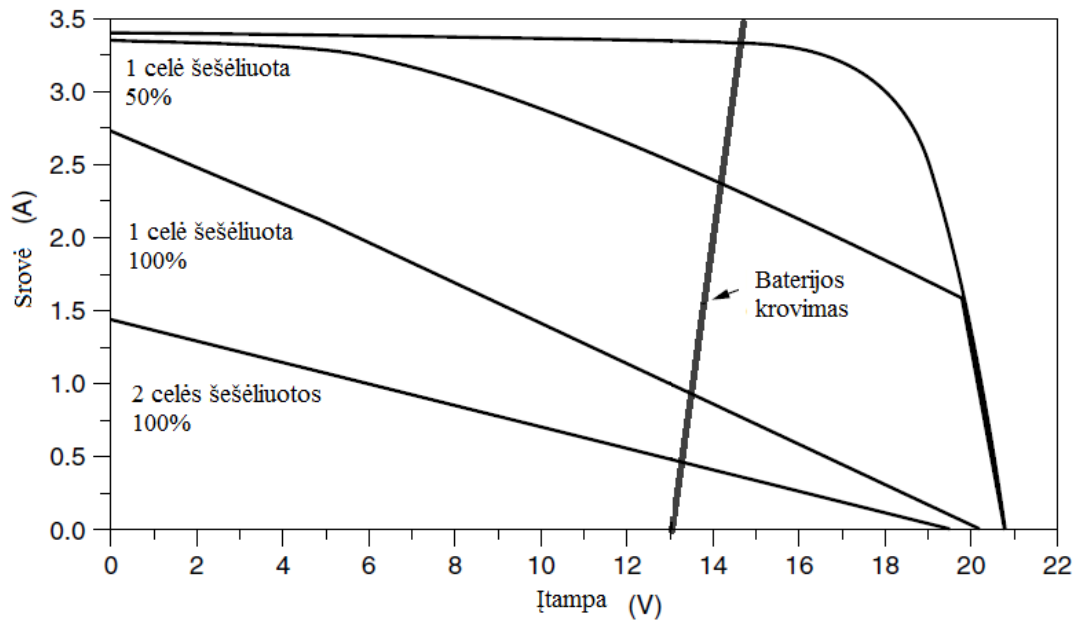
Vidinė varža sąlygoja idealios baterijos voltamperinės charakteristiko pasvirimą, kuris lygus $1/R_i$. Todėl baterijos įkrovimo metu įtampa turi būti didesnė už V_B . Procesui tęsiantis padidėja V_B vertė, kuri sąlygoja tolimesnį voltamperinės charakteristikos pasvirimą, kaip parodyta 1.7 pav. a dalyje [7].



1.7 pav. Baterijos įkrovimo (a) ir iškrovimo (b) ciklas [7]

Iškrovimo metu, išėjimo įtampa yra mažesnė už baterijos įtampą V_B , nuolydis apsiverčia ir voltamperinė charakteristika pakrypsta į kairę pusę kaip parodyta 1.7 pav. b dalyje.

Žinant saulės elektrinės šešėliavimo įtaką generuojamam energijos kiekiui ir baterijos įsikrovimo ir išsikrovimo ciklą, įvertinami abu procesai. 1.8 paveiksle pateikiami skirtingų šešėliavimo plotų įtaka voltamperinei fotoelemento charakteristikai. Taip pat paveiksle nurodomas ir tipinis 12 V baterijos įkrovimo ciklas. Pastebimas ryškus baterijos įkrovimo srovės sumažėjimas esant minimaliam modulio šešėliavimui. Esant vienai modulio celei šešėliuotai 50 % baterijos įkrovimo srovė sumažėja apie 30 %, o esant 100 % šešėliavimui, srovė sumažėja iki 70 % [7].



1.8 pav. Baterijos įkrovimo srovės priklausomybė nuo fotoelemento šešėliavimo [7]

Šešėliavimo įtakai sumažinti fotoelementuose naudojami diodai apsaugai nuo priešingos srovės krypties tekėjimo, kurių pagrindinis tikslas iš grandinės išjungti šešėliuotą celę ir taip sumažinti visos sistemos nuostolius [7].

2. TIRIAMOJO DARBO DALIS

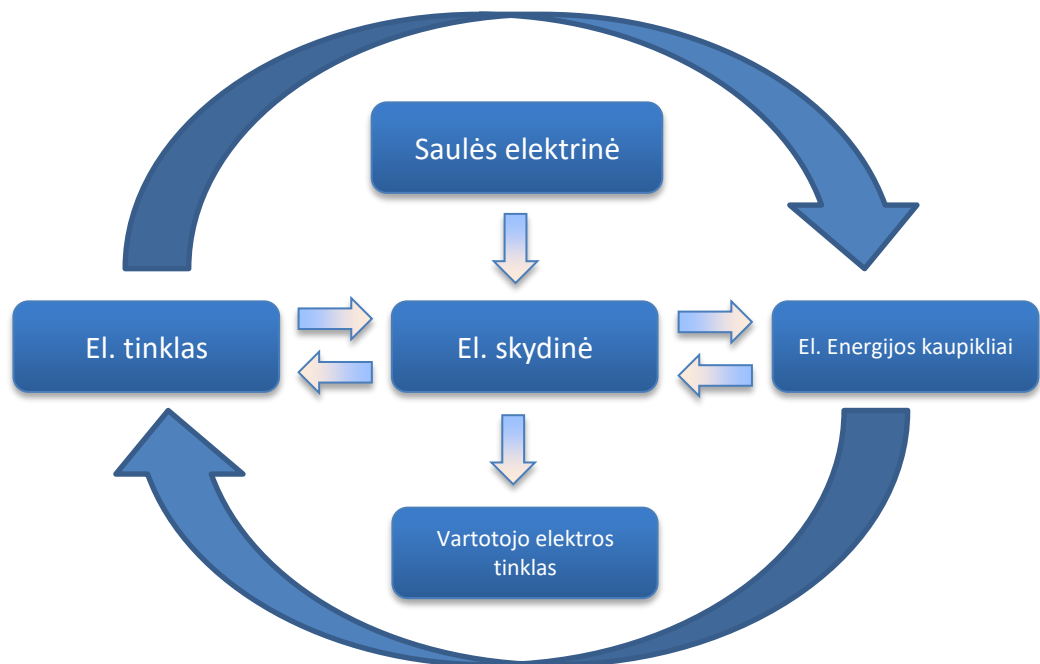
Didėjant atsinaujinančių energijos šaltinių integravimui į elektros energetikos sistemą, svarbus kokybiškas energijos (analizuojamu atveju saulės elektrinės pagamintos energijos) tiekimas į elektros tinklą. Šioje darbo dalyje aptariami metodai bei loginiai sprendimai, kuriais įvertinamas perteklinės energijos panaudojimas, bei jos įtaka analizuojamai sistemai.

Atsižvelgus į aprašomoje dalyje pateikiamas elektros energijos kaupimo technologijas, pasirinkta naudoti ličio jonų akumuliatorių sistema. Pasirinkimą lėmė šios ličio jonų baterijų savybės:

- ilgesnis veikimo laikas;
- mažas savaiminis išsikrovimas [1][8][16].

2.1 SISTEMOS APRAŠYMAS

Darbe analizuojama hibridinė sistema. Ši sistema susideda iš saulės elektrinės bei energijos kaupiklių, kurie yra prijungti prie skirstomojo elektros tinklo. Principinė mikrotinklo elektros energijos schema pateikiama 2.1 paveiksle. Šiame paveikslėlyje rodyklėmis pažymėtos galimos elektros energijos tekėjimo kryptys.



2.1 pav. Principinė elektros energijos tinklo schema

Saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis perduodamas į 0,4 kV skydinę. Iš jos pastatų energijos poreikis yra padengiamas saulės elektrinės generuojamu energijos kiekiu. Esant pastatų komplekso energijos poreikiui, mažesniau už saulės elektrinės generuojamą kiekį, perteklinė elektros energija gali būti perduodama į kaupiklių sistemą saugoti, arba tiesiogiai

atiduodama į skirstomąjį elektros tinklą. Galimas atvirkštinis procesas esant generuojamos energijos stygiui, t. y., reikalinga elektros energija pastatų apkrovos poreikiui patenkinti yra gaunama iš sutelktos energijos kaupiklių sistemoje, o esant didesniam poreikiui – elektros energija tiekama iš tinklo.

Šaltuoju metų laikotarpiu, kai saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis yra mažas, kaupiklių sistema gali būti panaudojama nebe pertekliniam saulės elektrinės energijos kiekiui saugoti. Elektros energija į kaupiklius perduodama iš elektros tinklo ne pikiniu metu, o atgal į tinklą, arba pastato energijos poreikiui tiekama pikiniu metu, kai elektros energijos kaina yra didesnė. Tokiu elektros energijos perdavimo ciklu yra sutaupoma lėšų reikalingų pastato elektros energijos poreikiui padengti bei sumažinamas diegiamos saulės elektrinės ir kaupiklių sistemos atsipirkimo laikotarpis. Kadangi neatliekamas ekonominis sistemos vertinimas, šio tipo energijos srautai baigiamajame darbe nėra išsamiau analizuojami ir aptariami.

2.2 ELEKTROS ENERGIJOS POREIKIS PASTATŲ KOMPLEKSE

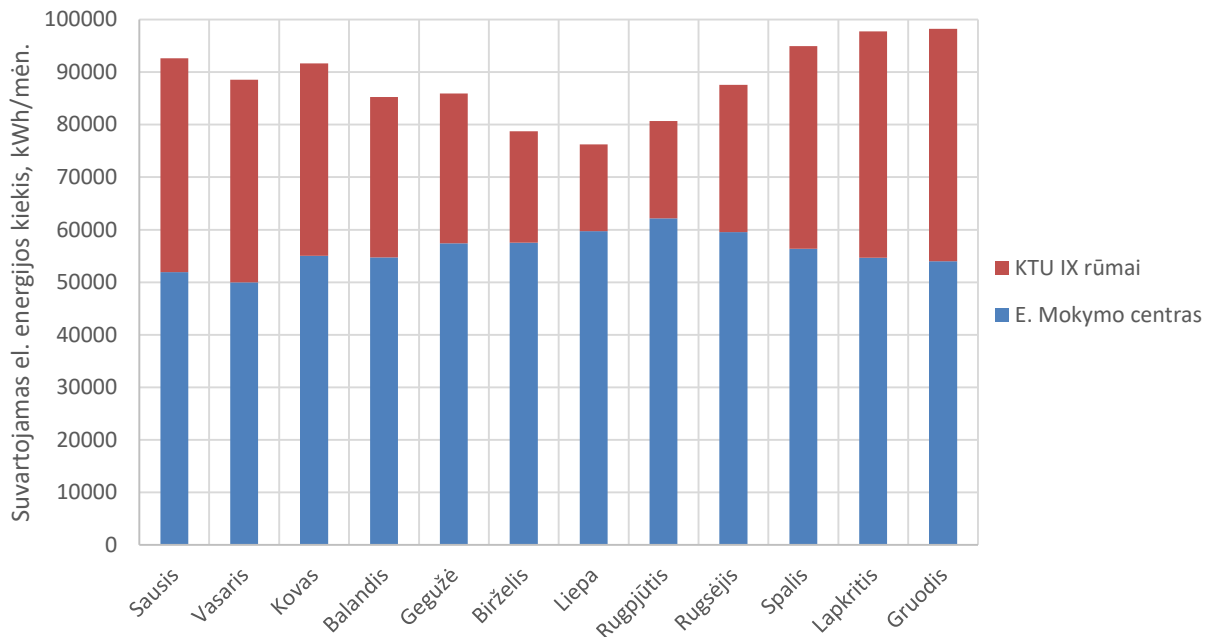
Norint atlikti efektyvaus energijos panaudojimo tyrimą, reikia įvertinti pastatų apkrovą skirtingais metų laikais bei generuojamą elektros energijos kiekį iš instaliuojamos saulės elektrinės.

Analizuojamas pastatų kompleksas susideda iš dviejų KTU studento miestelio pastatų – IX KTU rūmų ir E. mokymosi centro. Kiekvienas tiriamas objektas turi du įvadus, todėl elektros energijos apskaita pateikiama skirtingiems elektros energijos skaitikliams (atskiras kiekvienam įvadui). Analizė atlikta remiantis realiu elektros energijos suvartojimu pastatuose 2015 – aisiais metais.

KTU IX rūmų leistinoji naudoti galia yra 685 kW, o elektros energijos tiekimo patikimumo kategorija – II.

E. mokymosi centro esama leistinoji naudojimo galia siekia 240 kW. Šis pastatas priskiriamas III patikimumo kategorijai.

Surinkta informacija apdorojama kiekvienam pastatui ir 2.2 paveiksle pateikiamas suminis IX rūmų ir E. mokymosi centro suvartotos energijos kiekis kiekvieną mėnesį 2015 – aisiais metais.



2.2 pav. 2015 metų KTU IX rūmų ir E. mokymosi centro suvartojamas el. energijos kiekis

Atsižvelgus į 2.2 pav. pateikiamą grafiką, pastebima, jog suvartojamas elektros energijos kiekis priklauso nuo pastato veiklos. E. mokymo centras sunaudoja daugiau elektros energijos, lyginant su IX rūmų pastatu. Taip pat, lyginant šių dviejų pastatų apkrovą, galima teigti, jog E. mokymosi centrui nebūdingas sezoniškumas (suvartojamas energijos kiekis nekinta šuoliškai keičiantis metų laikui). Taip yra todėl, nes pastate esanti kompiuterinė tarnybinė stotis vartoja pastovų energijos kiekį visą parą. Grafike pastebimi nežymūs energijos kiekio padidėjimai vasarą, susidarantys dėl papildomo energijos kiekio, reikalingo sistemai aušinti karštomis vasaros dienomis.

Priešingai, kai yra vertinamas KTU IX rūmų suvartojamas elektros energijos kiekis. Čia išvelgiamas sezoniškumas. Šį faktorių lemia administracinio pastato paskirtis. Mažiausias energijos kiekis, reikalingas pastato apkrovai padengti, yra šiltuoju metų laiku, kai universiteto fakultete nevyksta paskaitos. Taip pat pastebimas energijos poreikio padidėjimas gegužės ir gruodžio mėnesiais. Didesnį energijos poreikį skatina artėjanti egzaminų sesija, kuomet padaugėja atsiskaitymų bei padaugėja šiems atsiskaitymams besiruošiančių studentų skaičius. Didžiausias suvartojamo energijos kiekio mėnėsis KTU IX rūmuose lemia ir didžiausią abiejų pastatų apkrovą. Šio mėnesio naudojamos energijos kiekis yra beveik 100 000 kWh.

2.3 SAULĖS ELEKTRINĖS GENERUOJAMO ENERGIJOS KIEKIO PLANAVIMAS

Objekto charakteristika. Saulės elektrinė įrengiama ant KTU IX rūmų ir E. mokymo centro stogo. Planuojama saulės elektrinę prijungti prie 0,4 kV skydinės, esančios KTU Studentų miestelio teritorijoje. Pilnutinė įrengiamos elektrinės galia yra 380 kW. Sistema sudaryta iš 1 520 modulių, kurios bendras užimamas plotas yra lygus – 2 432 m².

Skaičiuojant metinį saulės elektrinės pagaminamą energijos kiekį, reikia žinoti vietovės saulės apšvietą, elektrinės instaliuotą galią bei elektrinę sudarančių įrenginių naudingumo koeficientus.

Baigiamajame magistro darbe naudojami realūs saulės elektrinės monitoringo sistemoje sukaupti saulės apšvietos 2013 – 2015 metų duomenys. Duomenys įvertinami į horizontaliąją 0° plokštumą.

Pagrindiniai saulės fotoelementų parametrai, reikalingi įvertinti generuojam energijos kiekiui, pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. lentelė. Saulės fotoelemento techniniai parametrai. [12]

Mechaniniai duomenys	
Celės tipas	Stiklas/stiklas 156x156 mm
Celių skaičius modulyje	60
Dydis	1673x991x7,5 mm
Darbinė temperatūra	-40 ~ + 85°C
Elektriniai duomenys	
Nominali maksimali galia (Pmax)	250W
Optimali generuojama įtampa (VMP)	30,14 V
Optimali darbinė srovė (Imp)	8,30 A
Tuščiosios veikos įtampa (VOC)	37,57 V
Trumpojo jungimo srovė (ISC)	8,87 A
Modulio efektyvumas	15,08%

Saulės elektrinės generuojamas kiekis apskaičiuojamas atsižvelgus į saulės modulio parametrus, pateiktus 2.1 lentelėje. Atliekant skaičiavimus įvertinama ir saulės elektrinei prijungti reikalingų inverterių įtaka. Iškeliamą sąlyga, jog inverterio naudingumo koeficientas yra 98 %.

Saulės elektrinės monitoringo sistemoje apšvieta matuojama kiekvieną saulės elektrinės darbo minutę ir pateikiama W/m². Dėl šios priežasties generuojamas energijos kiekis paskaičiuojamas momentiniu laiku. Momentinių laikų skaičiavimai sumuojami ir dalinami iš saulės elektrinės veikimo laiko.

Įvertinus sistemos sąlygas, skaičiavimai atliekami taikant 2.1 formulę, o jų rezultatai pateikiami 2.2 lentelėje.

Fotomodulių pagaminama elektros energija yra lygi:

$$E_{pV,i} = S_{SE} \cdot \eta_{pV} \cdot E_{s,i} \cdot \eta_{inv}, \quad (2.1)$$

čia: η_{pV} – saulės modulių efektyvumas, %;

$ES_{i,j}$ – pilnutinė saulės apšvieta i -ajį laikotarpį, W/m^2 ;

$E_{pV,i}$ – Fotomodulių pagaminamas energijos kiekis i – taji momentą, kWh;

S_{SE} – saulės elektrinės modulių bendras plotas, m^2 ;

η_{inv} – keitiklio naudingumo koeficientas, %.

2.2 lentelė. Prognozuojamas saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis

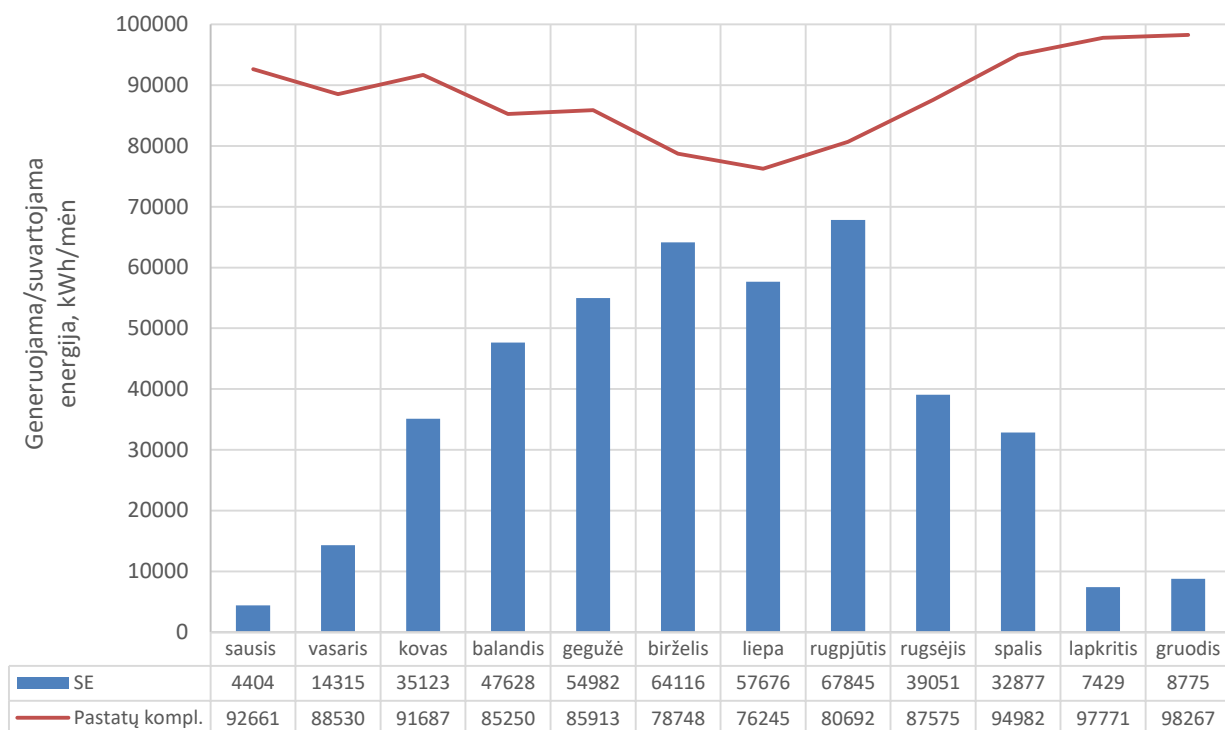
Mėnuo	Generuojamas elektros energijos kiekis, kWh		
	2013 m.	2014 m.	2015 m.
Sausis	3 890	10 540	4 404
Vasaris	11 081	16 711	14 315
Kovas	54 367	37 300	35 123
Balandis	49 336	56 508	47 628
Gegužė	61 632	54 209	54 982
Birželis	60 407	50 116	64 116
Liepa	53 008	64 968	57 676
Rugpjūtis	59 406	49 608	67 846
Rugsėjis	37 216	45 876	39 052
Spalis	24 254	32 552	32 878
Lapkritis	7 953	8 404	7 429
Gruodis	7 740	8 223	8 776
Iš viso:	430 290	435 015	434 225

Atsižvelgus į sukaupus 2013 – 2015 metų duomenis, galima teigti, jog diegiamos saulės elektrinės metinis pagaminamos energijos kiekis turėtų būti didesnis kaip 430 000 kWh elektros energijos. Didžiausią įtaką generuojamam elektros energijos kiekiui turi saulėtų dienų skaičius tiek per metus, tiek atskirai kiekvieno mėnesio. Dėl šios priežasties, lyginant skirtingų metų generuojamą energijos kiekį tą patį mėnesį, gaunami dideli skirtumai. Pavyzdžiui, 2014 m. birželio mėnesį buvo pagaminama net 10 000 kWh energijos mažiau nei 2013 m. ir net 14 000 kWh – nei 2015 m. Tačiau nepaisant mažo energijos kiekio pagaminto birželio mėnesį, 2014 metais suminė generacija buvo didesnė kaip 435 000 kWh elektros energijos ir buvo didžiausia analizuojamu laikotarpiu. Vidutiniškai maksimalus energijos kiekis pagaminamas rugpjūčio mėnesį.

2.4 GENERACIJOS IR APKROVOS VERTINIMAS

Nustačius saulės elektrinės generuojamą elektros energijos kiekį ir pastatų energijos suvartojimą, atliekamas sistemos vertinimas. 2.3 paveiksle pateikiamas generuojamos ir vartojamos el. energijos palyginimas. Iš paveikslo matyti, jog saulės elektrinės generuojamo

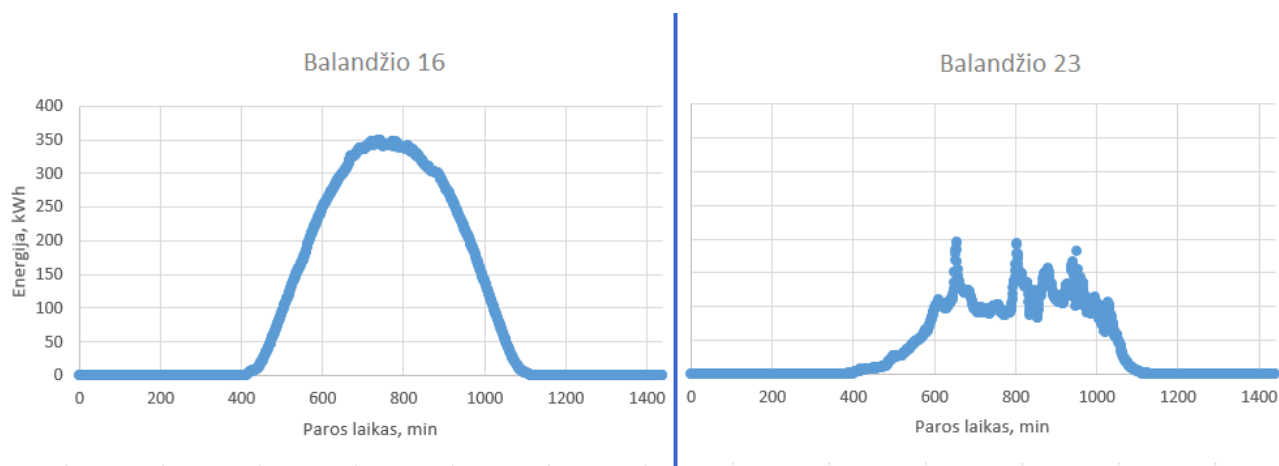
energijos kiekio nepakanka padengti dviejų pastatų suvartojamam energijos kiekiui. Kadangi saulės elektrinė energiją generuoja tik šviesiu paros metu, tokį generuojamos energijos kiekio stygių sukelia E. mokymosi centro pastatas, kurio apkrova, kaip jau minėta ankstesniame skyriuje, nepriklauso nei nuo paros laiko, nei nuo sezoniškumo.



2.3 pav. SE ir pastatų generuojamas/suvaldomas el. energijos kiekis 2015 m.

Toliau šiame darbe išsamiau įvertinama sistema, t. y. analizuojamas paros režimas. Aptarimui pasirenkama kiekvieno mėnesio darbo diena, kadangi tam įtakos turi administracinio pastato veikla, lemianti tokį energijos poreikį.

Saulės elektrinės generuojamam kiekiui daug įtakos turi taip pat ir meteorologinės sąlygos. Todėl įvertinus aplinkos sąlygas, galima išskirti du skirtingus generavimo atvejus: pirma – diena saulėta, antra – visa diena debesuota, arba debesuota su pragiedruliais. 2.4 paveiksle pateikiamas meteorologinių sąlygų įtakos pavyzdys to paties mėnesio skirtingoms dienoms. Palyginimas atliekamas 2015 – ujų metų balandžio 16 ir 23 dienomis.



2.4 pav. SE generuojamos energijos paros kreivės priklausomybė nuo meteorologinių sąlygų

Apžvelgus 2.4 paveiksle pateikiamus duomenis, galima pastebėti, jog saulės patekėjimo ir leidimosi laikas panašus, tačiau abiejų dienų generuojamas energijos kiekis skirtingas. Esant giedrai balandžio mėnesio dienai, saulės elektrinės momentinė generuojama galia didesnė kaip $350 W_p$, kai pilnutinė saulės elektrinės instaliuota galia yra $380 kW$. Balandžio 23-ią dieną, kuomet buvo debesuota, maksimali pasiekama energijos vertė nukrito iki $200 W_p$. Taip pat, esant prastoms oro sąlygoms, pastebimas ir ryškus galios svyravimas.

Lietuvoje saulėtų valandų skaičius per metus siekia 1 750 valandų [12]. Tai sudaro mažiau nei 20 % visų metuose esančių valandų skaičių. Dėl šios priežasties, efektyviam sistemos panaudojimui įvertinti, reikalinga žinoti saulėtų ir debesuotų dienų skaičių skirtingais metų laikais. Išanalizuoti sukaupti saulės apšvietos duomenys ir gauti rezultatai pateikiami 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Saulėtų ir debesuotų dienų skaičius kiekvieną mėnesį ir metų ketvirtį 2015 m.

	Mėnuo	Saulėtų dienų sk.	Debesuotų dienų sk.	Saulėtų d. sk. metų ketvirčiui	Debesuotų d. sk. metų ketvirčiui
Žiema	Gruodis	13	18	36	54
	Sausis	10	21		
	Vasaris	13	15		
Pavasaris	Kovas	13	18	48	44
	Balandis	16	14		
	Gegužė	19	12		
Vasara	Birželis	18	12	59	33
	Liepa	19	12		
	Rugpjūtis	22	9		
Ruduo	Rugsėjis	11	19	31	60
	Spalis	13	18		
	Lapkritis	7	23		

Kiekvieno mėnesio vienos paros energijos kiekių balanso duomenys pateikiami 2.4 lentelėje. Lentelėje pateikiamos dviejų skirtingų dienų reikšmės. Viršutinė to mėnesio eilutė nurodo, jog vertinama diena buvo saulėta (iš sukauptų duomenų išrinkta maksimali mėnesio vertė). Apatinė eilutė nurodo debesuotą dieną.

Atliekant sistemos analizę nevertinamos dienos, kai nebuvo generuojama jokio energijos kiekio. Paros energijos kiekių balansas sudaromas pagal 2015 metų saulės generacijos ir pastato apkrovos duomenis.

2015 metais didžiausias energijos trūkumas užfiksuotas lapkričio 23 d. ir viršijo 3379 kWh el. energijos. Maksimalus perteklinės energijos kiekis pasiekiamas rugpjūčio 3 dieną. Likusi nepanaudota energija siekia 107 kWh. Išanalizavus duomenis pastebima, jog debesuotomis dienomis gaunamas generuojamos energijos stygius, lyginant su energijos kiekiu apkrovai padengti. Rugsėjo – balandžio mėnesiais, saulės elektrinės gaminamos energijos trūkumas pastebimas ir saulėtomis dienomis. Nors atliekant paros energijos balansų vertinimą gauti neigiami šių mėnesių generuojamos energijos kiekiai iš saulės elektrinės, apžvelgiant paros grafiką pastebimi generuojamos ir vartojamos energijos skirtumai, kai saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis viršija apkrovą. Išsamesnis paros grafiko kreivės ir energijos kaupiklio sistemos efektyvaus panaudojimo vertinimas atliekamas tolimesniuose skyriuose, vykdant analizuojamo mikrotinklo modeliavimą.

2.4 lentelė. Pastatų komplekso ir saulės elektrinės energijos kiekiai per vieną saulėtą ir debesuotą mėnesio dieną.

Diena	KTU IX rūmų apkrova, kWh	E. mokymo centro apkrova, kWh	Suminė apkrova, kWh	SE generacija, kW/h	Perteklius/trūkumas, kWh
Sausio 15	1466,48	1997,40	3443,88	998,18	-2445,70
Sausio 20	1622,96	1902,60	3525,56	159,80	-3365,76
Vasario 17	1697,80	1878,60	3576,40	2144,26	-1432,14
Vasario 10	1547,20	1902,00	3449,20	133,11	-3316,09
Kovo 15	1377,30	2176,50	3553,80	2347,07	-1206,73
Kovo 30	1103,60	1864,80	2968,40	230,43	-2737,97
Balandžio 16	938,32	1983,30	2876,62	2770,50	-106,12
Balandžio 23	1003,44	2000,70	3004,14	735,95	-2268,19
Gegužės 8	957,28	1884,60	2841,88	2830,39	-11,49
Gegužės 11	1054,64	2124,90	3179,54	934,61	-2244,93
Birželio 16	851,44	1931,46	2782,90	2878,73	95,83
Birželio 3	844,40	1953,90	2798,30	1796,56	-1001,74
Liepos 7	455,44	2001,64	2457,08	2494,77	37,69
Liepos 14	550,32	1983,70	2533,62	685,10	-1848,52
Rugpjūčio 3	600,48	2015,70	2616,18	2723,33	107,15
Rugpjūčio 10	569,14	1919,40	2488,54	995,03	-1493,51
Rugsėjo 30	1170,68	2152,50	3323,18	2239,61	-1083,53
Rugsėjo 21	949,04	1837,70	2786,74	716,60	-2070,14
Spalio 29	1616,64	1937,10	3551,74	1925,15	-1626,59
Spalio 6	1203,84	1896,65	3100,49	992,26	-2108,23
Lapkričio 19	1517,36	2039,70	3557,06	895,51	-2661,55
Lapkričio 23	1370,24	2078,10	3448,34	69,23	-3379,11
Gruodžio 16	2019,92	2109,90	4129,82	1098,45	-3031,37
Gruodžio 28	1183,04	2106,60	3289,64	62,54	-3227,10

2.5 ENERGIJOS KAUPIKLIŲ TALPOS NUSTATYMAS

Priklausomai nuo meteorologinių sąlygų, kaupiklių sistemos panaudojimas išskiriamas į dvi dalis. Pirmoji – tai saulėtos dienos perteklinės energijos kaupimui ir vakaro apkrovos padengimo panaudojimui, kuomet saulės elektrinė nebegeneruoja el. energijos. Antroji – debesuotą dieną saulės elektrinės sukeltamų galios svyravimų įtakos sumažinimas elektros energijos vartotojui ar tinklui.

Kaupiklių sistemos talpa nustatoma pagal dienos poreikio ir generacijos skirtumą. Baterijose galima sukaupti perteklinę energiją apskaičiuojama:

$$P_{Rez.} = P_{PV} - P_{Apk}, \quad (2.2)$$

čia: $P_{Rez.}$ – perteklinės energijos kiekis, galimas sukaupti kaupiklių sistemoje, kWh;

P_{PV} – saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis per dieną, kWh;

P_{Apk} – pastatų suvartojamas energijos kiekis per dieną, kWh;

Energijos kaupiklio talpai surasti iškeliami sąlyga, jog visa perteklinė energija turi būti sukaupiama sistemoje, o neatiduodama į tinklą. Pagal tai, iš sukauptų duomenų išrenkamas toks atvejis, kuomet yra didžiausias skirtumas tarp generuojamos saulės elektrinės ir pastato apkrovos energijų. Esant didžiausiam perteklinės energijos kiekiui reikalinga ir didžiausios talpos kaupiklių sistema.

Energijos kaupiklio talpos nustatymui naudojami duomenys iš 2.3 lentelės. Skaičiavimai atliekami rugpjūčio mėnesio 3 dieną, kuomet perteklinė energijos vertė buvo didesnė nei 107 kWh el. energijos.

Žinant reikalingą sukaupti energijos kiekį bei kaupiklio sistemos įtampą, perskaičiuojama sistemos talpa:

$$C_{Bat.} = \frac{P_{Per.(max)}}{U_{bat}}; \quad (2.3)$$

čia: $C_{Bat.}$ – energijos kaupiklio talpa, Ah;

$P_{Per(max)}$ – maksimalus perteklinės energijos kiekis per dieną, Wh;

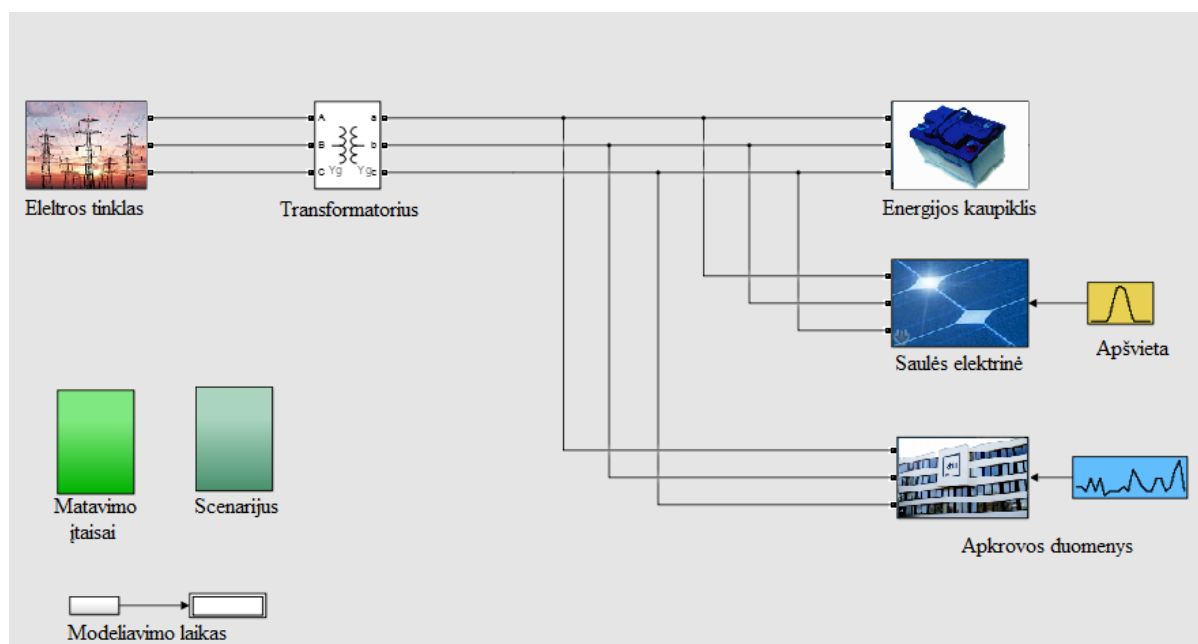
U_{Bat} – kaupiklių sistemos įtampa, V;

Įsistačius į 2.3 formulę rugpjūčio 3-iosios dienos vertes, apskaičiuojama kaupiklių talpa, kuri lygi:

$$C_{Bat.} = \frac{P_{Rez.(max)}}{U_{bat}} = \frac{107\,150\,Wh}{48\,V} = 2\,233\,Ah.$$

2.6 SISTEMOS ELEKTROS TINKLO MODELIAVIMAS

Sistemos modeliavimas atliekamas *Matlab Simulink* programiniame pakete. Bazinis sistemos modelis yra pateiktas *Matlab Simulink* standartinių bloků bibliotekoje. Viešai prieinamas bazinis modelis pritaikomas analizuojamai sistemai. Tiriamasis modelis koreguojamas pagal 2.1 paveiksle numatytą energijos principinę schemą. Pagrindinės modelio sudedamosios dalys gali būti išskiriamos į išorines – generatorių, transformatorių, bei vidines – saulės elektrinę, energijos kaupiklį bei apkrovą. Modeliuojamo mikrotinklo schema pateikiama 2.5 paveiksle.



2.5 pav. Modelio jungimo schema *Matlab Simulink* programiniame pakete

Trijų fazių šaltinis – modeliavimo dalyje atlieka elektros tinklo paskirtį. Su tiriamuoju objektu elektros tinklas sujungtas per transformatorių.

Saulės elektrinė – atsinaujinančių šaltinių blokas sistemoje. Elektrinė generuoja energiją, kurią veikia keturi veiksniai: apšvieta, saulės elemento efektyvumas, sistemos užimamas plotas bei nuostoliai (inverterio). Pasinaudojus „1-D Lookup Table“ funkcija, *Matlab Simulink* programiniame pakete įrašomi surinkti saulės ekspozicijos duomenys. Saulės elektrinės bloke pateikiama apšvietos vertė padauginama iš sistemos ploto, saulės elementų naudingumo koeficiento ir inverterio nuostolių.

Apkrova modeliujamoje sistemoje įrašoma taip pat kaip ir saulės elektrinė – „1-D Lookup Table“ funkcija. Prieš įkeliant apkrovos duomenis į modelio struktūrą jie yra suvienodinami. Kadangi saulės elektrinės duomenų vertės monitoringo sistemoje fiksuojamos kiekvieną minutę, o pastato apkrovos – kas valandą, pasirinkta pertvarkyti pastatų komplekso apkrovos vertes.

Pastato apkrovos duomenų pertvarkymui remiamasi slenkančių vidurkių metodika. Skaičiavimai atliekami pagal 2.4 formulę.

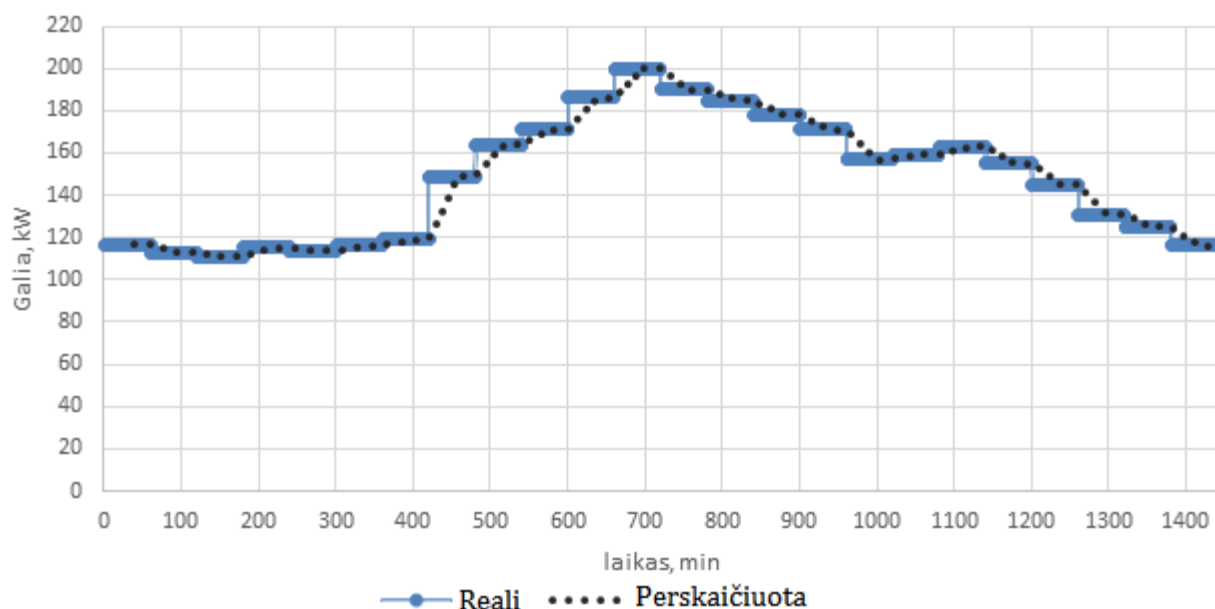
$$SMA = \frac{P_m + P_{m-1} + \dots + P_{m-(n-1)}}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} P_{m-i} ; \quad (2.4)$$

čia: SMA – skaičiavimų periodo vidutinė energijos vertė, kW;

n – skaičiavimų periodas;

P_m – m-toji apkrovos vertė naudojama skaičiavimui, kW.

Formulėje naudojamas periodas arba duomenų kiekis, kuriems apskaičiuojamas vidurkis. Kadangi analizuojamas pokytis iš valandų į minutes, skaičiavimams atlikti pasirinkta periodo vertė yra 60. Atlikus skaičiavimus, 2.6 paveiksle pateikiamas balandžio 16 dienos apkrovos paros grafikas minutėmis.



2.6 pav. 2015 m. balandžio 16 d. apkrovos paros grafikas, pritaikius judančių vidurkių metodą

Perskaičiuotos apkrovos grafiko vertės įkeliamos į programą modeliavimui atlikti.

Energijos kaupiklis – modeliavimo aplinkoje įrašomas pagrindinis parametras – talpa. Šiam sistemos elementui skiriamas didesnis dėmesys, kurio veikimas priklauso, nuo įkeliamų saulės elektrinės ir pastatų komplekso duomenų verčių. Elektros energijos kaupimo sistemos parametrai priklauso nuo technologijos. Todėl *Matlab Simulink* pakete aprašoma kaupiklių sistema. Šioje dalyje pateiktų apribojimų grupė garantuoja kaupiklių sistemos veikimo modelio įsikrovimo ir išsikrovimo ribas [10] [15].

Energijos pokytis baterijoje apibojamas išraiška:

$$Q_B(t + 1) = Q_B(t) + \eta_B \cdot P_{\text{įkr.}}(t) - P_{\text{iškr.}}(t), \quad (2.5)$$

čia: $Q_B(t)$ – baterijos sukauptos energijos kiekis pradiniu laiko momentu, kWh;

η_B – baterijos įkrovimo iškrovimo ciklo naudingumo koeficientas;

$P_{\text{įkr.}}(t)$ – baterijos įkrovimo galia laiko momentu t , kW;

$P_{\text{iškr.}}(t)$ – baterijos išsikrovimo galia laiko momentu t , kW.

Elektros energijos kaupiklyje sutelkiamas energijos kiekis apibrėžiamas maksimaliu ir minimaliu įkrovos lygiu.

$$Q_B(t) \leq SOC_{\text{max}} \cdot N_B - Q_f(t); \quad (2.6)$$

$$Q_B(t) \geq SOC_{\text{min}} \cdot N_B, \quad (2.7)$$

čia: SOC_{max} – maksimalus baterijos įkrovimo lygis, %;

SOC_{min} – minimalus baterijos įkrovimo lygis, %;

N_B – instaliuota baterijos talpa, kWh;

$Q_f(t)$ – baterijos talpos nusidėvėjimo lygis (kiekis), kWh.

Baterijos nusidėvėjimo lygis yra tiesinės degradacijos veiksnys, priklausantis nuo iškrovimo – įkrovimo ciklų skaičiaus. Įtakos turi baterijų gamybos technologijos ir medžiagos iš kurios pagamintas. Kadangi modeliavimas atliekamas vienai parai šis faktorius į sistemą neįtraukiamas.

Taip pat įvertinama ir baterijos maksimali įkrovimo ir iškrovimo galia:

$$P_{\text{įkr.}}(t) \leq P_{B(\text{max})} \cdot N_B; \quad (2.8)$$

$$P_{\text{iškr.}}(t) \leq P_{B(\text{max})} \cdot N_B, \quad (2.9)$$

čia: $P_{B(\text{max})}$ – maksimali baterijos įkrovimo galia, kW;

Energijos kaupiklio sistemos valdymas atliekamas valdikliu. Valdiklio veikimas paremtas perjungikliais (iš angl. *switch*). Valdiklio, bei visos sistemos veikimo algoritmas pateikiamas priede Nr. 1. Algoritmas 2.5 pav. pažymėtas scenarijaus bloku.

Mikrotinklo analizė *Matlab Simulink* programiniame pakete atliekama vieną parą. Modelio dinamiškumas išpildomas laiko funkcija, kurioje nustatytas modeliavimo žingsnis yra 1s. Dėl šios priežasties pateiktuose modeliavimo grafikuose paros laikas išreiškiamas sekundėmis. Pradiniu laiko momentu įvertinami saulės elektrinės, apkrovos bei akumuliatorių

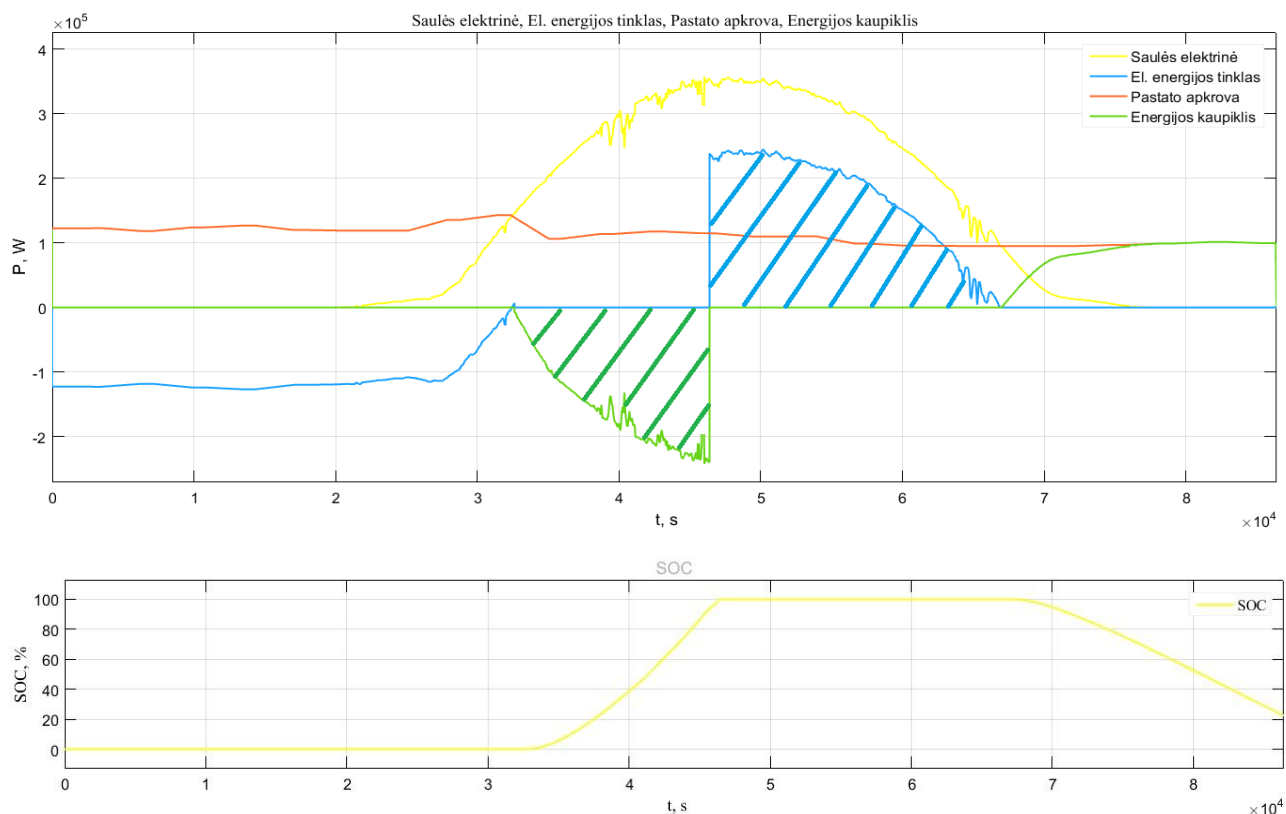
baterijų energijų kiekiai. Pirmuoju žingsniu įvertinama ar saulės elektrinės energijos kiekis didesnis už 0, t. y. ar saulės elektrinė generuoja energiją ar ne. Tokiu žingsniu išpildoma sąlyga, jog akumuliatorių baterijos valdymas įjungiamas tuo pačiu metu, kai saulės elektrinė pradeda generuoti energiją. Jei saulės elektrinė neveikia įvedama papildoma sąlyga, palyginanti investicijos laiko vertę. Nustatyta lyginimo reikšmė yra 12 h. Toks sistemos papildymas leidžia kaupikliuose sukauptą energijos kiekį panaudoti vakaro apkrovai padengti, kuomet saulės elektrinė jau negamina elektros energijos.

Veikiant saulės elektrinei, modeliavimo dienos įkeltos saulės elektrinės generuojamo energijos kiekio ir pastatų apkrovos vertės sumuojamos. Energijos generacija iš saulės elektrinės išreiškiama teigiamu kiekiu, o suvartojimas – neigiamu. Todėl modelyje pastato energijos kiekis funkcija „Gain“ padauginamas iš -1. Jei saulės elektrinės energijos kiekis didesnis už apkrovos, kitame žingsnyje lyginamas kaupiklių sistemos talpos dydis. Esant akumuliatorių talpai mažesnei kaip 100 %, perteklinis energijos kiekis perduodamas energijos kaupikliui prieš tai patikslinus ar visa perteklinė energija gali būti panaudojama perduoti baterijai. Kitu atveju, perteklinis energijos kiekis gali būti visas arba iš dalies atiduodamas į elektros tinklą. Priešinga situacija esant energijos trūkimui. Sistema pirmiausiai įvertina ar energijos kaupiklyje esančios energijos pakaks padengti apkrovai. Jei ši sąlyga netenkinama, trūkstamas energijos kiekis paimamas iš elektros tinklo.

Galutiniame skaičiavimo žingsnyje (esant bet kurios algoritmo sąlygos tenkinimui) patikrinamas sistemos balansas, t. y., visais modeliavimo atvejais generuojamo ir panaudojamo energijos kiekio suma turi būti lygi 0. Ciklui pasibaigus, galinė vertė gražinama į pirmąjį žingsnį, kuriame ciklas pradedamas iš naujo su naujomis apkrovos ir saulės generacijos reikšmėmis. Kitame žingsnyje baterijų energijos kiekiai panaudojami iš prieš tai gauto modeliavimo žingsnio. Skaičiavimai kartojami kol laiko vertė pasiekia 86 400 (24 valandą).

Sistemos galios vertės matuojamos atskirai iš kiekvieno įrenginio. Pasinaudojus matavimo prietaisų (iš angl. *scopes*) funkcija, sistemos analizė atliekama grafiškai. Modelio struktūroje taip pat išreiškiamas ir energijos kaupiklio iškrovos lygis (iš angl. *State of Charge*). Akumuliatoriaus iškrovos gylis išreiškiamas procentais, bei matuojamas kiekvienam modeliavimo žingsniui.

Pirmuoju aprašytos sistemos modeliavimu atliekamas baterijos talpos patikrinimas. Modeliuojamas rugpjūčio 3-iosios dienos paros grafikas. Modeliavimo aplinkoje įvedamas 2.5 poskyryje apskaičiuotas talpos dydis 2 233 Ah.



2.7 pav. Rugpjūčio 3 dienos modeliavimas (kaupiklių talpa – 2 233 Ah)

Atlikus sistemos modeliavimą, pastebima, jog perteklinės energijos kiekis, nesutampa su apkrovos kreive bei toks energijos kaupiklio talpos dydis yra greitai įkraunamas. Modeliavimo pradžioje akumuliatorių baterija buvo iki galo iškrauta. Laiko momentu 46 080 s (12 h 48 min) energija perduodama į elektros energijos tinklą. Palyginus žalios ir mėlynos spalvų sistemos plotus, kai saulės elektrinės generuojamas kiekis viršija pastatų apkrovą, galima teigti, jog esant tokiai energijos kaupiklio talpai didesnis energijos kiekis atiduodamas į tinklą negu sutelkiamas kaupiklyje. Saulėtą vasaros dieną, perteklinį energijos kiekį iš saulės elektrinės galima kaupti iki 66 780 s (18 h 33 min).

Iškeliama sąlyga, jog visa perteklinė energija, kai pradiniu laiko momentu akumuliatorių baterija yra neįkrauta, ji turi būti sukaupiama kaupiklyje. Eksperimentiniu būdu surandamas kaupiklio sistemos talpos dydis, kuris lygus 4 989 Ah. Energijos kaupiklio talpos dydis suapvalinamas ir modeliavimams naudojama 5 000 Ah talpos baterija.

Sistemos modeliavimui atlikti dienos pasirenkamos iš saulės elektrinės generuojamo energijos kiekio ir pastatų suvartojamo energijos kiekio balanso pateikiamo 2.3 lentelėje. Modeliavimas atliekamas visiems keturiems metų laikams. Iš 2.3 lentelės pasirenkami du kraštutiniai variantai, t. y., kai saulės elektrinės pagaminamas perteklinės energijos kiekis yra didžiausias, bei kitas – kai tarp apkrovos ir generacijos gaunamas maksimalus generuojamos

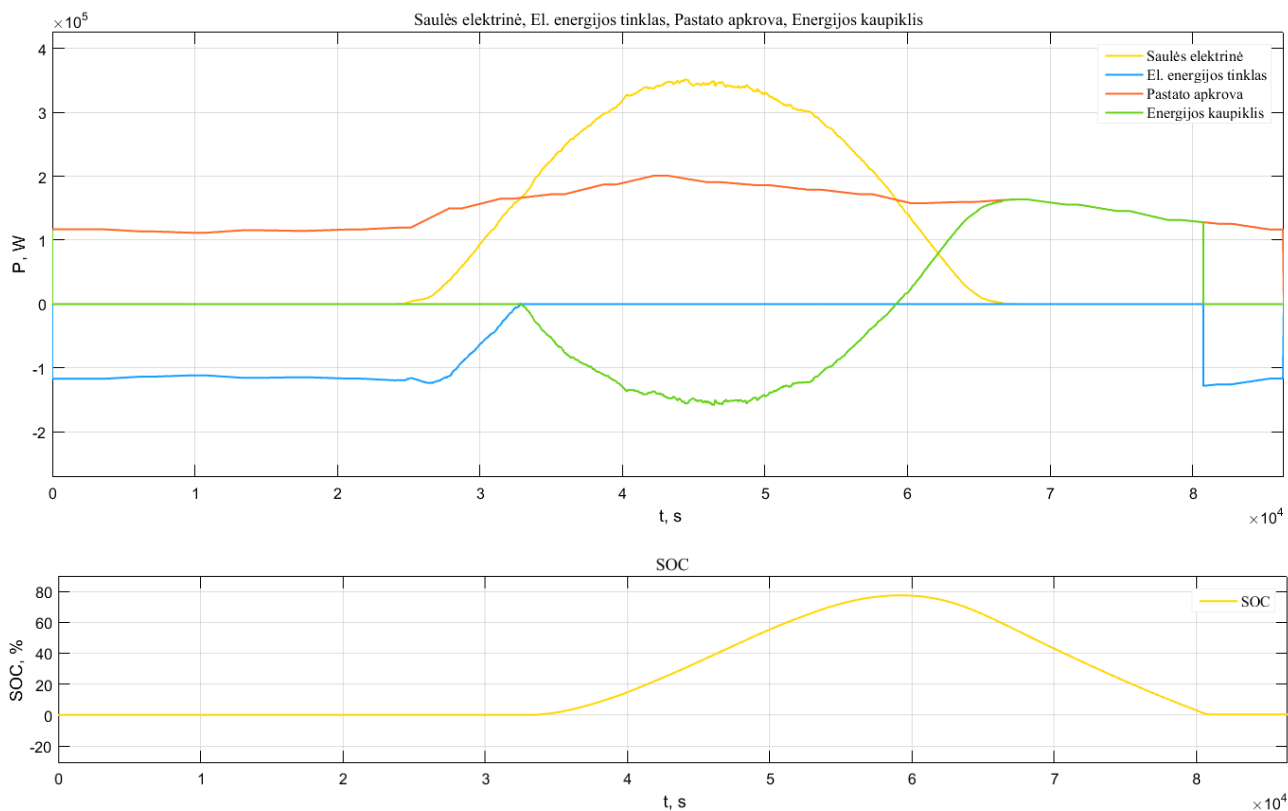
energijos trūkumas. Kiekvienas metų ketvirčio modeliavimas atliekamas saulėtą ir debesuotą dienomis.

Kiekvienos pasirinktos dienos modeliavimas atliekamas dviem atvejais: pradinio laiko momentu energijos kaupiklių sistema yra pilnai įkrauta ir, kai pradinio momentu, ta pati sistema yra visiškai iškrauta. Tokiu modeliavimų būdu įvertinamos prieš pasirinktą dieną esančios meteorologinės sąlygos. Laikoma, kad sistema yra iškrauta, kai prieš tai buvusią dieną elektrinė nesugeneravo perteklinės energijos ir kaupiklis buvo iškrautas, o sistema yra įkrauta, kai prieš tai buvusią dieną elektrinė sugeneravo pakankamą perteklinės energijos kiekį baterijų kaupikliui įkrauti.

Sistemos modeliavimo grafikai pateikiami 3 skyriuje.

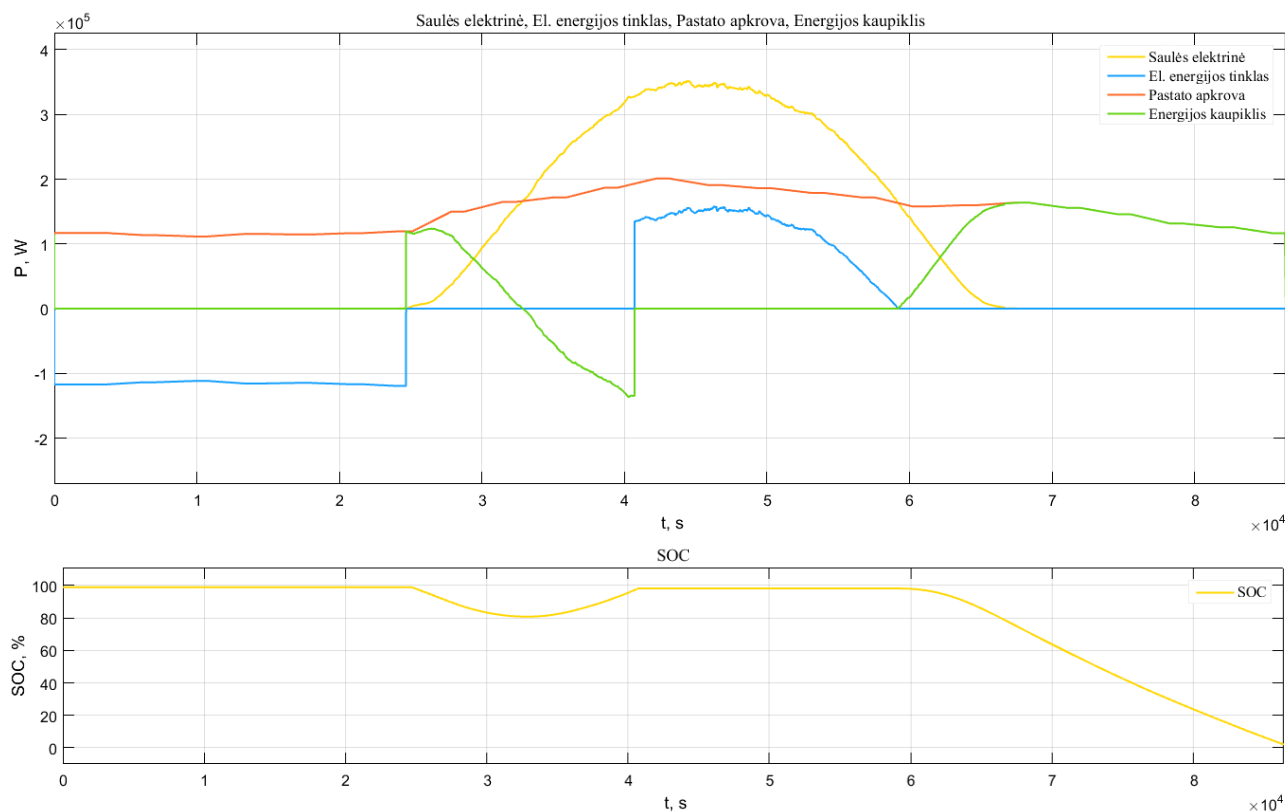
3. MODELIUOJAMOS SISTEMOS TYRIMŲ REZULTATAI

Sistemos modeliavimo metu išanalizuota skirtingų metų laikų sistema, esant toms pačioms modeliavimo sąlygoms. Įvertinama apšvietos pokyčio reikšmė sistemos galių pasiskirstymui. Nustatomi laiko intervalai, kai KTU IX rūmų ir E. mokymosi centro apkrova padengiama iš akumuliatorių baterijoje sukaupto energijos kiekio.



3.1 pav. Balandžio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas

Palyginus modeliavimo kreives, galima teigti, jog laiko intervalas, kai energija apkrovai padengti imama iš energijos tinklo yra mažesnis, už intervalą, kai energija padengiama iš hibridinės – saulės elektrinės ir energijos kaupiklių sistemos. Saulės elektrinė 8 h 50 min viršija apkrovą ir pradeda krauti energijos kaupiklį. Saulėtą balandžio dieną, energijos kaupiklis įkraunamas iki 80 %, o tai sudaro 4 000 Ah. Tokio energijos kiekio apkrovai padengti pakanka iki 22 h 26 min (80 751 s).

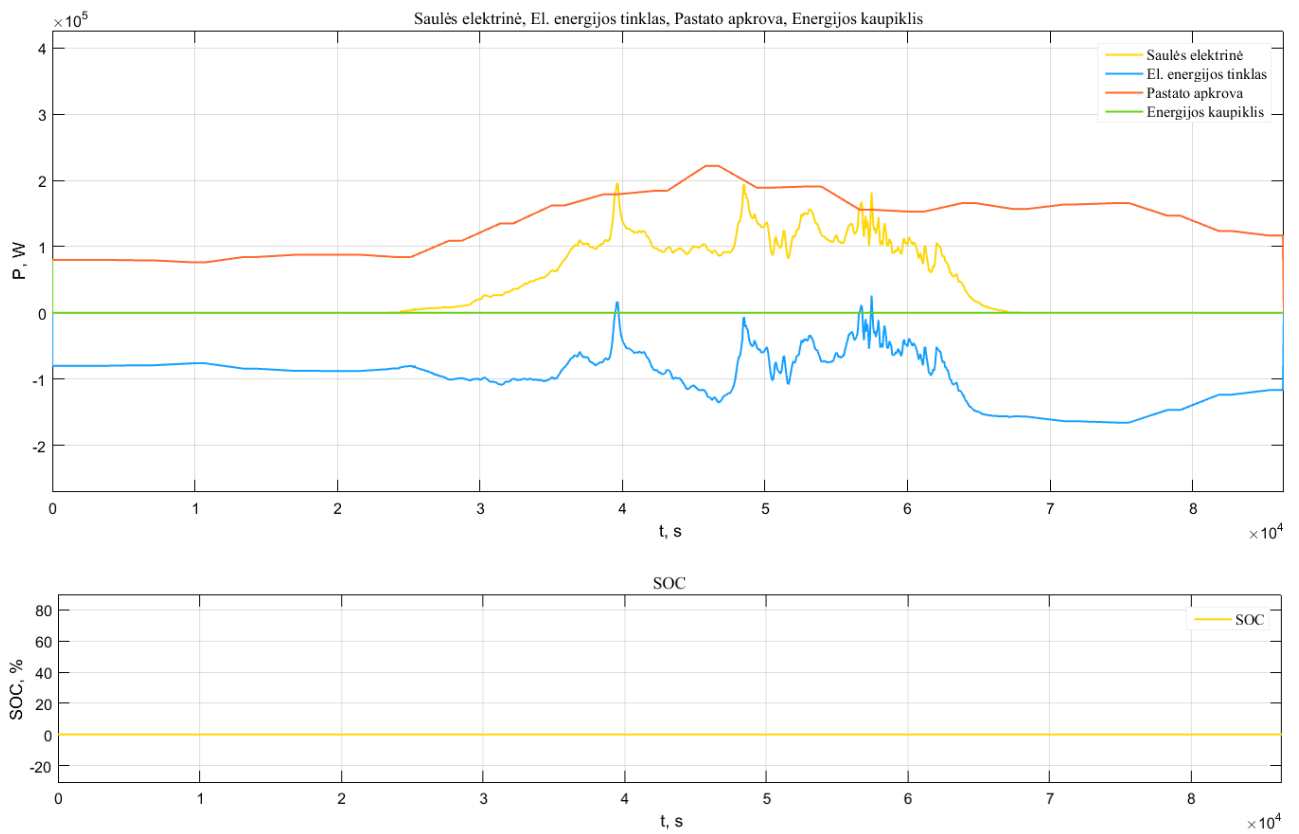


3.2 pav. Balandžio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

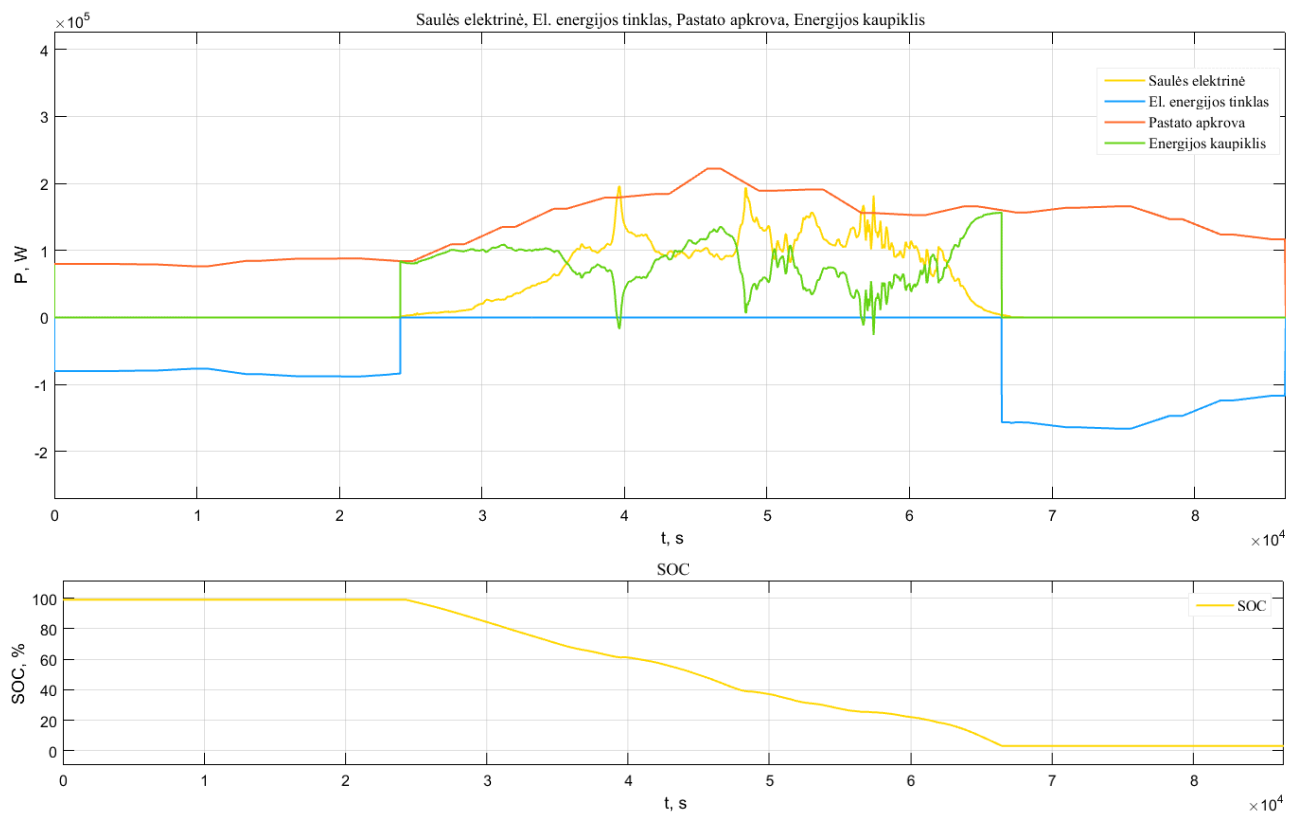
Balandžio 16 - os dienos modeliavime, kai energijos kaupiklis pradiniu laiko momentu yra įkrautas, pastebima, jog nuo saulės elektrinės veikimo pradžios, daugiau energijos yra tiekama į kaupiklių sistemą nei imama iš jo. Dėl šios priežasties, jau 11 h 20 min perteklinė energija yra tiekama į el. tinklą. Iš energijos kaupiklių energija pradeda naudoti tuo momentu, kai saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis susikerta su apkrovos kreive (59 500 s). Nuo šios akimirkos, energijos kaupiklio sistema (esant 100 % įkrovos lygiui) yra pajėgi padengti visą pastatui reikalingą energijos kiekį. Vidurnaktį sistemos įkrovos lygis nukrenta iki 0 %.

Balandžio mėnesio debesuotą dieną, kai pradiniu laiko momentu energijos kaupiklis yra neįkrautas, saulės elektrinės energijos kiekio nepakanka ne tik įkrauti akumuliatorių baterijai, bet ir padengti apkrovai. Dėl šios priežasties energijos kaupiklis nepanaudojamas (3.3 pav.). Tačiau energijos kaupiklio pakanka veikti kartu su saulės elektrine, kai jis pradiniu laiko momentu yra pilnai įkrautas.

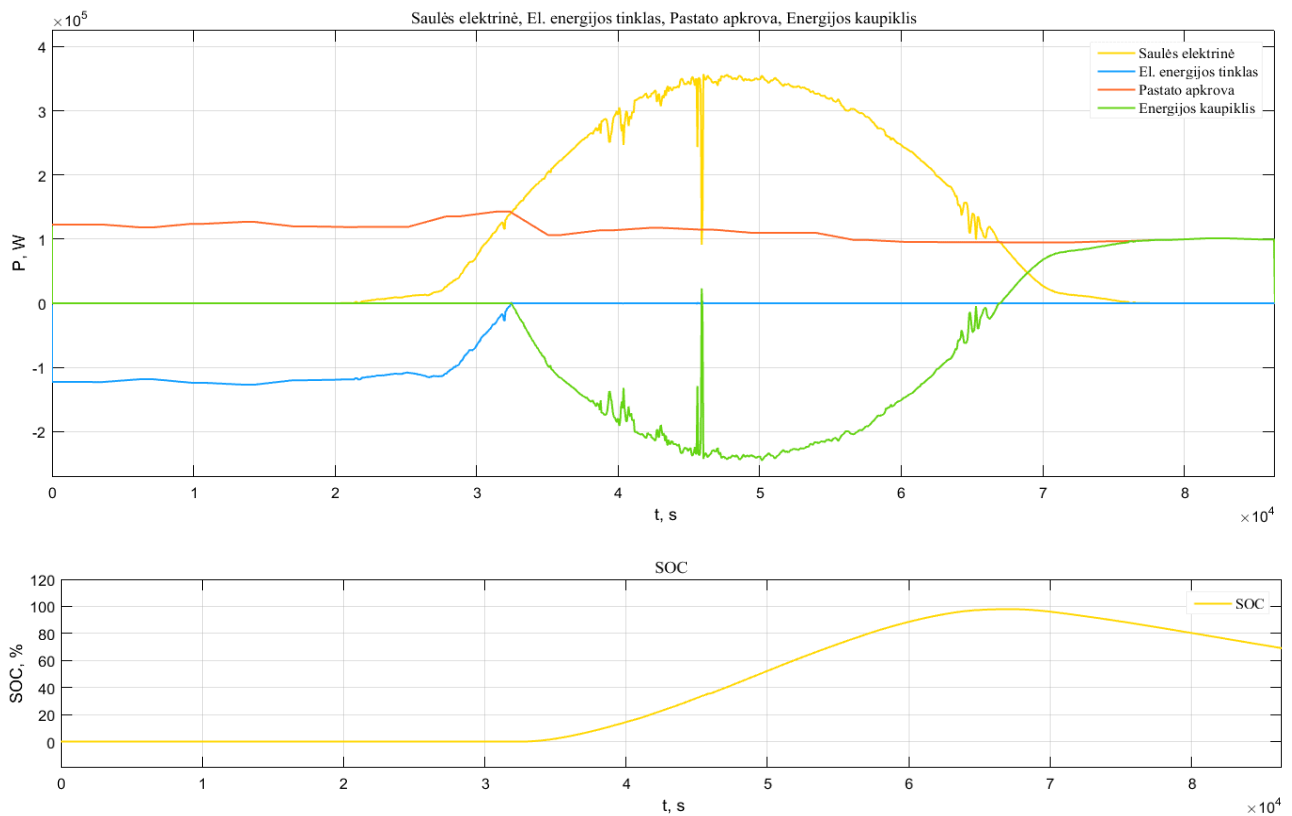
Apžvelgus 3.4 paveiksle pateiktas kreives, galima pastebėti, jog saulės elektrinė su energijos kaupikliu veikė nuo 6:44 (24 206 s) iki 18:28 (66 477 s).



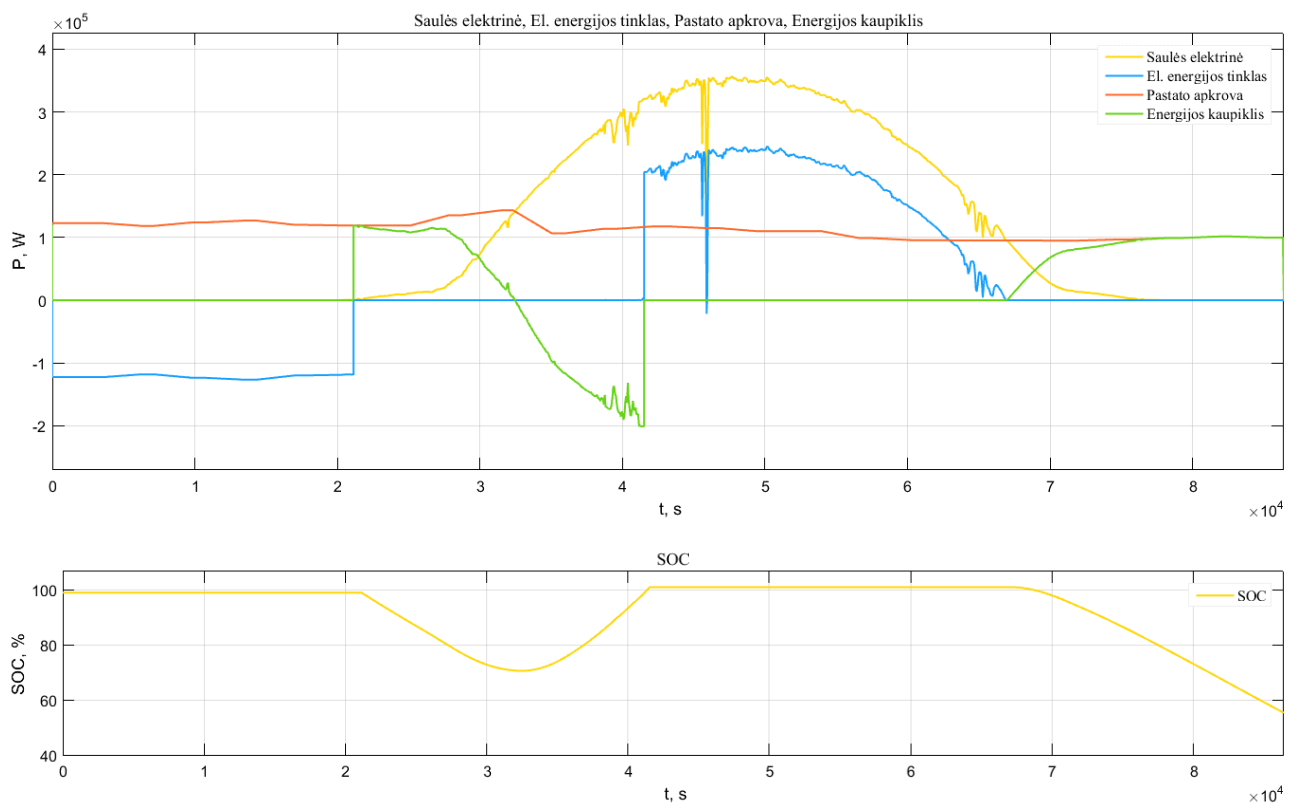
3.3 pav. Balandžio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas



3.4 pav. Balandžio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas



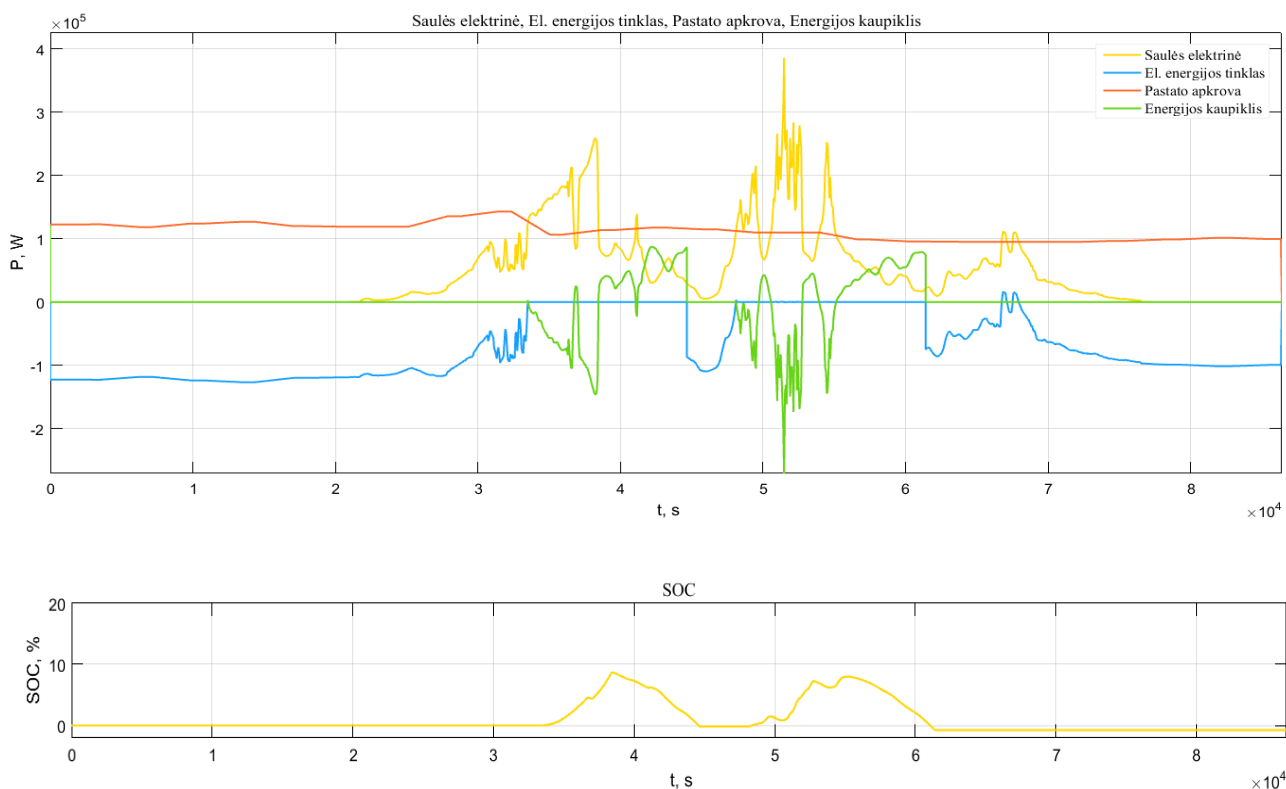
3.5 pav. Rugsjūčio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas



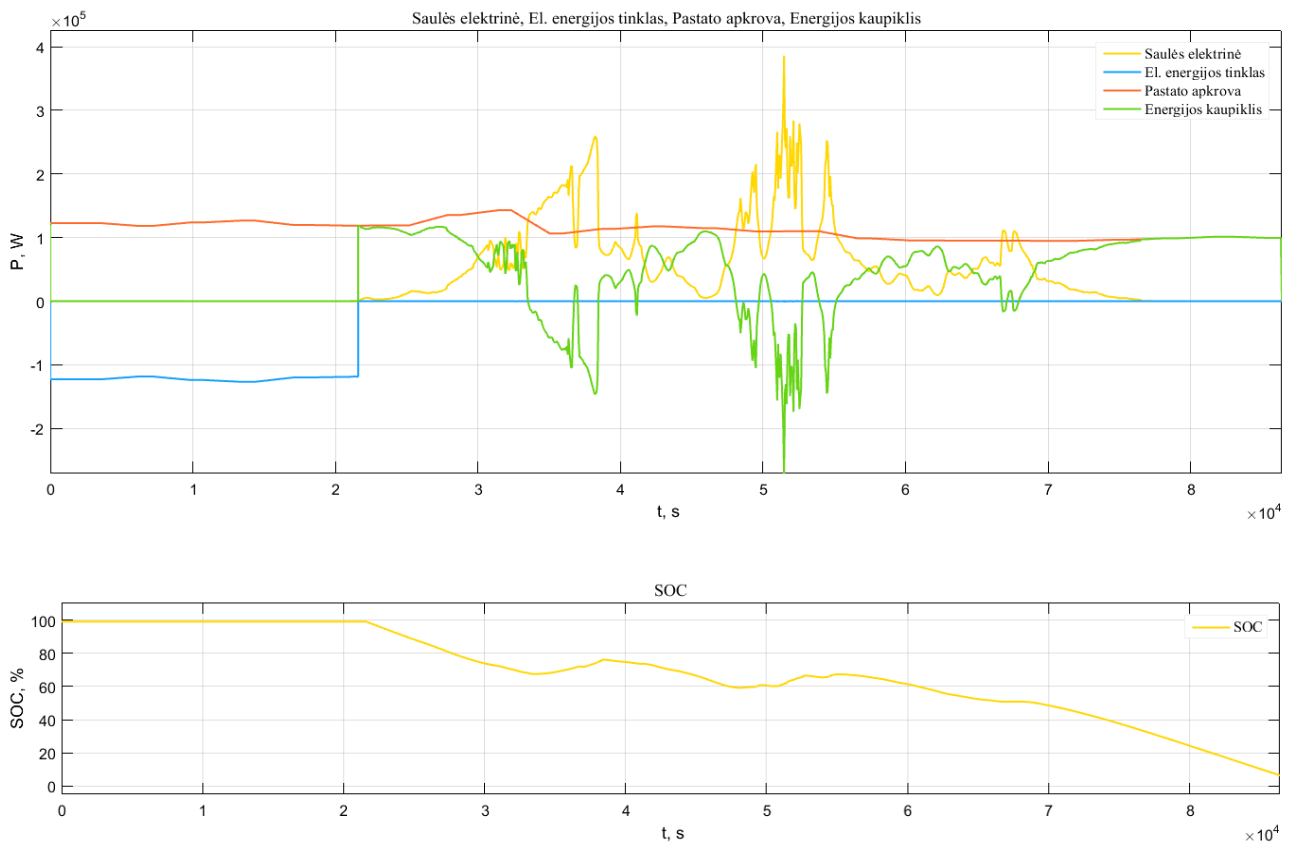
3.6 pav. Rugsjūčio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

Atlikus vasaros mėnesio saulėtos dienos analizę, galima pastebėti, jog gauti rezultatai panašūs į pavasario mėnesio rezultatus. Rugsjūčio mėnesio greitesnį akumuliatorių baterijos

įkrovimą (kai pradiniu laiko momentu kaupiklis buvo neįkrautas (3.5 pav.)), lėmė mažesnė pastato apkrova bei saulės elektrinės tekėjimo ir leidimosi (atitinkamai ankstesnis ir vėlesnis) laikas, kuris daro įtaką ilgesniam elektrinės veikimo intervalui. Vasaros metu, kai kaupiklis pradiniu laiko momentu nėra įkrautas, sukaupto energijos kiekio pakanka padengti pastatų apkrovai, o vidurnaktį akumuliatorių talpos iškvos lygis yra didesnis nei 65 %. Kai pradiniu laiko momentu energijos kaupiklis įkrautas (3.6 pav.), energija, reikalinga apkrovai padengti iš tinklo imama nuo 0:00 iki 5:46, o saulės elektrinės generuojamas perteklinis energijos kiekis į tinklą atiduodamas nuo 11:20 iki 19:05. Atsižvelgus į 3.5 ir 3.6 paveiksluose pateikiamus baterijos įkrovos lygio grafikus, galima teigti, jog energijos kaupiklis pradėdamas, veikti kartu su saulės elektrine, nėra efektyviai panaudojamas. Nors jame sukauptu energijos kiekiu yra padengiamas vakaro poreikis, dienos pabaigoje iškvos lygis yra didesnis už 50 %.

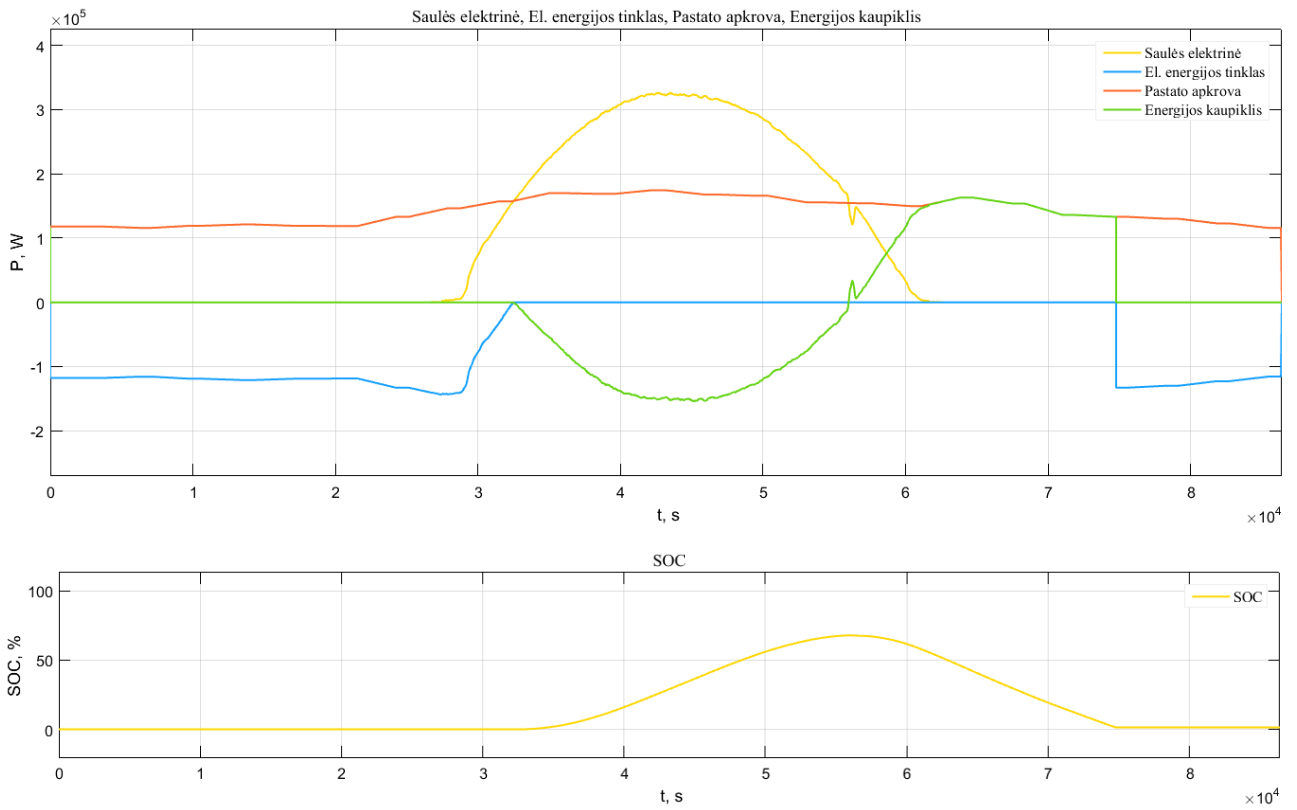


3.7 pav. Rugpjūčio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas

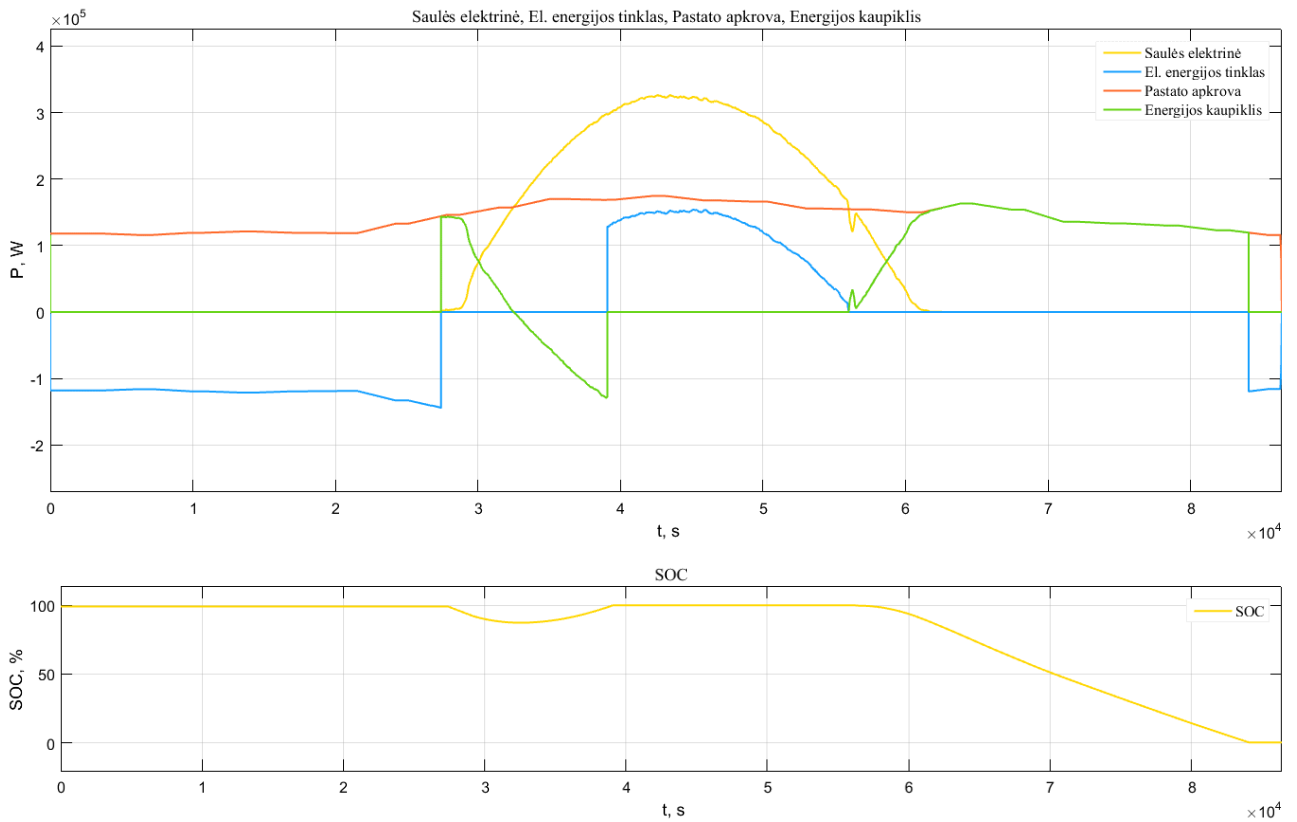


3.8 pav. Rugpjūčio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

Apžvelgus vasaros mėnesio, kai diena yra debesuota, baterijos įkrovos lygio kreivę pastebima, jog pradiniu laiko momentu neįkrautos baterijos įkrovimo nepakanka padengti saulės elektrinės sukeltiems svyravimams (3.7 pav.). Iš tinklo imamas energijos kiekis debesuotą vasaros dieną yra didesnis nei padengiamas hibridine saulės elektrinės ir kaupiklių sistema. Perteklinis energijos kiekis akumuliatorių baterija įkrauna iki 10 %. Tokiu atveju, energijos kaupiklis veikdamas kartu su saulės elektrine, išlaiko autonominę sistemą beveik dvi valandas (6 950 s). Jeigu baterija yra pilnai įkrauta (3.8 pav.), kaupiklyje esančios energijos pakanka padengti tiek saulės elektrinės sukeltiems galios svyravimams, tiek pastato apkrovai iki vidurnakčio.



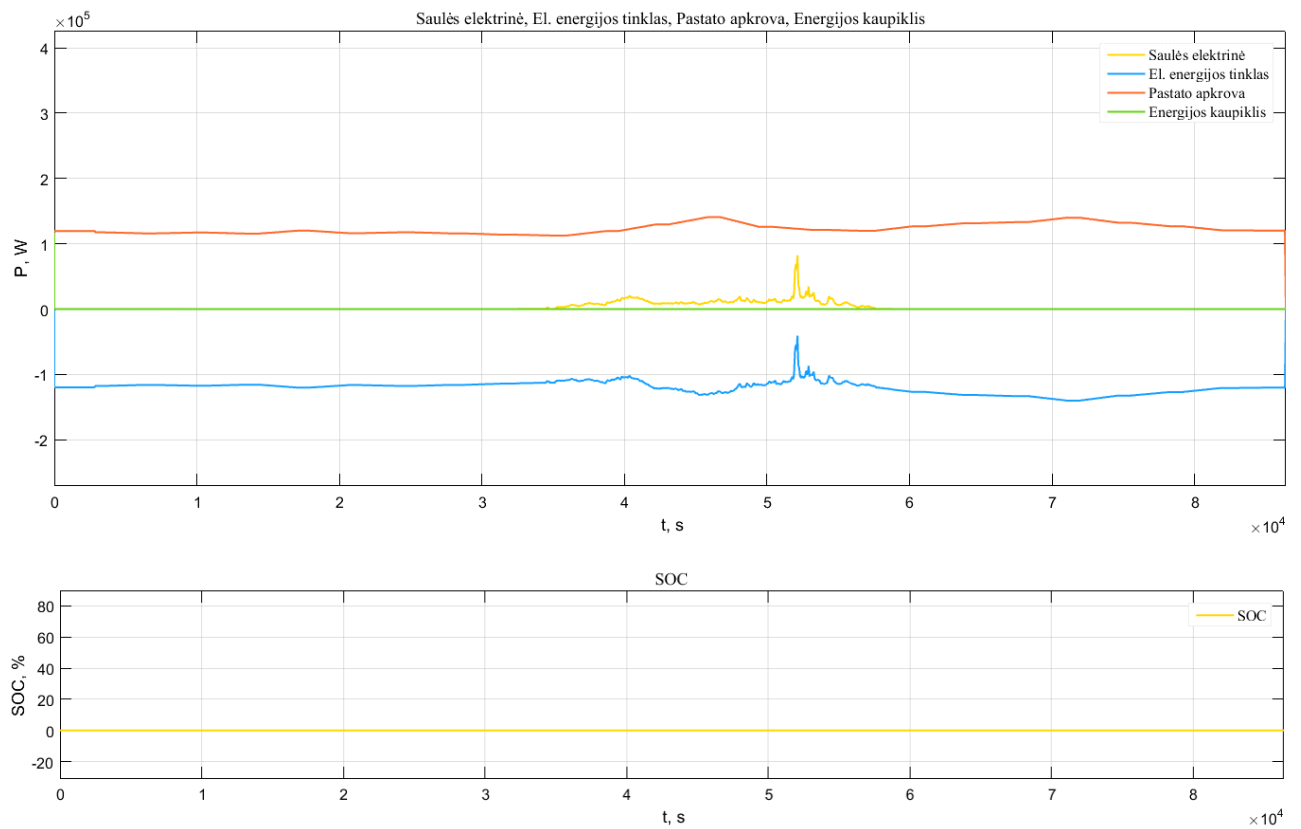
3.9 pav. Lapkričio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas



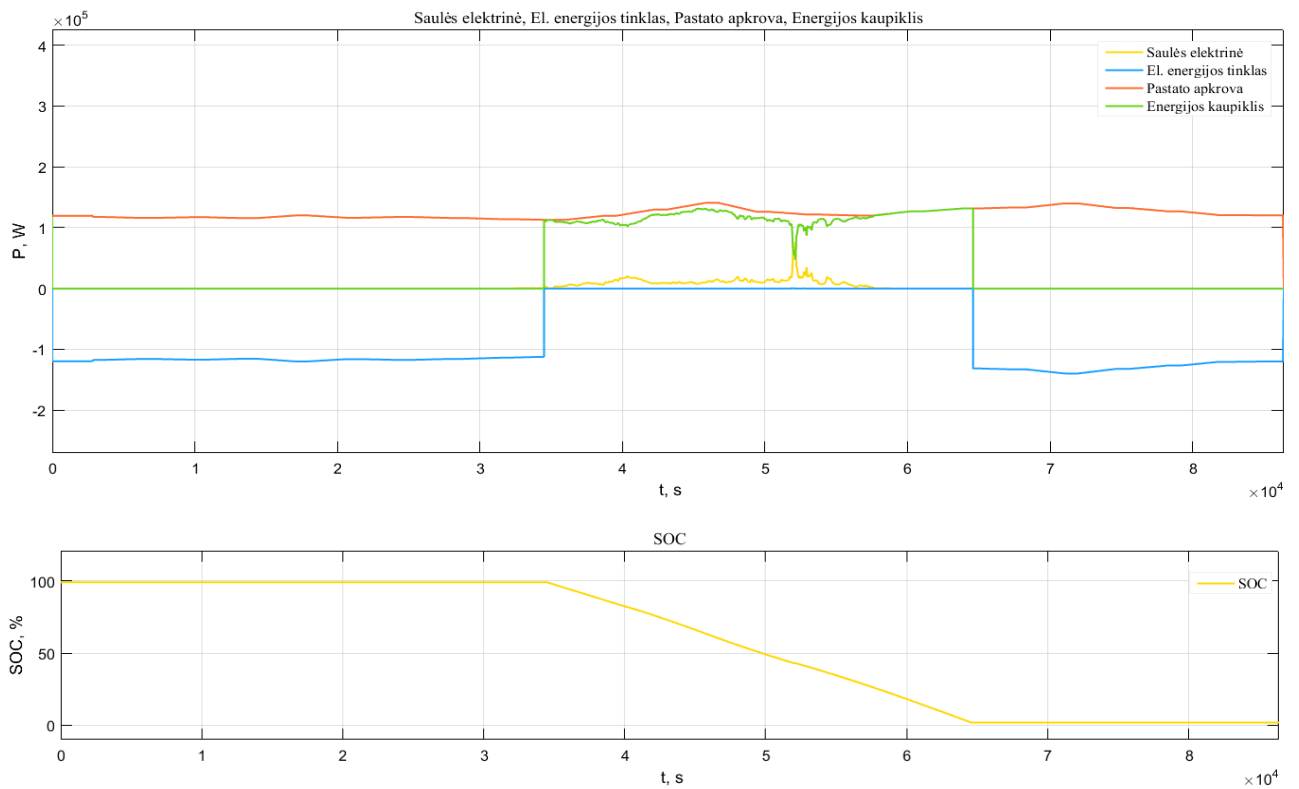
3.10 pav. Lapkričio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

Lapkričio mėnesio saulėtą dieną, kai pradiniu laiko momentu akumuliatorių baterija yra neįkrauta (3.9 pav.) pastebima, jog nuo to momento, kai saulės elektrinės generuojamas

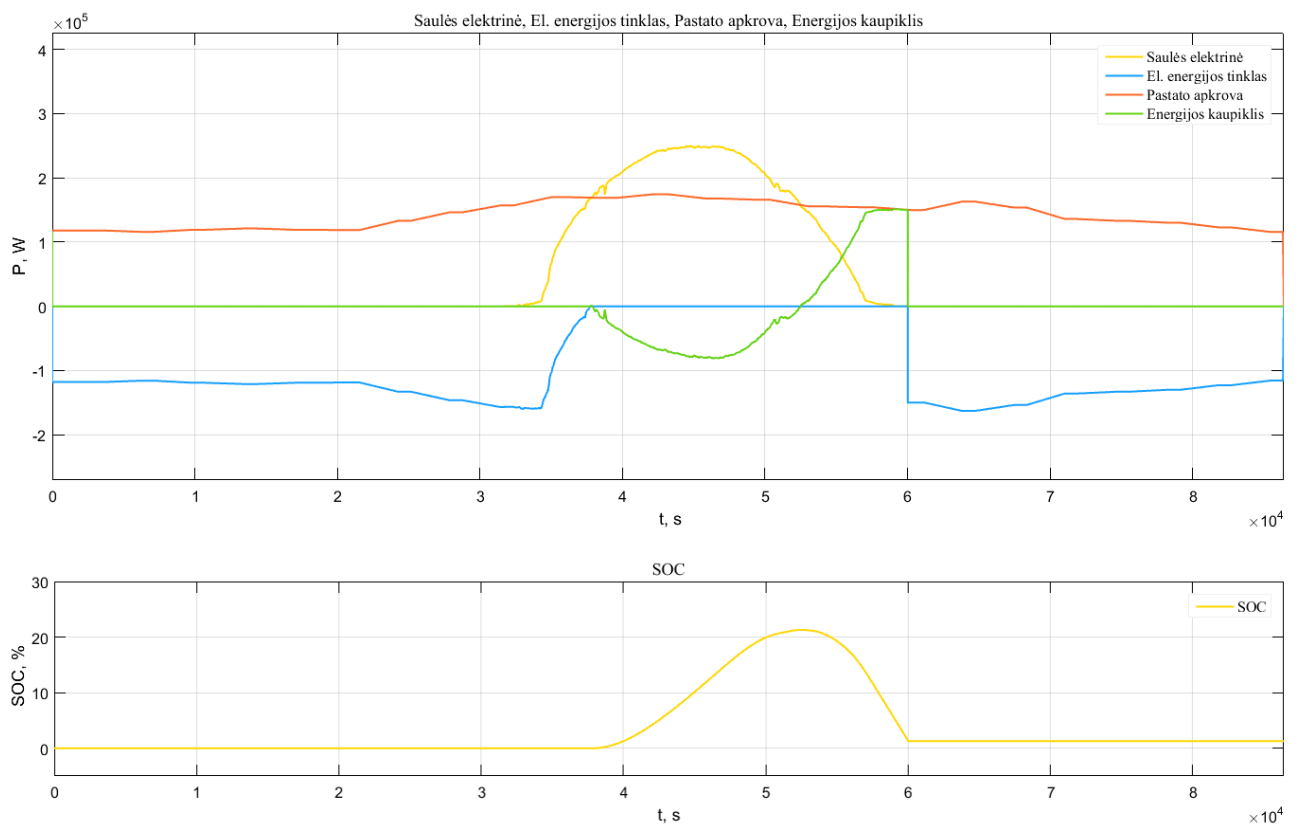
energijos kiekis viršija pastatui reikalingą apkrovos dydį, energijos kaupiklis įkraunamas iki 68 %. Tokio įkrovos gylio, nustojus saulės elektrinei generuoti energiją, apkrovai padengti pakanka iki 20:46 h (74 764 s). Sistema, atsijungusi nuo elektros tinklo veikia iki 12 valandų per parą.



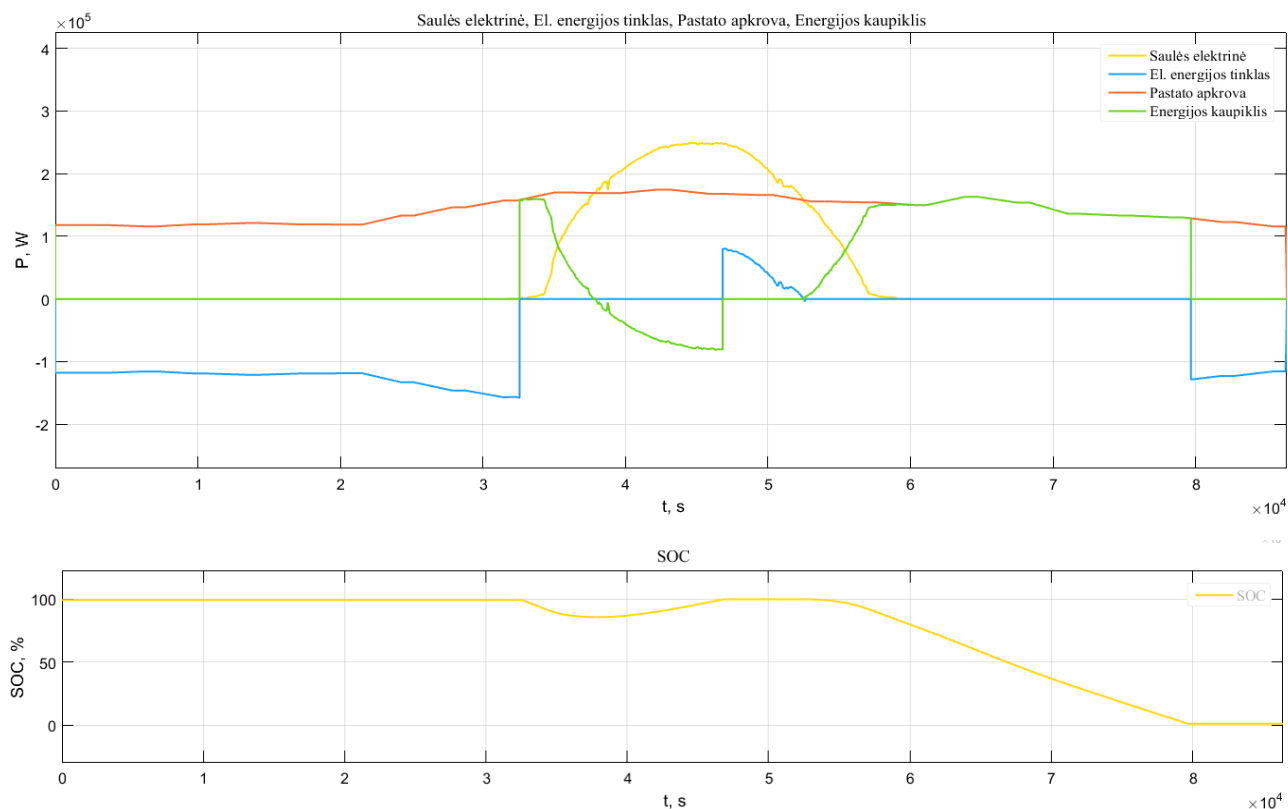
3.11 pav. Lapkričio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas



3.12 pav. Lapkričio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

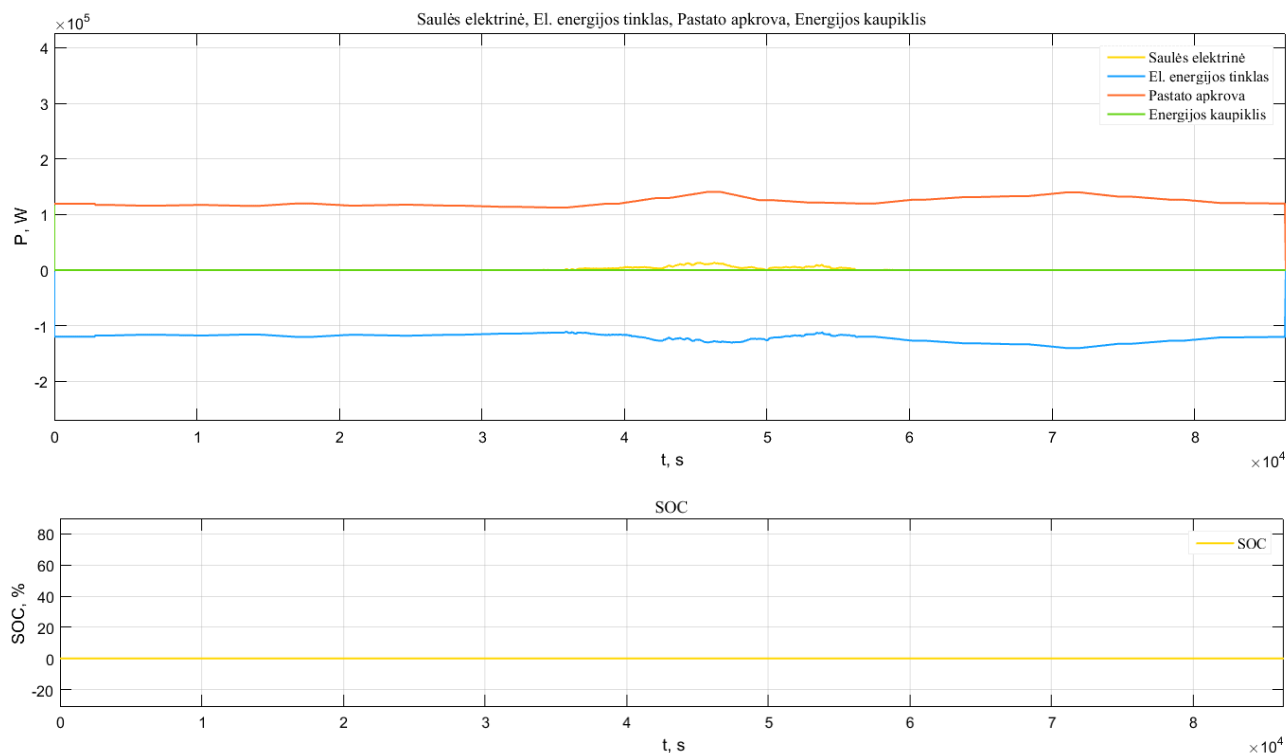


3.13 pav. Sausio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas

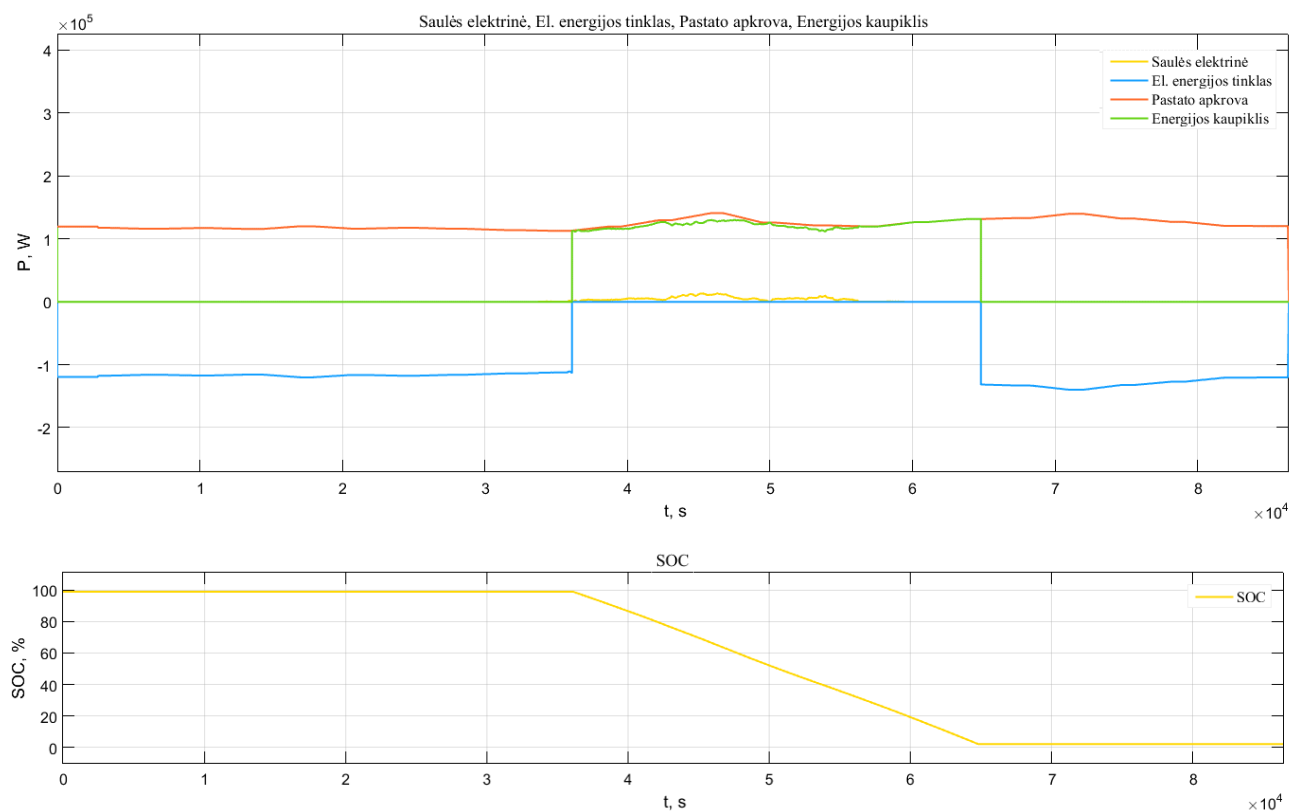


3.14 pav. Sausio mėn. saulėtos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

Sausio mėnesį, kai diena saulėta, o pradinio laiko momentu akumuliatorių baterija yra neįkrauta, (3.13 pav.) pastebima, jog nuo to momento, kai saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis viršija pastatui reikalingą apkrovos dydį, saulės elektrinės ir energijos kaupiklio pakanka padengti visai apkrovai saulės elektrinės veikimo valandomis. Sausio 29 d. 9 h ryto, saulės elektrinės generuojamos energijos vertė kertasi su pastato apkrova. Perteklinis energijos kiekis, akumuliatorių bateriją įkrauna iki 22,5 %, tai sudaro 1 125 Ah. Analizuojant sausio mėnesio modeliavimo rezultatus, kai baterijos talpa pradinio laiko momentu buvo lygi 100 %, pastebima, jog pasiekiamas režimas, kai perteklinis energijos kiekis yra atiduodamas į el. tinklą. Tokiu atveju, kaupiklio sistemoje sukaupto energijos kiekio pakanka padengti apkrovai iki 22:08 h (79 675 s).



3.15 pav. Sausio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis neįkrautas



3.16 pav. Sausio mėn. debesuotos dienos modeliavimo rezultatai, kai kaupiklis įkrautas

Atlikus debesuotos dienos sistemos modeliavimą, pastebima, jog rudens ir žiemos mėnesiais gauti panašūs rezultatai. Tiek rudens, tiek žiemos mėnesiais, esant debesuotai dienai, energijos kaupiklio sistema nepanaudojama, kai pradiniu laiko momentu baterija yra iki galo

iškrauta. Saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis, lyginant su pastatui reikalinga apkrova, yra mažas (3.11 ir 3.15 pav.). Dėl šios priežasties pastato suvartojamas energijos kiekis padengiamas iš el. tinklo. Tikimybė, jog baterija bus pilnai įkrauta yra maža, kadangi žiemos mėnesiais saulėtų dienų skaičius yra nedidelis. Taip pat, šaltuoju metų laiku pastatų apkrova yra išaugusi, todėl saulės elektrinės generuojama energija bus sunaudojama pastato apkrovai padengti. Sistemos naudingumas padidėtų įvedus konkurencingą energijos kainos rinką. Kai elektros energijos kaina yra mažesnė, energija kaupiama baterijose ir panaudojama pastato apkrovai padengti pikiniu režimu.

Pradiniu laiko momentu, kai energijos kaupiklis pilnai įkrautas, lapkričio mėnesį (3.12 pav.) saulės elektrinė ir kaupiklių sistema pradeda veikti 9:36 (34 520 s). Sausio mėnesį (3.16 pav.) sistema įsijungia 10:30 (37 860 s). Toks skirtumas atsiranda dėl skirtingo saulės pakilimo kampo virš horizonto sausio ir lapkričio mėnesiais.

Pagal 3.12 ir 3.16 paveiksluose pateiktas įkrovos gylio kreives, galima pastebėti, jog kaupiklių sistema tolygiai išsikrauna ir sistema, atsijungusi nuo elektros tinklo, lapkričio ir sausio mėnesiais atitinkamai iki veikia 17:51 (64 260 s) ir 18:05 (65 110 s).

Sistemos modeliavimas padėjo nustatyti baterijų kaupiklio veikimo režimus. Atsižvelgus į padengiamus energijos plotus, taip pat energijos kiekius, kai saulės elektrinė yra pajėgi ne tik padengti pastato apkrovą, bet ir krauti akumuliatorių baterijas, galima išskirti du energijos kaupiklių veikimo režimus: vasaros bei kitų metų laikų. Vasaros režimu tikslinga energijos kaupiklio veikimą pailginti, t. y. akumuliatorių bateriją naudoti visą parą, o ne įjungti tuomet, kai saulės elektrinė pradeda generuoti energiją. Tokiu būdu saulėtos dienos sukauptas energijos kiekis panaudojamas kitos dienos ryto apkrovai padengti, kai saulės elektrinė dar negeneruoja energijos kiekio. Iš 3.15 paveikslo matyti, jog esant iki galo iškrautai akumuliatorių baterijai, saulėtą vasaros dieną ji yra pilnai įkraunama. Tokiu atveju, kai kelios dienos yra saulėtos, sistema pajėgi veikti autonomiškai. Atsižvelgus į modeliavimus, atliktus visais kitais metų laikais, efektyvu energijos kaupiklio veikimą derinti su saulės elektrine.

Pikinių verčių sumažinimas – energijos apkrovos valdymo technologija, kuri, atsižvelgus į pastatų komplekso apkrovos grafiko kitimo tendenciją, gali būti įgyvendinama analizuojamoje sistemoje. Taip pat, energijos kaupiklio valdiklyje sumažinus momentinę atidavimo galią, pasiekama dar viena poreikio valdymo technologija – energijos apkrovos kontroliavimas. Tokiu būdu gali būti sumažinama apkrovos kreivė nustatytu dydžiu visame paros laiko intervale.

Atlikus mikrotinklo modeliavimą, analizuojamas efektyvus kaupiklių ir visos sistemos panaudojimas. Energijos kaupiklio efektyvumas vertinamas analizuojant baterijos įkrovos lygio kreives.

Baterijų efektyvumui ištirti nustatomos pradinės sąlygos:

- efektyvumas vertinamas vieną parą (pagal modeliavimo trukmę);
- baterija pradiniu laiko momentu yra iškrauta;
- panaudojamas 100 %, kai per dieną įvyksta pilnas įkrovimo – iškrovimo ciklas.

Atsižvelgiant į nustatytas pradines sąlygas, iš atliktų sistemos modeliavimų, analizuojama kiekvieno metų laiko saulėtos ir debesuotos dienos sistema, kai pradiniu laiko momentu baterija yra neįkrauta. Gauti rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Kaupiklių sistemos efektyvumo vertinimas skirtingiems metų laikams

Metų laikas	Diena	Įkrovimas iki, %	Iškrovimas iki, %	Panaudojimas, %
Pavasaris	Balandžio 16	80	0	80
	Balandžio 23	0	0	0
Vasara	Rugpjūčio 3	100	75	63
	Rugpjūčio 10	18	0	18
Ruduo	Lapkričio 19	68	0	68
	Lapkričio 23	0	0	0
Žiema	Sausio 15	22	0	22
	Sausio 20	0	0	0

Apžvelgus visus atliktus modeliavimus, pastebima, jog efektyviausiai energijos kaupiklis buvo panaudojamas balandžio mėnesį, kai diena buvo saulėta. Sistemos panaudojimo koeficientas siekia 80 %, nors energijos kaupiklis nebuvo pilnai įkrautas. Taip pat, atlikus skirtingų metų laikų sistemos vertinimą, galima teigti, jog pagrindinis faktorius, lemiantis sistemos panaudojimo efektyvumą yra meteorologinės sąlygos. Sistema pavasario – rudens mėnesiais yra konkurencinga esant saulėtai dienai, o esant debesuotai dienai – energijos kaupiklis nepanaudojamas (baterija dėl didelės apkrovos neįkraunama).

Metinis energijos kaupiklio efektyvumo vertinimas atliekamas remiantis 2.3 ir 3.1 lentelėse pateiktais duomenimis. Žinant saulėtų ir debesuotų dienų skaičių kiekvieną metų ketvirtį bei kiekvieno iš jų panaudojimo efektyvumą, apskaičiuojama suminė vertė.

$$\eta_{\Sigma} = \frac{48 \cdot 80 + 44 \cdot 0 + 58 \cdot 63 + 34 \cdot 18 + 31 \cdot 68 + 60 \cdot 0 + 36 \cdot 22 + 54 \cdot 0}{365} = 30\%. \quad (3.1)$$

Metinis baterijos efektyvumas dėl debesuotų dienų skaičiaus (191 per metus) ir kaupiklio nepanaudojimo tokiomis dienomis siekia tik 30 % (26,8 % sudaro saulėtomis dienomis bei 3,2 % - debesuotomis). Tačiau, kai energijos kaupiklis pradiniu laiko momentu yra įkrautas, tokios talpos kaupiklio pakanka veikti kartu su saulės elektrine visais metų laikais tiek saulėtomis ir debesuotomis dienomis. Dėl šios priežasties, elektros energijos vartotojas ar tinklo operatorius nepatiria saulės elektrinės sukeltų galios svyravimų.

Tokiu pačiu principu atliekami skaičiavimai sistemos autonominiam darbui įvertinti. Sistema vertinama prasčiausiu režimu, t. y. kai pradiniu laiko momentu energijos kaupiklis nėra įkrautas. Iš sistemos modeliavimo paveikslų apskaičiuojami laiko intervalai, kai sistema veikė savarankiškai (mėlyna kreivė ant abscisių ašies). Sistema vertinama dviem atvejais: be energijos kaupiklio bei su juo. Gauti rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje (atliktuose modeliavimo paveiksluose pateiktas laikas sekundėmis perskaičiuojamas į valandines reikšmes). Pagal 2.3 ir 3.2 lentelėse pateiktus duomenis bei įvertinant, jog metuose yra 8760 h, apskaičiuojami metiniai autonominio darbo režimai.

3.2 lentelė. Autonominio darbo režimai skirtingais metų laikais

Metų laikas	Diena	Autonominio darbo trukmė per parą	
		Be kaupiklio	Su kaupikliu
Pavasaris	Balandžio 16	7 h 44 min	13 h 38 min
	Balandžio 23	0	0
Vasara	Rugpjūčio 3	10 h 9 min	15 h 6 min
	Rugpjūčio 10	2 h 46 min	6 h 42 min
Ruduo	Lapkričio 19	6 h 45 min	11 h 44 min
	Lapkričio 23	0	0
Žiema	Sausio 15	3 h 49 min	5 h 54 min
	Sausio 20	0	0

Susumavus gautus rezultatus, sistema be energijos kaupiklio per metus apytiksliai veikia 1 408 h, o su juo – 2 240 h, atitinkamai tai sudaro 16 ir 25 % visų metuose esančių valandų.

IŠVADOS

1. Remiantis gautais rezultatais, analizuojamam pastatui galima pritaikyti pikinių verčių sumažinimo technologiją.
2. Išanalizavus energijos kaupiklių technologijas ir atsižvelgus į pagrindines savybes – veikimo laiką, mažą savaiminį išsikrovimą, – sistemoje pasirinktas energijos kaupiklių šaltinis – ličio jonų akumuliatorius, atliekantis energijos valdymo paskirtį.
3. Didžiausias pastatų suminis suvartojamos energijos kiekis pasiekiamas gruodžio mėnesį ir lygus 98 265 kWh.
4. Įvertinus 2013 – 2015 metų saulės apšvietos duomenis, apskaičiuotas prognozuojamas saulės elektrinės generuojamas energijos kiekis kiekvienais metais viršija 430 000 kWh.
5. Sistemos analizės ir modeliavimo bandymų metu nustatyta energijos kaupiklio talpa lygi 5 000 Ah. Esant tokiam kaupikliui išskiriami du veikimo režimai: vasarą kaupiklis dirba visą parą, o kitais metų laikais – pradeda veikti kartu su saulės elektrine.
6. Saulės elektrinės ir kaupiklių sistemos efektyviam panaudojimui įtakos turi meteorologinės sąlygos: esant saulėtai dienai, sistema efektyviai panaudojama pavasario – rudens mėnesiais. Dėl didelio debesuotų dienų skaičiaus, metinis energijos kaupiklių sistemos efektyvumas siekia tik 30 %, o sistema autonomiškai dirba 25 % per metus.

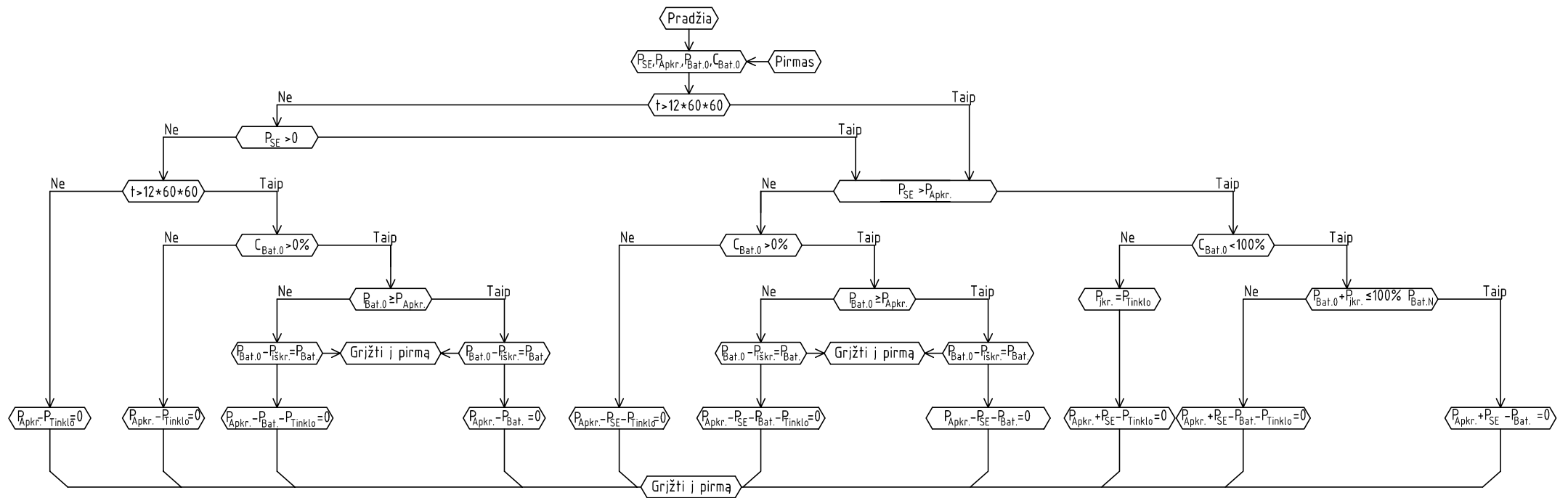
LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ADOMAVIČIUS, V. Šiuolaikiniai elektros energijos kaupikliai. [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://gjstudija.net/ltma/ltma-darbai/LTMAMd-7-VA-ElekrKaup.pdf>
2. ATIA R., YAMADA N. Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids. *IEEE transactions on smart grid*. May.2016, vol 7, no. 3, p. 1204 – 1213.
3. BARBATO A., CAPONE A. Optimization Models and Methods for Demand – Side Management of Residential Users: A Survey. *Energies*. September 2014, p. 5787 – 5824
4. BEN CHRISTOPHER, S. J. Dynamic Demand Balancing Using Demand Side Management Techniques in a Grid Connected Hybrid System. *International journal of renewable energy research*. 2014, vol 4, no.4, p. 1031 – 1041.
5. GUPTA I., ANANDINI G.N., GUPTA M. An Hour wise device scheduling approach for Demand Side Management in Smart Grid using Particle Swarm Optimization. 2016. [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per: IEEE Xplore Digital Library
6. KEMPENER R., BORDEN E., Battery storage for renewables: market status and technology outlook. *IRENA*, January 2015 [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Battery_Storage_report_2015.pdf
7. MASTERS G. M. Renewable and efficient electric power systems. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004, p. 477 – 485, 512 – 514, 562 – 565.
8. MEHRABANKHOMARTASH M., RAYATI M., SHEIKHI A., RANJBAR A.M. Practical battery size optimization of a PV system by considering individual customer damage function. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2017, vol 67, p. 36 – 50.
9. PHIRI S.F., KUSAKANA K. Demand Side Management of a grid connected PV-WT-Battery hybrid system [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per: IEEE Xplore Digital Library
10. RAJI A., YAMADA N., Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, vol 7, No 3, p. 1204 – 1212.
11. Saulės energijos ištekliai. [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.lsea.lt/saules-energijos-istekliai>

12. Saulės fotoelemento parametrai. [žiūrėta 2017 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: http://www.viasolis.lt/uploads/userfiles/atsisiuntimui/LT_PRIME_245-270_.pdf
13. Sustainable energy regulation and policy – making training manual. Module 14: Demand – side management. p. 14.31 – 14.41. [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per: IEEE Xplore Digital Library
14. WASI S., MUHAMMAD S. Demand Site Management and Demand Response. [žiūrėta 2017 m. balandžio 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://ssrn.com/abstract=2774167>
15. WEI Q., SHI G., SONG R., LIU Y. Adaptive Dynamic Programming-Based Optimal Control Scheme for Energy Storage Systems With Solar Renewable Energy. *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2016
16. WU, Yuping. Lithium – ion batteries. Fundamentals and applications. United Kingdom, CRC Press, 2015, p.549 – 555.

PRIEDAI

1 PRIEDAS ANALIZUOJAMOS SISTEMOS MODELIAVIMO ALGORITMAS



Paaiškinimai:

- t - laikas
- $P_{Apkr.}$ - pastatų apkrovos galia
- P_{Tinklo} - galia, paimama iš tinklo
- P_{SE} - saulės elektrinės generuojama galia
- $C_{Bat.0}$ - baterijos talpa, modeliavimo žingsnio pradžioje
- $P_{Bat.0}$ - baterijos galia, modeliavimo žingsnio pradžioje
- $P_{Bat.}$ - baterijos galia, modeliavimo žingsnio pabaigoje
- $P_{jkr.}$ - įkrovimo galia (perteklinės energijos panaudojimas)
- $P_{iskr.}$ - iškrovimo galia (trūkstantos energijos panaudojimas)