



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros energijos konversijos procesų elektros mikrotinkle tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Dovilė Barauskaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Elektros energijos konversijos procesų elektros mikrotinkle tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos sistemos (6211EX011)

Dovilė Baranauskaitė

Projekto autorė

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

Vadovas

Doc. dr. Audrius Jonaitis

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Dovilė Baranauskaitė

Elektros energijos konversijos procesų elektros mikrotinkle tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Dovilės Baranauskaitės, baigiamasis projektas tema „Elektros energijos konversijos procesų elektros mikrotinkle 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.

Baranauskaitė, Dovilė. Elektros energijos konversijos procesų elektros mikrotinkle tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Povilas Norkevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Reikšminiai žodžiai: Elektros mikrotinklas, energijos kaupikliai, paskirstytieji generatoriai, atsinaujinantys energijos šaltiniai, Matlab/Simulink.

Kaunas, 2019. 50 p.

Santrauka

Šiame darbe apžvelgiami paskutiniųjų metų iš atsinaujinančiosios energijos bei tradicinių energijos šaltinių pagaminamos ir suvartojamos energijos rodikliai Europos Sąjungoje; pristatoma Europos Sąjungos aplinkosaugos politika, susijusi su atsinaujinančiosios energijos išteklių panaudojimo skatinimu, mikrotinklų plėtra. Taip pat pristatomi mikrotinklų struktūros elementai, plačiau apžvelgiami trijų elektrocheminės kilmės energijos kaupiklių parametrai ir darbo sąlygos. Apžvalginės dalies pabaigoje pristatoma dėl mikrotinklų plėtojimo kylanti problematika.

Tiriamajoje darbo dalyje pristatomas Matlab/Simulink sudarytas imitacinis procesų modelis – gyvenamojo namo mikrotinklas, jo elementai ir parametrai. Pateikiamos priimamos sąlygos, prie kurių atliekamas modeliavimas. Atliekamas energijos kaupiklių dinaminių savybių tyrimas, pateikiami gauti rezultatai bei atliktos išvados.

Baranauskaitė, Dovilė. Research of Electric Power Conversion Processes in Microgrid. Master's Final Degree Project / supervisor lect. doc. Povilas Norkevičius; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology,.

Keywords: Microgrid, Energy storage system, Distributed generators, Renewable resources, Matlab/Simulink.

Kaunas, 2019. 50 pp.

Summary

This work provides an overview of energy generation from renewable energy and traditional energy resources in the European Union in the recent year; the European Union's environmental policy on promoting the use of renewable energy sources and the development of microgrids. The elements of the microgrids structure are also presented, and the parameters and operating conditions of three electrochemical energy storage devices are reviewed more broadly. At the end of the review section, the problems arising from the development of microgrids are presented.

The research part introduces the imitative process model developed by Matlab / Simulink - the microgrid for the household application, its elements and parameters. The conditions under which the simulation is carried out are accepted. A study of the dynamic properties of energy storage devices is performed and results and conclusions are presented.

Turinys

Paveikslėlių sąrašas	7
Lentelių sąrašas	8
Santrumpos	9
Įvadas.....	10
1. Mikrotinklai	11
1.1. Apžvalga.....	11
1.1.1. Paskirstytieji generatoriai	14
1.1.2. Apkrovos	14
1.1.3. Energijos kaupikliai.....	15
1.1.4. Valdymo įrenginiai.....	15
1.1.5. Problematika.....	16
1.2. Energijos kaupikliai.....	17
1.2.1. Ličio jonų baterijos.....	21
1.2.2. Švino rūgštinės akumuliatorių baterijos	25
1.2.3. Nikelio metalo hidrido baterijos.....	26
2. Tiriamojo mikrotinklo modelis	29
2.1. Tiriamojo mikrotinklo struktūra ir imitacinis procesų modelis.....	29
2.2. Elektros energijos keitikliai bei jų parinkimas	32
2.3. Elektros tinklo struktūra bei parametrai	35
2.3.1. Optimalaus sistemos modelio sudarymas HOMER programa.....	36
3. Galios svyravimų procesų optimizavimas panaudojant energijos kaupiklius ir rezultatų analizė.....	40
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47
Priedai.....	50
Priedas Nr. 1. Modeliavimas su ličio jonų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą.....	51
Priedas Nr. 2. Modeliavimas su nikelio metalo hidridų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą.....	53
Priedas Nr. 3. Modeliavimas su nikelio metalo hidridų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą.....	55
Priedas Nr. 4. Modeliavimas su ličio jonų akumuliatoriumi pagal 3-ąją sąlygą.....	57
Priedas Nr. 5. Modeliavimas su švino rūgštiniu akumuliatoriumi pagal 3-ąją sąlygą	61

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav. Atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalis bendrosiose galutinėse energijos sąnaudose 2017 m. ir 2020 m. [3].....	12
1.2 pav. Mikrotinklo sąvoką atspindinti iliustracija bendrame elektros generacijos lygmenyje...	13
1.3 pav. Mikrotinklų sistemos funkcijos	16
1.4 pav. Energijos kaupiklių dalis bendrame kaupiklių balanse, nevertinant hidroakumuliacinės kilmės EK.....	19
1.5 pav. Naujai instaliuotų energijos kaupiklių dalis pagal technologiją	20
1.6 pav. Energijos kaupiklių instaliuota galia pasaulyje iki 2016 metų [10].....	20
1.7 pav. Ličio jonų celės įkrovos/iškrovos parametrai [15]	24
1.8 pav. Ličio jonų baterijos ekvivalentinė elektros grandinė [15]	24
2.1 pav. Tiriamojo mikrotinklo blokinė schema.....	29
2.2 pav. Vidutinis vyraujantis vėjo greitis kiekvieną mėnesį	30
2.3 pav. Vidutinė saulės apšvieta bei skaidrumo indeksas kiekvieną mėnesį.....	30
2.4 pav. Vėjo elektrinės schema	31
2.5 pav. Saulės elektrinės schema	31
2.6 pav. Tiriamojo mikrotinklo modelis Matlab/Simulink programoje	31
2.7 pav. Aukštinančiojo nuolatinės srovės keitiklio schema.....	35
3.2 pav. Energijos kaupiklio suveikimo laikas nutrūkus saulės elektrinės generacijai	41
3.3 pav. Laikas nuo disbalanso atsiradimo iki EK nusistovėjusio veikimo	41
3.4 pav. Energijos kaupiklio SOC ir įtampos kitimas atsiradus disbalansui a) ličio jonų akumuliatoriuje; b) švino rūgštiniame c) nikelio metalo hidridų.....	42
3.5 pav. Energijos kaupiklio srovės kitimas atsiradus disbalansui.....	43
3.6 pav. Įtampos svyravimai apkrovos pusėje pasireškus tinkle disbalansui	43

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Energijos kaupiklių paskirtis skirtinguose tinklo lygmenyse	18
1.2 lentelė. Ličio jonų akumuliatorių tipų palyginimai [21]	22
1.3 lentelė. Švino rūgštinių akumuliatorių tipų palyginimai [21]	25
1.4 lentelė. Nikelio pagrindo akumuliatorių tipų palyginimai [21].....	27
1.5 lentelė. Energijos kaupiklių parametru palyginimai.....	28
2.1 lentelė. Siūloma mikrotinklo architektūra	38
2.2 lentelė. Sistemos el. energijos generacijos vertės.....	38
2.3 lentelė. Mikrotinklo ekonominiai rodikliai.....	38
2.4 lentelė. Energijos kaupiklių parametrai	39
3.1 lentelė. Pirmos sąlygos modeliavimo rezultatai	44
3.2 lentelė. Modeliavimo rezultatai, kai maksimali apkrovos galia pakelta iki 19 kW.....	44
3.3 lentelė. Modeliavimo rezultatai pagal trečiąją sąlygą	44

Santrumpos

AEI – atsinaujinantys energijos ištekliai;
AEŠ – atsinaujinančiosios energijos šaltiniai;
EK – energijos kaupiklis;
MT – mikrotinklas;
MPPT – maksimalaus galios taško sekimas;
AC – kintama srovė;
DC – nuolatinė srovė;
SOC – įkrovos būseną;
SE – saulės elektrinė;
VE – vėjo elektrinė;
PG – paskirstytasis generatorius;
Li-ion – ličio jonų akumuliatorius;
NiMH – nikelio metalo hidrido akumuliatorius;
NiFe – nikelio geležies akumuliatorius;
LA – (angl. lead acid) švino rūgštinis akumuliatorius.

Išvadas

Kylant iškastinio kuro kainoms ir mažėjant jo atsargoms, vis daugiau dėmesio skiriama naujų technologijų plėtrai integruojant į energijos gamybą atsinaujinančios energijos šaltinius. Atsižvelgiant į tai, kad skatinant atsinaujinančių energijos šaltinių integravimą į mažos, vidutinės ar didelės apimties energetikos sistemas, tinklams plečiantis ir tampant vis sudėtingesniais, naujų technologijų plėtra geresnei atsinaujinančių šaltinių integracijai ir panaudojimui kelia didelį susirūpinimą. Daugelis šalių telkia dideles pastangas pasiekti užsibrėžtus tikslus: pagaminti kuo energijos iš atsinaujinančių energijos šaltinių (AEŠ), sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą ir padidinti visuomenės energijos vartojimo efektyvumą, tačiau integruojant vis daugiau AEŠ, jų kintamumas ir nenuspėjamas pobūdis mažina tinklų patikimumą, ir jie tampa vis labiau jautrūs įtampos ir dažnio stabilumo problemoms.

Atsinaujinančių energijos šaltinių integravimas į energetikos sistemą yra labai naudingas būdas panaudoti neišsenkančią gamtos energiją, tačiau reikalauja didelio besisukančios galios rezervo. Siekiant išvengti didelių investicijų į esamų tinklų rekonstrukciją ir siekiant tinklo stabilumo, būtina įtraukti inovatyvius sprendimus, technologijas ir tinklų architektūras. Išmanieji tinklai, mikrotinklai ir energijos kaupikliai tinkle gali ne tik sumažinti esamo elektros tinklo pertvarkymo poreikį, bet ir sušvelninti pereinamuosius procesus tinkle keičiantis energijos gamybos galiai.

Mikrotinklų įrengimas nutolusiose vietovėse suteikia galimybę naudotis elektros energija, kur įrengti skirstomuosius tinklus yra neįmanoma arba ekonomiškai neapsimoka; didina energetinę nepriklausomybę nuo centralizuoto elektros energijos tiekimo ir diversifikuoja energijos gamybos rinką. Vietovėse, kur elektros tinklai yra labai pažeidžiami ir dažnai kartojami atjungimai, mikrotinklas su energijos kaupimo sistema įgalina vartotoją nepertraukiamai naudotis elektros energija. Elektrocheminis energijos kaupimas akumuliatoriuose yra patrauklus, nes jis yra kompaktiškas, lengvai diegiamas, turi perspektyvią kainos mažėjimo tendenciją ir ypatingai greitai gali sukaupti bei atiduoti elektros energiją.

Tikslas: Ištirti vienbučio gyvenamojo namo mikrotinklo energijos kaupiklių dinamiką pasireiškus tinkle elektros energijos generacijos disbalansui.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti mikrotinklų elementų elektrines charakteristikas ir elektros energijos konversijos procesus;
2. Palyginti skirtingų energijos kaupiklių technologijas, technines charakteristikas ir panaudojimo galimybes;
3. Sumodeliuoti mikrotinklą su elektros energijos poreikį užtikrinančios galios atsinaujinančios energijos šaltiniais bei parinkti reikalingos talpos energijos kaupiklius;
4. Ištirti elektros energijos konversijos pereinamuosius procesus pasireiškus tinkle disbalansui.

1. Mikrotinklai

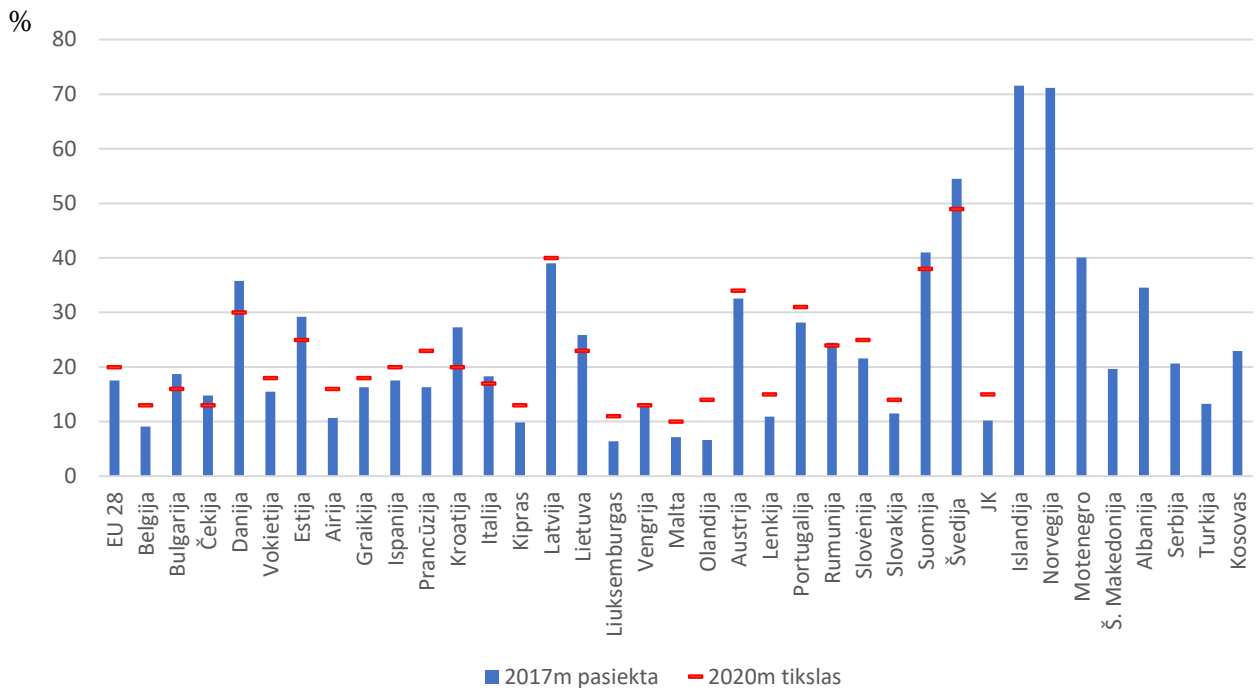
1.1. Apžvalga

Šiuolaikinės energetikos sistemos patiria didžiulius pokyčius, kuriuos lemia pasaulyje tarp didžiųjų valstybių atsirandantys susitarimai bei Europos Parlamento direktyvose išskirti aplinkosauginiai reikalavimai, energijos efektyvumo didinimas, taupymas ir kt. (direktyvos: 2012/27/ES – dėl energijos vartojimo efektyvumo, 2009/29/EB – dėl šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos mažinimo, 2009/125/EB – dėl su energija susijusių gaminių ekologinio projektavimo [1]). Europos aplinkos agentūros duomenimis, 2015 m. energijos tiekimo sektorius buvo daugiausiai šiltnamio efektą sukeliančių dujų išskiriantis sektorius, kurio dalis sudarė 29 % [6]. Siekiant išspęsti tokias problemas kaip klimato atšilimas, privalomas glaudus visų pramonės sektorių ir politikos sričių bendradarbiavimas priimant sprendimus.

Aplinkosaugos klausimų ir problemų sprendimų integravimas į daugumą kitų Europos Sąjungos politikos sričių prasidėjo jau nuo 1998 metais vykusio Europos Vadovų Tarybos susitikimo – Kardifo proceso. Nuo tada padaryta didžiulė pažanga, kurią, pavyzdžiui, galima matyti ir energetikos srityje – ES klimato ir energetikos dokumentų rinkiniai yra rengiami lygiagrečiai; planas iki 2050 metų sukurti mažo anglies dioksido kiekio ekonomiką.

Šiuo metu labai svarbų vaidmenį pramonės, energetikos ir kitiems sektoriams atlieka ES parengta energetikos strategija, kurios tikslai per direktyvas perkeliama į Europos Sąjungos šalių nacionalinę politiką. Šioje strategijoje yra išskirti tikslai iki 2020 m., 2030 m. ir 2050 m., kurie apibrėžia kiek procentų reikia sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį, lyginant su 1990 metų lygiu (2020 m. – 20 %, 2030 m. – 40 %, 2050 m. – 80-95%), kokią dalį pagamintos energijos turėtų sudaryti iš atsinaujinančių energijos šaltinių pagaminta energija (atitinkamai 20 %, 27 % ir 75 %) ir kiek procentų turėtų būti padidintas energijos vartojimo efektyvumas (atitinkamai 20 %, 27 % ir 41 %) [6, 7]. Vertinant aplinkosauginiu aspektu tai reiškia, kad, įgyvendinus šiuos tikslus, bus žymiai sumažinta energijos gamyba naudojant iškastinį kurą, kurio rezervai sparčiai senka, ir kurio degimo metu į aplinką išskiriama žalingų medžiagų; taip pat padidės investicijos į energetikos sistemos kapitalą, kas lems AEŠ plėtrą ir išmetamo šiltnamio efektą sukeliančių dujų mažėjimą. Šiais Europos Sąjungos užmojais siekiama sukurti tausiai išteklius naudojančią Europą, kovoti su klimato kaita, mažinti išteklių naudojimo poveikį aplinkai, pagerinti energetikos patikimumą bei prieinamumą ir diversifikuoti energijos gamybos šaltinius.

Atsinaujinančios energijos direktyvos tikslai ES valstybėms narėms, paskirstyti ES šalių narių nacionaliniuose veiksmų planuose, kuriuose numatoma, kaip plėtoti atsinaujinančių išteklių energiją kiekvienoje valstybėje. 1.1 paveiksle pateikti naujausi atsinaujinančių išteklių energijos dalies bendrosiose galutinėse energijos sąnaudose duomenys ir kiekvienai valstybei narei nustatyti 2020 m. tikslai. 2017 m. ES 28 atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalis bendrosiose galutinėse energijos sąnaudose sudarė 17,52 proc. [3].



1.1 pav. Atsinaujinančiųjų energijos išteklių dalis bendrosiose galutinėse energijos sąnaudose 2017 m. ir 2020 m. [3]

Prisidėti prie atsinaujinančių energijos šaltinių plėtros ir efektyvumo rodiklių gerinimo gali ne tik energetikos sektoriuje veikiančios įmonės, bet ir pramonės įmonės ir verslai bei paprasti buitiniai vartotojai.

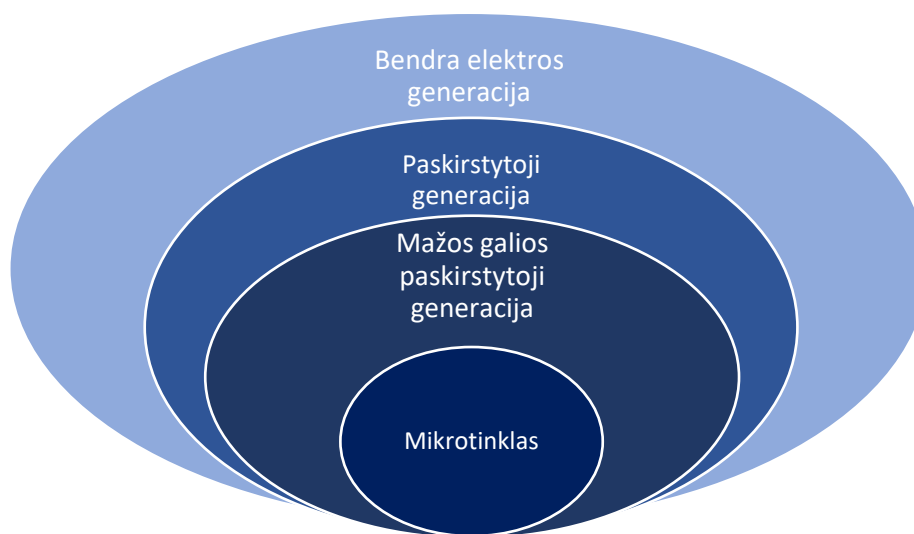
Mikrotinklų atsiradimą lėmė tiek nepriklausomos nuo centralizuoto tinklo elektros infrastruktūros poreikis atokiuose kraštuose (Afrikos kaimai, karinės stovyklavietės, salos), tiek urbanizuotose vietose, kur yra nepertraukiamo elektros maitinimo poreikis dėl technologinių procesų ar kitų priežasčių.

Mikrotinklų sąvoką įvairios šalys ir organizacijos apibrėžia skirtingai, tačiau padarius bendrą išvadą galima traktuoti, kad mikrotinklas yra atskiras, valdomas ir nepriklausomas energijos tiekimo sistemos vienetas, susidedantis iš paskirstytųjų generatorių, apkrovos, energijos kaupimo ir valdymo įtaisų. Šioje sistemoje paskirstytieji generatoriai ir energijos kaupikliai prijungti netoli įsikūrusių vartotojų, prie žemos įtampos skirstomojo tinklo ir juose pagaminta arba sukaupta energija sunaudojama vietoje. Gebantys autonomiškai valdyti ir apsaugoti mikrotinklai gali dirbti sinchroniškai prijungti prie centralizuoto elektros tinklo arba, įrengus energijos kaupiklius, „salos“ režimu, kas ypač paranku siekiant energetinio savarankiškumo ar esant tiekimo sutrikimams skirstomajame tinkle.

Iš literatūros [5], galima padaryti dar kelias išvadas apie mikrotinklo koncepciją:

1. Mikrotinklas yra tiekimo grandinės (mikrogeneracijos), saugojimo vienetų ir paklausos išteklių (kontroliuojamų apkrovų) integravimo platforma, esanti vietiniame paskirstymo tinkle. Tai reiškia, kad mikrotinklų kontekste, daugiausia dėmesio skiriama vietiniam energijos tiekimui netoliese įsikūrusiems vartotojams, todėl generatorių sistemos, įrengtos neatsižvelgiant į fizines generatorių ir apkrovų vietas (pvz., virtualios jėgainės tarpregioniniame lygmenyje) nėra traktuojamos kaip mikrotinklai.

2. Mikrotinklas turi būti pajėgus dirbti tiek normaliaame (sujungtai su centralizuotu tinklu), tiek izoliuotame („salos“) režime. Nors spėjama, kad ateities mikrotinklai turės daugiausiai naudoti dirbant prijungtai prie centralizuoto tinklo, tačiau turi gebėti ilgalaikėje perspektyvoje išlaikyti tinkamus tinklo parametrus. Tam tikslui sistemoje turi būti įrengti aukštas reikalavimus atitinkantys energijos kaupikliai, kad galėtų padengti kintančią apkrovą.
3. Pagrindinis skirtumas tarp mikrotinklo ir pasyviojo elektros tinklo, integruoto mikrogeneratorių, daugiausiai yra susijęs su turimų išteklių valdymu ir derinimu. Mikrotinklas yra daugiau negu tik mikrošaltinių junginys ar energijos skirstymo operatorius, ar apkrovų valdytojas. Jis atlieka visas šias funkcijas, kartu įgyvendindamas ir išskeltus ekonominius, techninius ir aplinkosauginius tikslus.



1.2 pav. Mikrotinklo sąvoką atspindinti iliustracija bendrame elektros generacijos lygmenyje

Mikrotinklai įrengiami siekiant sumažinti energijos perdavimo kaštus, padidinti elektros energijos vartojimo patikimumą diversifikuojant generacijos šaltinius ir siekiant liberalizuoti elektros energijos gamybos rinką. Taip pat vis didesnę susidomėjimą paskirstytaisiais elektros energijos šaltiniais ir mikrotinklais lemia auganti atsinaujinančių šaltinių bei elektromobilių plėtra bei vartotojų siekis vartoti ekologiškai švarią ir pigią ne tik elektros, bet ir šilumos energiją.

Žvelgiant globaliai, tokios sistemos yra nepamainomos siekiant aprūpinti izoliuotas ir skurdžias teritorijas besivystančiose šalyse ar užtikrinti energijos tiekimą atokioms bendruomenėms išsivysčiusiose šalyse, namų ūkio elektriniam savarankiškumui didinti, [4]. Bendruomenės vis dažniau įsirenginėja MT užtikrinti energiją ligoninėms, prieglaudoms, policijos nuovadoms ar maisto prekių parduotuvėms ar kitiems svarbiems įrenginiams kritiniais atvejais. Nutolusiose vietovėse, kur esamų elektros tinklų plėtra negalima ar ekonomiškai nenaudinga, mikrotinklai su integruotais atsinaujinančios energijos šaltiniais gali būti vienintelis techniškai ir ekonomiškai pagrįstas sprendimas turėti elektros bei šilumos energiją.

MT taip pat naudojami universitetų miesteliuose, kadangi įprastai pastatai būna išsidėstę netoli vienas kito; dažnai būna atliekami moksliniai tyrimai, kuriems elektros energijos patikimumas yra ypatingai svarbus. Duomenų centrams tikslinga įsirengti MT, kadangi jiems būtina nepertraukiama elektros energija.

Įmonės vis dažniau tampa MT naudotojos. Siekiant išvengti elektros energijos tiekimo sutrikimų, kurie trukdo darbui ir gali atnešti didelius nuostolius, mikrotinklai yra patrauklūs pramonei. Kartais įmonės renkasi mikrotinklus dėl aplinkos apsaugos priežasčių, ypač jei jie yra įsikūrę ekologiniame parke.

Priklausomai nuo dydžio ir talpos mikrotinklai būna labai mažos, mažos, vidutinės arba didelės galios, kurie atitinkamai būna 1–5 kW, 0,005–5 MW, 5–50 MW ir 50–300 MW galios.

1.1.1. Paskirstytieji generatoriai

Paskirstytaisiais generatoriais gali būti tiek iškastinio kuro, tiek atsinaujinančių šaltinių energiją naudojančios generatoriai. Pagal tipą PG šaltiniais gali būti saulės ar vėjo elektrinės, nedidelės galios hidroelektrinės, kuro elementai, dujų turbinų generatoriai, kombinuoto ciklo generatoriai, kondensaciniai ar termofikaciniai generatoriai, ar vidaus degimo varikliai.

Norint optimaliausiai parinkti energijos generavimo šaltinį, reikia tinkamai įvertinti regione prieinamus energijos resursus. Rajonuose, kuriuose vyrauja dideli vėjai, vėjo elektrinės turi didžiausią potencialą gaminti švarią ir pigią elektros energiją. VE būna įvairios galios, naudingumo bei ašių, todėl labai svarbu tinkamai įvertinti esamus vėjo parametrus ir vietos tinkamumą vystyti vėjo energetikai.

Saulės elektrinės taip pat yra viena iš švariausių bei dažniausiai naudojamų paskirstytųjų generatorių rūšių. Kadangi saulės elektrinės yra lengvai pritaikomos įvairaus galingumo sistemoms, jas paprasta įdiegti tiek buitiniuose mikrotinkluose, tiek didesnėse sistemose integruojant į skirstomuosius tinklus. Saulės energija yra neišsenkanti, švari ir nemokama, todėl elektros generacija iš SE yra viena iš perspektyviausių ir lengviausiai pritaikomų elektros gamybos technologijų. Nors fotomodulių efektyvumas yra sąlyginai nedidelis, mažėjanti modulių kaina ir tobulėjanti technologija daro šią energijos generacijos šaltinį vis patrauklesniu tiek buitiniams vartotojams, tiek komercinėms organizacijoms.

Turint palankias sąlygas ir prieinamumą prie tekančio vandens, tikslinga įrengti nedidelės galios hidroelektrines. Kadangi jos turi geras dinamines savybes, šio tipo generatoriai puikiai tinka mikrotinklams balansuoti.

Nesant tinkamoms vietos sąlygoms energijos šaltinių prieinamumo ar laisvo ploto atžvilgiu, arba siekiant įdiegti reguliuojamos galios energijos šaltinius, vidaus degimo varikliai ar dujų turbinos gali būti naudojami kaip paskirstytieji generatoriai. Šie generatoriai yra valdomos galios, greitai ir stabilūs, todėl yra puikiai tinkami tinklui balansuoti ar užtikrinti rezervinės energijos poreikį.

1.1.2. Apkrovos

Elektros tinklo apkrovos kreivės kinta priklausomai nuo vartotojų įpročių. Jos gali būti valdomos arba ne. Apkrovos valdomos taikant dinamišką kainodarą ir tarifus arba valdant tiesiogiai. Galimi 3 apkrovų valdymo efektai [8]:

- Pikinės apkrovos sumažinimas. Šis efektas gaunamas kritinėmis valandomis, kai dėl įrenginių avarių ar tinklo gedimų kyla grėsmė elektros energijos tiekimo patikimumui.
- Pikinės apkrovos perkėlimas. Šiuo būdu siekiama pakeisti vartotojų įpročius ir perkelti labiausiai apkrautus energijos vartojimo laikotarpius į mažiaus apkrautus.

- Nepikinės apkrovos didinimas. Stengiamasi didinti vartojimą valandomis, kai elektros kaina yra žymiai mažesnė.

Elektros tinklams tampant vis išmanesniais, vartotojams suteikiama galimybė tapti aktyviais rinkos dalyviais, galinčiais rinktis energijos vartojimo ar tiekimo į tinklą laiką. Reguluojant elektros kainą galima valdyti ir energijos vartojimą. Įmonėms, gamykloms ar medicinos įstaigoms kainų kitimas paros bėgyje vartojimo įpročiams didelės įtakos neturės, dėl gamybinių ar technologinių procesų sudėtingumo – jas galima traktuoti nevaldomomis apkrovomis. Valdomas apkrovas geriausiai atspindi buitiniai vartotojai ar elektromobiliai, kurie gali būti prijungti prie tinklo kaip vartotojai, bet ir kaip energijos kaupikliai, padedantys sušvelninti pikinę apkrovą ir išlyginti apkrovos grafiką paros bėgyje.

1.1.3. Energijos kaupikliai

Energijos kaupimo poreikis elektros tinkluose tampa vis svarbesnis, kadangi vis daugiau energijos gaminama iš atsinaujinančių energijos šaltinių, kurie iš esmės yra pertraukiami ir nepastovūs. Didelių sistemų besisukantis rezervas tampa vis mažiau pajėgus išlaikyti energijos kokybę didėjant AEŠ galiai, strategijos, kurių reikia išteklių optimizavimui ir kitos priežastys skatina pereiti prie energijos saugojimo. Energijos kaupikliais gali būti įvairių tipų akumuliatorių baterijos, pvz ličio jonų, švino rūgštiniai ar nikelio metalų hidridų, taip pat smagračiai, kondensatorių baterijos, suspausto oro sistemos, hidroakumuliacinės elektrinės ir dar daugiau. Dėl didelės technologijų plėtros ir inovacijų, energijos kaupiklių efektyvumas, galia ir gyvavimo laikotarpis stipriai pažengė į priekį.

Pagal paskirtį EEK skirstomi į šias kategorijas [3]:

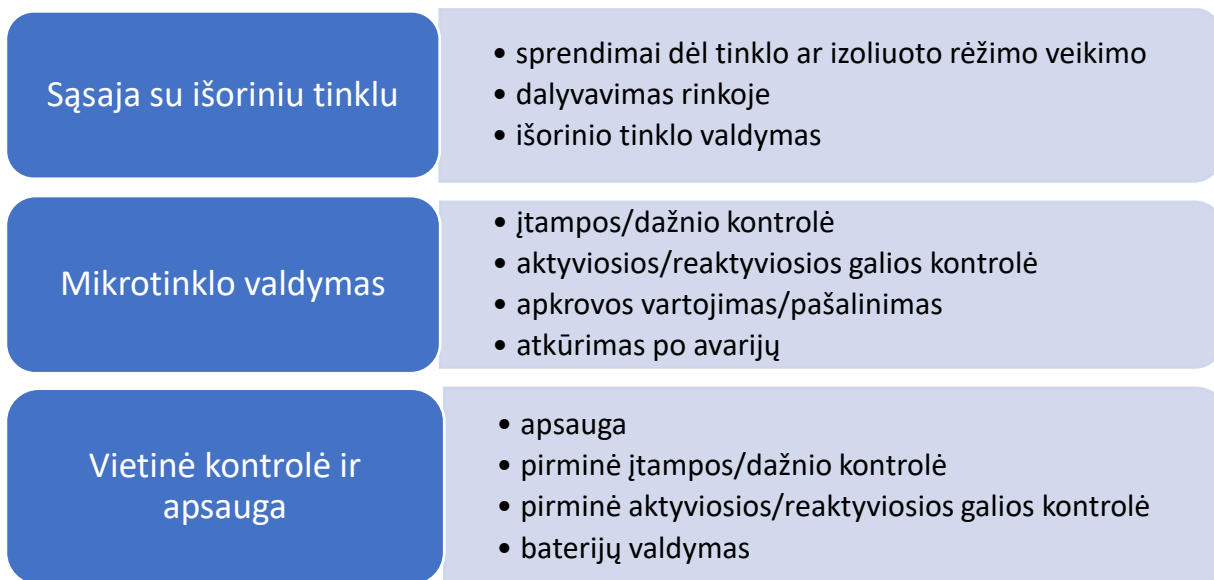
1. Elektros kokybės užtikrinimo;
2. Trumpalaikės perjungimo energijos;
3. Energijos srautų valdymo.

Svarbiausi energijos kaupiklių parametrai yra baterijų talpa, iškrovos laikas, savitoji galia, iškrovos gylis, efektyvumas, ciklų skaičius ir instaliuotos kilovatvalandės kaina. Svarbūs kaupiklių modeliavimo parametrai yra galios faktorius, energijos kokybė ir atsako laikas.

Labai svarbų vaidmenį hibridinėse sistemose atlieka energijos kaupiklių valdymo modelis, kuris įvertindamas baterijų įkrovos būklę (SOC) kontroliuoja energijos srautus tarp energijos šaltinių, akumuliatorių ir vartotojų.

1.1.4. Valdymo įrenginiai

Tinklo valdymas ir suderinamumas yra skiriamasis bruožas ir pagrindinis skirtumas tarp mikrotinklo ir paprasto skirstomojo tinklo su paskirstytaisiais generatoriais. Mikrotinklai kaip atskiri vienetai dažniausiai integruojami skirstomojo tinklo operatoriaus sistemoje, todėl tinklo valdymas ir efektyvus elektros ir šilumos panaudojimas yra kompleksiškas uždavinys. Pagrindinės sistemos funkcijos ir uždaviniai gali būti skirstomi į tris grupes: tarpusavio tinklų sąsaja, mikrotinklo valdymas bei vietinė kontrolė ir apsauga (1.3 pav.) [5]. Žemiausiosios skilties funkcijos glaudžiai susijusios su individualiais komponentais ir vietinių įrenginių – mikrošaltinių, kaupiklių, apkrovų valdymu, vidurinioji skiltis apima bendrą mikrotinklo kontrolę, o viršutinė dalis apima sąsają su išoriniu tinklu.



1.3 pav. Mikrotinklų sistemos funkcijos

1.1.5. Problematika

Viena iš pagrindinių iššūkių sričių, apimančių energetiką ir mikrotinklus, yra neišspręsti esminiai uždaviniai, susiję su kintama energijos gavyba iš atsinaujančiųjų išteklių, energijos saugojimu, decentralizuota energijos gamyba ir dinamišku paklausos valdymu. Atsinaujantieji šaltiniai gamina kintančios galios ir parametrų elektros energiją, priklausomai nuo paros laiko ir sezoniškumo, o vartotojų apkrovos lygis keičiasi nepriklausomai nuo oro sąlygų. Todėl didėjant mikrotinklų plėtrai, energetikos sistema neišvengiamai susidurs su galios balansavimo ir tinklo stabilumo parametrų išlaikymo problemomis. Taip pat, remiantis ES anglies dioksido išmetimo mažinimo scenarijų duomenimis, elektromobilių skaičius galimai išaugs, kadangi elektros energija gali būtų galima padengti iki 65 % keleiviniams automobiliams ir mažos keliamosios galios transporto priemonėms reikalingos energijos reikmių [2]. Tai reiškia, kad elektromobilių vartotojų įpročiai labai stipriai lems apkrovų pasiskirstymo grafiką ir turės didelės įtakos energijos gamybos planavimui. Tinklo perkrovos, sumažėjęs efektyvumas, blogėjanti energijos kokybė ir padidėję nuostoliai – tai pagrindinės problemos, kurias sukelia elektromobilių integracija į skirstomąjį tinklą.

Energijos kaupikliais galima balansuoti tinklą, tačiau būtina aiškiai ištirti tinklo galimybes išlaikyti energijos kokybės parametrus normos ribose, suprasti pereinamuosius procesus ilguoju ir trumpuoju momentu, siekiant panaudoti esamus resursus ir sušvelninti investicijas į infrastruktūros plėtrą. Kad mikrotinklas būtų konkurencingas tradicinėje energetikos sistemoje, jis turi būti ekonomiškai efektyvus, stabilus bei turi visiškai užtikrinti vartotojų elektros ir šilumos energijos poreikį.

Diegiant mikrotinklus svarbus išlieka ir sinchronizacijos su pagrindiniu tinklu klausimas. Dirbant salos režimu mikrotinklas gali veikti nesinchroniškai su skirstomuoju tinklu, tačiau sujungus sistemas jos turi veikti vienodai.

Daug paskirstytųjų energijos šaltinių (SE, kuro elementai, energijos kaupikliai) teikia arba kaupia nuolatinės srovės elektros energiją, kaip ir daug elektros prietaisų, tokių kaip galios elektronikos prietaisai, apšvietimo įrenginiai, kintamo greičio pavaros naudojamos šildymui, oro

kondicionavimui ir t.t. Jungiant įrangą tiesiogiai prie nuolatinės srovės grandinių, arba įrengiant nuolatinės srovės mikrotinklus būtų galima išvengti nuo 5 % iki 15 % energijos nuostolių, gaunamų konvertuojant iš AC į DC ir atvirkščiai [24]. Be to, trikdžius DC sistemose būtų galima izoliuoti blokuojančiais diodais ir sinchronizacijos, harmonikų ar reaktyviųjų srovių cirkuliacijos problemos nekeltų grėsmės. Galiausiai, su tinklu susieta, nuolatinės srovės pagrindu sukurta ne sinchroninė architektūra supaprastina sujungimą su kintamosios srovės tinklu ir leidžia pridėti komponentus be esminio pertvarkymo.

Yra ir daugiau neapibrėžtumų, su kuriomis susiduriama eksploatuojant mikrotinklus:

- Elektros energijos kokybės apibrėžtumas. Pirmasis rūpestis, susijęs su elektros energijos kokybe, yra tinkamo apibrėžimo, kuris yra pakankamai bendras, kad galėtų apimti ir kintamosios srovės, ir nuolatinės srovės energijos kokybę, buvimas. IEC 61000 pateiktas apibrėžimas tinka šiuo požiūriu, nes jame neatsižvelgiama į kintamosios srovės ir nuolatinės srovės energijos kokybę, ir teigiama, kad „energijos kokybė apima elektros energijos savybes tam tikrame elektros sistemos taške, įvertintas pagal atskaitos rinkinio techninius parametrus“. Kitos nuorodos pateikia skirtingas galios kokybės apibrėžtis, tačiau nė viena iš jų neatsižvelgia į kintamosios srovės ir nuolatinės srovės galios kokybę - galios kokybė yra įtampos kokybės ir srovės kokybės derinys. Taigi galios kokybė susijusi su įtampos ir (arba) srovės nukrypimais nuo idealios bangos formos. Bet kokia galios problema, pasireiškianti įtampos, srovės ar dažnio nuokrypiais, kurie sukelia vartotojo įrangos gedimą ar netinkamą darbą [25].
- Maitinimo šaltinio atjungimas nuo tinklo - trikdžių srovė mikrotinkle gali būti daug didesnė negu skirstomajame tinkle, kuri gali stipriai pažeisti apsaugos įtaisus. Tai kelia didelį susirūpinimą „salos“ veikimo režimu, todėl reikia kruopščiai įvertinti galimas sroves ir parinkti tinkamus apsaugos prietaisus.
- „Salos“ režimo paleidimo problemos – pradinėje „salos“ paleidimo būsenoje gali atsirasti staigus srovės šuoliai, kurie gali paveikti sistemos įtampą ir dažnį. Tai gali suklaidinti apsaugos prietaisus, kurie neteisingai suveikę atjungs sistemą. Siekiant kovoti su šia problema, reikia analizuoti energijos gamybos metodus salų režimu ir sukurti specialias kontrolės priemones, kurios yra tinkamos MT operacijoms.
- Pusiausvyros tarp generacijos ir suvartojimo palaikymas. Viena pagrindinių problemų izoliuotame tinkle yra galių balansas. Staigūs apkrovos arba generacijos pokyčiai gali privesti mikrotinklą prie nestabilaus darbo režimo.

1.2. Energijos kaupikliai

Energijos kaupikliai energetikos sistemoje naudojami įvairiais tikslais: užtikrinti energijos kokybės parametrus, sušvelninti pikinei apkrovai, valdyti energijos srautams ar rezervuoti bei sušvelninti pereinamiesiems procesams prijungiant dideles apkrovas (detalesnis funkcijų išdėstymas kiekviename tinklo lygmenyje pateikiamas 1.1 lentelėje). Jie privalo kaupti iš AE šaltinių generuojamą perteklinę energiją, konvertuodami ją į elektrocheminio pobūdžio, mechaninę ar kitokio pavidalo energiją ir atiduoti į skirstomąjį tinklą esant generuojamos galios deficitui.

Įvairios baterijos ir superlaidininkų magnetinės energijos kaupikliai naudojami elektros kokybei užtikrinti, kadangi jie energiją į sistemą gali tiekti tiek, kiek reikia, pvz., sekundę ir trumpiau.

Elektrocheminiai kaupikliai suteikia galimybę sušvelninti neigiamą AEŠ nepastovumo sukeltą įtaką tinklui, prisidedant prie energijos kokybės gerinimo, maksimalios apkrovos valdymo bei įtampos ir dažnio stabilizavimo. Baterijose vykstant cheminėms reakcijoms įkrovimo metu elektros energija keičiama chemine energija, o iškrovos metu vyksta atvirkštinis procesas – iš cheminės energijos gaunama elektros energija.

Trumpalaikiai perjungimo energijai užtikrinti naudojami smagratiniai energijos kaupikliai, superkondensatoriai ir kt., kadangi jie sudaro sąlygas aprūpinti vartotojus elektros energija perjungimo metu, nenutraukiant tiekimo.

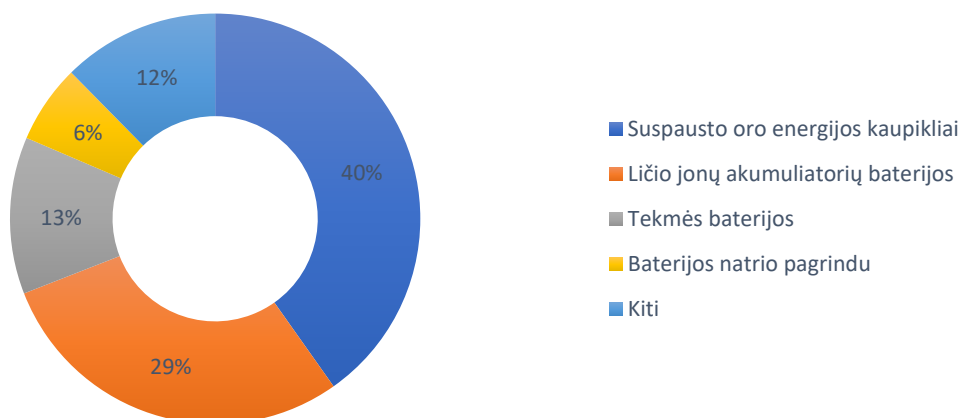
Dideliems energijos srautams valdyti gali būti naudojamos gravitacinės, suslėgto oro energijos kaupyklos ar hidroakumuliacinės elektrinės, kuriose sukaupta potencinė energija panaudojama darbui atlikti. Šie kaupikliai paprastai įkraunami, kai energija pigi, o energija naudojama tuomet, kai jos trūksta.

1.1 lentelė. Energijos kaupiklių paskirtis skirtinguose tinklo lygmenyse

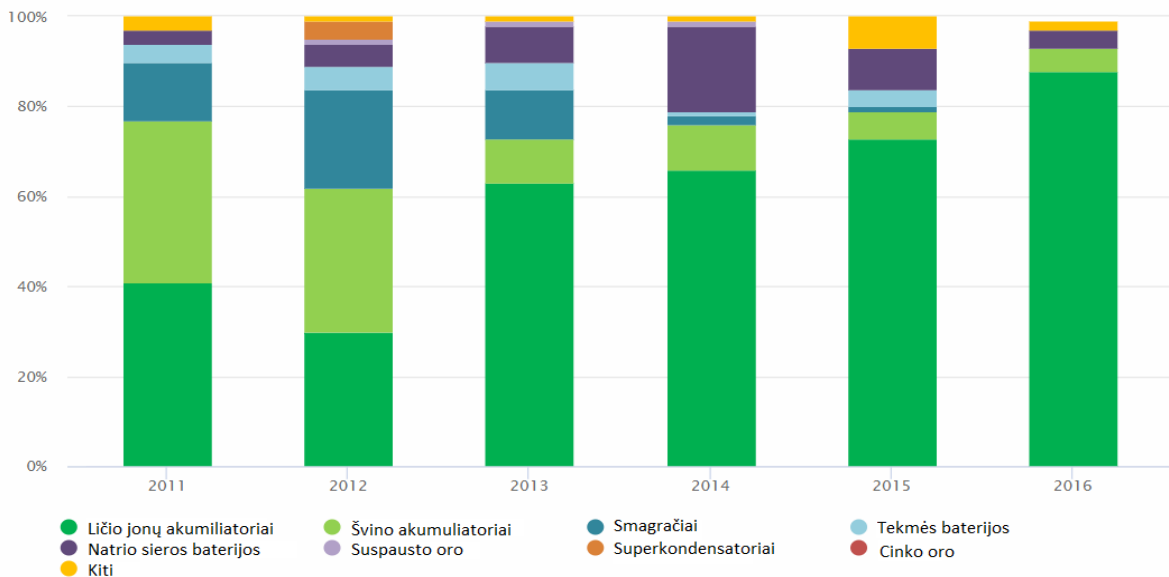
Taikymas energetikos sistemoje kaupiklių paskirtis	Perdavimo tinkle (tarptautinio ar Europos lygmens)	Skirstomajame tinkle (miesto lygmenyje)	Galutinio vartotojo tinkle (namų ūkyje)
Pasiūlos ir paklausos balansavimo	<ul style="list-style-type: none"> - Savaitinius ir sezoninius svyravimus - Didelius geografinius disbalansus - Didelius saulės ir vėjo svyravimus <p>(turėtų būti integruoti elektros ir dujų kaupikliai)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dienos/ valandos svyravimus - Apkrovos švelninimo 	<ul style="list-style-type: none"> - Dienos svyravimus
Tinklo valdymo	<ul style="list-style-type: none"> - Įtampos ir dažnio reguliavimo - Įprastinės elektrinės papildymo pikinei galiai generuoti - Tarptautiniams mainams - Dalyvauti balansavimo rinkoje 	<ul style="list-style-type: none"> - Įtampos ir dažnio reguliavimo - Pakeisti esamas pagalbines paslaugas (mažinant CO₂) - Dalyvauti balansavimo rinkoje 	<ul style="list-style-type: none"> - Mažų tinklui teikiančių paslaugas saugojimo sistemų sujungimo

Taikymas energetikos sistemoje kaupiklių paskirtis	Perdavimo tinkle (tarptautinio ar Europos lygmens)	Skirstomajame tinkle (miesto lygmenyje)	Galutinio vartotojo tinkle (namų ūkyje)
Energijos efektyvumo	- Efektyvesnio globalaus apkrovos pikinės energijos valdymo	- Apkrovos valdymo - Saveika tarp tinklo ir vartotojo	- Vietinės gamybos ir vartojimo - Vietinės gamybos iš SE ir VE vertės gerinimo - Efektyvių pastatų

Šiuo metu pasaulyje yra integruota įvairios galios energijos kaupiklių, kurių galia varijuoja nuo kelių kilovatų iki šimtų megavatų. International energy agency duomenimis 2017 metais pasaulyje instaliuota 176,5 GW suminės galios energijos kaupiklių, iš kurių 172 GW - 97,45 % yra hidroakumuliacinės kilmės kaupikliai [10]. 2017 metais energijos kaupiklių, neįtraukiant hidroakumuliacinių elektrinių, talpa siekė 15 300 MWh kurių didžiausią dalį sudarė suspausto oro energijos kaupikliai (1.4 pav.).

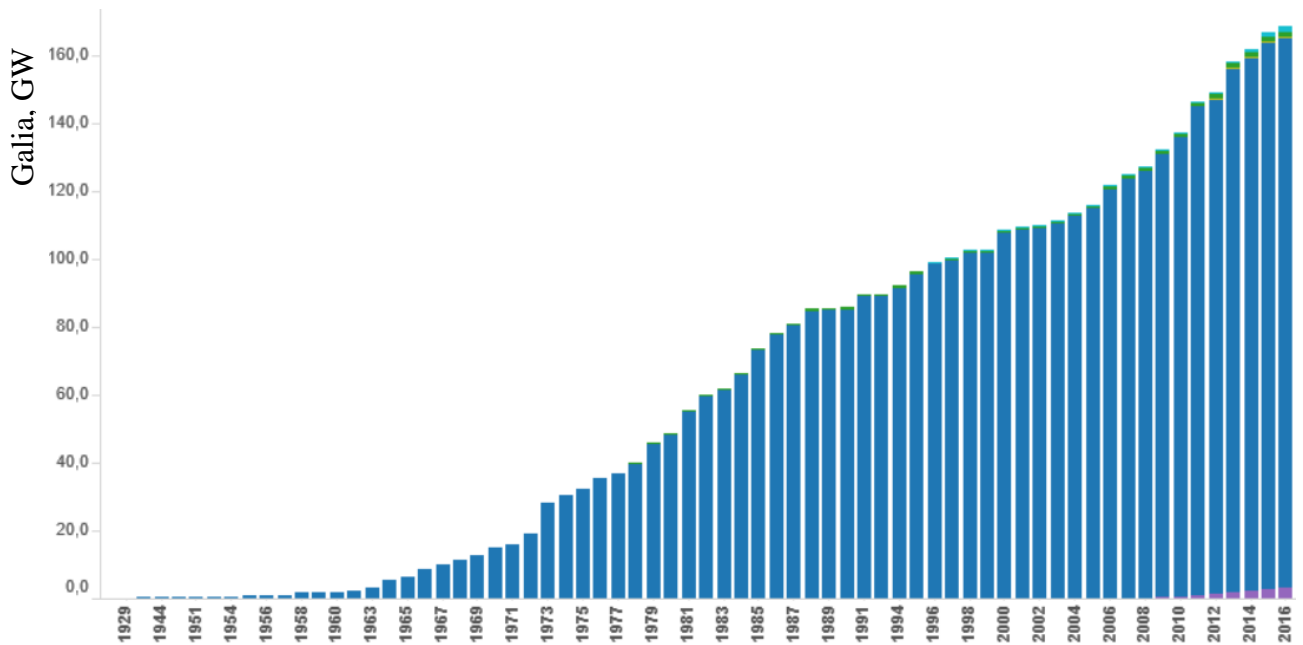


1.4 pav. Energijos kaupiklių dalis bendrame kaupiklių balanse, nevertinant hidroakumuliacinės kilmės EK



1.5 pav. Naujai instaliuotų energijos kaupiklių dalis pagal technologiją

Kaip matyti 1.5 paveikse, vis didesnę dalį naujai instaliuojamų kaupiklių sudaro ličio jonų akumulatoriai, kurių populiarumą lemia geros kaupiklio dinaminės charakteristikos ir pakankamai didelis kaupiklio įkrovos/iškrovos ciklų skaičius. Didžiausios galios energijos kaupimo sistemos įrengtos/statomos Australijoje (Kingfisher Project statoma) 102 MW, Vokietijoje (Germany Residential Energy Storage Systems - 34,000 PV Battery Storage Systems@2 kW) 68 MW, Pietų Korėjoje (Gyeongsan Substation ESS - 48 MW ESS - KEPCO/Woojin/LG Chem) 48 MW, kuriose daugiausiai energijos kaupimui naudojamos ličio jonų baterijos [9].



1.6 pav. Energijos kaupiklių instaliuota galia pasaulyje iki 2016 metų [10]

Elektrocheminės prigimties energijos kaupiklių technologijos labai dažnai naudojamos mikrotinkluose. Paprasčiausią elektrocheminės energijos kaupimo sistemą sudaro baterijų blokas, baterijų valdymo sistema, energijos keitiklis ir energijos valdymo sistema. Baterijos blokas yra modulinio dizaino, kuris patogus integracijai, diegimui ir plėtrai. Baterijų valdymo sistema stebi

akumulatoriaus parametrus, įvertina savo esamą pajėgumą ir valdo visą sistemą. Energijos keitiklis atlieka energijos išlyginimo ir invertavimo procesą, būtiną tarp AC ir DC energijos sistemų. Priklausomai nuo nustatyto režimo ar apkrovos pakitimo, energijos valdymo sistema yra atsakinga už energijos kaupimo sistemos veiksmingą planavimą ir valdymą.

Baterijų valdymo sistema turi atlikti baterijų apsaugos ir balansavimo funkcijas, tokias kaip: apsaugos nuo perkrovos dėl aukštos ar žemos įtampos, srovės monitoringo, apsaugos nuo viršsrovių, trumpųjų jungimų ar perkaitimo. Siekiant baterijų ilgaamžiškumo geriausiai jas įkrauti maža srove – 3-5 procentais baterijos talpos. Baterijos įkrovos būseną (SOC – State of charge) nusako baterijoje likusios energijos dalį procentais.

$$SOC = \frac{Ah \text{ likusi energijos talpa baterijoje}}{\text{Vardinė talpa Ah}}; \quad (2.1)$$

Pilnai įkrauto akumulatoriaus SOC yra 100 %, o 70 proc. iškrauta – SOC 30 %.

Elektrocheminės energijos kaupimas baterijose yra patrauklus, nes baterijos yra kompaktiškos, paprastos įdiegti, ekonomiškos ir geba greitai reaguoti į tinklo energijos pokyčius.

1.2.1 Ličio jonų baterijos

Ličio jonų (Li-ion) baterijos veikia judant ličio jonams tarp teigiamų ir neigiamų elektrodų. Įkrovimo metu ličio jonai ištrūksta iš teigiamo elektrodo ir įsiterpia į neigiamą elektrodą; tuo metu neigiamas elektrodas yra prisotintoje ličio būsenoje. Kai baterija išsikrauna, ličio jonai juda priešinga kryptimi. Teigiamas ličio jonų akumulatoriaus elektrodas yra sudarytas iš ličio junginių, tokių kaip ličio geležies fosfatas (LiFePO₄) ir ličio magnio oksidas. Labiausiai paplitusi neigiamo elektrodo naudojimo medžiaga yra grafitas.

Yra sukurtas ir patobulintas Li-jonų baterijos variantas su pusiau skystais elektrodais. Klasikinės Li-jonų baterijos elementai yra sudaryti iš daugelio detalių – teigiamo ir neigiamo poliškumo elektrodų, separatorių, srovės kolektorių. Jų gamybos procesas yra daugiapakopis ir reikalaujantis daug laiko bei tokių medžiagų, kurios energijos kaupimo ir regeneravimo procesuose tiesiogiai nedalyvauja. Patobulintas baterijos elementas ir jo gamybos procesas yra daug paprastesni lyginant su klasikinių Li-jonų baterijų elementais. Jis turi tik du elektrodus, du srovės kolektorius ir vieną separatorių. Šiuose elementuose naudojama pusiau kieta (pusiau skysta) elektrodų medžiaga ir vienos pakopos elektrodų gamybos technologija.

Klasikinių Ličio jonų elektrodai yra ploni ir jie nekaupia energijos, o patobulintos baterijos – stori ir kaupia energiją. Taip sumažinama neaktyviųjų medžiagų dalis baterijoje. Baterijos elementas pagaminamas vienu „užpylimu“ sudedant katodo ir anodo medžiagas bei ploną elektrolito sluoksnį tarp jų. Toks elementas yra didelės energijos talpos ir didelės leistinos srovės tankio, todėl bateriją galima greitai įkrauti. Elektrodai neturi jokių brangių komponentų ir medžiagų, kurių tiekimas būtų probleminis [7].

Yra nemažai skirtingos cheminės sudėties baterijų, kurios bendrai yra vadinamos ličio jonų akumulatoriais. Pagrindinės šešios ličio jonų akumuliatorių rūšys išvardintos ir aprašytos žemiau.

1.2 lentelė. Ličio jonų akumuliatorių tipų palyginimai [21]

Pavadinimas	Cheminė sudėtis	Trumpinys	Gyvavimo ciklas	Energijos tankis	Taikymas	Pastabos
Ličio kobalto oksidas ¹	LiCoO ₂ (60 % Co)	LCO	500-1000	150-200 Wh/kg	Mobiliesiems tel., kompiuteriams, kameroms	Labai didelė specifinė energija, ribota specifinė galia. Kobaltas yra brangus. Ankstyvoji versija, šiandien nebenaudojamos
Ličio magnio oksidas ¹	LiMn ₂ O ₄	LMO	300-700	100-150 Wh/kg	Elektriniai įrankiai, medicinos prietaisai, elektromobilių/hibridinių automob. varikliai	Didelė galia, bet mažesnė talpa už LCO; saugesnis už Li-kobalto; dažniausiai sumaišyti su NMC, kad pagerėtų našumas, grynos LMO nebenaudoamos
Ličio nikelio mangano kobalto oksidas	LiNiMnCoO ₂	NMC	1000-2000	150-220 Wh/kg	El. dviračiai, medicinos prietaisai, elektromobiliai, pramonė	Užtikrina didelę galią ir talpą. Pirmaujanti sistema; dominuojanti katodinė chemija
Ličio geležies fosfatas ¹	LiFePO ₄	LFP	1000-2000	90-120 Wh/kg	Nešiojamas ir stacionarus naudojimas, kur reikalingas didelis apkrovos ir srovės patvarumas	Labai plokščia įtampos iškrovos kreivė, bet maža talpa. Viena iš saugiausių Ličio jonų baterijų. Vidutinis rinkos augimas.
Ličio nikelio kobalto aliuminio oksidas ¹	LiNiCoAlO ₂	NCA	500	200-260 Wh/kg	Medicinos prietaisai, pramonė, elektriniai varikliai (Tesla)	Daugiausia naudoja Panasonic ir Tesla; turi augimo potencialą.
Ličio titanatas ²	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO	3000-7000	50-80 Wh/kg	UPS, elektriniai varikliai (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV), SE naudojantis gatvės apšvietimas	Ilgas tarnavimo laikas, greitas įkrovimas, platus temperatūros diapazonas, bet maža specifinė energija ir brangus. Tarp saugiausių Li-ion baterijų.

¹ Katodo medžiaga

² Anodo medžiaga

Ličio-jonų baterijos pasižymi labai dideliu energijos tankiu, kuris viršija 200 Wh/kg, dideliu galios tankiu ir labai dideliu įkrovos bei iškrovos ciklo efektyvumu, kuris siekia 80-90 %. Tokių baterijų trūkumai yra ne itin didelė jų darbo trukmė (ciklų skaičius iki kelių tūkstančių) ir gana didelė degradacija ilgėjant jų darbo trukmei [7]. Baterijų senėjimo procesas priklauso ne tik nuo naudojimo bei laikymo sąlygų, bet ir nuo elektrodų ir elektrolitų medžiagų. Nors elementų degradacijos procesai yra sudėtingi, jie turi dvi pagrindines pasekmes: 1 – prarandama talpa dėl

aktyviojo ličio ir (arba) aktyviosios medžiagos praradimo, 2 – prarandama galia dėl padidėjusios varžos ląstelėse. Veikiant tam tikroms ekstremalioms sąlygoms, tokioms kaip perkrovos ar labai didelė aplinkos temperatūra, baterijų degradacijos procesas dar labiau pagreitinėja.

Turi būti taikomi griežti saugumo reikalavimai, kadangi baterijos pasižymi dideliu energijos tankiu, o organinis elektrolitas yra degus.

Platų ličio jonų baterijų naudojimą energijos kaupimo sistemose riboja didelės pradinio kapitalo investicijos. Situacijose, kur yra didelis atsitiktinis ir dažnas įkrovimas, nepakankamas ciklo laikas apsunkina ličio jonų akumuliatoriaus naudojimą. Kai akumuliatoriai yra perkraunami, arba juose įvyksta vidiniai trumpieji jungimai, baterijų temperatūra kyla, todėl iškyla saugumo pavojus.

Ličio jonų baterijos atlieka svarbų vaidmenį skatinant elektros transporto priemonių vystymąsi. Kaip maitinimo šaltinis, ličio jonų baterijos idealiai tinka mažos apimties elektronikai. Šiuo metu ličio jonų baterija demonstraciniu tikslu plačiai naudojama atsinaujinančios energijos tinkle ir mikrotinklų sistemoms.

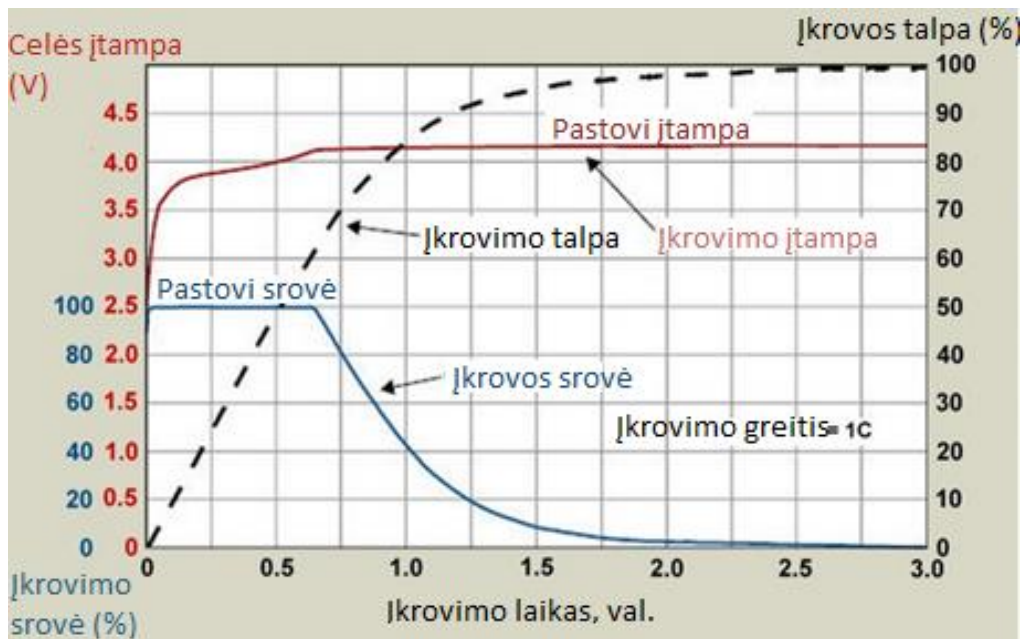
Prieš integruojant ličio jonų baterijas į įvairias ir brangias sistemas, tikslinga įvertinti baterijų veikimą ir prisitaikymą prie įvairių sąlygų atliekant modeliavimą programomis. Tam tikslui būtini tikslūs akumuliatorių dinaminiai modeliai, tačiau tai nėra paprasta užduotis. Šių baterijų veikimas yra labai nelineinis; našumo parametrai, tokie kaip talpumas ir varža, priklauso nuo darbo temperatūros, apkrovos srovės ir įkrovos būsenos (SOC) [11].

Įprastų ličio jonų akumuliatorių (kurių katodas sudarytas iš kolbato, nikelio, magnio ar aliuminio) tipinė įkrovimo įtampa siekia apie 4,20 V/celę [15]. Pilnas įkrovimas įvyksta tada, kai akumuliatorius pasiekia įtampos slenkstį ir srovė nukrenta iki 3 procentų nominalios vertės. Baterija taip pat laikoma pilnai įkrauta, jei srovės lygis nebegali toliau kristi (1.6 pav.).

Šio tipo baterijų nereikia ir net nepatartina pilnai įkrauti, kadangi aukšta įtampa kenkia baterijai. Pasirinkus žemesnės įtampos slenkstį galima prailginti baterijos eksploatavimo laiką, bet sutrumpinti ciklo laiką.

Ličio jonų baterijos negali absorbuoti perkrovų. Kai baterija pasiekia įkrovimo būseną, įkrovimo srovė turi būti nutraukta. Išsistinis krovimas sukelia ličio dangos metalėjimą ir kelia grėsmę saugumui. Sumažinti šią riziką galima nutraukiant įkrovimo.

Baigus įkrovimą akumuliatoriaus įtampa pradeda mažėti. Laikui bėgant celės atvirosios grandinės įtampa nusistovi ties 3,70 – 3,90 V. Baterija, kuri įkrauta iki „išsisotinimo“ būsenos ilgiau palaikys įtampą, negu ta, kuri nepasiekė šios būsenos.



1.7 pav. Ličio jonų celės įkrovos/iškrovos parametrai [15]

Dinaminis ličio jonų akumulatoriaus veikimas gali būti iliustruojamas 1.7 paveikslu. Talpa C_{capacity} ir valdomas srovės šaltinis imituoja baterijos talpą ir SOC; baterijos SOC nusakoma priklausomai nuo baterijos talpos ir per bateriją tekančios srovės [11]. Valdomas įtampos šaltinis VOC(SOC) naudojamas imituoti baterijos tuščiosios veikos įtampą, kuri yra priklausoma nuo SOC. Pereinamasis baterijos procesas modeliuojamas ekvivalentine elektrine grandine. Kadangi ličio jonų akumuliatorių savaiminė iškrova labai maža, palyginti su kitomis baterijų technologijomis, ir ji neturi žymios įtakos dinaminiam veikimui, todėl atliekant dinaminį modeliavimą šis veiksnys nevertinamas. Taigi, remiantis ekvivalentine grandine, baterijos įtampą ir SOC galima išreikšti sekančiomis formulėmis.

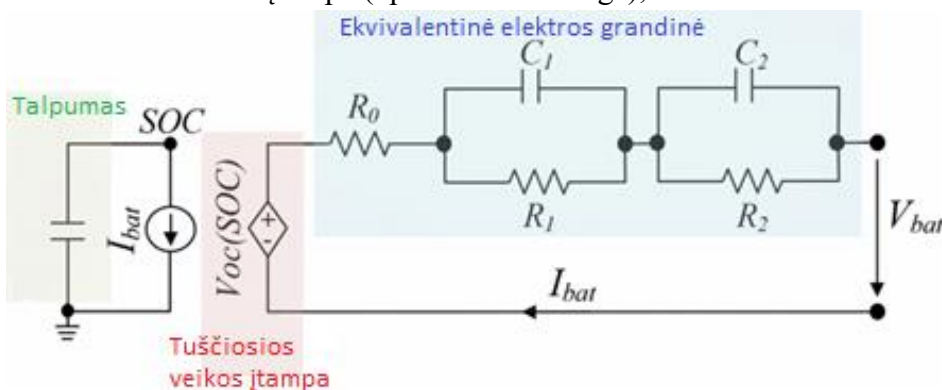
$$SOC = SOC_i \pm \frac{1}{c_{\text{talpa}}} \int_0^t I_{\text{bat}} dt; \quad (2.2)$$

$$V_{\text{bat}} = OCV \pm Z_{\text{EEC}} \cdot I_{\text{bat}} \quad (2.3)$$

čia : SOC_i – pradinė baterijos įkrovos būseną;

Z_{EEC} – EEC varža.

OCV – tuščiosios veikos įtampa (open circuit voltage);



1.8 pav. Ličio jonų baterijos ekvivalentinė elektros grandinė [15]

1.2.2 Švino rūgštinės akumuliatorių baterijos

Švino rūgštinio akumulatoriaus veikimas pagrįstas cheminėmis reakcijomis tarp teigiamos švino dioksido plokštelės (PbO₂), neigiamos švino plokštelės (Pb) ir elektrolito, pagaminto iš sieros rūgšties (H₂SO₄) ir vandens (H₂O). Kai baterija yra įkraunama, švino dioksidas kaupiasi teigiamoje plokštelėje, susiformavęs švinas kaupiasi neigiamoje plokštelėje ir santykinis sieros rūgšties kiekis elektrolite didėja. Kai baterija išsikrauna, švino sulfatas kaupiasi neigiamoje plokštelėje ir santykinis vandens kiekis elektrolite didėja (cheminės reakcijos lygtis pateikta žemiau).



Rūgštinių švino akumuliatorių technologija yra brandžiausia ir pigiausia tarp energijos kaupimo technologijų baterijose. Šio tipo baterijos eilę metų tarnauja kaip atsarginės baterijos elektrinėse ir transformatorių pastotėse, kur jos atlieka labai reikšmingą vaidmenį išlaikant patikimą energetikos sistemų veikimą. Patobulinus jų konstrukciją pasiektas iki 80 % iškrovos gylis. Šios baterijos gali būti greitai įkraunamos, tačiau joms būdingas eksploatavimo laikas – normaliai eksploatuojant turėtų būti keičiamos kas 3 metus. Šios baterijos pasižymi sąlyginai dideliu svoriu, mažu energijos tankiu (30-40 Wh/kg), ne itin geru įkrovos ir iškrovos ciklo naudingumo koeficientu – 70-75 % [7] ir dideliu savaiminio išsikrovimo lygiu. Šių baterijų talpumui didelę įtaką turi aplinkos temperatūra – kuo temperatūra žemesnė, tuo labiau prarandama talpa, pvz., įprasta baterija užtikrins energiją 20 % trumpiau prie 0 °C, negu prie 40 °C [14]. Be to, šios baterijos gali sukelti aplinkos taršą, todėl pastaraisiais metais energija saugojama vis rečiau švino rūgštiniuose akumuliatoriuose, nepaisant jų žemos kainos.

Įterpus į neigiamą plokštelę aktyvuotos anglies galima žymiai pagerinti baterijos gyvavimo ciklą. Baterija, kuriai taikomas metodas, kuriuo sumaišoma aktyvuota anglis su švinu, kad susidarytų neigiamas elektrodas, vadinama pažangiąja švino rūgštine baterija. Nėra skirtumo tarp įprasto švino rūgštinio akumulatoriaus ir anglies-švino akumulatoriaus specifinės energijos, tačiau pastarosios specifinė galia žymiai didesnė ir padidintas gyvavimo ciklo trukmė esant mažiems iškrovos gyliams [9].

Apibendrinti švino pagrindu naudojamų akumuliatorių tipai, charakteristikos ir palyginimai pateikiami 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Švino rūgštinių akumuliatorių tipų palyginimai [21]

Cheminė kilmė	Pirminis Uztvindytas	Gilaus ciklo Uztvindytas	AGM VRLA*	Gelinis VRLA*	Pažangus švino anglies (ALC)
Baterijos tipas	Daug plonų plokštelių padidina paviršių dideliame srovės tiekime, gali išsiliesti	Mažiau storų plokščių suteikia didelį pajėgumą ir ilgaamžiškumą, gali išsiliesti	Sieros rūgštis absorbuojama smulkaus stiklo pluošto, atsparus išsiliėjimui	Elektrolitas yra sustabdytas silicio tipo gelyje, atsparus išsiliėjimui	Anglies anodas pagerina įkrovimo ir iškrovimo efektyvumą
Energijos tankis	30-50 Wh/kg				20-30 Wh/kg
Iškrovimo lygis	Didelė momentinė srovė	Nuolatinė vidutinė srovė	Nuo vidutinės iki didelės srovės		Didelė srovė

Gyvavimo ciklas (pilni iškrovimai)	12-15	150-200, ilgiau, jeigu neiškraunama daugiau kaip iki SOC 60 %	5-10 metų naudojant UPS	Daugiau, negu įprasti švino rūgštiniai akumuliatoriai	
Aptarnavimas	Užtvindytus reikia papildyti vandeniu; apsaugai nuo sulfacijos reikia įkrauti 16 val. kas 6 mėn.		Priežiūros nereikia; mažiau linę į sulfaciją, nepildomi vandeniu	Mažiau linę į sulfaciją	
Taikymas	Transporto priemonės (užkūrimas, šviesos)	UPS, ratinis mobilumas	Kariuomenė, orlaiviai, „start-stop“, lenktynės, jūriniai tikslai	UPS, ratinis mobilumas, autobusai, sunkvežimiai, pramonė	Automobiliai, kariuomenė, energijos kaupimas
Pastabos	Žema kaina, didelis temperatūros diapazonas	Puikiai tinka UPS, kuriems reikia mažai pilnų darbo ciklų	Ekonomiški, greit įkraunami, pasižymi didele galia, bet neperduoda šilumos taip gerai kaip geliniai. Gerai funkcionuoja prie šaltų oro sąlygų	Aukštas darbo ciklų rodiklis, mažiau linę į sulfaciją, reikalingas teisingas įkrovimas, brangūs. Maža savaiminė iškrova, tolerantiški šiltose temperatūrose	Geresnis įkrovos priėmimas, ilgiau tarnauja

*AGM ir geliniai yra VRLA - vožtuvais reguliuojami švino rūgštiniai akumuliatoriai

1.2.3 Nikelio metalo hidrido baterijos

50 metų nešiojamieji prietaisai naudojo beveik vien tik nikelio kadmio baterijas (NiCd). Tai padėjo sukaupti didelį kiekį duomenų, tačiau dešimtajame dešimtmetyje iškilo nikelio metalo hidrido (NiMH) baterijos, dėl NiCd toksiškumo. Tobulinant NiMH buvo panaudota daug NiCd savybių ir pakeista medžiagų, todėl šios dvi sistemos yra panašios. Dėl aplinkosauginių sumetimų NiCd šiandien naudojamos tik specialios paskirties tikslams.

Nikelio metalo hidridų baterijų gamybos technologija yra gana brandi, tačiau jų įkrovos ir iškrovos ciklo efektyvumas nėra itin didelis ir konkurencingas – 60-70 %. Jų sukaupiamos energijos tankis irgi yra sąlyginai mažas – 30-80 Wh/kg. Dar vienas šių baterijų trūkumas – gana didelė savaiminė elektrolito iškrova – 20 % per pirmasias 24 valandas po iškrovimo, 10 % per mėnesį. Tik modifikavus hidridines medžiagas pasiekama mažesnė savaiminė iškrova ir korozija, tačiau dėl to kenčia energijos tankis. Tinkamai eksploatuojant baterijos darbo laikas siekia daugiau negu 10 metų [7].

Nikelio metalo hidrido baterijų privalumai yra šie:

- 30-40 % didesnė talpa nei standartinių NiCd;
- Mažesnis atminties efektas nei NiCd, galima atnaujinti;
- Paprastas transportavimas ir laikymas;
- Draugiškas aplinkai, bet sudėtyje yra šiek tiek „švelnių“ toksinų;
- Nikelio perdirbimas yra apsimokantis;
- Platus temperatūros diapazonas.

Taip pat NiMH baterijos turi ir trūkumų:

- Ribotas tarnavimo laikas; gilus iškrovimas sumažina tarnavimo laiką;
- Reikalingas sudėtingas įkrovimo algoritmas, jautrus perkrovoms;
- Neapsorbuoja tinkamai perkrovos, turi būti palaikomas žemesnis lygis;
- Greitos įkrovos ir didelės apkrovos metu generuoja šilumą;
- Didelis savaiminės iškrovos lygis;
- Efektivumas siekia tik apie 65%.

Apibendrinti nikelio pagrindu naudojamų akumuliatorių tipai, charakteristikos ir palyginimai pateikiami 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Nikelio pagrindo akumuliatorių tipų palyginimai [21]

Pavadinimas	Nikelio-kadmio	Nikelio-metalo hidrido	Nikelio-geležies	Nikelio-cinko	Nikelio-vandenilio
Cheminė formulė	NiCd	NiMH	NiFe	NiZn	NiH
Energijos tankis	45-80 Wh/kg	30-120 Wh/kg	50 Wh/kg	100 Wh/kg	40-75 Wh/kg
Gyvavimo ciklas (pilni iškrovimai)	1000	300-500	20 metų naudojant UPS	200-300	Labai ilgai (>70 000 dalinių iškrovimų)
Aptarnavimas	Pilnai iškrauti kas 3 mėnesius	Pilnai iškrauti kas 6 mėnesius	Neapibrėžta		Nereikalaujantys priežiūros; mažas savaiminis iškrovimas
Taikymas	Pagrindė naudojami aviacijoje (užtvindyti), platus temperatūros diapazonas	Hibridiniai automobiliai, UPS	Vokiečių V-1 skrendančios bombos, V-2 raketos; geležinkelių signalizavimas, UPS, kasyba	Atnaujintas susidomėjimas komercine rinka su patobulinimais	Tik palydovai; pernelyg brangus antžemiam naudojimui
Pastabos	Tvirti, reikalaujantys daug priežiūros. Vienintelis akumuliatorius, kuris gali būti itin greitai įkraunamas su mažai streso	Didesnio pajėgumo; reikalaujantis mažiau priežiūros	Didelė savaiminė iškrova, dideli gamybos kaštai	Didelė galia, geras temperatūros diapazonas, maža kaina, bet didelė savaiminė iškrova, trumpas tarnavimo laikas	Naudojama plieninė talpa saugoti vandenilį 8,270 kPa (1200 psi) slėgyje

Apibendrinti apžvelgtų energijos kaupiklių parametrai pateikti lentelėje. Švino rūgštinių akumuliatorių poveikis aplinkai ir jų ribotas eksploatavimo ciklo laikas turi įtakos baterijų naudojimo mažėjimui energetikos sistemoje. Šias baterijas keičia naujos kartos švino – anglies akumuliatoriai. Investicijos į ličio jonų akumuliatorių įrengimą yra didelės, o jų saugaus eksploatavimo klausimas visuomet buvo problema, kuriai reikia skirti ypatingą dėmesį.

1.5 lentelė. Energijos kaupiklių parametrų palyginimai

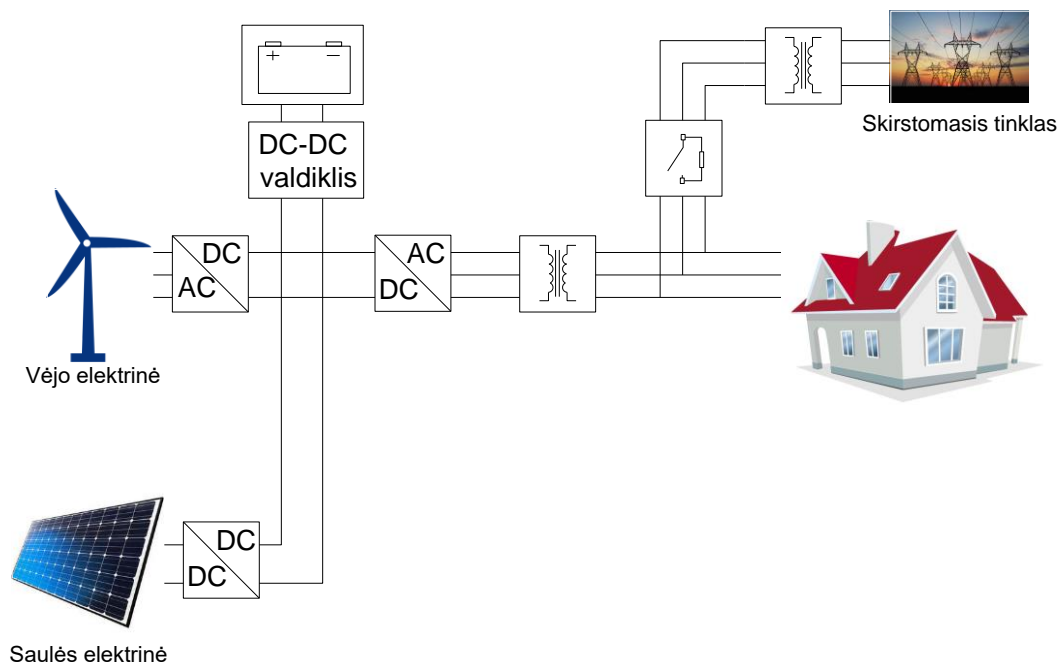
	Li-jonų	Švino rūgštiniai	NiMH
Energijos tankis, Wh/kg	110-175	30-40	75
Iškrovos gylis	80 %	50 %	
Naudingumo koeficientas	90-95	70-80	60-65
Įkrovos iškrovos ciklų skaičius	<3000	<1800	<1000
Darbo temperatūra, C	-30 - 50	-10-40	-20 - 50
Kaina, Eur/ kWh	600/1000	215	300/400

2. Tiriomojo mikrotinklo modelis

2.1. Tiriomojo mikrotinklo struktūra ir imitacinis procesų modelis

Projektuojant mikrotinklą su atsinaujinančios energijos šaltiniais tikslinga įrengti kombinuotą, pavyzdžiui, saulės ir vėjo elektrinių sistemą. Saulėtą giedrą dieną, kada vyksta didžiausia saulės elektrinės generacija, dažniausiai vėjo energija per maža, kad efektyviai veiktų vėjo elektrinės. Esant vėjuotoms sąlygoms, arba naktį, vėjas yra pagrindinis šaltinis, iš kurio gaminama elektra. Saulės bei vėjo elektrinės papildo viena kitos gamybos grafikus ir taip didinamas sistemos patikimumas bei pasiekiamas maksimalus esamų resursų išnaudojimas. Kad mikrotinklas nebūtų priklausomas nuo išorinio energijos šaltinio, t.y. skirstomojo tinklo operatoriaus, turi būti įrengiama energijos kaupiklių sistema.

Tiriamasis namų ūkio mikrotinklas yra modeliuojamas programa Matlab/Simulink, integruojant įvairias posistemas (2.1 pav.). Mikrotinklą sudaro vėjo elektrinė, saulės elektrinė, energijos kaupikliai su valdymo įranga, vartotojo apkrovos ir energijos keitikliai. Mikrotinklas tiriamas autonominiame režime, tačiau yra prijungtas prie skirstomojo tinklo, kad būtų galimybė energijos perteklių arba trūkumą padengti centralizuoto tinklo energija bei stabilizuoti tinklo energijos šaltinių generacijos parametrus.



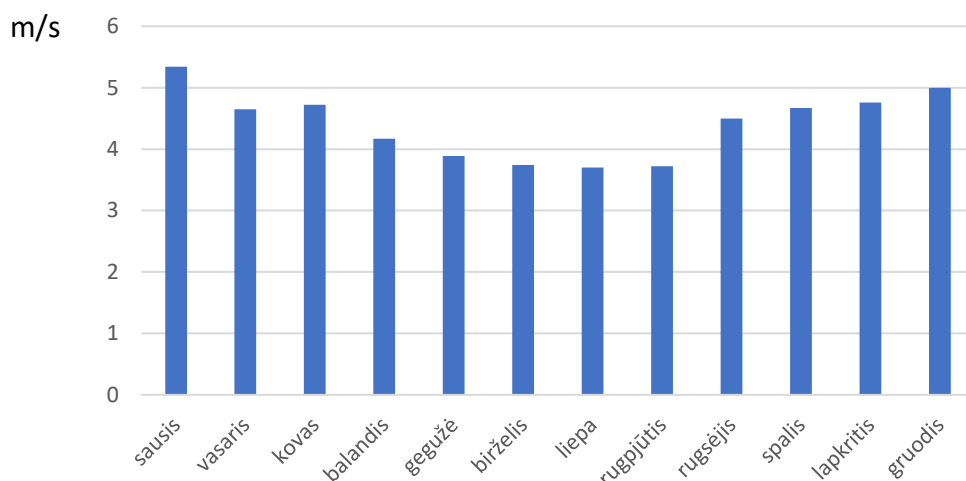
2.1 pav. Tiriomojo mikrotinklo blokinė schema

Energijos šaltiniai - saulės ir vėjo elektrinės, programoje modeliuojami su valdomais veikiančios aplinkos sąlygų parametrais, t.y. vėjo elektrinių parkui įvedama galimybė keisti vėjo greitį, o saulės elektrinei - apšvietą.

Vyraujantys vėjo greičiai vietovėje yra labai svarbus veiksnys, siekiant įvertinti VE pagaminamos energijos kiekį per tam tikrą laikotarpį – dieną, mėnesį, metus ir t.t. Priklausomai nuo vėjo

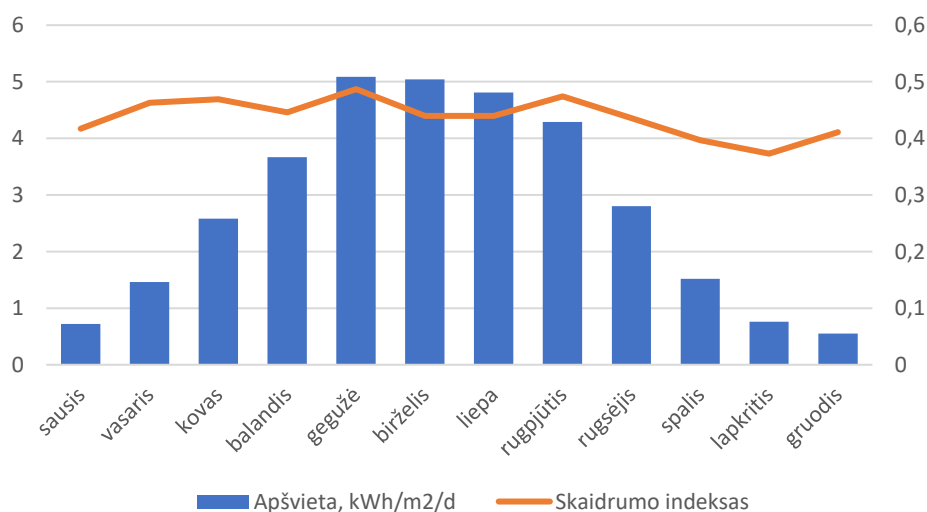
elektrinės vardinės galios, įtampos, varžų ir kitų parametų, vėjo greičio kitimas labai stipriai lemia išėjimo įtampos ir generuojamos galios dydį.

Parinktoje vietovėje (Kauno r., Užliedžių sen.) kiekvieną mėnesį vyraujantys vidutiniai vėjo greičiai 50 m aukštyje pateikti 2.2 pav. (duomenys surinkti 1995-2006 m laikotarpiu) [12].



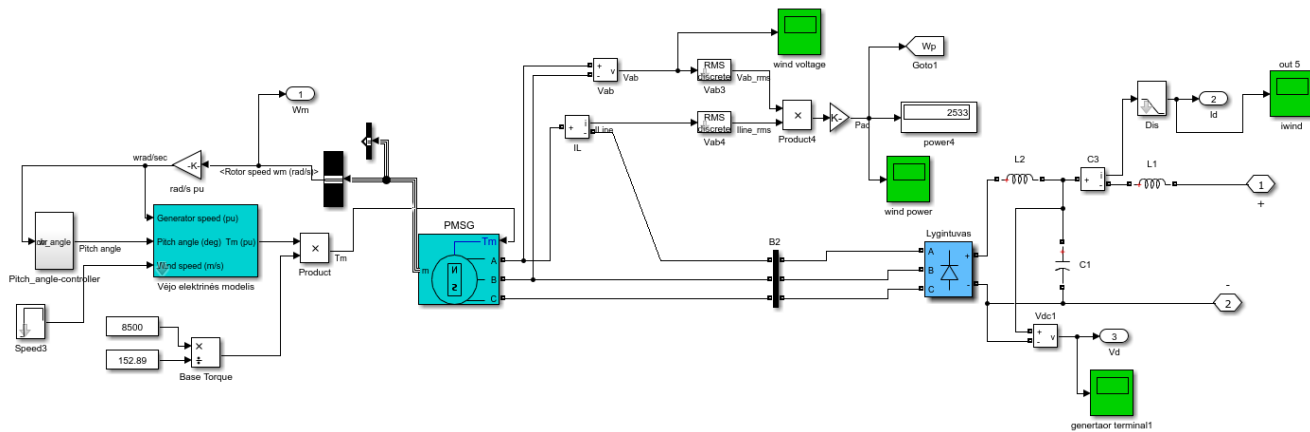
2.2 pav. Vidutinis vyraujantis vėjo greitis kiekvieną mėnesį

Kitaip negu vėjo elektrinei, saulės elektrinės įtampos bei srovės dydžiai priklauso nuo saulės apšvietos bei aplinkos temperatūros. Išėjimo įtampa kinta priešingai negu temperatūra – kuo temperatūra didesnė, tuo įtampa labiau krenta (kritimo dydis nežymus, lyginant su vardinės įtampos santykiu), o išėjimo srovė priklauso tiesiogiai nuo apšvietos – kuo daugiau šviesos, tuo didesnė išėjimo srovė. Žemės atmosferos skaidrumą rodo parametras, vadinamas skaidrumo indeksu. Tai rodo, kokia dalis spinduliuotės pasiekia žemės paviršių, palyginti su viršutinį atmosferos sluoksnį pasiekusia spinduliuote. Žemės paviršių pasiekiantis spinduliuotės dydis yra mažesnis už į atmosferą patenkančią spinduliuotę dėl drėgmės, dulkių, debesų ar netgi žemesnės atmosferos temperatūrų skirtumų. Modeliuojamo mikrotinklo parinktoje vietovėje vidutinė saulės apšvieta bei skaidrumo indeksas pateikti 2.3 pav. [12].



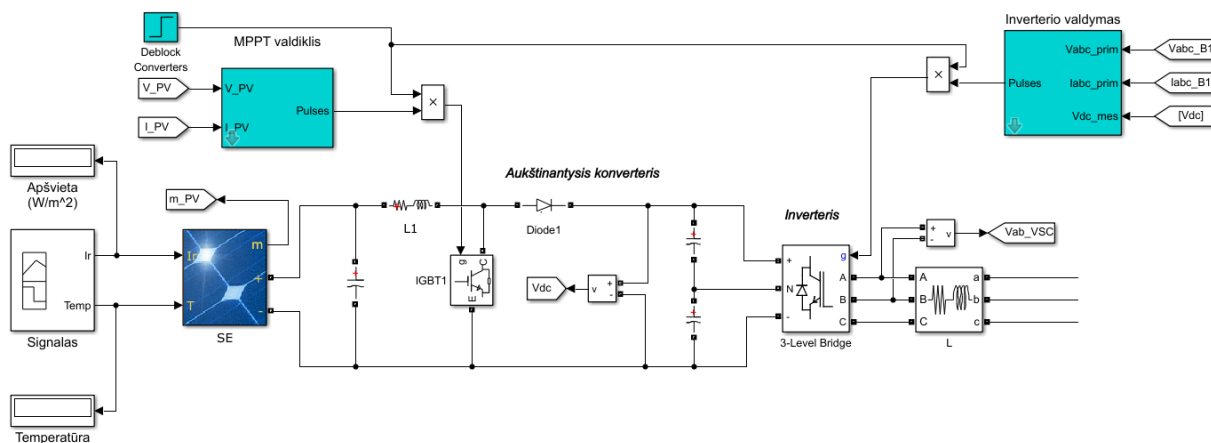
2.3 pav. Vidutinė saulės apšvieta bei skaidrumo indeksas kiekvieną mėnesį

Vėjo elektrinei imituoti modelyje panaudojamas VE blokas, kurį sudaro nuolatinių magnetų sinchroninis generatorius su valdomais parametrais (galia, įtampa, rotoriaus ir statoriaus parametrai, sukimosi greitis ir t.t.), lygintuvas ir parametrų atvaizdavimo prietaisai (angl. scopes) (2.4 pav.). Siekiant imituoti VE generacijos dinaminį kitimą įvedamas signalas, keičiantis vėjo greitį, nuo kurio keičiasi ir generatoriaus sukimo momentas. Kadangi saulės ir vėjo energijos šaltiniai jungiami per DC intarpą, kintamajai įtampai išlyginti naudojamas lygintuvas.

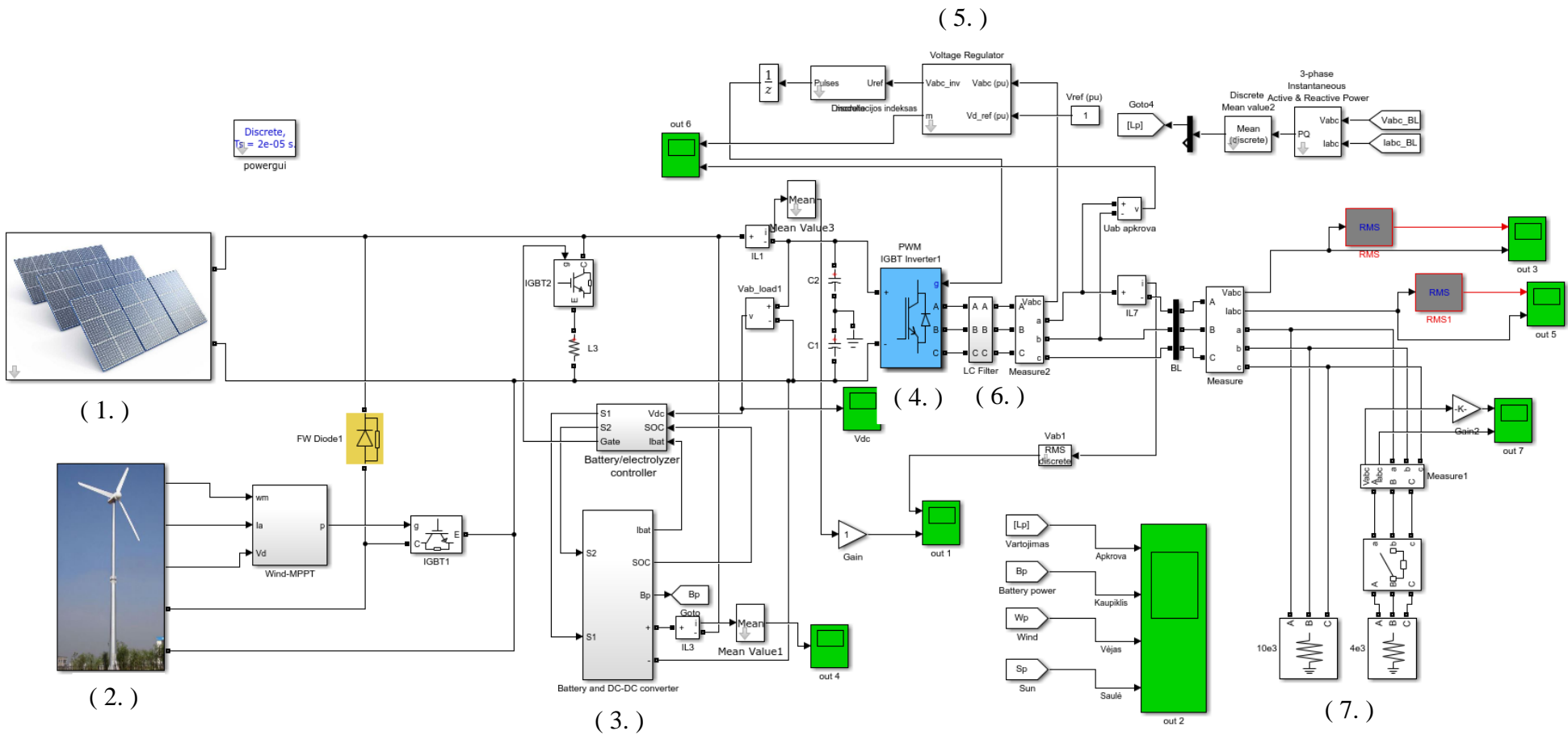


2.4 pav. Vėjo elektrinės schema

Saulės elektrinės posistemė sudaryta iš SE bloko, kuriame galima pasirinkti norimus parametrus: fotomodulio galią, srovę, įtampą, nuosekliai ir lygiagrečiai sujungtų modulių skaičių, taip pat galimi įvesties parametrai, tokie kaip temperatūra ir apšvieta, kuriais galima imituoti dinaminį elektros generacijos procesą. Maksimaliai fotomodulio efektyvumui gauti naudojamas maksimalaus galios taško sekimo blokas (MPPT).



2.5 pav. Saulės elektrinės schema



2.6 pav. Tiriamojo mikrotinklo modelis Matlab/Simulink programoje

Pirmu numeriu pažymėtas saulės elektrinės blokas, kuris detaliau aprašytas anksčiau ir posisteme pateikta 2.5 paveiksle. Antru numeriu pažymėtas vėjo elektrinės blokas, kuris kartu su saulės elektrine sujungiami per nuolatinės srovės grandį, į kurią taip pat jungiamas ir energijos kaupiklis – sistemos blokas Nr. 3. Tiek saulės, tiek vėjo elektrinių maksimalioms generacijos vertėms gauti panaudojami maksimalios galios taško sekimo (MPPT) įrenginiai, kurie pagerina energijos gamybos efektyvumą iš esamų gamtos išteklių.

Visi įtampos ir srovės šaltiniai generuoja apie 600 V nuolatinės įtampos elektros energiją, kuri per IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) inverterį – blokas Nr. 4, pakeičiama į reikiamų parametru ir perduodama apkrovai. IGBT inverteris naudoja pulsų pločio valdiklį – blokas Nr. 5 (pulse width modulation – PWM), kuris matuoja apkrovos pusėje gaunamą įtampą ir lygina ją su užduota etalonine verte. Jeigu įtampa nesutampa, pulsų pločio valdiklis keičia inverterio jungiklių atidarymo laiką ir greitį, kurie atitinkamai formuoja skirtingo pločio impulsus, kurie formuoja reikiamo dydžio įtampą.

Blokas Nr. 6 - LC lygintuvas, naudojamas sumažinti iš energijos keitiklio išeinančias harmonikas. Apkorovų blokai (blokas Nr. 7) prijungti kintamos įtampos pusėje už LC filtrų, kuriems galimi keisti įtampos, dažnio, galios ir kiti modeliavimui reikalingi parametrai.

2.2. Elektros energijos keitikliai bei jų parinkimas

Energijos generacijos įrenginiai, ypač saulės ar vėjo elektrinės, gamina nepastovių parametru energiją, kuri nėra tinkama tiesiogiai tiekti į tinklą. Kad elektros energija būtų tinkamų parametru – 50 Hz dažnio, 400 V ar 10,5 kV, ji turi būti atitinkamais įrenginiais konvertuojama, transformatoriais paaukštinama arba pažeminama ir tik tada perduodama į skirstomąjį ar perdavimo tinklą. Tam tikslui naudojami energijos keitikliai – lygintuvai, inverteriai ir konverteriai (nuolatinės įtampos keitikliai).

Lygintuvai

Lygintuvai, kaip ir sako pavadinimas, yra skirti kintamosios srovės keitimui į nuolatinę pulsuojančią srovę (AC-DC). Dalis elektroninių įrenginių naudoja būtent nuolatinę srovę, todėl, jeigu nėra prijungti prie nuolatinės srovės tinklo dalies, įprasta iš tinklo imama kintamos srovės elektros energija privalo būti konvertuojama, o tam tikslui dažniausiai naudojami lygintuvai. Taip pat lygintuvai naudojami elektros energijos perdavimui dideliu atstumu, siekiant sumažinti energijos perdavimo nuostolius arba sujungti skirtingas, nesinchroniškai dirbančias energetikos sistemas, kurių betarpiškai nebūtų galima sujungti. Lygintuvai pagal įvairius parametrus gali būti skirstomi į skirtingas grupes:

- Pagal kintamosios srovės pusbangių energijos keitimo galimybes – vienpusiai ir dvipusiai;
- Pagal keičiamos kintamosios srovės fazių skaičių – vienfaziai, trifaziai ir daugiataziai;
- Pagal galimybes keisti išlygintos įtampos vertę – nevaldomi, pusiau valdomi (tiristoriniai) ir valdomi.

Pagrindiniai lygintuvų parametrai yra vidutinė išlyginta įtampa, pulsacijų koeficientas, pulsacijų dažnis, naudingumo koeficientas, galios koeficientas, vidinė varža, išorinė ir valdymo charakteristikos [13].

Lygintuvo išlygintos vidutinės įtampos dydį galima apskaičiuoti sekančiai:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_0(t) dt, \quad (2.1)$$

čia : T – išlygintos įtampos periodas;

$u_0(t)$ – momentinė išlygintos įtampos vertė.

Analogiškai galima apskaičiuoti ir vidutinę išlygintos srovės vertę I_0 , integruojant vertes srovės atžvilgiu.

Pulsacijų koeficientas apskaičiuojamas sekančiai:

$$K_p = \frac{U_{p1m}}{U_0}, \quad (2.2)$$

Jis nurodo santykį tarp įtampos pulsacijų pirmosios harmonikos amplitudės ir vidutinės išlygintos įtampos verčių.

Pulsacijų dažnis apskaičiuojamas sekančiai:

$$f_p = f_{in} m, \quad (2.3)$$

čia : m – pulsacijų dažnio daugiklis;

f_{in} – kintamosios įtampos dažnis lygintuvo įėjime.

Lygintuvo naudingumo koeficientas apskaičiuojamas sekančiai:

$$\eta = \frac{P_0}{P_\Sigma} = \frac{U_0 I_0}{P_\Sigma}, \quad (2.4)$$

čia : P_Σ – lygintuvo naudojama aktyvioji galia;

Lygintuvo galios koeficientas apskaičiuojamas:

$$\chi = \frac{P_0}{S} = \vartheta \cos \varphi, \quad (2.5)$$

čia : S – pilnutinė lygintuvo galia;

$\vartheta = I_{in1}/I_{in}$ – tinklo srovės formos iškraipymo koeficientas, lygus tinklo srovės pirmosios harmonikos I_{in1} ir šios srovės I_{in} efektinių verčių santykiui [13].

Priklausomai nuo panaudojimo pobūdžio galimos įvairios lygintuvų schemas:

- Vienfazis vienpusis lygintuvas;
- Vienfazis dvipusis nevaldomas lygintuvas;
- Trifazis vienpusis nevaldomas lygintuvas;
- Trifazis dvipusis tiltelinis nevaldomas lygintuvas;

- Daugiafazis lygintuvas;
- Pusiau valdomas lygintuvas. Šiuose lygintuvuose vietoje nevaldomų diodų naudojami pusiau valdomi ventiliai. Lyginant su nevaldomu lygintuvu, kurio diodai pralaidūs tik viena kryptimi, šių lygintuvų ventilių įjungimo momentas gali būti uždelstas, o išjungimas abiejų tipų lygintuvuose yra vienodas – nevaldomas. Vidutinės išlygintos įtampos dydis gali būti keičiamas vėlinant ventilių įjungimo momentą.
- Valdomas lygintuvas. Šių lygintuvų ventiliai (tiristoriai) yra visiškai valdomi ir, lyginant su pusiau valdomų lygintuvų veikimu, yra pranašesni, kadangi nesukelia šaltinio srovės iškraipymų, kurie mažina galios koeficiento vertę. Šie lygintuvai taip pat skirstomi į pogrupius:
 - Lygintuvai su aukštinamuoju keitikliu. Šio tipo lygintuvai sudaryti iš nuosekliai sujungtų nevaldomo lygintuvo ir aukštinamojo nuolatinės įtampos keitiklio. Aukštinantysis keitiklis formuoja sinusinę šaltinio srovę ir reguliuoja išlygintą įtampą. Taip pat šis lygintuvas pasižymi mažesnėmis išėjimo įtampų pulsacijomis, kadangi keitiklio perdavimo koeficientas yra sinchroniškas su šaltinio įtampos.
 - Impulsų plotį modeliuojantys lygintuvai. Šaltinio energijos perdavimo apkrovai procesas gali būti visiškai kontroliuojamas valdant ventilių laidumą impulsų pločio moduliacijos būdu.

Nuolatinės įtampos keitikliai

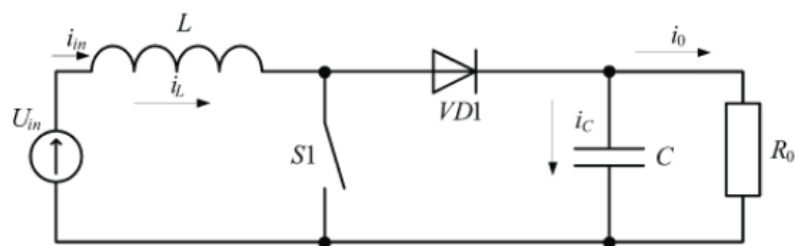
Nuolatinės įtampos keitikliai, arba konverteriai, keičia nuolatinę įtampą į nuolatinę įtampą (DC-DC). Elektros energetikoje naudojama daug energijos šaltinių, kurie generuoja energiją nuolatine įtampa (pvz., saulės elektrinės, kuro elementai, elektros energijos akumuliatoriai, termoelektrinės, nuolatinės įtampos mašininiai generatoriai) ir ji dažniausiai nėra tinkamų parametrų. Tam kad generuojamą įtampą būtų galima pritaikyti, jai stabilizuoti ir reguliuoti naudojami konverteriai.

Yra išskiriamos keturios pagrindinės nuolatinės įtampos keitiklių rūšys [13]:

- Impulsų pločio reguliatoriai;
- Valdantys energijos mainus tarp reaktyviųjų elementų;
- Naudojantys rezonansinius LC kontūrų reiškinius;
- Dozuojantys į apkrovą perduodamos energijos kiekį.

Nuolatinės įtampos keitiklių schemas pagal įvairius parametrus skirstomos į daug rūšių, pvz.: pagal energijos perdavimo apkrovai pobūdį – tiesioginiai ir grįžtamieji, pagal šaltinio ir apkrovos rūšį – galvaniskai susieti ir atskiri, bet visos egzistuojančios rūšys suskirstytos į šešias kartas. Kiekviena karta turi dar pogrupių, plačiau nagrinėjama literatūroje [13].

Šiame tyrime naudojamas aukštinantysis nuolatinės srovės keitiklis, skirtas saulės elektrinės integracijai į tinklą. Aukštinančiojo nuolatinės įtampos keitiklio paskirtis yra paaukštinti keitiklio išėjimo įtampą lyginant su šaltinio įtampa. Keitiklio išėjimo įtampą galima reguliuoti keičiant jungiklio (S1) ciklo trukmę.



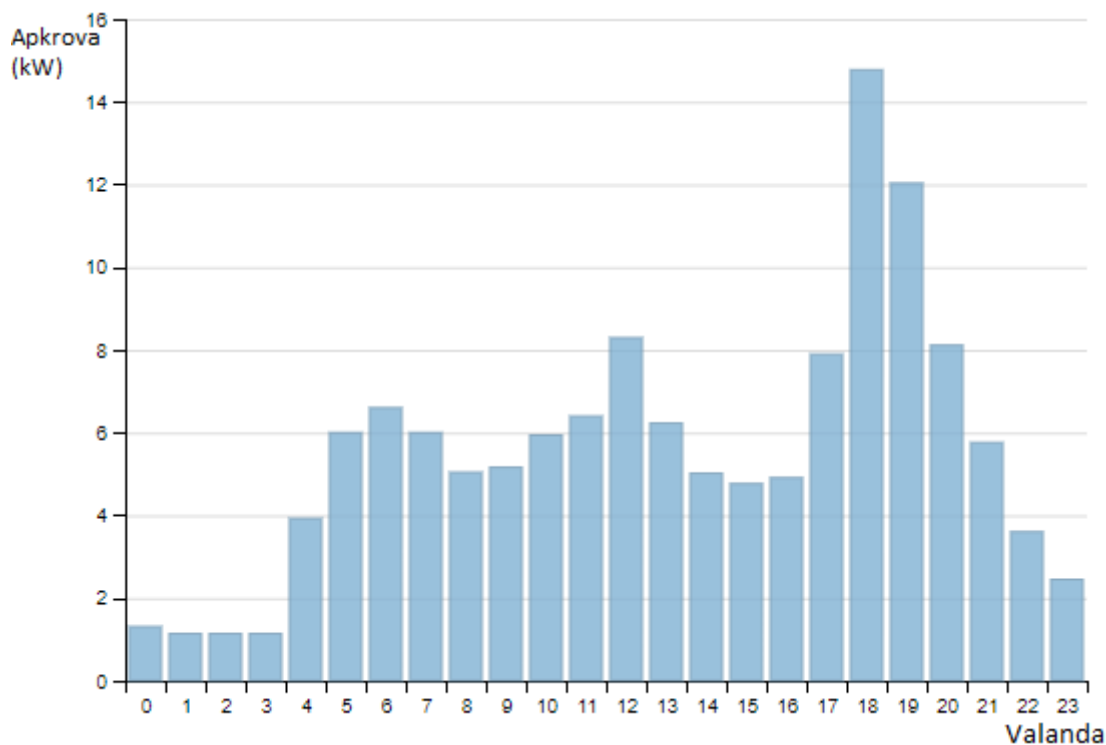
2.7 pav. Aukštinančiojo nuolatinės srovės keitiklio schema

Inverteriai

Inverteriai keičia nuolatinę įtampą į kintamą reikiamo dažnio sinusinę įtampą. Jie naudojami kai reikia gauti kitokio dažnio įtampą, arba kaip avarinio maitinimo šaltiniai kuriantys pramoninio dažnio įtampą [14]. Reikiama inverterio išėjimo įtampa impulsiniu platuminiu būdu, tai yra parenkant valdymo signalui proporcingą įjungimo impulso trukmę per komutavimo periodą $T_k=1/f_k$. Impulso trukmė komutavimo periodo metu nustatoma vieną kart, todėl visų impulsų pločio moduliacijos būdu veikiančių inverterių darbo režimas yra diskretusis. Kadangi reikiama išėjimo įtampos forma dažniausiai yra sinusinė, tai valdymo signalas taip pat sinusinis.

2.3. Elektros tinklo struktūra bei parametrai

Tyrimui atlikti parenkamas namų ūkio tinklas esantis Kauno rajone, Užliedžių kaime, į kurį integruojami atsinaujinančios energijos šaltiniai bei energijos kaupikliai, iš kurių formuojamas mažos galios mikrotinklas. Šiam mikrotinklui būdingas tipinis namų ūkio apkrovų grafikas, kurio didžiausia apkrovos vertė siekia 14,3 kW. Apkrovų grafikas paros bėgyje pateikiamas 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Tiriamojo mikrotinklo vartotojų elektros energijos apkrovų grafikas paros bėgyje

Mikrotinklo energijos poreikiams užtikrinti optimalūs hibridinės sistemos komponentų dydžiai ir vardinės galios parinktos pasinaudojant programine įranga HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources). Tinklo architektūra gaunama įvedus valandinius apkrovos duomenis metų bėgyje, pasirinkus vietovės klimatinės sąlygas – vidutinę kiekvieno mėnesio apšvietą ir vid. vėjo greičius, bei pageidaujamus tinklo komponentus – generacijos šaltinius, kaupiklius ir, jeigu modeliuojamas MT sujungtas su skirstomuoju tinklu, el. tinklo ekonominius parametrus (esamas elektros energijos pirkimo, pardavimo ir kitas kainas). Esamos vietovės vidutinius vėjo greičių bei saulės ekspozicijos matavimus programa paima iš „NASA Surface meteorology and Solar Energy database“, kurioje duomenys buvo archyvuojami 1983 – 2005 metais.

2.3.1. Optimalaus sistemos modelio sudarymas HOMER programa

HOMER, pagal programai pateiktus įvestinius duomenis (apkrovas, vietovę, sistemos komponentus), imituoja sistemos veikimą atliekant energijos balanso skaičiavimus kiekvienu metų intervalu. Kiekvienu laiko momentu HOMER lygina elektros poreikį ir el. energijos generaciją, kurią sistema gali tiekti tuo metu, ir apskaičiuoja energijos srautą į kiekvieną sistemos komponentą ir iš jo. Sistemoms, kuriose yra energijos kaupiklių arba kurą naudojančių generatorių, HOMER taip pat kiekvienu momentu nusprendžia, kaip valdyti generatorius ir ar įkrauti, ar iškrauti baterijas.

HOMER atlieka šiuos energijos balanso skaičiavimus kiekvienai sistemos konfigūracijai, kurią norima apsvarstyti. Tada ji nustato, ar konfigūracija yra įmanoma (t.y. ar ji gali patenkinti elektros poreikį pagal programai nurodytas sąlygas), ir įvertina sistemos diegimo ir eksploatavimo išlaidas per visą projekto eksploatavimo laikotarpį. Sistemos sąnaudų skaičiavimai sudaro tokias išlaidas kaip kapitalas, keitimas, eksploatavimas ir priežiūra, kuras ir palūkanos.

Gavus simuliacijos rezultatus galima ne tik palyginti skirtingų konfigūracijų sistemas techniniu ir ekonominiu požiūriu, bet ir gauti konkrečius duomenis, kokie numatomi sistemos nuostoliai, kiek sistema pagamins perteklinės energijos, ar koks bus galimas nepagamintos energijos trūkumas.

Žemiau pateikiamos formulės, kuriomis programoje atliekami skaičiavimai.

Saulės elektrinėje generuojamos el. energija galia:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\overline{G_T}}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})]$$

kur:

Y_{PV} – vardinė saulės elektrinės galia, standartinėmio testo sąlygomis [kW] [homer puslapis];

f_{PV} - PV vertės sumažinimo koeficientas, kurį programa taiko bendram SE galingumui, kad generacija atitiktų realesnes sąlygas, palyginus su idealiu modeliu (įvertinamas plokščių užterštumas, nuostoliai laiduose, šešėliai, senėjimas ir pan.);

$\overline{G_T}$ – saulės spinduliuotė, krentanti į SE modulį skaičiuojamuoju momentu [kW/m²];

$G_{T,STC}$ – spinduliuotė standartinėmis bandymo sąlygomis [1 kW/m²];

α_P – temperatūros koeficientas [%/°C] ;

T_c – PV modulio temperatūra skaičiuojamuoju momentu [°C]

$T_{c,STC}$ - PV modulio temperatūra standartinėmis bandymo sąlygomis [25 °C].

Prenkant energijos kaupiklį kiekvienu laiko momentu HOMER apskaičiuoja didžiausią kiekį energijos, kurį kaupiklis gali įsisavinti. Programa vertina didžiausią kaupiklio įkrovimo galią priimdama sprendimą, ar energijos kaupiklis gali įsisavinti visą gaunamą atsinaujinančios energijos kiekį arba ar galės užtikrinti el. energijos poreikį didžiausios apkrovos metu. Didžiausia įkrovimo galia kiekvienu laiko momentu skiriasi priklausomai nuo kaupiklio įkrovos būsenos.

Skaičiuojant maksimalią įkrovimo galią HOMER vertina tris apribojimus. Pirmasis apribojimas yra kilęs iš kinetinės baterijos saugojimo modelio, kuriame teigiama, kad didžiausia galia, kurią gali sugerti dviejų talpyklų sistema, apskaičiuojama pagal šią lygtį:

$$P_{batt,max,kbm} = \frac{kQ_1 e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}$$

kur:

Q_1 – energijos kaupiklyje turima energija [kWh] skaičiuojamojo laikotarpio pradžioje;

Q – bendras energijos kiekis [kWh] energijos kaupiklyje skaičiuojamojo laikotarpio pradžioje;

c – talpos santykis;

k – greičio konstanta [h⁻¹];

Δt – trukmė [h].

Antrasis apribojimas susijęs su maksimaliu kaupiklio įkrovos greičiu A/Ah. Kaupiklio įkrovimo galia atitinkanti maksimalų įkrovos greitį gaunama pagal šią formulę:

$$P_{batt,max,mcr} = \frac{(1 - e^{-\alpha_c \Delta t})(Q_{max} - Q)}{\Delta t}$$

kur:

α_c – kaupiklio maksimalus įkrovos greitis [A/Ah];

Q_{max} – bendra kaupiklio talpa [kwh].

Trečiasis apribojimas susijęs su maksimalia kaupiklio įkrovos srove. Didžiausia energijos kaupiklio įkrovos galia susijusi su maksimalia įkrovos srove apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$P_{batt,max,mcc} = \frac{N_{batt} I_{max} V_{nom}}{1000}$$

kur:

N_{batt} – akumuliatorių skaičius visame energijos kaupiklyje;

I_{max} – kaupiklio maksimali įkrovimo srovė [A];

V_{nom} – kaupiklio vardinė įtampa [V].

Taigi HOMER apskaičiuoja didžiausią kaupiklio įkrovos galią pagal mažiausią iš trijų apskaičiuotų verčių įvertindamas ir įkrovimo metu atsirandančius nuostolius:

$$P_{batt,cmax} = \frac{MIN(P_{batt,cmax,kbm}, P_{batt,cmax,mcr}, P_{batt,cmax,mcc})}{\eta_{batt,c}}$$

kur:

$\eta_{batt,c}$ – energijos kaupiklio įkrovos efektyvumas.

Iškrovos galia apskaičiuojama:

$$P_{batt,dmax,kbm} = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})}$$

Įvertinus iškrovos metu atsirandančius nuostolius didžiausia iškrovos galia apskaičiuojama:

$$P_{batt,dmax} = \eta_{batt,d}P_{batt,dmax,kbm}$$

kur:

$\eta_{batt,d}$ – energijos kaupiklio iškrovos efektyvumas.

Siūlomo optimaliausio tinklo architektūra su skirtingais energijos kaupiklių tipais pateikiama 2.1 lentelėje. Kadangi programoje nėra aprašyto ir įvertinto NiMH kaupiklio, pasirinktas artimiausias šiam tipui kaupiklis – nikelio geležies (NiFe).

2.1 lentelė. Siūloma mikrotinklo architektūra

SISTEMOS ARCHITEKTŪRA				
	Su ličio jonų akumuliatoriumi	Li-ion	LA	NiFe
1.	Saulės elektrinė, kW	17,2	16,6	1,89
2.	Vėjo elektrinė, kW	10,0	10,0	2
3.	Energijos kaupiklis			
3.1.	<i>Ličio jonų, 9,08 kWh, 189 Ah, vnt.</i>	4	-	-
3.2.	<i>Švino rūgštinis, 9,49 kWh, 1,19 Ah, vnt.</i>	-	10	-
3.3.	<i>Nikelio geležies, 400 Ah, vnt.</i>	-	-	25

2.2 lentelė. Sistemos el. energijos generacijos vertės

	Sistemos el. energijos generacijos vertės	Li-ion	LA	NiFe
1.	Sistemos pagaminta el. energija, kWh/m	20 768,0	21 140,0	12 398,0
2.	<i>Saulės energijos, kWh/m</i>	15 468,0	15 840,0	1 799,0
3.	<i>Vėjo energijos, kWh/m</i>	5 300,0	5 300,0	10 600
4.	Vartotojo sunaudota el. energija, kWh/m	4 110,0		
5.	Sistemoje pagamintos energijos perteklius, kWh/m	16 418,0	16 532,0	7 742,0
6.	Energijos trūkumas, kWh/m	0,0	1,94	3,97

2.3 lentelė. Mikrotinklo ekonominiai rodikliai

	Mikrotinklo ekoniminiai rodikliai	Li-ion	LA	NiFe
1.	Pradinio kapitalo sąnaudos, Eur	58 130,0	54 850,0	51 310,0

2.	Pakeitimas, Eur	22 386,0	13 800,0	16 675,0
3.	Eksploatacijos išlaidos, Eur	5 995,0	5990,0	11 645,0
4.	Saulės elektrinės pagaminamos energijos kaina, eur/kWh	0,088	0,088	0,088
5.	Vėjo elektrinės pagaminamos energijos kaina, eur/kWh	0,46		
6.	Energijos kaupiklyje saugojimo kaina, eur/kWh	0,14	0,11	0,013

2.4 lentelė. Energijos kaupiklių parametrai

	Energijos kaupiklių parametrai	Li-ion	LA	NiFe
1.	Energijos kaupiklio autonomija, val.	69,4	121,0	57,5
2.	Sukaupta energija per baterijos gyvavimo ciklą, kWh	13 510,0	22 183,0	25 278,0
3.	Energijos nuostoliai, kWh/m	69,3	330,0	377,0
4.	Energijos pralaidumas, kWh/m	1 351,0	1 479,0	1 685,0

Kaip matyti 2.1 lentelėje, kad mikrotinklas gebėtų dirbti autonomiškai kintant oro sąlygoms ar apkrovai tiek dienos, tiek sezonų bėgyje, MT komponentų galios turi būti labai didelės. Iš visos sistemoje pagamintos energijos net 79,1 proc. nebus panaudota mikrotinke, o bus atiduodama į tinklą. Taip yra todėl, kad yra didelis apkrovos grafiko ir generacijos nesuderinamumas, o ir pati generacija nevyksta visuomet vardinėmis galiomis. Tai ir yra didžiausias atsinaujinančių energijos šaltinių trūkumas.

3. Galios svyravimų procesų optimizavimas panaudojant energijos kaupiklius ir rezultatų analizė

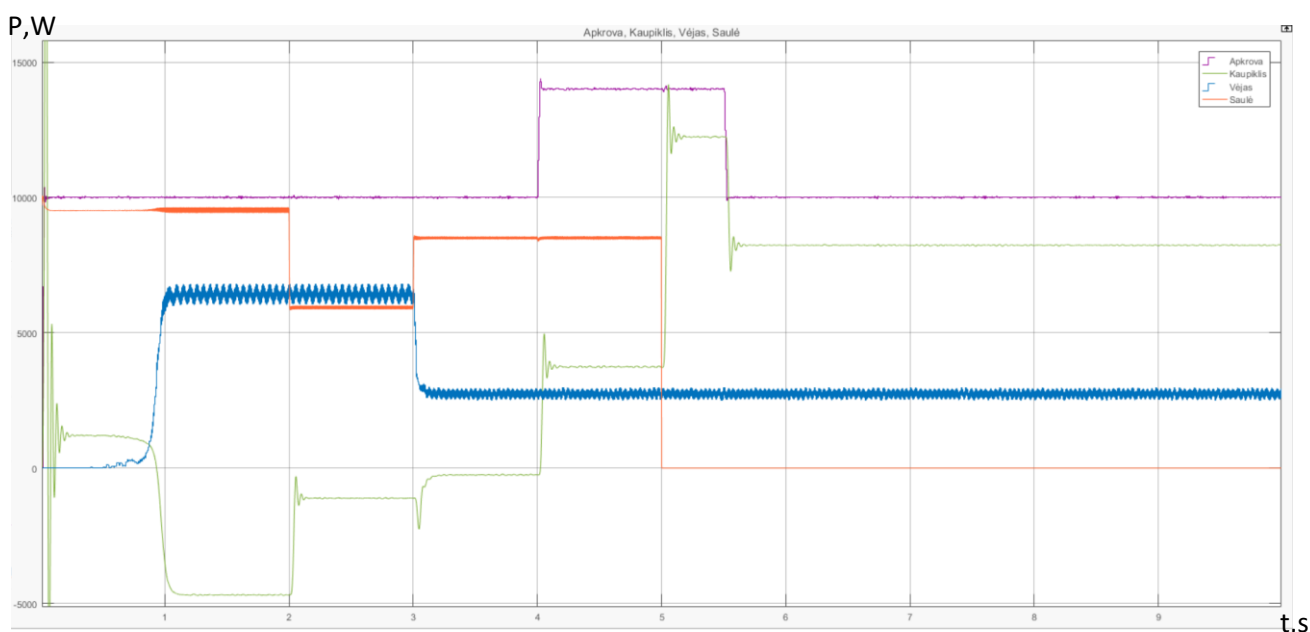
Nesant įrengto mikrotinklo visas energijos poreikis užtikrinamas iš centralizuoto elektros energijos skirstymo operatoriaus. Tada sistema tampa priklausoma nuo vienintelio elektros energijos tiekėjo ir pažeidžiama atsiradus tiekimo sutrikimams. Esant trumpalaikiams tiekimo trikdžiams sistemos stabilumą galima pagerinti įrengiant nepertraukiamo maitinimo šaltinius - UPS (uninterruptible power supply), tačiau ilgesniems nei kelių sekundžių energijos tiekimo sutrikimams šalinti tikslinga įrengti didesnės talpos energijos kaupiklius.

Siekiant įvertinti energijos konversijos procesus ir energijos kaupiklių įtaką tiriamojo mikrotinklo veikimui modeliuojamos skirtingos sąlygos:

1. Vėjo elektrinės generacija nusistovėjus režimui sumažėja nuo 60 % iki 30 % vardinės galios, saulės elektrinė 15 % vardinės galios, apkrovos galia vidutinė – kinta nuo 10 kW iki 14 kW, ir ties 5s nutrūksta SE generacija. Energijos kaupiklio pradinė SOC 60 %.
2. Vėjo ir saulės elektrinės dirba tomis pačiomis sąlygomis, apkrovos galia pasiekia 100 %, t.y. 18,5 kW ir nutrūksta SE generacija ties 5s. Energijos kaupiklio pradinė SOC 60 %.
3. Vėjo elektrinė generuoja energiją 10 kW galia, SE 10 kW galia, vartojama taip pat 10 kW. 3 sekundę atsijungia abu energijos šaltiniai, t.y. SE ir VE. 4 sekundę dar padidinama vartojamos energijos galia. Energijos kaupiklio pradinė SOC 35 %.

Modeliuojamame mikrotinkle tiriamos trys elektrocheminės kilmės energijos kaupimo sistemos: ličio jonų, švino rūgšties ir nikelio metalo hidrido akumuliatorių baterijos. Didelę reikšmę sistemos stabilumui turi energijos kaupiklių atsako laikas ir iškrovos galia, kuria jie pilnai turi užtikrinti momentinį energijos poreikį. Tyrimo metu siekiama įvertinti, ar keičiantis galių balansui, t.y. įvendant galių disbalansą, sistema sugebės išlaikyti stabilią įtampos vertę – įtampos svyravimai neviršys leidžiamų 5 %.

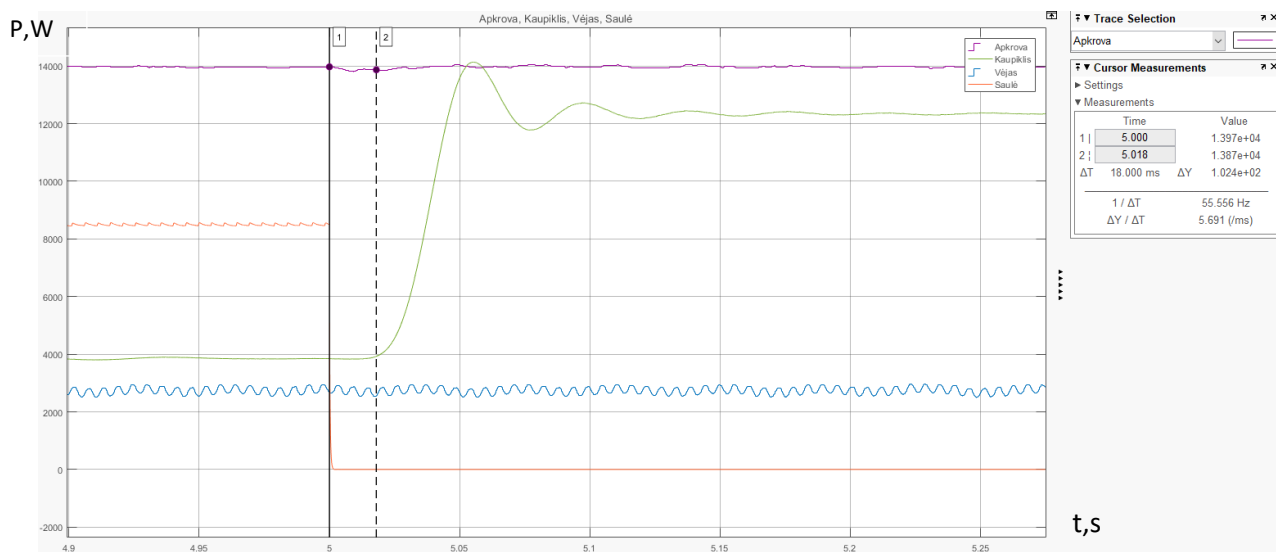
Pateikiami 10 sekundžių modeliavimo rezultatai su ličio jonų akumuliatoriais pagal pirmąją sąlygą.



3.1 pav. Mikrotinklo su ličio jonų akumuliatoriais generacijos ir vartojimo galių svyravimai pagal pirmąją sąlygą

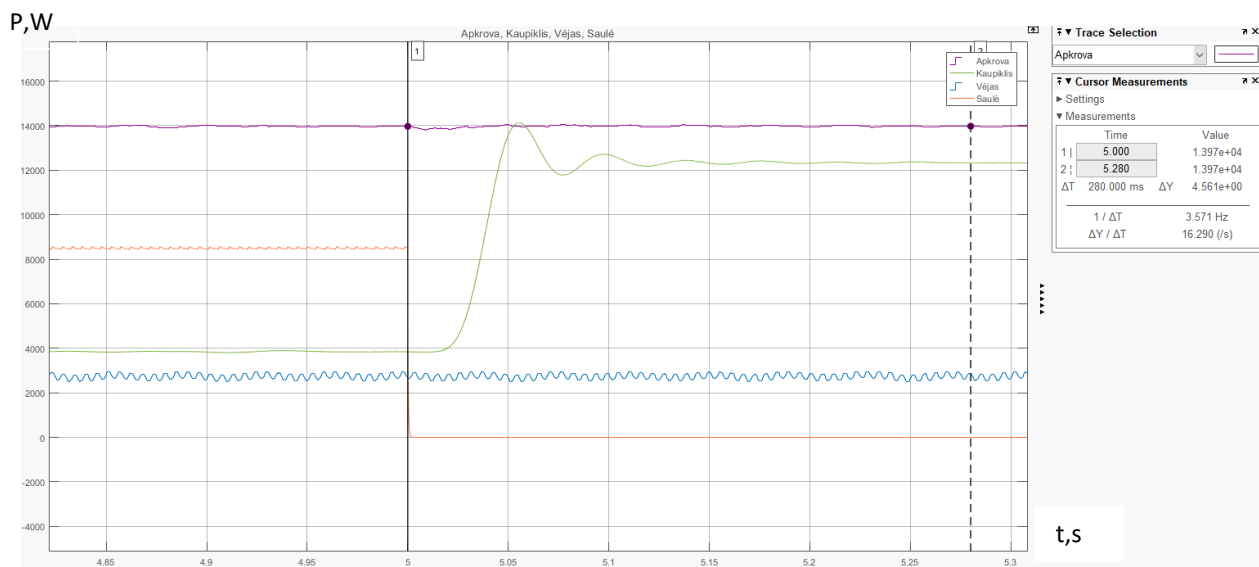
Grafike violetine spalva žymima apkrovos kreivė - nusistovėjusiame režime iki 4 s vartojama 10 kW galios elektros energija, ties 4-5,5 s pakeliama iki 14 kW ir po to gražinama 14 kW. Mėlyna spalva žymima vėjo elektrinės generacijos kreivė, žalia spalva energijos kaupiklio galios kreivė. Matyti, kad keičiantis pagaminamos ir suvartojamos galių santykiui energijos kaupiklio galia nenutrūkstamai irgi kinta.

Pasireiškus tinkle disbalansui, t.y. sumažėjus saulės elektrinės generacijai iki 0 kW ties 5 sekunde, bet energijos suvartojimui nesikeičiant, energijos kaupiklis turi pilnai padengti atsiradusį elektros poreikio skirtumą. Laikas, per kurį kaupiklis suveikė yra 18 ms (3.2 pav. – 3.1 paveikslo priartintas vaizdas).



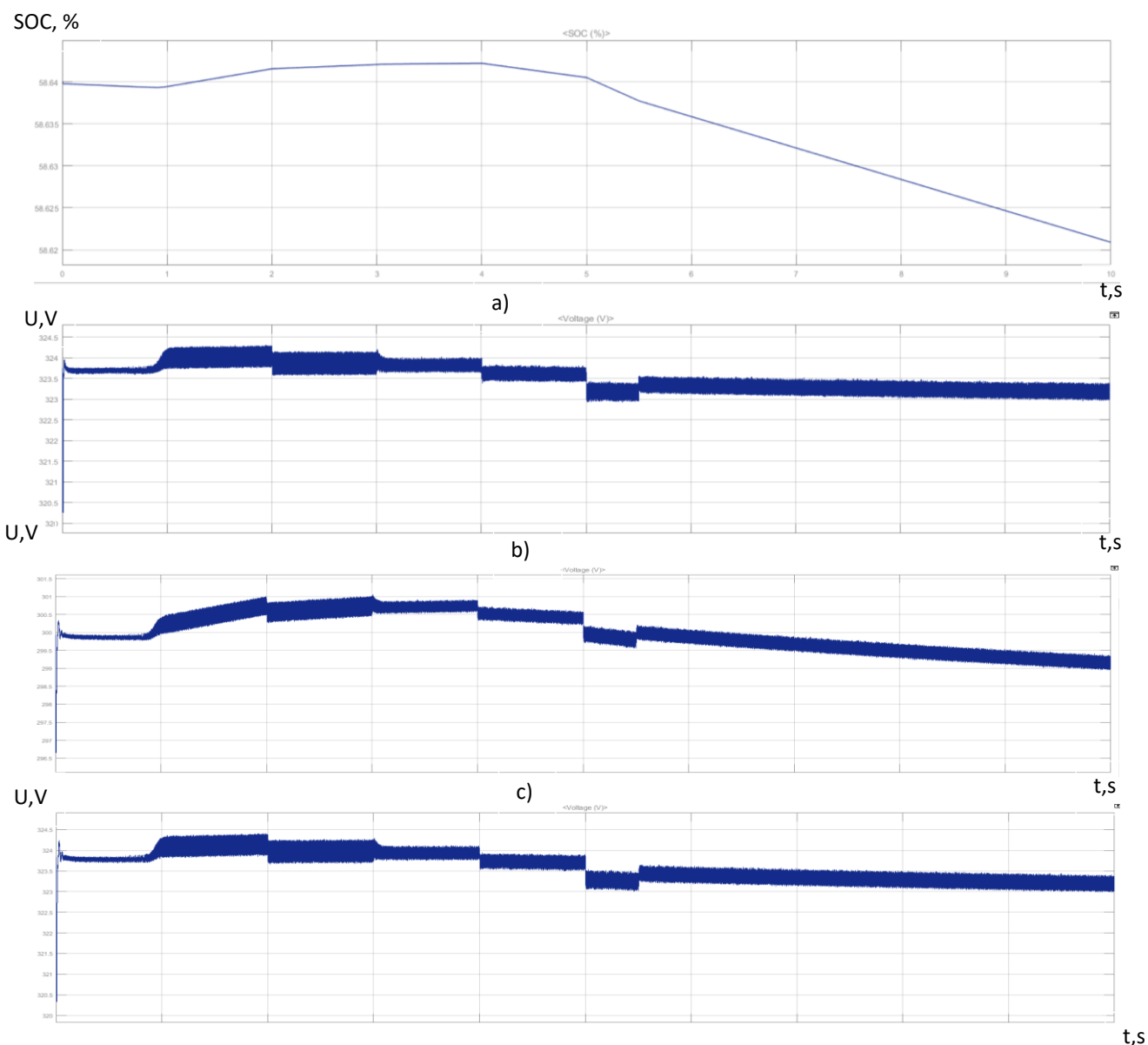
3.2 pav. Energijos kaupiklio suveikimo laikas nutrūkus saulės elektrinės generacijai

Atsiradus galių disbalansui energijos kaupiklio srovė stipriai padidėja ir trumpam atsiranda nestabilus darbo režimas - galios svyravimai. Laikas, per kurį nusistovi energijos kaupiklio dinaminės charakteristikos pateikiamos 3.3 paveiksle. Matyti, kad nuo disbalanso pradžios iki EK nusistovėjusio veikimo yra 280 ms.



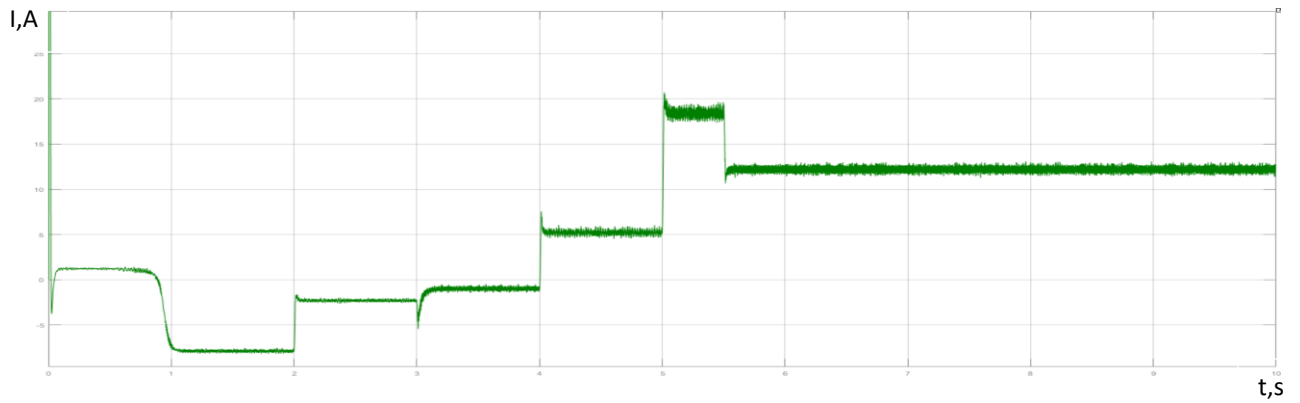
3.3 pav. Laikas nuo disbalanso atsiradimo iki EK nusistovėjusio veikimo

Modeliavimo pradžioje energijos kaupiklio įkrovos būseną (SOC) siekia 60 %. Kol energijos šaltinių generacija viršija apkrovos momentinę galią akumulatoriai įkraunami. Ties 5 sekunde nutrūkus SE generacijai vėjo elektrinės pagaminama energija neužtikrina visos apkrovos galios poreikio, todėl įsijungia kaupiklis. Iš įkrovimo būsenos kaupiklis pereina į išsikrovimo - tai atspindi 3.4 pav.



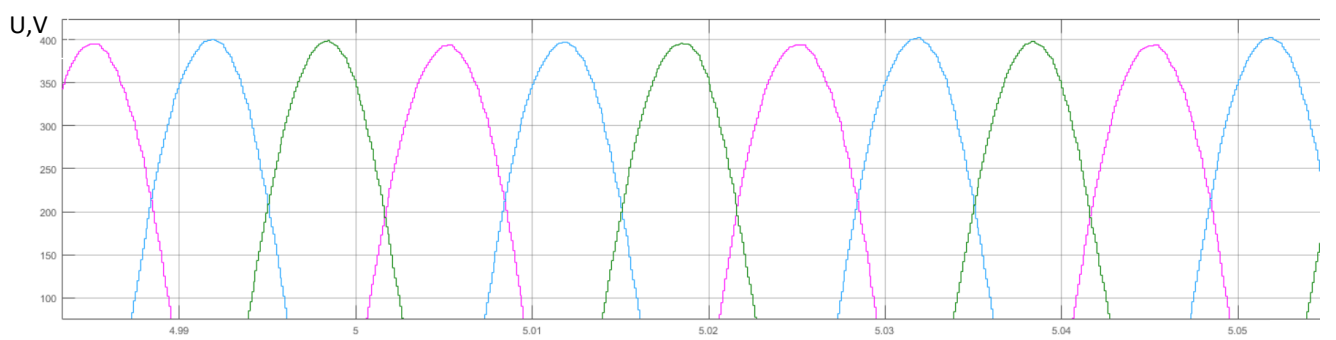
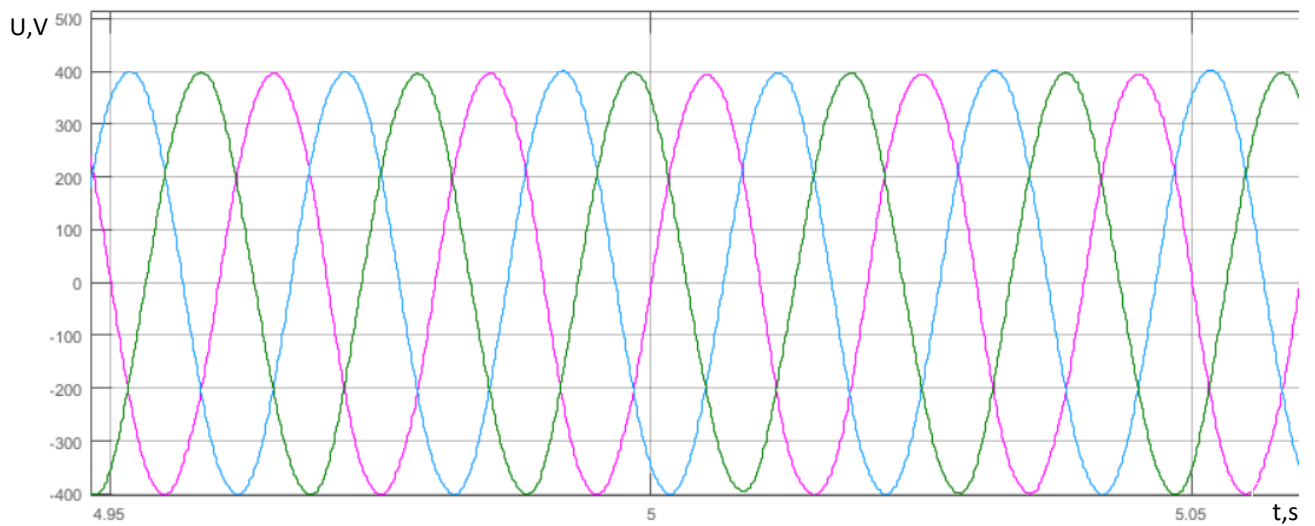
3.4 pav. Energijos kaupiklio SOC ir įtampos kitimas atsiradus disbalansui a) ličio jonų akumuliatoriuje; b) švino rūgštiniam c) nikelio metalo hidridų

3.4 paveiksle pavaizduoti visų 3 tiriamųjų energijos kaupiklių įtampos svyravimai keičiantis pagaminamos ir suvartojamos energijos santykiams. Matyti, kad vykstant netolygiai energijos konversijai skirtinguose energijos šaltiniuose tiesiogiai paveikiama energijos kaupiklių įtampa. Ličio jonų ir nikelio metalo hidridų akumuliatorių įtampa kinta tolygiai ir nežymiai, lyginant su švino rūgštiniu akumuliatoriumi (b kreivė). Dar galima pastebėti, kad švino rūgštinio energijos kaupiklio darbo įtampa yra apie 20 V mažesnė negu kitų dviejų kaupiklių (300 V ir 324 V).



3.5 pav. Energijos kaupiklio srovės kitimas atsiradus disbalansui

Iš 3.5 pav. ir 3.6 pav. galima matyti, kad energijos kaupikliui perėjus į iškvros būseną įtampa nežymiai krenta, bet srovė palaikoma stabili. Apkrovos įrenginių pusėje įtampos svyravimai įvyksta nežymūs – t.y. neviršija leidžiamų kokybės reikalavimų ir stabilizuojasi per kelis sinusoidės svyravimo ciklus (3.6 pav.).



3.6 pav. Įtampos svyravimai apkrovos pusėje pasireškus tinkle disbalansui

Sklandus pereinamasis procesas kintamosios įtampos pusėje gaunamas dėl energijos keitiklio elementų savybių. Talpinis elementas, esantis nuolatinės srovės grandinėje, kaupia energiją ir sugeba išlaikyti stabilų tinklą, kol įvyksta pereinamasis procesas energijos kaupiklyje.

3.1 lentelė. Pirmos sąlygos modeliavimo rezultatai

	Ličio jonų	Švino rūgštinis	Nikelio metalo hidrido
Reakcijos laikas iki kaupiklio suveikimo, ms	18,0	20,0	19,0
Laikas iki stabilaus režimo nusistovėjimo, ms	280,0	210,0	210,0
SOC pokytis per 5 sekundes	58,64-58,62	55,60-55,58	58,32-58,302
EK įtampos kritimas nusistovėjus režimui, V	0,2	0,6	0,2
Įtampos nuokrypis apkrovos pusėje	1,5 %	2,0 %	1,95 %

Tiriant mikrotinklą pagal antrąją sąlygą siekiama įvertinti, ar energijos kaupiklis geba užtikrinti energijos poreikį esant maksimaliai apkrovai. Tinklas tampa labiau pažeidžiamas, kai dirbama ribiniu režimu papildomai įvedant trikdį – saulės elektrinės generacijos nutraukimą. Rezultatai rodo, kad energijos kokybė (įtampa sumažėja daugiau negu 5 %, kas lemia ir sistemoje krentantį dažnį) nėra išlaikoma prie maksimalios apkrovos esant mažai generacijai iš AEŠ, todėl tokiu atveju įtampos rodikliams pagerinti turėtų būti prijungiamas skirstomasis tinklas.

Tirymų rezultatų Matlab kreivės pateikiamos prieduose.

3.2 lentelė. Modeliavimo rezultatai, kai maksimali apkrovos galia pakelta iki 19 kW

	Ličio jonų	Švino rūgštinis	Nikelio metalo hidrido
Reakcijos laikas iki kaupiklio suveikimo, ms	14	14	14
Laikas iki stabilaus režimo nusistovėjimo, ms	220	400	300
SOC pokytis per 5 sekundes	58,625-58,59	55,585-55,545	58,305-58,273
EK įtampos kritimas nusistovėjus režimui, V	0,01	0,1	0,01
Įtampos nuokrypis apkrovos pusėje	394,2-369,3 (6,26 %)	394-368,8 (6,39 %)	394-374 (5,08 %)
DC dalies įtampa	642-632	642-632	642-630

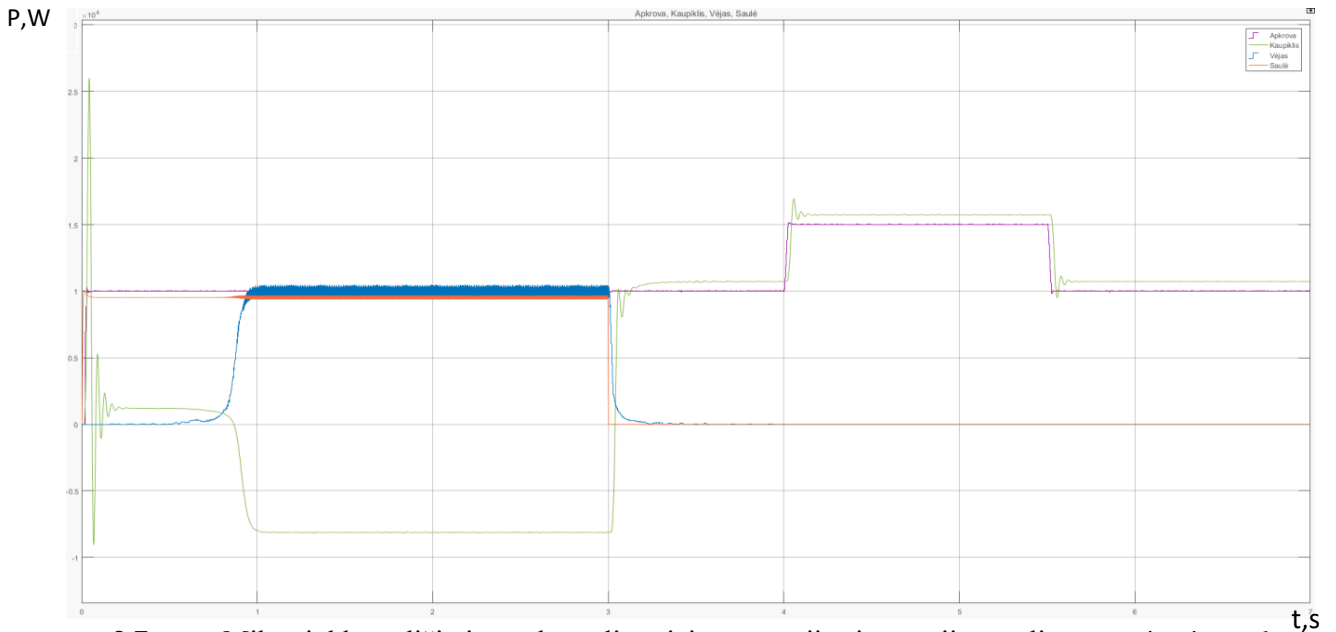
Rezultatų lentelėje matyti, kad visų energijos kaupiklių elektrinės charakteristikos yra labai panašios, tačiau švino rūgštinio akumulatoriaus įtampos mažėjimo greitis yra ženkliai didesnis negu kitų dviejų kaupiklių.

Atlikus modeliavimą pagal trečiąją sąlygą, kai nutraukiamas elektros energijos tiekimas tiek iš VE, ties iš SE matoma, kad energijos kaupiklis visiškai užtikrina energijos poreikį vartotojo apkrovai (3.7 pav.).

Šio bandymo metu energijos kaupiklių pradinė SOC nustatyta 35%. EK įtampos kreivėje galima pastebėti, kad kaupiklio darbo įtampa yra mažesnė negu ankstesniuose bandymuose, kai pradinės SOC buvo 60% , atitinkamai apie 320 V ir 324 V.(3.8 pav.).

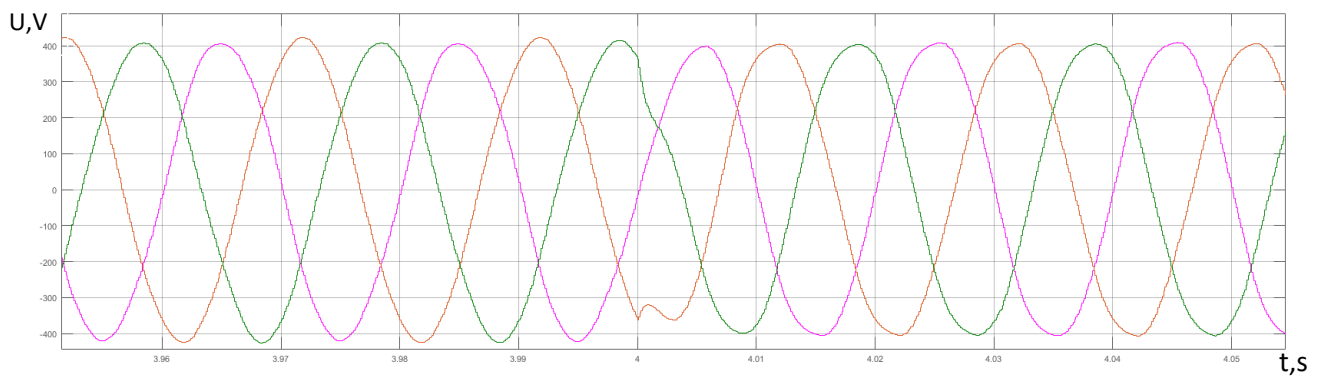
3.3 lentelė. Modeliavimo rezultatai pagal trečiąją sąlygą

	Ličio jonų	Švino rūgštinis	Nikelio metalo hidrido
Reakcijos laikas iki kaupiklio suveikimo, ms	15,0	20,0	15,0
Laikas iki stabilaus režimo nusistovėjimo, ms	400,0	300,0	170,0
SOC pokytis per 5 sekundes	32,797-32,6	28,855-27,815	32,75-32,5
EK įtampos kritimas nusistovėjus režimui, V	0,25	1,75 V	0,25



3.7 pav. Mikrotinklo su ličio jonų akumuliatoriais generacijos ir vartojimo galių svyravimai pagal trečiąją sąlygą

Ištyrus gautas įtampos charakteristikas matyti, kad atsijungus visiems generacijos šaltiniams, bet apkrovos galiai nepakitus, sistemos įtampa vartotojo pusėje truputį padidėjo, t.y. viršija 400 V. Ankstesniuose tyrimuose, kai veikė vienas arba keli generacijos šaltiniai, pasikeitus galių balansui įtampa vartotojų pusėje nežymiai susvyruodavo, tačiau sinusoidės forma išliko nepakitusi. Šio modeliavimo metu 4 sekundę, kai padidėjo apkrovos vertė įvyko žymesni įtampos pokyčiai, kurie atsistatė per kelis sinusoidės svyravimus.



Išvados

1. Mikrotinklams veikiant „salos“ režimu padidėjusi trikdžių srovė turi žymiai didesnės įtakos įrenginiams negu skirstomajame tinkle atsirandantys trikdžiai. Pavojingai padidėja srovė perjungimo į izoliuotą režimą metu, dėl kurios atsiranda tikimybė neteisingai suveikti apsaugos prietaisams.
2. Siekiant parinkti optimalią mikrotinklo struktūrą būtina įvertinti nestabilios galios generavimo šaltinių įtaką mikrotinklo energijos kokybės parametrams bei parinkti saulės ir vėjo elektrinių instaliuotų galių santykį tokį, kuris galėtų kuo labiau prisitaikyti prie mikrotinklo apkrovos grafiko. Atlikus simuliaciją programa HOMER energy nustatyta, kad optimali mikrotinklo struktūra tiriamajam gyvenamajam namui yra: 10 kW vėjo elektrinė, 17 kW saulės elektrinė ir 4 vnt. 189 kWh talpos ličio jonų energijos kaupiklių; 10 kW vėjo elektrinė, 16,6 kW saulės elektrinė ir 10 vnt. 9,49 kWh talpos švino rūgštinių energijos kaupiklių; 2 kW vėjo elektrinė, 1,89 kW saulės elektrinė ir 25 vnt. 400 Ah nikelio geležies kaupiklių. Šios struktūros užtikrina techniškai ir ekonomiškai pagrįstą tinklo veikimą.
3. Lyginant skirtingų tipų energijos kaupiklių parametrus atjungiant dalį apkrovos arba elektros generacijos šaltinių matyti, kad visų energijos kaupiklių suveikimo laikas yra labai panašus – 18 ms ličio jonų, 19 ms nikelio kadmio, 20 ms švino rūgštinio energijos kaupiklio, tačiau žymesni skirtumai pasireiškia įtampos kritime. Švino rūgštinio akumuliatoriaus įtampa nusistovėjus pereinamajam procesui per 5s sumažėjo 0,6 V, tuo tarpu ličio jonų ir nikelio metalo hidrido tik po 0,2 V, tai reiškia, kad švino rūgštinio akumuliatorius žymiai greičiau pasieks žemutinę įtampos ribą ir bus atjungtas nuo tinklo, negu kito tipo baterijos.
4. Modeliavimo su visais trimis energijos kaupikliais metu, įvykdžius energijos šaltinio atjungimą tinkle įvyksta nežymūs įtampos svyravimai, kurie neviršija leidžiamų elektros kokybės reikalavimų, tačiau srovė iki stabilaus režimo nusistovėjimo padidėja beveik 5 A, kas gali turėti įtakos neteisingam apsaugos aparatų suveikimui arba įrenginių apgadinimui. Esant maksimaliai apkrovai ir mažai šaltinių generacijai kaupiklis nepalaiko reikalingų kokybės parametrų tinkle, t.y. neužtikrina reikalingos galios apkrovai ir įtampos kritimas viršija 5 % stabiliaame režime.

Literatūros sąrašas

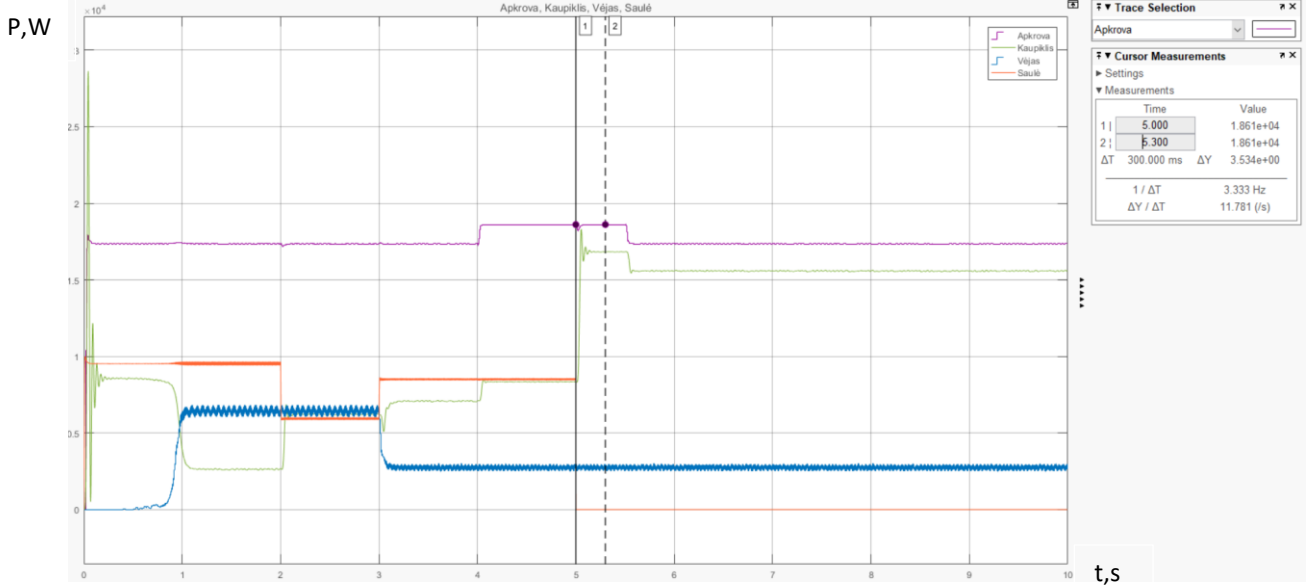
1. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA. *Įsakymas: Energijos vartojimo efektyvumo didinimo 2017-2019 metų veiksmų planas, 2017-07-31, Nr. 1-181* [interaktyvus] [žiūrėta 2018 m. kovo 25 d.]. Prieiga per:
<https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/energijos-vartojimo-efektyvumas/teises-aktai-energijos-vartojimo-efektyvumas>
2. EUROPOS KOMISIJA. *Energetikos veiksmų planas iki 2050 m, KOM(2011) 885 galutinis, Briuselis, 2011.12.15* [interaktyvus] [žiūrėta 2018 balandžio 2 d.]. Prieiga per:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0885&from=LT>
3. EUROSTAT DUOMENŲ BAZĖ. *Atsinaujinančių išteklių energijos statistika* [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-08]. Prieiga per:
http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics/lt
4. DOMENECH B., RANABOLDO M., FERRER-MARTI L., PASTOR R. D., *Flyn, Local and regional microgrid models to optimise the design of isolated electrification projects* [interaktyvus]. Science Direct [žiūrėta 2018 m. kovo 25 d.]. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0960148117310224>
5. HATZIARGYRIOU, N. *Microgrids Architectures and Control*. Chichester: IEEE Press, 2015. ISBN 978-1-118-72064-3
6. EUROPOS AUDITO RŪMAI. *ES veiksmai energetikos ir klimato kaitos srityje: padėties apžvalga 2017*. ISBN 978-92-872-8177-7 [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-10]. Prieiga per:
https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/LR17_01_LEAFLET/LR_LEAFLET_LT.pdf
7. EUROPOS KOMISIJA. *Komunikatas: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social Committee and the Committee of the regions energy roadmap 2050* [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-10]. Prieiga per:
http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX_SESSIONID=pXNYJKSFbLwdq5JBWQ9CvYWYJxD9RF4mnS3ctywT2xXmFYhlnlW1!-868768807?uri=CELEX:52011DC0885
8. LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA, LIETUVOS RESPUBLIKOS UŽSIENIO REIKALŲ MINISTERIJA. *Elektros energetikos infrastruktūros energijos vartojimo efektyvumo potencialo, ypač susijusio su perdavimu, skirstymu, savomis reikmėmis, gamybos efektyvumu, apkrovos valdymu ir visų šių elementų tarpusavio sąveika, taip pat prijungimu prie energijos gamybos įrenginių, be kita ko, priegios galimybės labai mažos galios energijos generatorių atveju, įvertinimas Galutinė ataskaita, 2015-07-21* [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-10]. Prieiga per:
<https://enmin.lrv.lt/uploads/enmin/documents/files/Veikla/Veiklos%20sritys/energijos-naudojimo-efektyvumas/EVE-priemoniu-diegimas-Civitta-2015.pdf>
9. ZHANG Chao, WEI Yi-Li, CAO Peng-Fei, LIN Meng-Chang. *Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82 tomas, 3 dalis, 2018 vasaris, puslapiai 3091-3106 [interaktyvus] [žiūrėta 2018-04-18]. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S1364032117314077?via%3Dihub>
10. International energy storage [interaktyvus] [žiūrėta 2019-04-20]. Prieiga per:
<https://www.iea.org/tcep/energyintegration/energystorage/>

11. STROE ANA-IRINA, D.J Stroe, M. Swierczynski, R. Teodorescu, S.K. Kær. *Lithium-ion battery dynamic model for wide range of operating conditions* [interaktyvus]. IEEE Xplore Digital Library [žiūrėta 2018-04-21]. Prieiga per:
<https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.ktu.edu/document/7975044/>
12. NASA Surface meteorology and Solas Energy database [interaktyvus]. Prieiga per:
<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
13. UDRIS D. *Elektroniniai galios keitikliai*. Mokomoji knyga. Vilnius: Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008, 158psl. ISBN 9955-25-20-288-2.
14. HANKINS M. *Stand-Alone Solar Electric Systems: the Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*. Washington, Earthscan, 2010. ISBN 978-1-84407-713-7
15. BU-409: Charging Lithium-ion. Battery university. Prieiga per internetą:
http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
16. LIETUVOS RESPUBLIKOS SUSISIEKIMO MINISTERIJA. *Elektromobilių skaičius Lietuvoje*. Prieiga per internetą [žiūrėta 2018-05-10]: <https://sumin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/kita-veikla/pletra-ir-inovacijos/elektromobiliu-skaicius-lietuvoje>
17. LIETUVOS RESPUBLIKOS ŪKIO MINISTERIJA, LIETUVOS RESPUBLIKOS ENERGETIKOS MINISTERIJA, LIETUVOS RESPUBLIKOS SUSISIEKIMO MINISTERIJA *Kompleksinė elektromobilių transporto plėtros galimybių studija. Galutinės ataskaitos projektas*, Vilnius, 2012. [žiūrėta 2018-05-10]: Prieiga per:
[http://sumin.lrv.lt/uploads/sumin/documents/files/Veikla/Kita%20veikla/Kompleksine%20EM%20transporto%20pletros%20galimybiu%20studija%20min_\(1\).pdf](http://sumin.lrv.lt/uploads/sumin/documents/files/Veikla/Kita%20veikla/Kompleksine%20EM%20transporto%20pletros%20galimybiu%20studija%20min_(1).pdf)
18. ADOMAVIČIUS V. *Mazosios atsinaujinančiųjų išteklių energijos sistemos*. KTU leidykla „Technologija“, 2013.
19. VĮ „REGITRA“. Atviri duomenys: *Įregistruotų transporto priemonių skaičius pagal degalų rūšį ir savivaldybes (2018 m. sausio 1 d. duomenys), Pirmą kartą įregistruotų Lietuvoje kelių transporto priemonių skaičius sausio-gruodžio mėn.* Prieiga per:
<https://www.regitra.lt/lt/atviri-duomenys/?filesyear=2017&filesquery=>
20. LIETUVOS STATISTIKOS DEPARTAMENTAS. Oficialiosios statistikos portalas. *Nuolatinių gyventojų skaičius liepos 1 d.* Prieiga per:
<https://osp.stat.gov.lt/gyventojai>
21. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery university. Prieiga per internetą [žiūrėta 2019-05-19]. Žiūrėta per:
https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion
22. BARANAUSKAS, Audrius . *Elektrinių ir energijos kaupimo sistemų valdymo modelis vėjo elektrinių galiai balansuoti: daktaro disertacija*. Kauno technologijos universitetas, Kaunas, 2014 [interaktyvus] [žiūrėta 2018-01-20]. Prieiga per:
<https://epubl.ktu.edu/object/elaba:2195259/2195259.pdf>
23. KALANTAR M., MOUSAVI S.M. G, *Dynamic behavior of a stand-alone hybrid power generation system of wind turbine, microturbine, solar array and battery storage*. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-02-17]. Prieiga per:
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0306261910000504#!>
24. HIRSCHA A., PARAGA Y., GUERRERO J. *Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues*. [interaktyvus] [žiūrėta 2019-05-20]. Prieiga per:
<https://www-sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S136403211830128X>

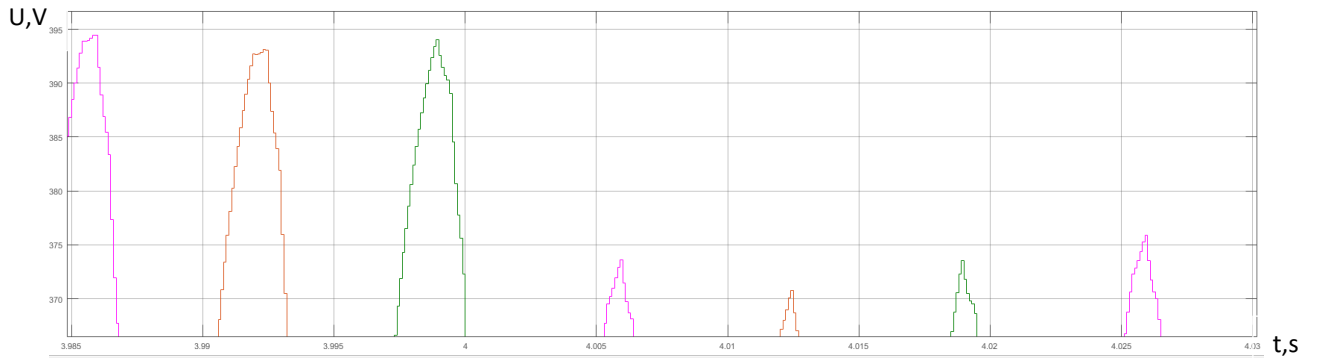
25. VAN DEN BROECK G., STUYTS J., DRIESE J. *A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids*. Applied Energy, 229 tomas, 2018 lapkričio 1 d., puslapiai 281-288 [interaktyvus] [žiūrėta 2019-05-28]. Prieiga per:
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0306261918310869>

Priedai

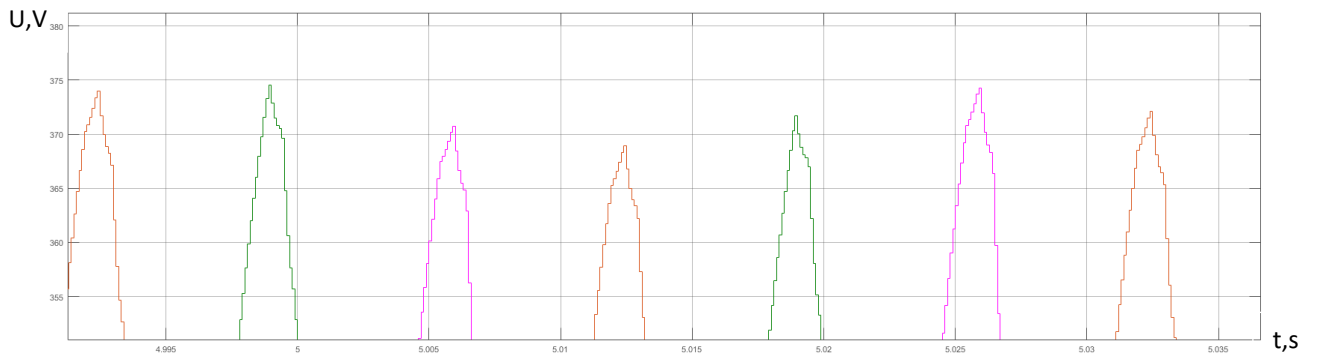
Priedas Nr. 1. Modeliavimas su ličio jonų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą



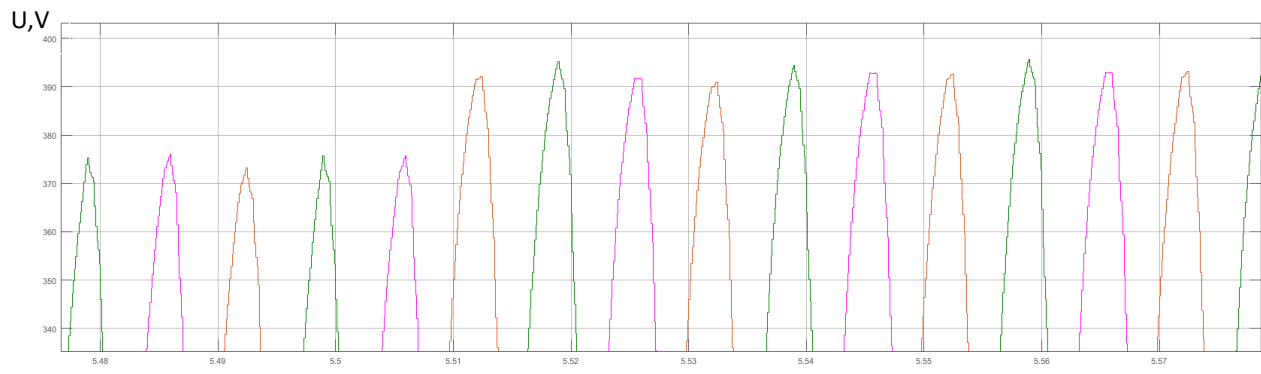
Įtampos pokytis apkrovos pusėje padidėjus apkrovos galiai



Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus SE

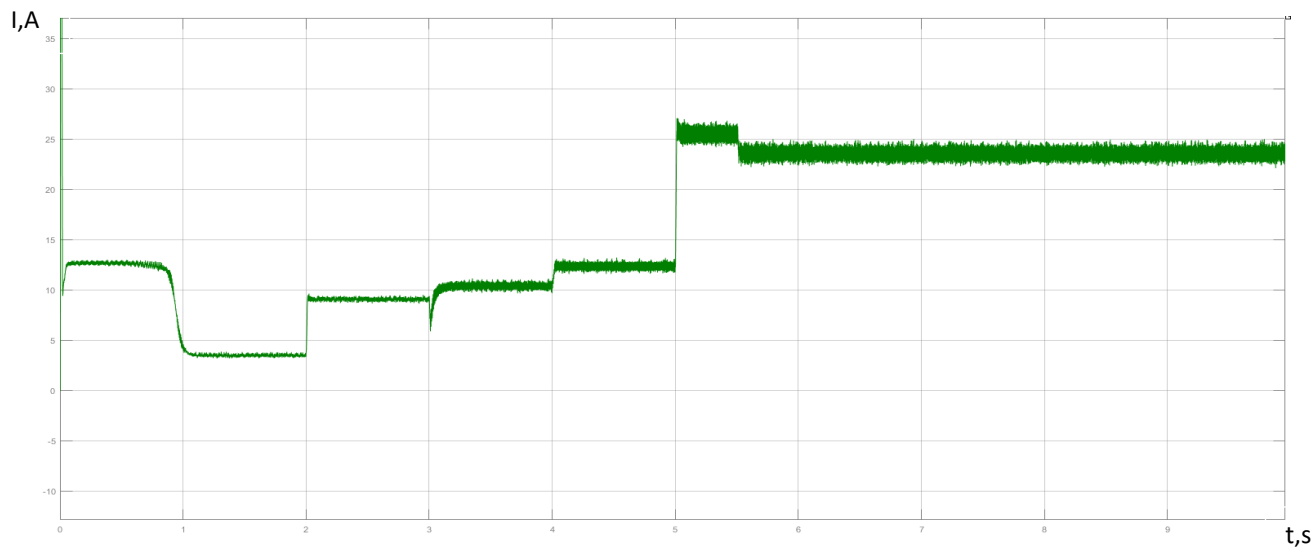
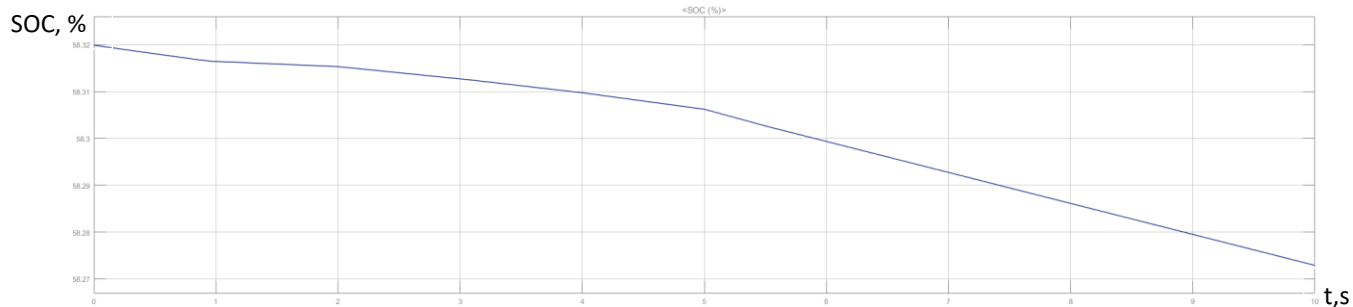
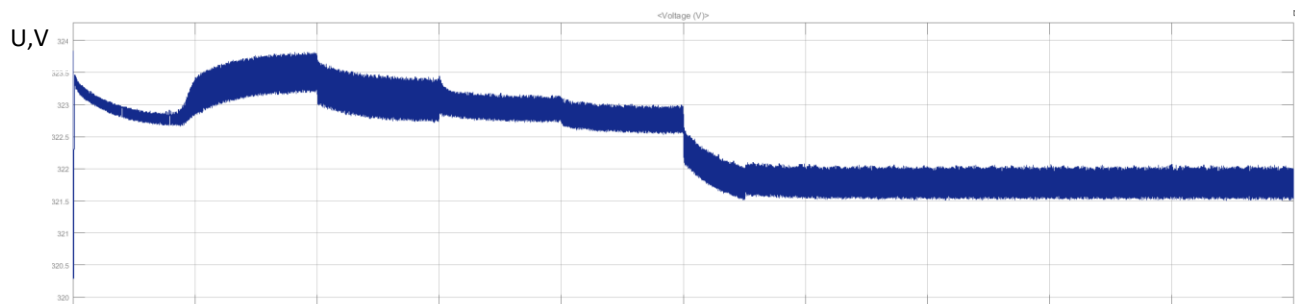


Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus daliai apkrovos

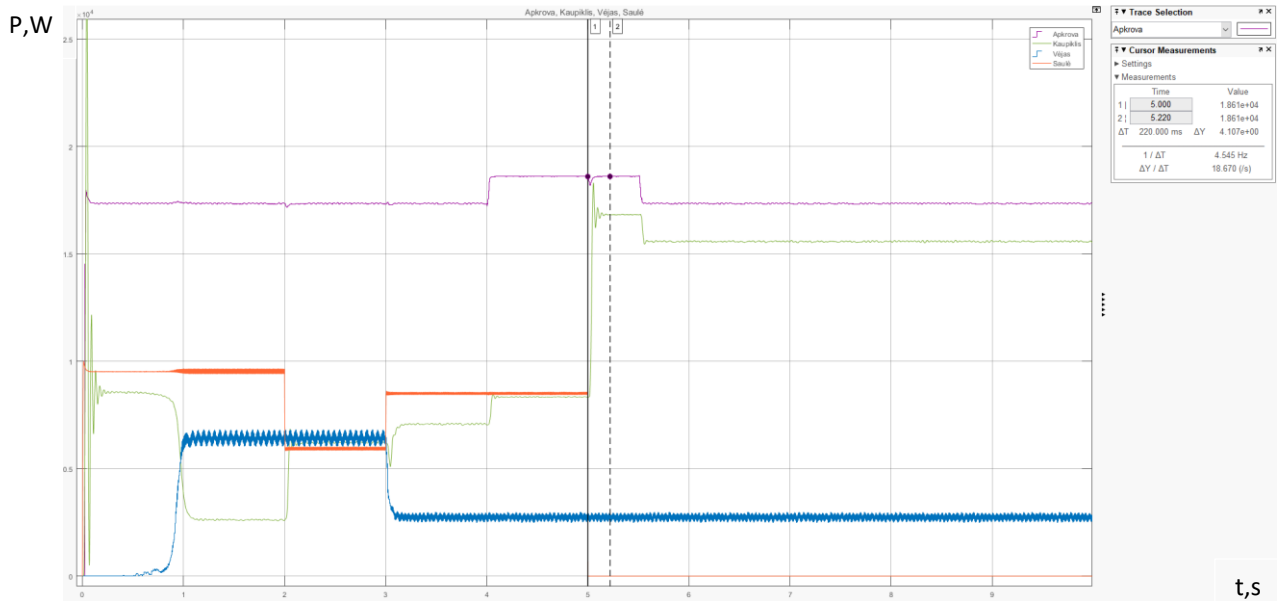


Energijos kaupiklio SOC įtampos ir srovės kitimas modeliavimo metu

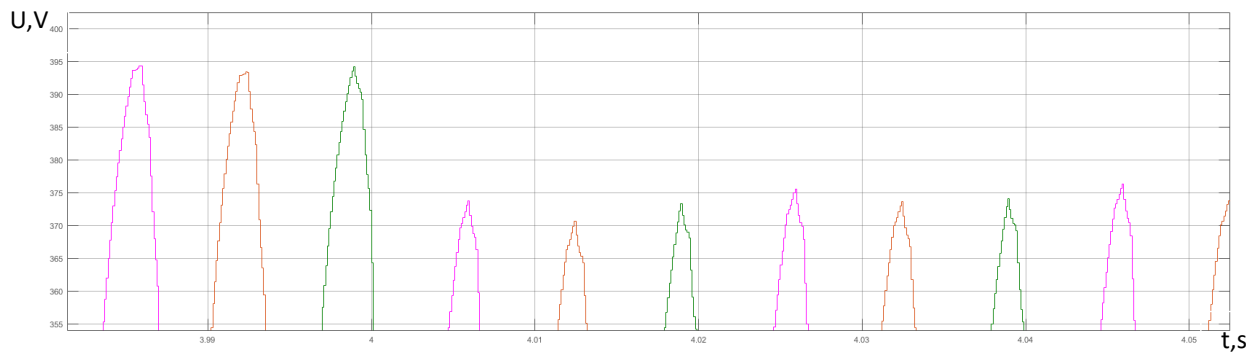
t,s



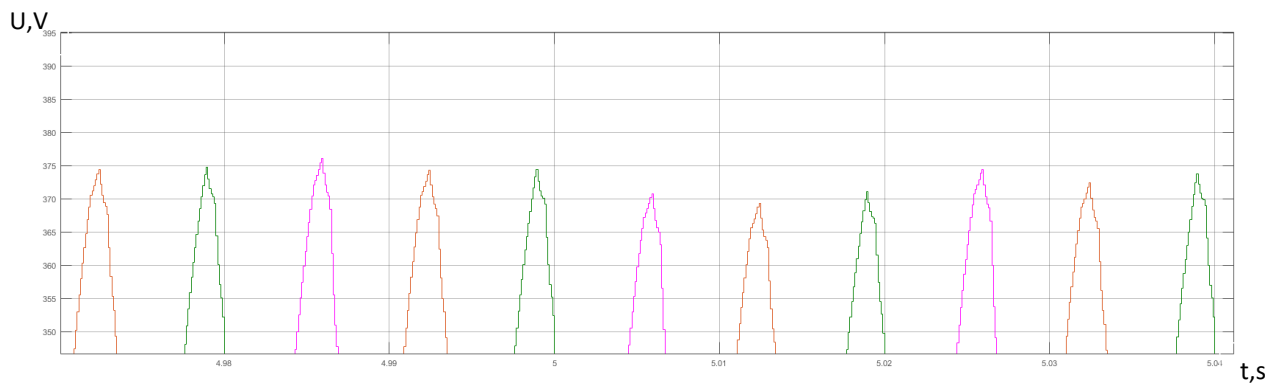
Priedas Nr. 2. Modeliavimas su nikelio metalo hidridų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą



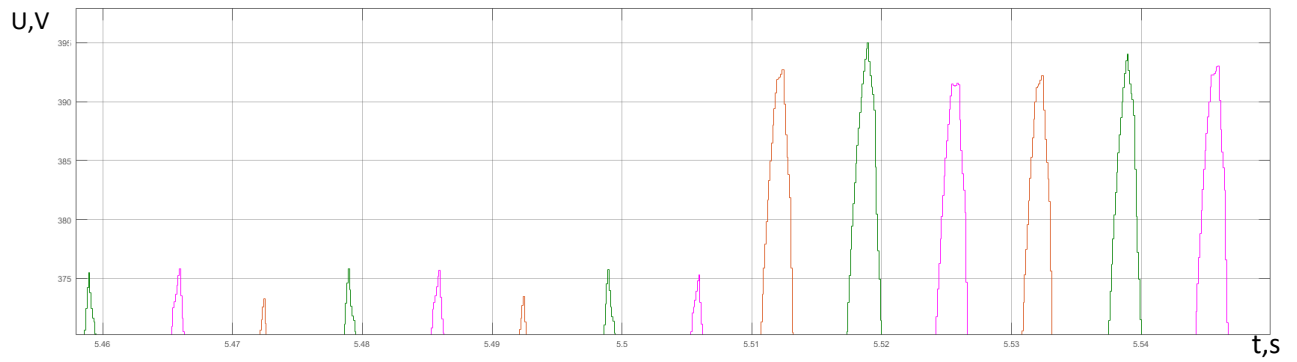
Įtampos pokytis apkrovos pusėje padidėjus apkrovos galiai



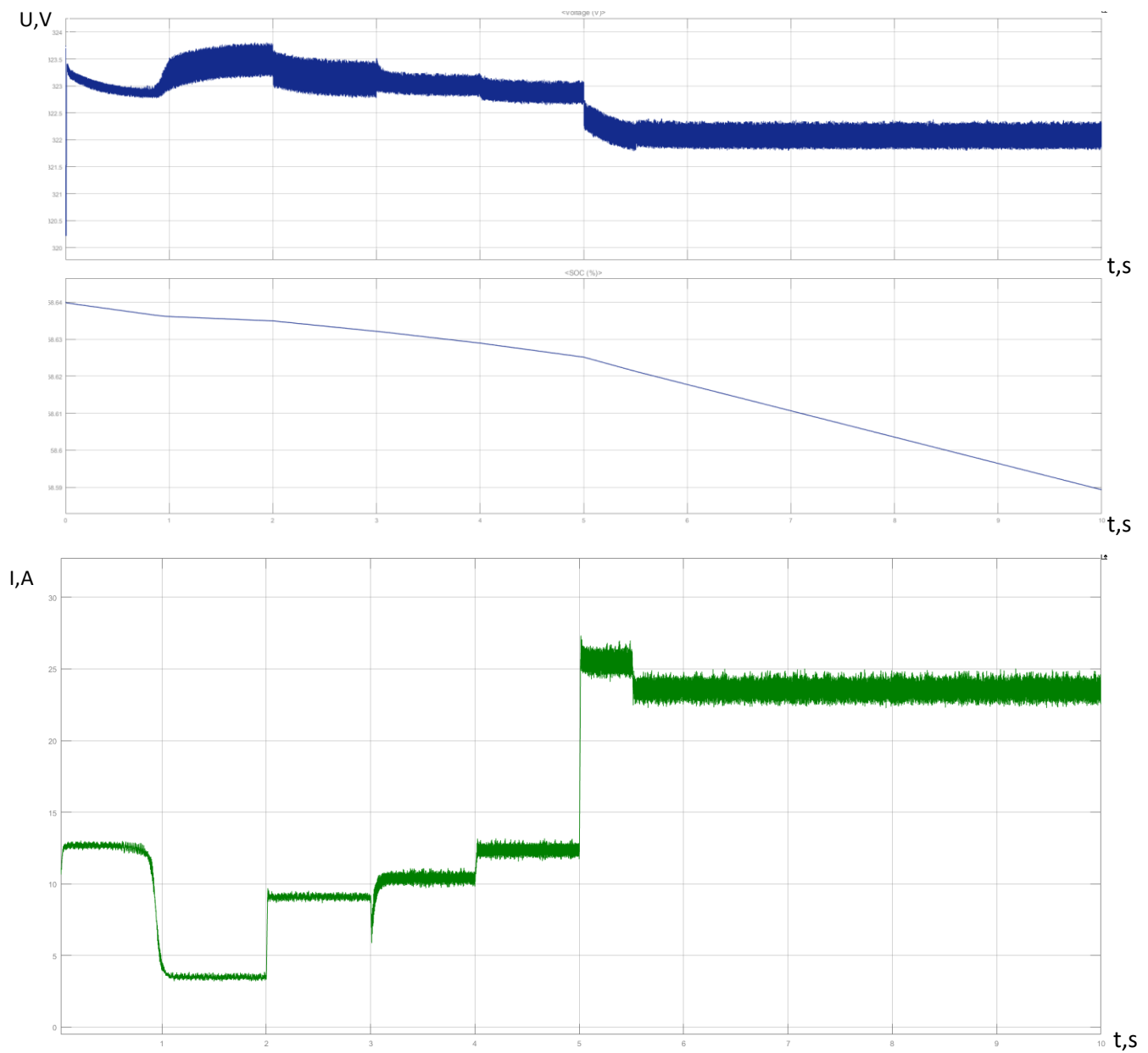
Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus SE



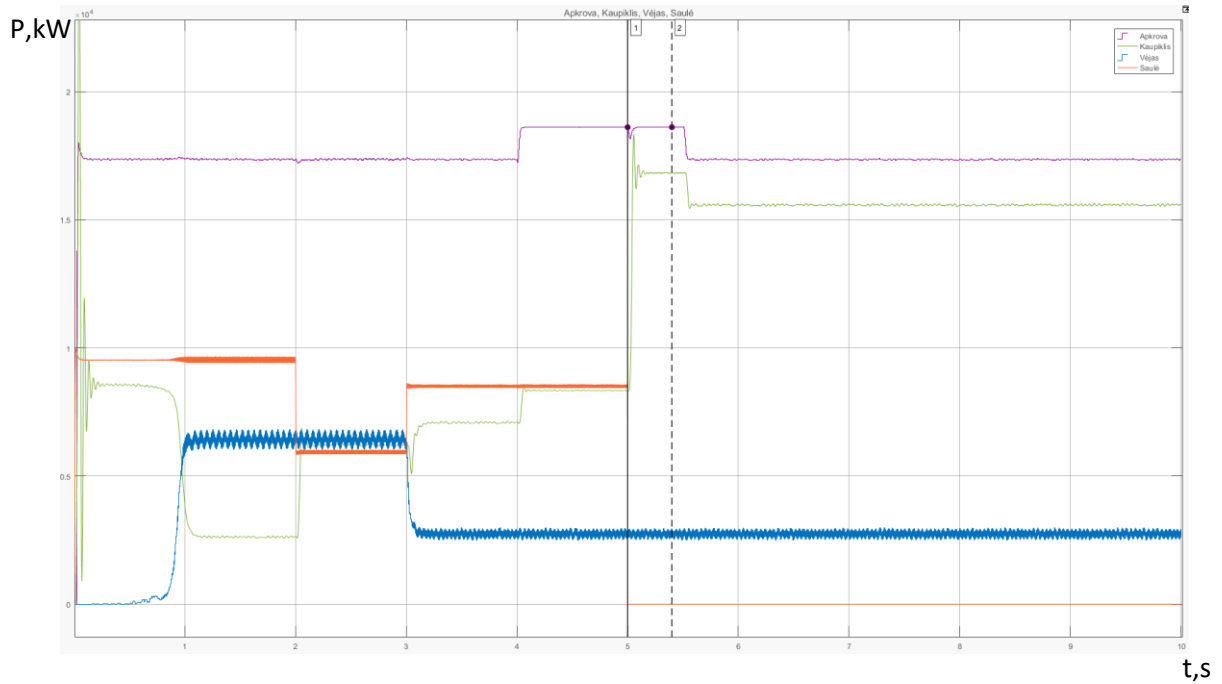
Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus daliai apkrovos



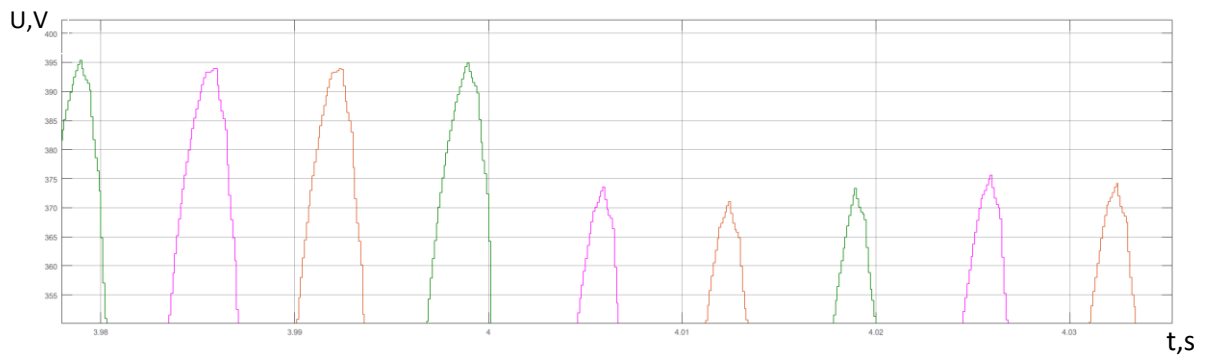
Energijos kaupiklio SOC įtampos ir srovės kitimas modeliavimo metu



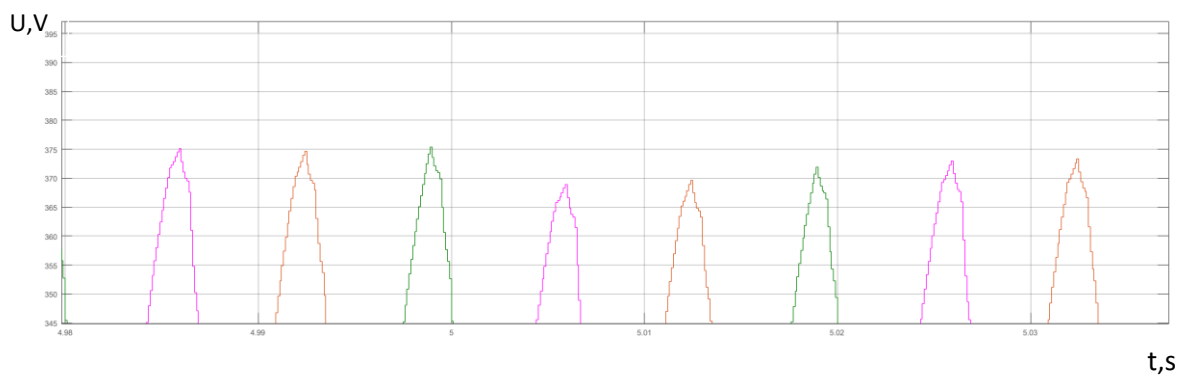
Priedas Nr. 3. Modeliavimas su nikelio metalo hidridų akumuliatoriumi pagal 2-ąją sąlygą



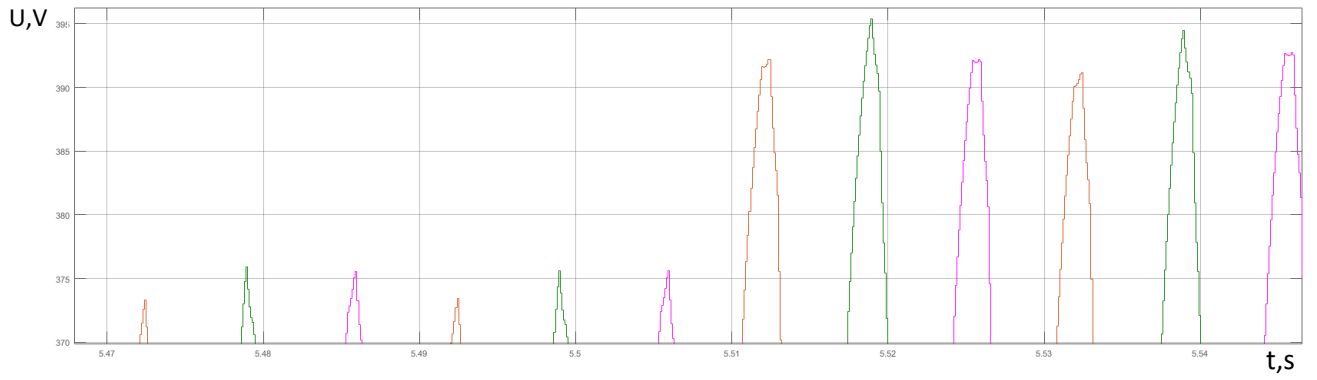
Įtampos pokytis apkrovos pusėje padidėjus apkrovos galiai



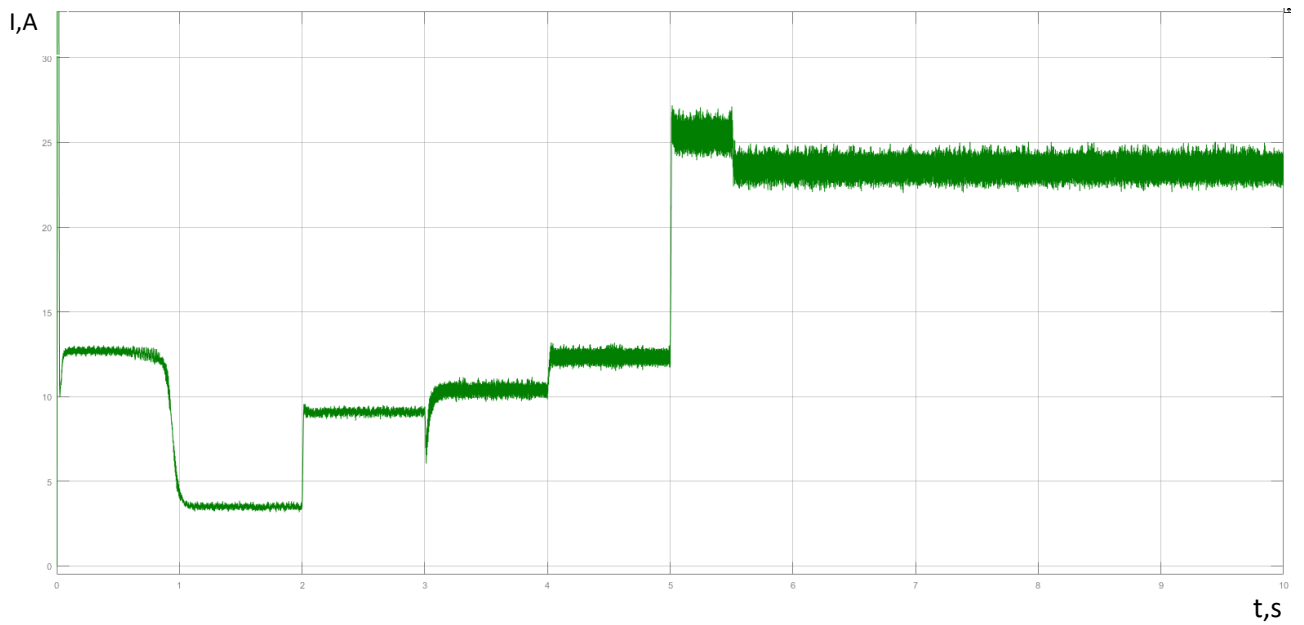
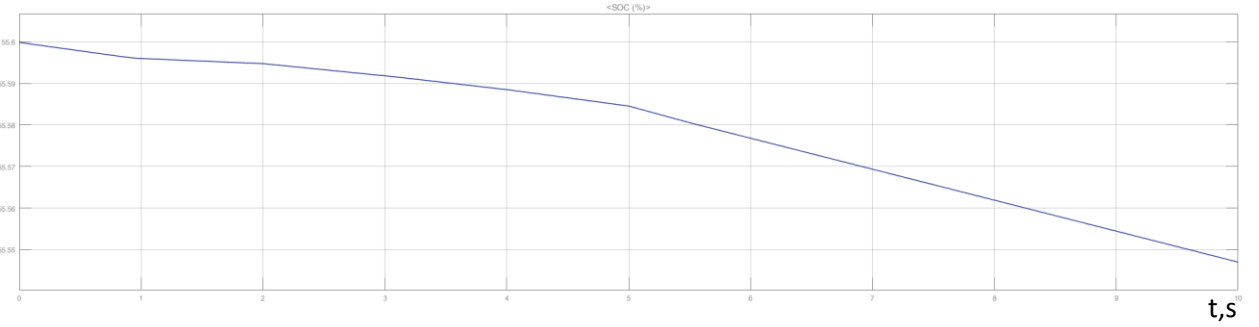
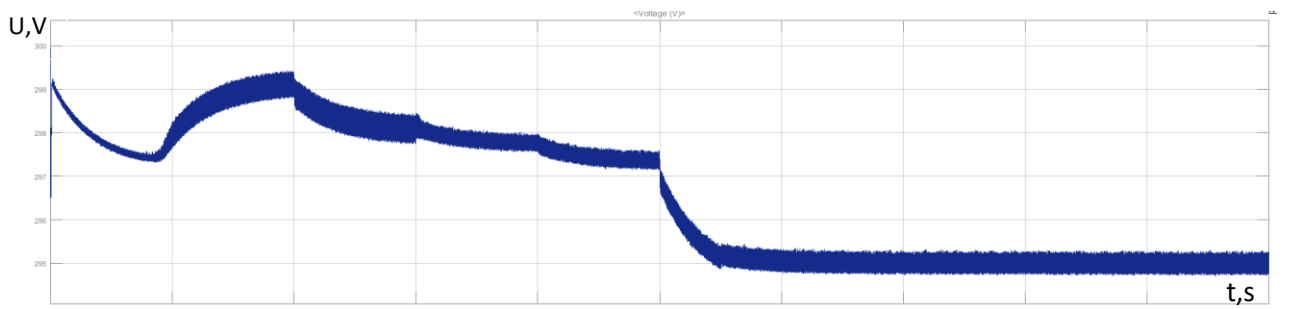
Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus SE



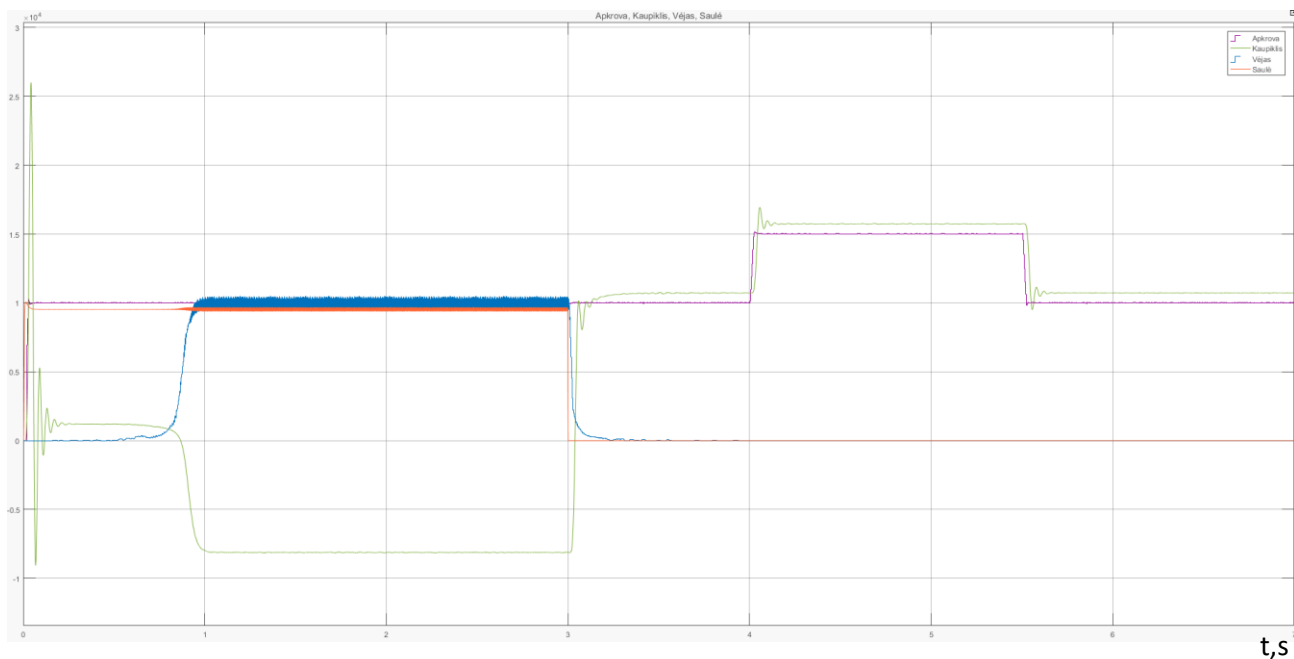
Įtampos pokytis apkrovos pusėje atsijungus daliai apkrovos



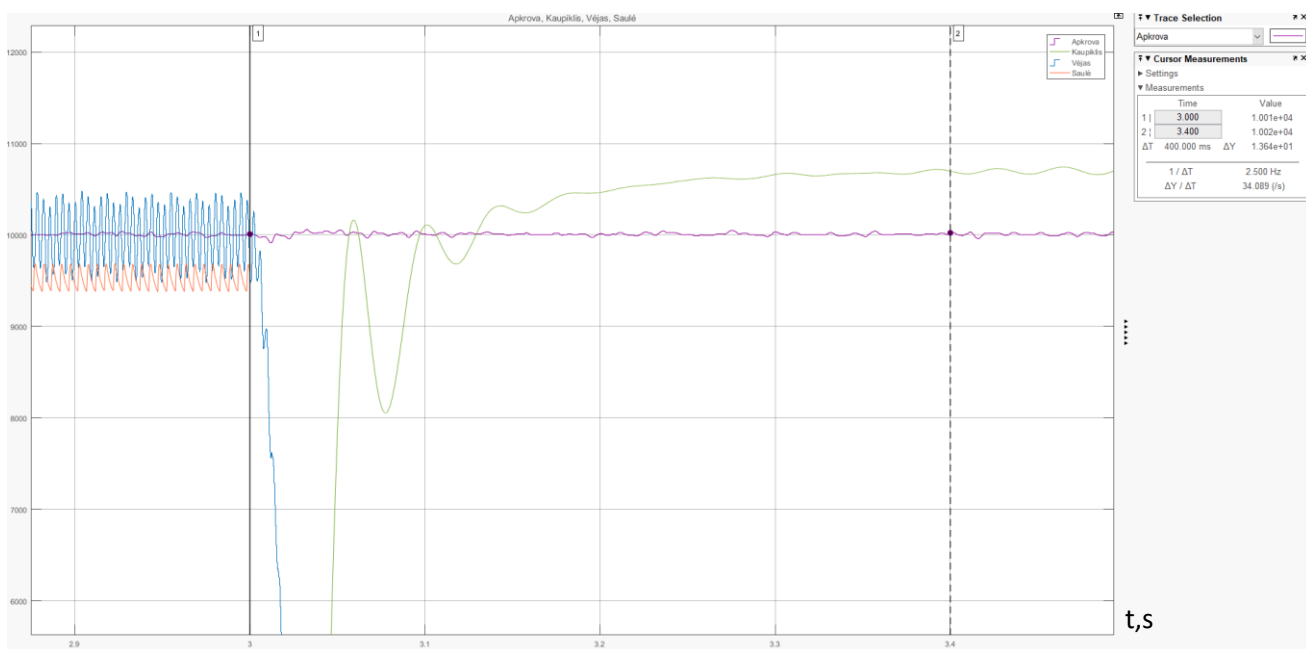
Energijos kaupiklio SOC įtampos ir srovės kitimas modeliavimo metu



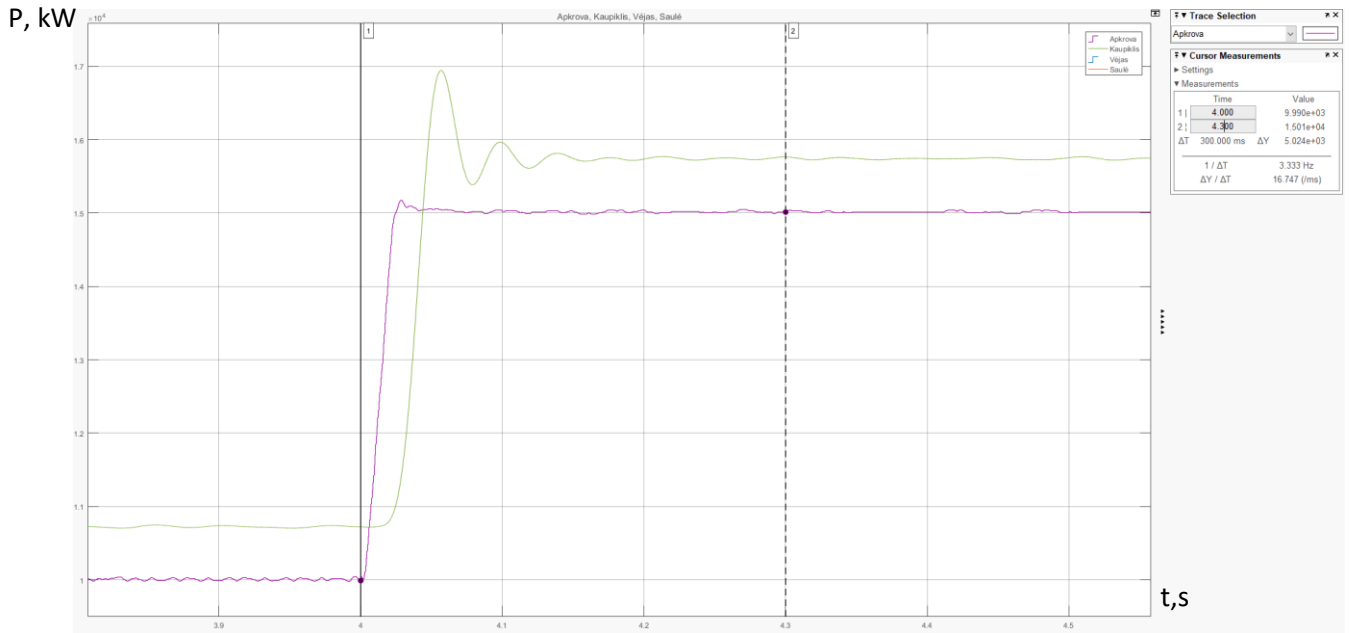
Priedas Nr. 4. Modeliavimas su ličio jonų akumuliatoriumi pagal 3-ąją sąlygą



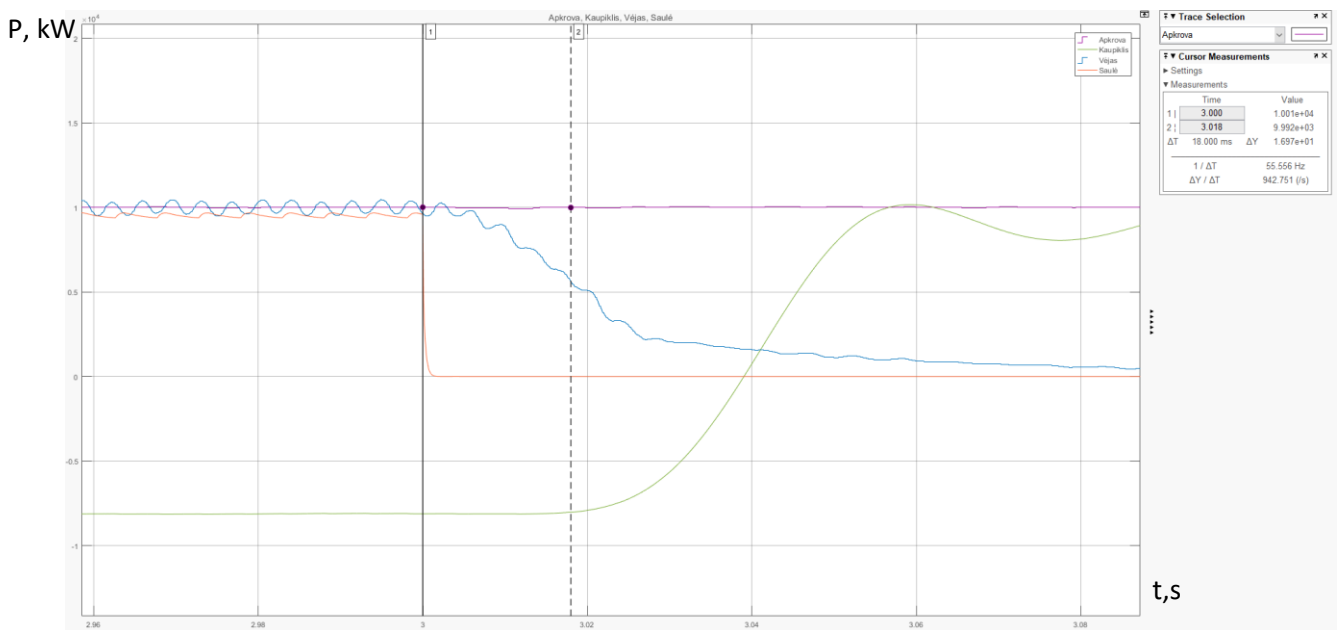
Laikas, iki energijos kaupiklio nusistovėjimo įvykus šaltinių atjungimui



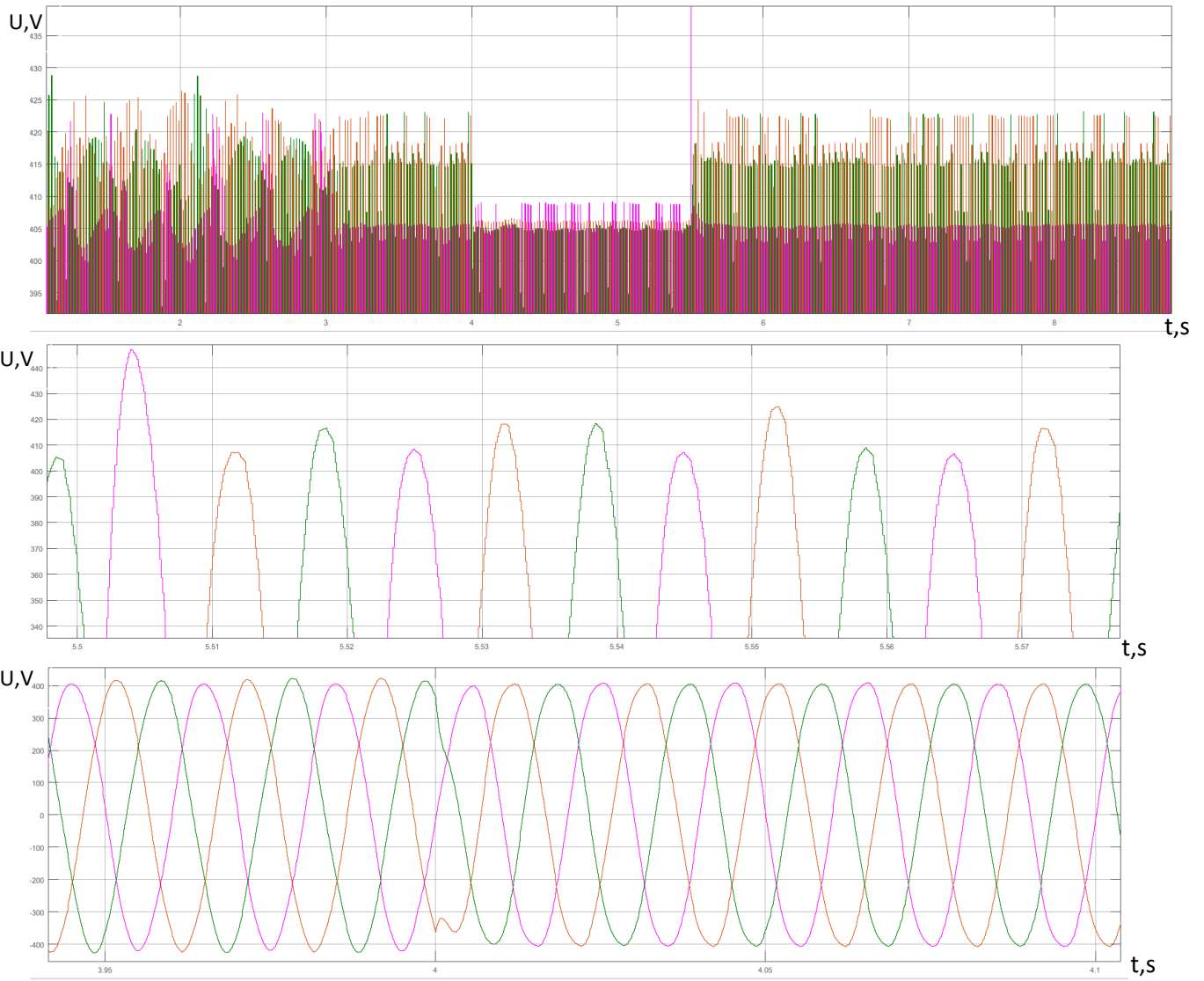
Laikas, iki EK stabilaus veikimo padidinus apkrovos galią



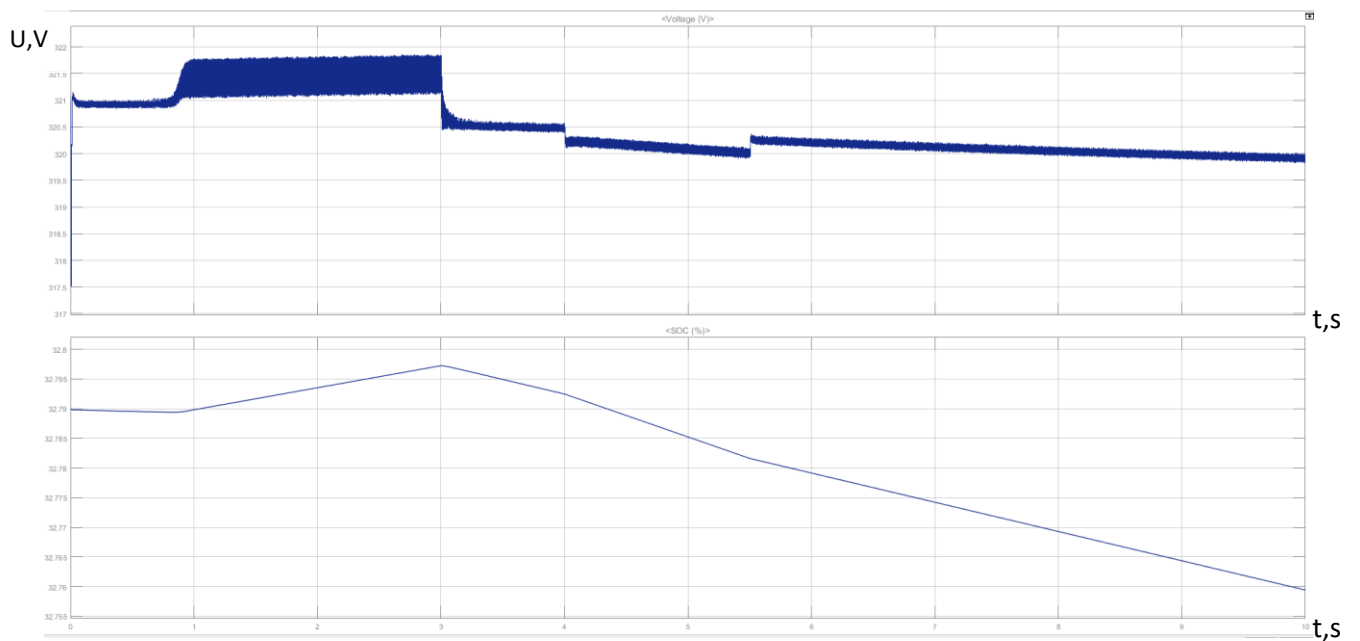
Laikas, iki EK suveikimo



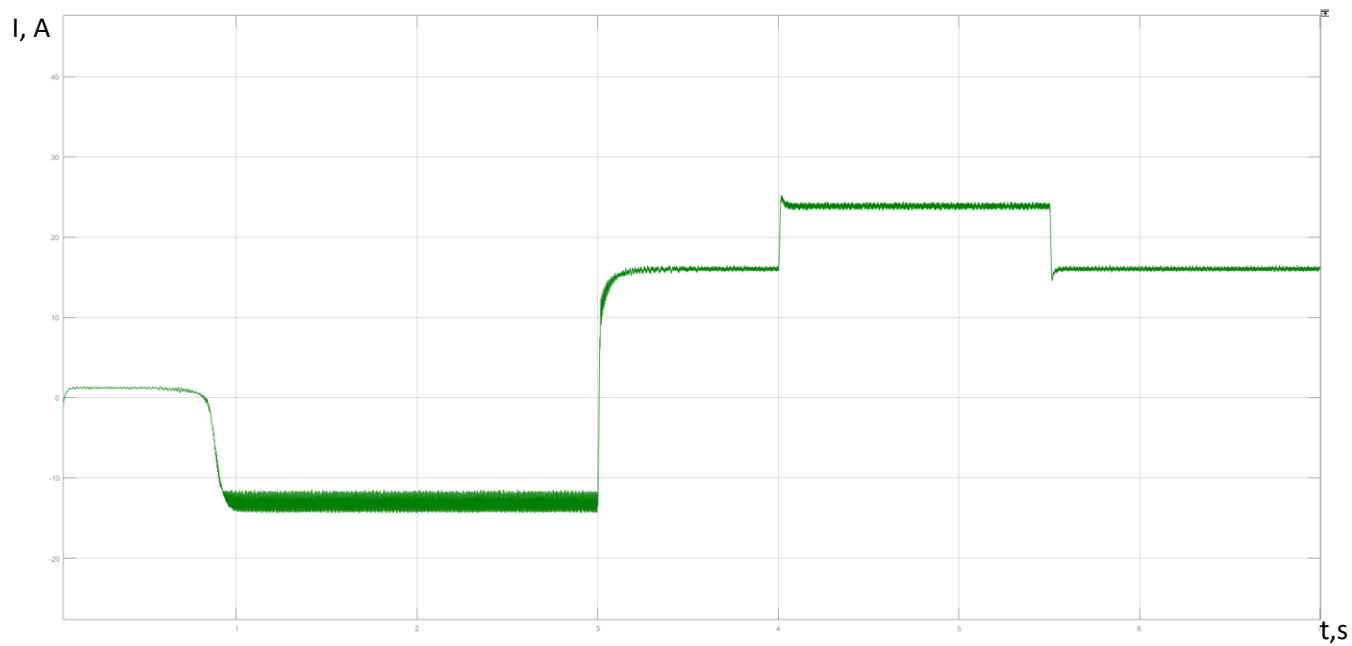
Apkrovos darbo įtampa



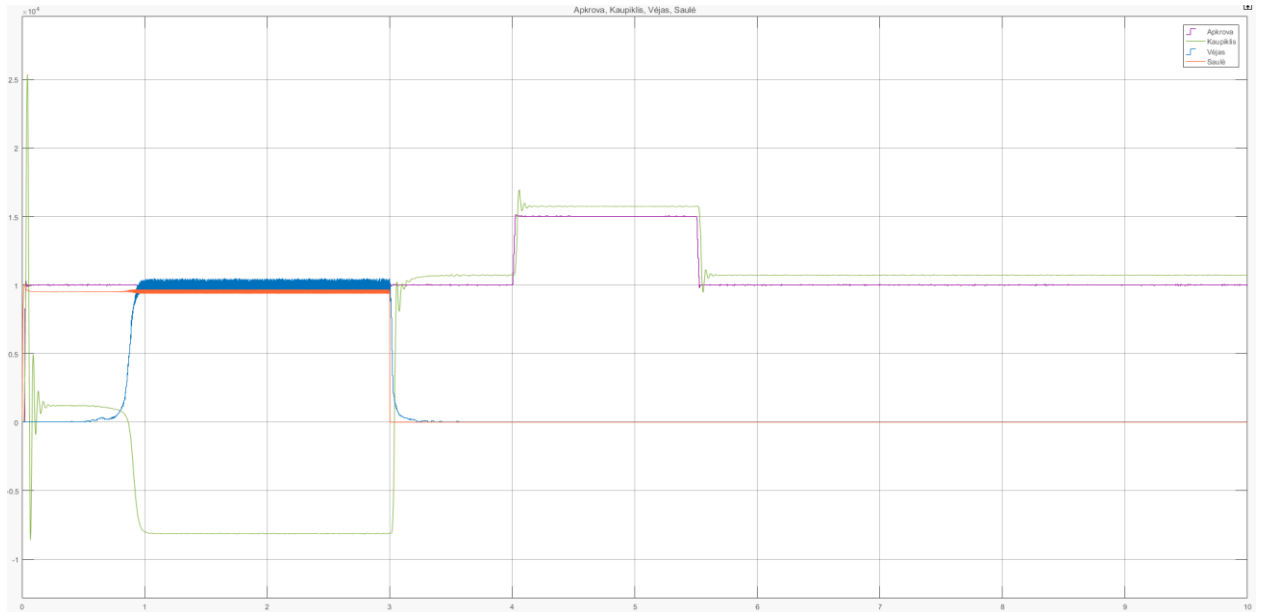
Energijos kaupiklio SOC ir įtampa



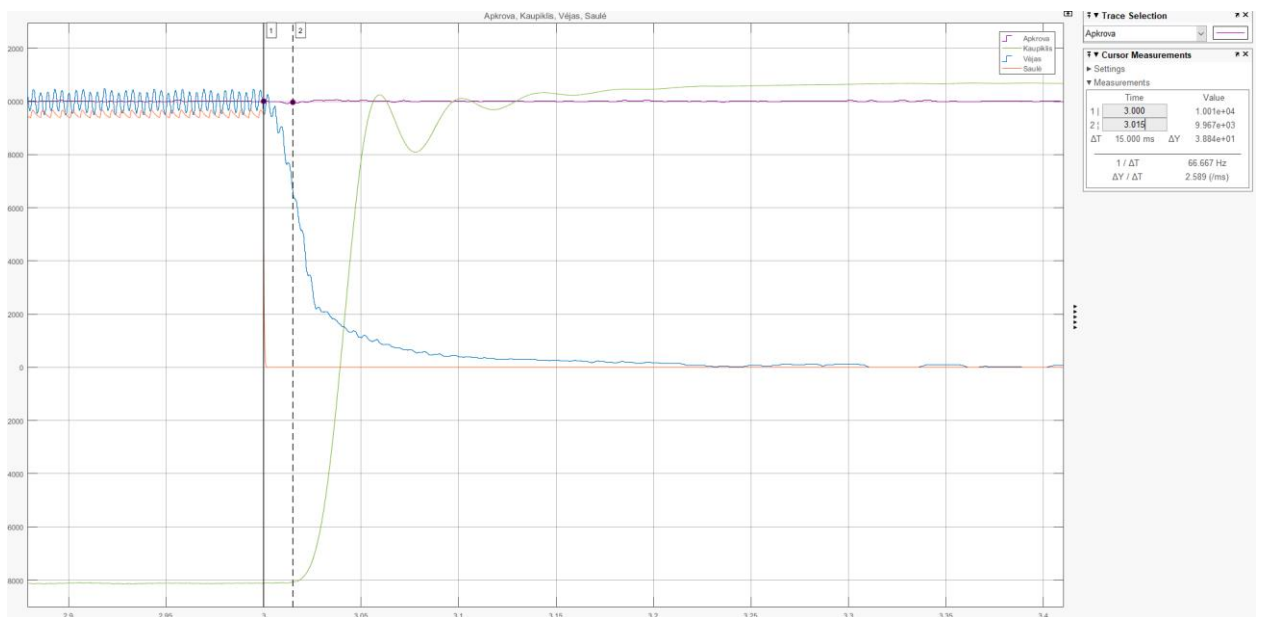
Energijos kaupiklio srovė



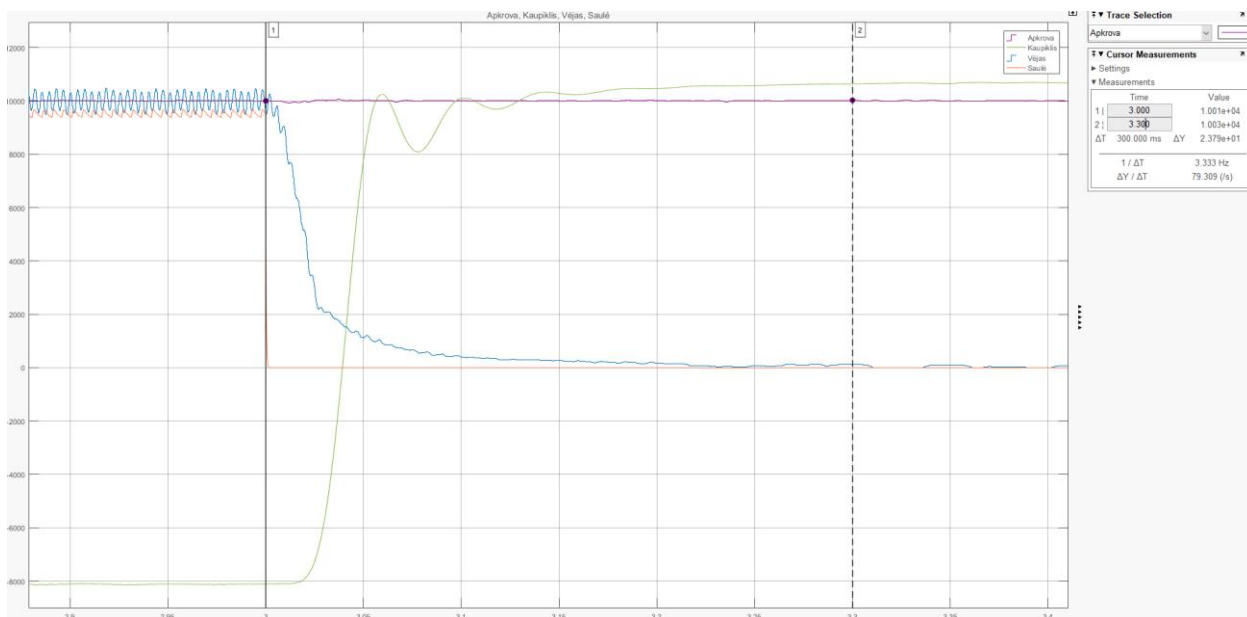
Priedas Nr. 5. Modeliavimas su švino rūgštiniu akumuliatoriumi pagal 3-ąją sąlygą



EK suveikimo laikas



laikas iki EK stabilaus veikimo



Energijos kaupiklio SOC ir įtampos charakteristika

