



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Justinas Šimanskas

**PASTOVIOS GALIOS VĖJO ELEKTRINĖS SU
AKUMULIATORINIŲ KAUPIKLIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Vytautas Sučila

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**PASTOVIOS GALIOS VĖJO ELEKTRINĖS SU
AKUMULIATORINIŲ KAUPIKLIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

Lekt. dr. Vytautas Sučila

Recenzentas

Projektą atliko

Justinas Šimanskas

KAUNAS, 2015

Šimanskas, J. Pastovios galios vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Vytautas Sučila; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 47 psl.

SANTRAUKA

Šiame darbe aprašomas pastovios galios vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu tyrimas. Atliekama vėjo elektrinės bei akumuliatorinio kaupiklio galios laikinių charakteristikų įvairiais laiko intervalais analizė, parenkamas tinkamiausias laiko intervalas siekiant akumuliatorinio kaupiklio pagalba kompensuoti vėjo elektrinės generuojamos galios svyravimus.

Apžvelgiamos elektros energijos kaupiklių technologijos bei taikymo sritys. Parenkamas tinkamas elektros energijos kaupiklis tiriamajai 250kW galios vėjo elektrinei. Atliekama analizė ir apskaičiuojama optimali akumuliatorinio kaupiklio talpa. Pateikiamos kaupiklio įkrovimo bei išsikrovimo laikinės charakteristikos. Jos palyginamos dviem skirtingais atvejais: kai kaupiklio įsikrovimo ir išsikrovimo valdymui nenaudojamas joks valdiklis; kai kaupiklio įsikrovimo ir išsikrovimo procesas reguliuojamas naudojant pramonėje plačiai paplitusį PID valdiklį. Taip pat sukuriamas kaupiklio įkrovimo bei išsikrovimo algoritmas.

Aprašomas vėjo elektrinės generuojamos galios netolimos prognozės algoritmas, pagal kurį reguliuojama vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu išeiga.

Sukuriamas vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu valdymo modelis, sumažinantis galios švytavimus.

Reikšminiai žodžiai: vėjo elektrinė, akumuliatorinis kaupiklis, srautinė baterija, galios švytavimai.

Šimanskas, J. Research on Wind Power Generator with Battery Energy Storage.
Final project of master / supervisor lect. dr. Vytautas Sučila; Kaunas University of Technology,
Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Systems.
Kaunas, 2015. 47 p.

SUMMARY

The purpose of this research is to describe and investigate wind power generator with energy storage system. The analysis of generated power dependence on different time intervals is carried out. The most suitable interval of time is chosen in order to reduce power fluctuations generated by wind generator. Energy storage system is used for it.

An overview of the technology used in the electrical energy storage devices is analysed its application areas are considered. The most suitable electrical energy storage is selected to investigative 250kW wind power plant.

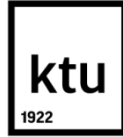
Calculations of capacity of the battery for investigative wind power plant are also described. The charge / discharge time dependent characteristics are compared in two different ways:

1. Battery's charge / discharge time dependent characteristics when additional controller is not used;
2. Battery's charge / discharge time dependent characteristics using PID controller.

An algorithm of battery's charge / discharge rate is created. An algorithm which controls the output of wind power plant using recent forecast is also submitted.

The model of 250kW wind power plant using energy storage with intelligent controller is created in order to reduce the generated power fluctuations.

Keywords : wind power, energy storage, flow batteries, power fluctuations.



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pastovios galios vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu tyrimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Justino Šimansko**, baigiamasis projektas tema „Pastovios galios vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu tyrimas.“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

TURINYS

ĮVADAS	7
DARBO TIKSLAS	8
1.APŽVALGINĖ DALIS	9
1.1.Energijos kaupiklių naudojamų su vėjo elektrinėmis svarba	9
1.2.Elektros energijos kaupimo technologijos, jų funkcijos ir taikymo sritys	10
1.3.Baterijos.....	12
1.4.Srautinės baterijos	13
1.5.Srautinės baterijos veikimo principas.....	13
1.6.Srautinės baterijos charakteristikos	16
1.7.Energijos kaupimo technologijų palyginimas	17
1.8.Srautinės baterijos atsako greitis	20
1.9.PID valdikliai.....	21
2.METODINĖ DALIS	23
2.1.Turimų duomenų analizė.....	23
2.2. Akumuliatorinio kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo algoritmas	29
2.3. Srautinės baterijos talpos skaičiavimas	33
2.4. Vėjo elektrinės galios aproksimacija realiu laiku.....	34
2.5.Vėjo elektrinės su srautine baterija schema.....	36
2.6 Ekonominis palyginimas	37
3.TYRIMO REZULTATŲ DALIS	38
IŠVADOS.....	41
LITERATŪRA	42
1 PRIEDAS. PAGRINDINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI	44

IVADAS

Atsinaujinančioji energetika šiais laikais užima vis didesnę dalį elektros gamyboje. Šios energetikos rūšies sparčią plėtrą lemia tai, jog įprastinės elektrinės naudoja pirminius energijos šaltinius (naftą, akmens anglis, gamtines dujas ir kt.), turinčius baigtinius resursus, tuo tarpu atsinaujinantieji energijos išteklių yra nesibaigiantys. Svarbu yra tai, jog skirtingai nuo įprastinių elektrinių, atsinaujinančiuosius energijos šaltinius naudojančios elektrinės yra ekologiškos ir nesukelia šiltnamio efekto. „Žaliajai“ energetikai taip pat įtakos turi ir didėjantys visuomenės elektros poreikiai.

Viena iš atsinaujinančiosios energijos rūšių – vėjo energija. Šią energijos rūšį elektros gamybai naudojančios elektrinės aptariamos darbe. Svarbus aspektas yra tas, jog vėjo elektrinės gamina elektros energiją priklausomai nuo pirminio šaltinio – vėjo, jų galios charakteristikos yra netolygios, todėl kyla sunkumų norint prijungti jas prie bendros elektros energetikos sistemos. Dėl šios priežasties darbe aptariama pastovios galios vėjo elektrinė su akumuliatoriniu kaupikliu.

DARBO TIKSLAS

Darbo tikslas – pritaikyti pastovios galios vėjo elektrinę su akumuliatoriniu kaupikliu naudojimui Lietuvos elektros energetikos sistemoje.

Uždaviniai:

- Atlikti akumuliatorinių kaupiklių analizę;
- Ištirti elektrinės galios laikinę charakteristiką;
- Parinkti tinkamą akumuliatorinį kaupiklį tiriamajai vėjo elektrinei;
- Sukurti vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu valdymo modelį, sumažinantį galios švytavimus;
- Atlikti vėjo elektrinės ir akumuliatorinio kaupiklio ekonominį palyginimą.

1.APŽVALGINĖ DALIS

Spartus vėjo elektrinių technologijų vystymasis lėmė jog daugelyje šalių šio tipo elektrinių generuojama galia siekia šimtus megavatų ir sparčiai auga. Šiuolaikiškos elektrinės dažnai jungiamos prie bendrojo elektros energetikos tinklo. Dėl šios priežasties vėjo elektrinių generuojamos galios skvarbos lygis tinkluose esti didelis, pavyzdžiui, vidutinis lygis siekia 20% - 30% , o piko metu gali siekti iki 100% bendros generuojamos galios vertės. Įžvelgiama tendencija, jog lėtėja elektrinių, gaminančių elektros energiją įprastiniais būdais bei naudojančių iškastinį kurą, plėtra. Akivaizdu, jog norint sklandžiai integruoti vėjo elektrines į bendrąją elektros energetikos tinklą, reikia įveikti iškilusius sunkumus. Dėl to problemos, susijusios su sistemos veikimu ir valdymu, stabilumu ir galios kokybe, turi būti išspręstos.[15]

1.1.Energijos kaupiklių naudojamų su vėjo elektrinėmis svarba

Vėjo energija turi daug pranašumų, tačiau sparti vėjo elektrinių elektros energijos gamybos plėtra gali sukelti techninių sunkumų ir iššūkių, tokių kaip prijungimo prie bendrojo elektros energetikos tinklo, tiekiamos elektros energijos kokybės užtikrinimo, patikimumo, apsaugos, valdymo keblumus. Tokios nepastovios ir sunkiai prognozuojamos vėjo energijos tiekimas į elektros energetikos sistemą, o ypač į silpnąją jos vietą, gali sukelti nemažai problemų. Pagrindiniai sunkumai, susiję su vėjo elektrine bei energijos kaupimu yra tokie:

1. Nepastovumas. Galimybė keisti generuojančio įrenginio išėigą keičiantis apkrovai yra ekonominio paskirstymo pagrindas. Siekiant to, kad vėjo elektrinė būtų paskirstoma kaip ir įprastiniai elektros generavimo šaltiniai, jos išėiga turi būti sureguliuota norimu paskirstomumo lygiu.
2. Staigūs generuojamos galios pokyčiai. Dėl to, kad vėjo elektrinės generuojama galia priklauso nuo vėjo stiprumo, vėjo elektrinės generuojamos galios laikinė charakteristika yra šuoliška, nepastovi. Šuoliai turi būti sumažinti siekiant integruoti didelę vėjo elektrinės generuojamą galią į bendrąją elektros energetikos tinklą. Tokiu būdu sumažinamas reikalingas galios rezervas bei poveikis benrai sistemai.
3. Ribota vėjo elektrinės išėiga. Didelės galios vėjo elektrinės gali sukelti linijų, kuriomis perduodama vėjo elektrinių galia, perkrovą (pavyzdžiui tada, kai vėjo elektrinių parkas prijungiamas prie silpnosios elektros energetikos tinkle grandies). Siekiant to išvengti, vėjo elektrinės išėiga turi būti sumažinta, kad linijos nebūtų perkrautos.[6, 7, 8]

1.2. Elektros energijos kaupimo technologijos, jų funkcijos ir taikymo sritys

Elektros energijos kaupimas gali būti vykdomas efektyviai. Pirmiausia, elektros energija turi būti paversta į kitą kaupiamos energijos formą ir esant reikiamybei konvertuojama atgal. Yra nemažai galimų energijos kaupimo technologijų, kai kaupiama energija yra praktiškai visose energijos formose: mechaninėje, cheminėje ir terminėje. Apžvalgoje aptariamos įvairios energijos kaupiklių technologijos, naudojamos priklausomai nuo skirtingų energijos kaupimo poreikių ir paskirties.[7]

Elektros energijos kaupiklių technologijas galima suskirstyti į tris kategorijas.

Elektros kokybės užtikrinimo. Tokių kaupiklių paskirtis – užtikrinti elektros energijos kokybės pastovumą sekundės ar mažesniame laikotarpyje.

Trumpalaikės perjungimo energijos. Šie kaupikliai vartotojus aprūpina energija per laikotarpius, trunkančius nuo sekundžių iki minučių. Jų paskirtis – užtikrinti nepertraukiamą elektros tiekimą esant elektros tiekimo perjungimui nuo vieno šaltinio prie kito.

Energijos valdymo. Šių kaupiklių paskirtis - kaupti elektros energiją, kad elektros energijos gamyba būtų nepriklausoma nuo jos vartojimo. Dažniausiai kaupikliai įkraunami, kai energijos kaina yra žema, o kaupiklio energija naudojama tuomet, kai to reikia. Vartotojas, naudojantis tokius kaupiklius, keleto valandų laikotarpyje gali nepriklausyti nuo bendrosios elektros energetikos sistemos. Skirtingų technologijų energijos kaupiklių privalumai ir trūkumai pateikti 1.1 lentelėje, kurioje technologijų naudojimo tinkamumas pažymėtas taip:[10]

be žymės – naudoti neįmanoma arba ekonomiškai nenaudinga,

■ – naudoti galima ir tikslinga,

■□ – šiam tikslui naudoti galima,

□ – naudoti įmanoma, bet praktiškai ar ekonomiškai netikslinga.

1.1. lentelė. Elektros energijos kaupiklių privalumų ir trūkumų lentelė[10]

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

Pastaruoju metu kuriami ir tobulinami įvairūs nauji elektros energijos kaupikliai, kurie šiuo metu yra komercializuojami arba greitai bus komercializuoti. Šios elektros energijos

kaupimo ir regeneravimo technologijos skiriasi savo ekonominiu ir techniniu efektyvumu. Šiuo metu pagrindinėmis elektros energijos kaupimo technologijomis yra laikomos šios:[10]

- hidroakumuliacinės,
- suspausto oro,
- įvairių tipų baterijų (akumuliatorių),
- vandenilio,
- superkondensatorių,
- magnetinės energijos superlaidininkuose,
- regeneracinės elektrocheminės,
- smagratinės.

Apžvelgėme įvairias elektros energijos kaupiklių technologijas bei taikymo būdus. Kadangi šio darbo tikslas yra pritaikyti pastovios galios vėjo elektrinę su akumuliatoriniu kaupikliu elektros energetikos sistemai, kitame skyriuje plačiau aptarsime akumuliatorinius kaupiklius.

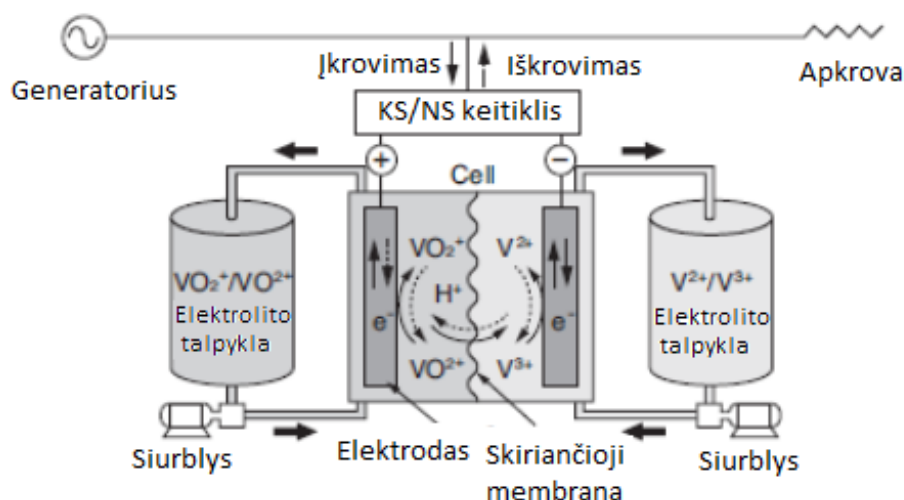
1.3.Baterijos

Baterijos yra sudarytos iš atskirų celių, kur cheminė energija yra verčiama į elektros energiją, ir atvirkščiai. Norima baterijos įtampa, o kartu ir srovės vertė yra gaunama elektriškai, nuosekliai ar lygiagrečiai, jungiant celes. Bateriją apibūdinantys pagrindiniai parametrai yra galia ir talpa. Daugumai baterijų tipų galia ir talpa nėra viena nuo kitos nepriklausomos. Jų tarpusavio priklausomybę lemia skirtingos baterijų technologijos. Kitos taip pat svarbios baterijų savybės yra efektyvumas, ilgaamžiškumas (dažniausiai išreiškiamas ciklų skaičiumi), veikimo temperatūra, iškrovos gylis (paprastai baterijos nėra pilnai iškraunamos ir iškrovos gylis nusako iškrovimo laipsnį), savaiminė iškrova (kai kurios baterijos negali išlaikyti įkrovimo lygio, palaipsniui išsikrauna, taigi šis parametras nusako savaiminio išsikrovimo lygį), bei energijos tankį. [5]

Iš baterijų sudaryti pakankamai didelės įkrovos ir galios kaupikliai energetikoje naudojami galios kokybei gerinti, atsinaujinančiosios energijos elektrinėms rezervuoti, apkrovai išlyginti, energijos perdavimo stabilumui palaikyti, pikinei energijai generuoti. Jie gali būti naudojami įvairiuose elektros energijos tiekimo tinklo lygmenyse.[5]

1.4.Srautinės baterijos

Žodis redoksas(*angl. Redox*) – tai redukcijos ir oksidacijos reiškinių trumpinys. Redokso baterija - tai elektrocheminė sistema, kurios veikimas pagrįstas aktyviųjų medžiagų oksidacija ir redukcija nuo neaktyvių elektrodų paviršiaus(patys elektrodai nesikeičia). Srautinių baterijų elektrolitai, turintys aktyviųjų medžiagų, laikomi išorinėse talpyklose. Baterijų iškrovimas ir įkrovimas vykdomas pumpuojant elektrolitus per celes naudojant siurblius.[2]



1.1 pav. Srautinės baterijos konfigūracija bei veikimo principas[2]

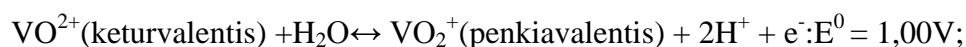
1.5.Srautinės baterijos veikimo principas

Srautinės baterijos veikimo principas pateiktas 1.1 paveiksle. Baterija sudaryta iš celės, kurioje vyksta redukcijos ir oksidacijos reakcijos, teigiamojo ir neigiamojo elektrolitų talpyklų, kuriose laikomas tirpalas su aktyviosiomis medžiagomis, siurblių bei vamzdžių, kuriais elektrolitas iš talpyklų pasiekia celę. Baterija prie sistemos jungiama per kintamosios / nuolatinės srovės keitiklį.[2]

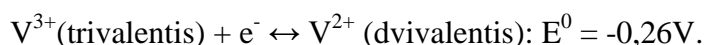
Keičiantys valentingumą metalo jonai taip pat gali būti naudojami srautinėse baterijose. Tačiau, atsižvelgus energijos tankį bei ekonominius rodiklius, geležies (Fe^{2+}/Fe^{3+}) – chromo (Cr^{3+}/Cr^{2+}) sistema bei vanadžio ($V^{2+}/V^{3+}-VO^{2+}/VO^{2+}$) sistemos yra tinkamiausios redokso sistemoms. V-V sistema yra ypatingai naudinga, kadangi naudoja to paties metalo jonus tiek teigiamam, tiek neigiamam elektrodams. Dėl šios priežasties baterijos įkrovos kiekis nemažėja net jei elektrolitai susimaišo per membraną. Jei baterijoje naudojami skirtingi metalų jonai, pvz. geležies ir chromo, baterijos įkrova mažėja esant elektrolitų susimaišymui. Šios

priežastys lėmė, jog vanadžio – vanadžio srautinės baterijos yra plačiai paplitusios. Vanadžio srautinių baterijų elektrodų reakcijų formulės yra tokios:

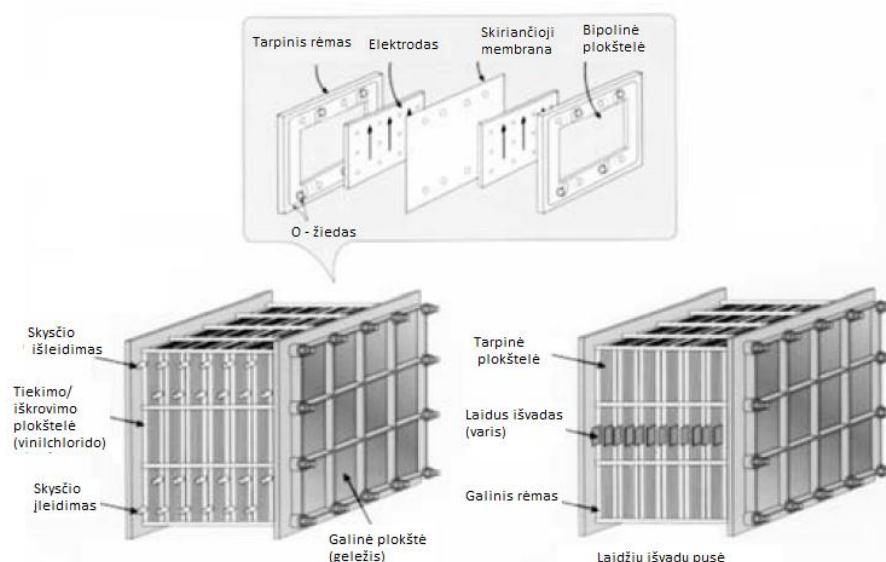
Teigiamo elektrodo



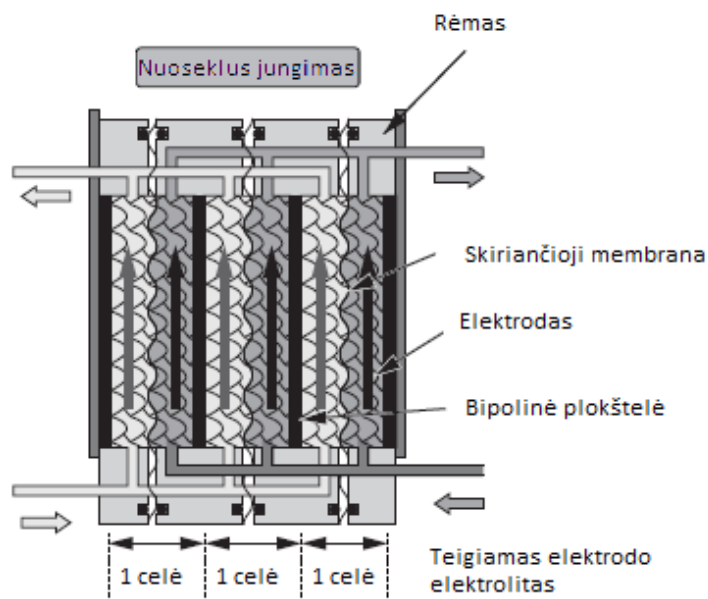
Neigiamo elektrodo



Šiose formulėse reakcija, vykstanti iš kairės į dešinę nurodo reakciją įkrovimo metu. Celės teigiamame elektrode keturvalenčiai vanadžio jonai (VO^{2+}) yra oksiduojami penkiavalenčiais vanadžio jonais (VO_2^+). Tuo tarpu neigiamame electrode trivalenčiai vanadžio jonai (V^{3+}) yra redukuojami į divalenčius vanadžio jonus (V^{2+}). Krovimo metu vandenilio jonai (H^+), susidarę ties teigiamu elektrodu, keliauja pro membraną ir tokiu būdu išlaiko elektros neutralumą elektrolite. Į bateriją tiekama elektros energija yra kaupiama dėl skirtingo vanadžio jonų valentingumo virsmų. Vykstant iškrovimui, sukaupta energija atiduodama vykstant atvirkštinei reakcijai. Srautinės baterijos elektrovaros jėga priklauso nuo naudojamos redokso sistemos. Naudojant vanadžio redukcinę – oksidacinę sistemą, elektrovaros jėgos skaičiavimas yra toks kaip standartinio oksidacijos – redukcijos potencialo, taigi $E^0 = 1,26\text{V}$. Tačiau praktikoje, esant paruoštoms celėms ir elektrolitui, elektrovaros jėga būna apie 1,4V.[2]



1.2 pav. Tipinė celių išdėstymo schema[2]



1.3 pav. Srautinės baterijos pjūvio vaizdas[2]

Baterijos struktūra, susidedanti iš dviejų ar daugiau baterijos celių, vadinama celių steku (*angl. cell stack*). 1.2 ir 1.3 paveiksluose pateikiamos atitinkamai celių steko struktūra bei tos struktūros skerspjūvis. Vienos celės maksimali įtampos vertė yra 1,4V. Todėl, norint praktiškai išgauti norimą aukštą įtampą, celes reikia sujungti nuosekliai. Sujungimo metodas yra panašus kaip ir kuro celių. Jungiama naudojant bipolines plokšteles. Celės skirtos efektyvioms elektrolitų vanadžio jonų redukcijos – oksidacijos reakcijoms užtikrinti. Žvelgiant į celę kaip į elektros grandinės elementą, jos vidinės varžos vertė turi būti maža. Be to pageidaujama, jog celėje vykstant oksidacijai ir redukcijai nevyktų jokių pašalinių reakcijų. Celę sudaro šie komponentai: elektrodai, membrana, bipolinės plokštelės, bei rėminė konstrukcija. Celės struktūra pateikta 1.2 paveiksle. Kadangi kaip elektrolitas naudojamas rūgštinis tirpalas, todėl medžiagos, tiesiogiai sąveikaujančios su elektrolitu, turi būti atsparios rūgščiai.[2]

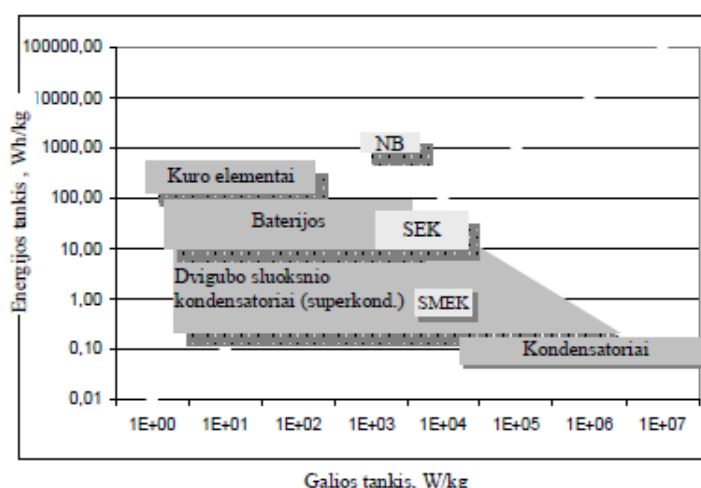
1.6.Srautinės baterijos charakteristikos

Srautinės baterijos gali būti pritaikytos įvairiais atvejais. Jų charakteristikos yra tokios:[2]

1. Baterijos reakcijos principas yra paprastas metalo jonų, esančių elektrolite, valentingumo keitimas. Dėl to šios baterijos pasižymi ilgaamžiškumu, t.y. turi didelį įkrovimo / iškrovimo ciklų skaičių.
2. Srautinės baterijos išeiga, priklausanti nuo celių skaičiaus bei jos talpa, priklausanti nuo elektrolitų talpyklų dydžio, yra tarpusavyje nepriklausomos. Taigi šio tipo baterijos gali būti naudojamos esant įvairiems poreikiams.
3. Srautinių baterijų priežiūra yra paprasta, kadangi į skirtingas celes tiekiamas tas pats elektrolitas, dėl to kiekvienos celės įkrovimo lygio stebėti nebūtina. Celių įkrovimo lygis paprastai matuojamas pastoviai matuojant elektrolito potencialą.
4. Srautinės baterijos teigiamas ir neigiamas elektrolitai laikomi atskirose talpose, dėl to šioms baterijoms nebūdingas savaiminis išsikrovimas jų sustabdžius ar dirbant buitinčiuoju režimu. Savaiminė iškrova vyksta tik celėse.
5. Srautinės baterijos geba kompensuoti nepastovias trumpalaikes fliktuacijas, atsirandančias, pavyzdžiui, elektrinėse, naudojančiose atsinaujinančiąją energiją. Baterijos pasižymi greitu, milisekundžių eilės momentiniu atsaku, be to, įkrovimo ir iškrovimo išeiga trumpam gali būti kelis kartus didesnė už numatytąją.
6. Srautinėse baterijose naudojami elektrolitai yra nekenksmingi aplinkai, nes normalus veikimo metu vyksta tik metalo jonų valentingumo kaita. Taip pat elektrolitai gali būti pakartotinai panaudoti.
7. Kadangi srautinės baterijos naudoja metalų jonus ištirpdytus elektrolite, jų tirpumas yra ribotas. Dėl to elektrolitų talpyklos yra pakankamai didelės, o energijos tankis yra sąlyginai mažesnis lyginant su kitais akumuliatoriniais kaupikliais.

1.7. Energijos kaupimo technologijų palyginimas

1.4 paveiksle yra palyginti kai kurių tipų energijos kaupiklių galios ir energijos tankiai. Energetikoje šiuo metu jau yra naudojamos ir geriausias perspektyvas ateityje turi hidroakumuliacinės elektrinės(HAE), suspausto oro energijos kaupyklos (SOEK), smagratinės energijos kaupyklos(SEK) ir superlaidininkų magnetinės energijos kaupyklos(SMEK). Baterijos (akumuliatoriai) ir superkondensatoriai jau naudojami transporte ir rezerviniuose maitinimo šaltiniuose, o netolimoje ateityje gali būti pradėti plačiai naudoti ir elektros energetikoje kaip paskirstyti energijos kaupikliai. Jų galia turėtų būti nedidelė (šimtai kW), bet jų skaičius – labai didelis. HAE ir SOEK atveju jų energijos kaupimo savybes sunku įvertinti tokiais rodikliais, kurių dimensijose yra kilogramai, todėl jos šiame paveikslėlyje neparodytos. 1.4 paveiksle NB pažymėtos naujausios baterijos, kuriamos naudojant nanotechnologijas, kurios, kaip manoma, bus komercializuotos netolimoje ateityje.[10]



1.4 pav. Įvairių tipų energijos kaupiklių galios ir energijos tankių palyginimas[10]

Vėjo elektrinės galiai balansuoti reikia turėti didelės galios ilgo iškrovos laiko (valandos) ir trumpo iškrovos laiko (sekundės) energijos kaupiklių. Tinkamiausiomis valandinėmis vėjo elektrinių parkų galios balansavimo ir rezervavimo priemonės gali būti hidroakumuliacinės elektrinės(HAE), suspausto oro energijos kaupyklos(SOEK) ir srautinės baterijos(SB). Tačiau kol kas nėra ištirta, ar Lietuvos teritorijoje gali būti tinkamų natūralių pakankamai sandarių ir erdvių požeminių ertmių, kuriose būtų galima įrengti suspausto oro energijos kaupyklas. Kitose šalyse šiam tikslui naudojamos senos šachtos ir požeminės ertmės, susidariusios išsiurbus naftą ar gamtines dujas, iškasus druską. Šios šachtos ir kitos požeminės ertmės prieš jas naudojant kruopščiai užsandarinamos, kad nebūtų suspaudžiamo oro nuotėkio.

Kaip trumpalaikės vėjo elektrinių parkų generuojamos elektrinės galios kokybės valdymo priemonės gali būti naudojamos superlaidininkų magnetinės energijos kaupikliai(SMEK), smagratiniai energijos kaupikliai(SEK), superkondensatoriai. Jų iškrovos laikai dažniausiai neviršija 1 s.[10]

Įvertinant ne tik masiško paskirstyto elektros energijos generavimo galimybes netolimoje ateityje, bet ir masiško elektros energijos paskirstyto kaupimo galimybes, tikėtina, jog pasaulyje taip pat bus naudojami nedidelės galios (dešimčių ir šimtų kilovatų) paskirstyti elektros energijos kaupikliai baterijų ir superkondensatorių pagrindu. Šie kaupikliai turėtų būti valdomi perdavimo elektros tinklo operatorių naudojant naujausias informacines ir komunikacines technologijas. Tolimesnėje perspektyvoje visoje Lietuvoje tokių energijos kaupyklų kiekis turėtų būti skaičiuojamas dešimtimis tūkstančių. Kaupyklos būtų išdėstytos visoje šalies teritorijoje ir prie vėjo elektrinių parkų. Jas eksploatuoti galėtų smulkiųjų ir vidutinių mažųjų elektros energijos kaupimo ir regeneravimo įmonių savininkai.[10]

1.2 lentelė. Elektros energijos kaupiklių pagrindinių parametų palyginimas[10]

Kaupiklio tipas	Tipinė galia	Tipinė energija	Tipinė iškrovos trukmė	Technologijos brandumas
Baterijos (švinorūgštinės, NiCd, NiMH, Li-jonų)	1kW – 500kW	1MWh – 100mWh	1h -8h	Brandžios, yra rinkoje
SEK	500kW – 1MW	100kWh – 100MWh	< 5min	Brandi, yra rinkoje
HAE	100MW – 4000MW	500MWh – 15GWh	4 – 12h	Brandi, naudojama >100 metų
Suspausto oro energijos kaupikliai (SOEK)	25MW – 3000MW	200MWh – 10GWh	1 – 20h	Sukurta, yra demonstraciniai objektai
NaS baterijos	1MW	1MWh	1h	Sukurta, yra rinkoje, yra demonstraciniai objektai
SMEK	10kW – 10MW	10kWh – 1MWh	1 – 30min	Sukurta, dar nėra rinkoje
Superkondensatoriai	<250kW	10kWh	< 1min	Sukurta, yra rinkoje
Srautinės baterijos	100kW – 10MW	1 – 100MWh	10h	Sukurta, demonstracinių projektų stadija
Vandenilio kaupikliai	10MW	Neribota	>5h	Kūrimo stadijoje

1.3 lent. Elektros energijos kaupiklių taikymo sritys, pagrindiniai parametrai ir naudojamos technologijos[10]

Taikymo sritys	Tipinė galia, tipinis iškrovos laikas	Naudojamos technologijos
Galios kokybės gerinimas	< 1MW, 1s	Superkond., SMEK, SEK, baterijos
Energijos valdymas (ilgalaikiai svyravimai, apkrovos išlyginimas)	10 – 100MW, 1 – 10h	HAE, SOEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos, vandenilio kaupikliai
Atsinaujinančiosios energijos elektrinių integravimas	0,1 – 100MW, 1 min – 10h	SEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS
Atsinaujinančiosios energijos elektrinių rezervavimas	~ 1MW, 1 – 20h	HAE, SMEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos
Pikinis energijos generavimas	~ 1MW, ~1h	HAE, SMEK, SEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos
Energijos perdavimo stabilumas	1 – 100MW, 1s	SMEK, baterijos, srautinės baterijos, NaS baterijos

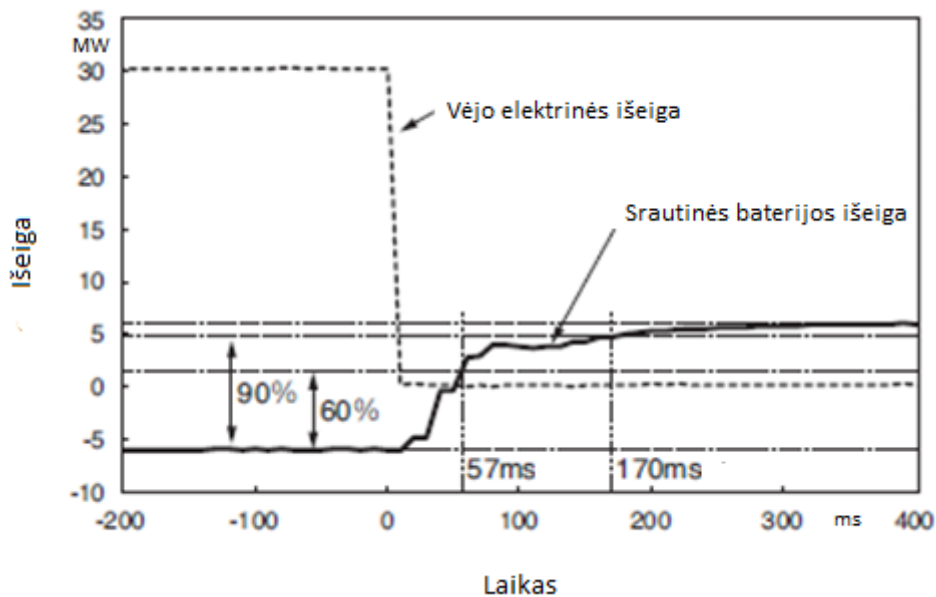
1.4 lent. Ilgalaikių ir trumpalaikių elektros energijos kaupimo priemonių charakteristikos[10]

Charakteristikos	Technologijos						
	Ilgalaikės energijos kaupimo priemonės				Trumpalaikės energijos kaupimo priemonės		
	HAE	Baterijos	Suspaustas oras	Kuro elementai	SEK	Superkondensatoriai	SMEK
Galia (MW)	100 – 3000	< 100	100 – 3000	< 50	< 10	< 10	< 100
Energija (MWh)	< 10000	< 500	50 – 5000	-	< 5	< 3	< 1000
Ciklo n.k	80%	50 – 90%	75%	20 – 36%	90%	90%	95%
Darbo amžius (ciklais, metais, h)	40 metų	10 ³ - 10 ⁴	30 metų	10 ⁴ h	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
Kaina(/kWh)	35 – 70	70 – 4000	10 – 70	-	-	-	-
Kaina (/kW)	-	-	-	-	140 - 350	70 – 4000	200- 500

1.8.Srautinės baterijos atsako greitis

Atsinaujinančiąją energiją vartojančioms vėjo elektrinėms bei jų valdymui reikalingas didelis atsako greitis, kad būtų efektyviai valdomas tiekimas bei suvartojimas.

Didelis veikimo atsako greitis reikalingas siekiant užtikrinti stabilų vėjo elektrinės darbą bei valdyti tiekimą ir suvartojimą. 1.4 paveiksle pavaizduotas 6MW srautinės redukcijos – oksidacijos baterijos, naudojamos stabilizuoti vėjo elektrinės išėigą, duomenys. Atliktame bandyme elektrinės išėiga staiga krito nuo 30MW iki 0MW naudojant simuliaciją. Stebimas srautinės baterijos atsako laikas į staigų vėjo elektrinės generuojamos galios pokytį. Jei atsako laikas apibrėžtas kaip laikas, per kurį turi būti pasiekama 63% ($1 - 1/e$) norimos vertės, tai šis laikas yra 57ms. Jei atsako laikas apibrėžtas kaip laikas, per kurį turi būti pasiekama 90%, tai toks atsako laikas yra 170ms. Šie atsako laikai buvo valdomi kontrolės bei signalų matavimo sistemomis. Atlikto tyrimo rezultatai rodo, jog srautinės redukcijos – oksidacijos baterijos turi didelį atsako greitį.[13]



1.4 pav. Srautinės baterijos atsako į staigų vėjo elektrinės generuojamos galios kritimą laikinė charakteristika[13]

1.9.PID valdikliai

PID (*angl. Proportional – integral – derivative*) valdiklis su grįžtamuju ryšiu yra plačiai naudojamas valdyti industrijos sistemas. PID valdiklis skaičiuoja paklaidą kaip norimos nustatytos vertės bei proceso kintamojo skirtumą. Valdiklio paskirtis yra minimalizuoti paklaidos vertes naudojant kintamąjį daugiklį.[12, 13, 14]

PID valdiklio algoritmas susideda iš trijų atskirų pastovių komponentų, dėl to jis kartais vadinamas „trijų komponentų valdymu“: proporcinės, integruojančios, ir diferencijuojančios. Šios reikšmės gali būti išreikštos laiko terminais: P priklauso nuo esamos paklaidos, I – nuo buvusių paklaidų kaupimo, D – būsimų paklaidų numatymo remiantis esamu paklaidos pokyčiu. Tokiu būdu svertinė šių veiksmų suma naudojama pasirinktiems procesams reguliuoti.[12, 13, 14]

PID valdiklio pagalba galima užtikrinti konkretaus proceso valdymą pagal keliamus reikalavimus. Tai realizuojama reguliuojant minėtuosius tris P, I bei D parametrus valdiklio algoritme. Valdiklio atsakas gali būti įvardijamas kaip atsakas į esamą paklaidą, taip pat valdiklio „peršokimo“ virš nustatytojo taško laipsnį bei sistemos svyravimų laipsnį. PID valdiklio algoritmo naudojimas sistemai valdyti negarantuoja optimalaus sistemos valdymo ar jos stabilumo. Kai kurioms sistemoms reikia naudoti tik vieną ar du veiksmus, siekiant išgauti norimą sistemos valdymą. Tokiu atveju kiti algoritmo parametrai prilyginami nuliui. Atlikus pakeitimus, PID valdiklis bus vadinamas PI, PD, P ar I valdikliu. PI valdikliai yra dažnai naudojami, nes išvestinės veiksmas yra jautrus triukšmams, o integravimo nebuvimas gali užkirsti kelią sistemai priartėti prie norimos vertės dėl pačio valdymo veiksmų.[12, 13, 14]

PID valdymo sistema taip pavadinta dėl trijų koreguojančių dedamųjų, kurių suma nusako valdomą kintamąjį. Proporcinė, integralinė bei išvestinės sąlygos yra sudedamos norint gauti PID valdiklio išeią. Taigi, jei įvardinsime valdiklio išeią kaip $u(t)$, galutinis PID valdiklio algoritmas atrodys taip:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1.2)$$

čia K_p – proporcinis daugiklis, reguliuojamas parametras;

K_I – intergalinis daugiklis, reguliuojamas parametras;

K_D – išvestinės daugiklis, reguliuojamas parametras;

e : esamos vertės paklaida nuo norimosios;

t : laikas(momentinis);

τ : integravimo kintamasis, apimantis laiko vertes nuo 0 iki esamos vertės t .

Proporcinis narys valdiklio išeiagoje sąlygoja tai, jog išeiagos vertė yra proporcinga esamai paklaidos vertei. Proporcinis atsakas gali būti derinamas dauginant minėtą paklaidą iš konstantos K_P , vadinamos proporciniu daugikliu. Tuomet proporcinis narys gali būti išreikštas taip:

$$P_{i\dot{s}} = K_P e(t) \quad (1.3)$$

Didelės proporcinio daugiklio K_P vertės sąlygoja didelį valdiklio išeiagos pokytį esant mažam paklaidos pokyčiui. Jei parenkamas K_P yra per didelis, valdomoji sistema gali tapti nestabili. Mažos proporcinio daugiklio K_P vertės sąlygoja mažą valdiklio išeiagos pokytį esant dideliame paklaidos pokyčiui. Jei parenkamas K_P yra per mažas, valdiklio atsakas gali būti per mažas norint kompensuoti valdomosios sistemos trukdžius. Reguliavimo teorija bei industrinė praktika rodo, jog proporcinis narys turi sudaryti didžiąją dalį valdiklio išeiagos.[12, 13, 14]

Integralinis narys yra proporcingas paklaidos dydžiui bei trukmei. Integralas PID valdiklyje yra momentinių paklaidų suma per tam tikrą laiką ir suminį nuokrypį, kuris jau turėjo būti kompensuotas anksčiau. Suminė paklaida tuomet padauginama iš integralinio daugiklio K_I ir pridedama prie valdiklio išeiagos:

$$I_{i\dot{s}} = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.4)$$

Integralinis narys pagreitina proceso artėjimą link norimos vertės bei eliminuoja liekamąją pusiausvyros paklaidą, kuri atsiranda dėl proporcinio nario. Kitaip tariant, jis atlieka sistemos nuokrypio sudėtį laikui bėgant. Nors integralinis narys reaguoja į suminį nuokrypį praeityje, tačiau gali sukelti esamos vertės „peršokimus“ virš numatytosios vertės.

Proceso paklaidos išvestinė skaičiuojama nustatant paklaidos kitimo greitį laikui bėgant bei padauginus iš išvestinės daugiklio K_D . Išvestinės nario įnašas į bendrą valdiklio išeiagą yra toks:

$$D_{i\dot{s}} = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (1.5)$$

Išvestinės veiksmas nuspėja sistemos elgesį ir taip pagerina reguliavimo laiką bei sistemos stabilumą. Ideali išvestinė nėra priežastinė, todėl PID valdymo vykdymui naudojamas papildomas žemų dažnių filtras išvestinės nariui, kad apribotų aukštų dažnių stiprinimą bei triukšmą. Išvestinės narys retai naudojamas praktikoje, sudaro tik penktadalį iš visų minėtų valdiklių, nes daro didelį poveikį realios sistemos stabilumui.[12, 13, 14]

2.METODINĖ DALIS

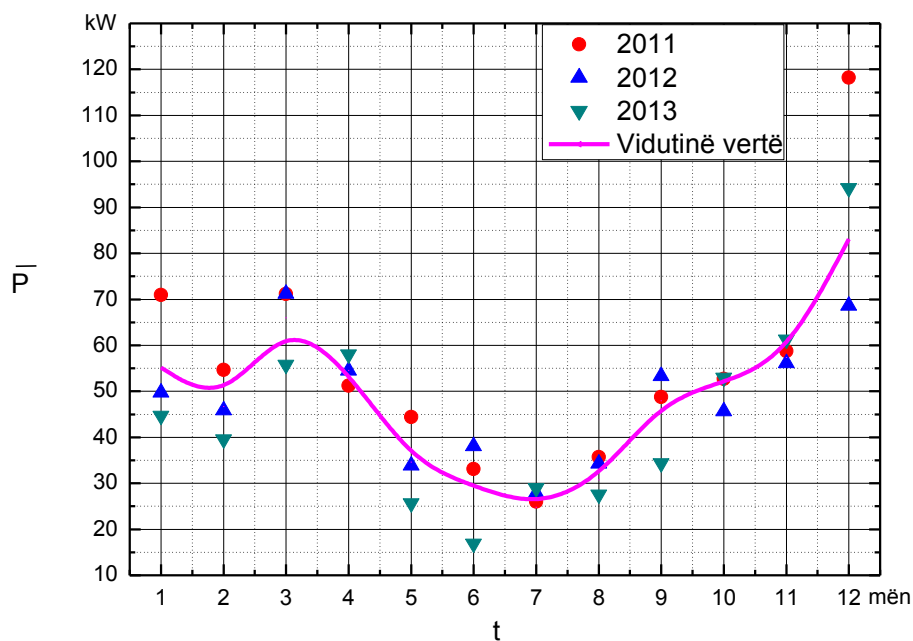
Kokybiškos vėjo elektrinės generuojamos elektros energijos tiekimas yra svarbus dalykas, žvelgiant į atsinaujinančių pirminės energijos šaltinių plėtrą elektros energetikos rinkoje. Šioje darbo dalyje aptariami metodai bei loginiai sprendimai, kuriais vadovaujantis galima efektyviai sumažinti neigiamą nuolat kintančios vėjo elektrinės generuojamos galios įtaką bendrai elektros energetikos sistemai. Taip pat, apžvelgus literatūrą, aprašančią elektros energijos kaupimo būdus, nuspręsta tiriamajai vėjo elektrinei kaip akumuliatorinį kaupiklį naudoti srautinę bateriją. Pasirinkimą nulėmė šios srautinių baterijų savybės:

1. Ilgas tarnavimo laikas;
2. Maži eksploataciniai kaštai;
3. Patikimumas ir saugumas;
4. Kintantis galios poreikis joms nedaro įtakos;
5. Pilnos iškrovos nedaro žalos baterijai.

2.1.Turimų duomenų analizė

Norint tinkamai išsiaiškinti bei efektyviai integruoti vėjo elektrinę į bendrąją elektros energetikos sistemą, pirmiausia turime susidaryti bendrą vėjo elektrinės generuojamos galios įvairiais laiko intervalais vaizdą. Kitaip tariant, turime ištirti elektrinės generuojamos galios kitimą bėgant laikui. Kadangi vėjo stiprumą ir galiausiai jo buvimą ar nebuvimą sunku prognozuoti, pirmiausia reikia išsamiai apdoroti turimus duomenis. Akivaizdu, kad kuo daugiau turima duomenų, tuo tiksliau galima įvertinti generuojamos galios pokyčius bei įžvelgti dėsningumus. Šiam projektui naudojome 2011 –ųjų, 2012 –ųjų bei 2013 –ųjų metų 250kW elektrinės generuojamos galios vertes, matuotas kas 10 minučių. Svarbu yra tinkamai parinkti laiko intervalą, kuriame toliau bus nagrinėjami galios pokyčiai. Tinkamas laiko intervalo parinkimas lemia tolimesnės tyrimo plėtros eigą bei turi didelę įtaką sprendžiant, kokį akumuliatorinį kaupiklį pritaikyti tiriamajai vėjo elektrinei. Dėl šių priežasčių analizės metu tiriama vėjo elektrinės generuojama galia metų, mėnesių, dienų laikotarpiuose. Taip pat išskiriami charakteringi laikotarpiai, kurių metu generuojama galia buvo didžiausia ir mažiausia.

Siekiant išsiaiškinti, kokių parametrų akumuliatorinį kaupiklį tinkamiausia naudoti pastovios galios vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu sistemoje, pirmiausia išanalizuosime vėjo elektrinės galios laikines charakteristikas. Jos pavaizduotos 2.1 – 2.5 paveiksluose.

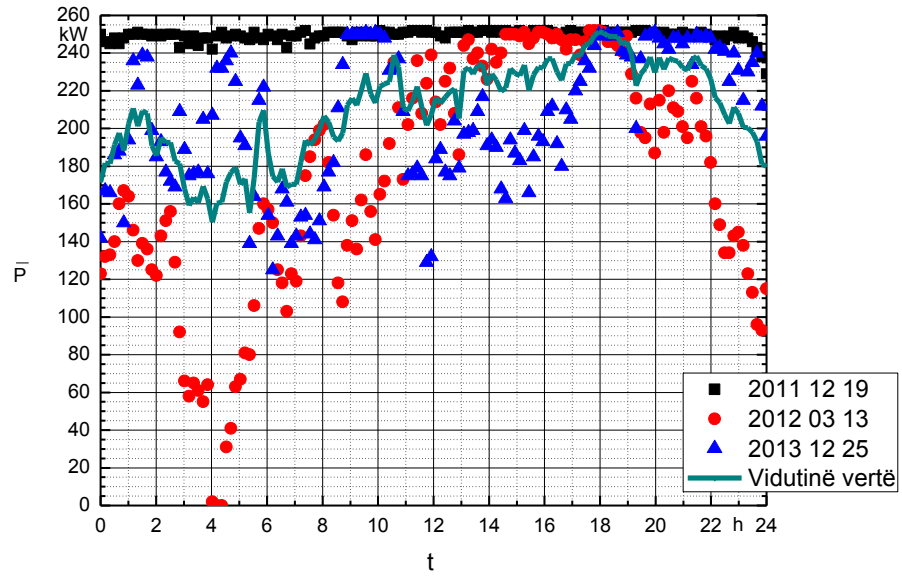


2.1 pav. Vėjo elektrinės vidutinės generuojamos galios \bar{P} laikinė diagrama

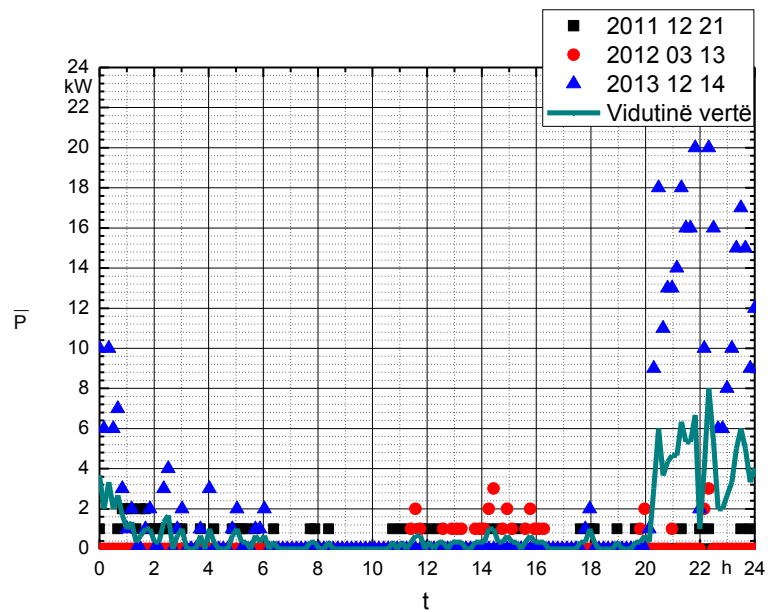
2.1 paveiksle pateikta vėjo elektrinės vidutinės generuojamos galios laikinė diagrama. Ji gauta išvedus atitinkamai 2011 – ujų, 2012 – ujų bei 2013 – ujų metų kiekvieno mėnesio generuojamų galių aritmetinius vidurkius. Violetinė linija diagramoje vaizduoja bendrą tiriamų metų mėnesių aritmetinį vidurkį. Iš čia galime daryti išvadą, jog daugiausia galios generuojama rugpjūčio – balandžio mėnesiais, mažiausiai – birželio – rugpjūčio mėnesiais.

Tiriant Vėjo elektrinės generuojamos galios kitimą pastebėta, jog mėnesio intervale jis nėra aktualus, kadangi siekiama išgauti tiriamosios vėjo elektrinės galios trumpalaikį reguliavimą vykstantį realiu laiku, naudojant akumuliatorinį kaupiklį. Remiantis šiuo faktu toliau bus nagrinėjami vėjo elektrinės generuojamos galios laikinės charakteristikos vienos paros laikotarpyje.

2.3 ir 2.4 paveiksluose pavaizduotos charakteringų mėnesių, kai generuojama galia buvo didžiausia, dienų, kai buvo generuojamos atitinkamai didžiausia ir mažiausia galia, laikinės charakteristikos.

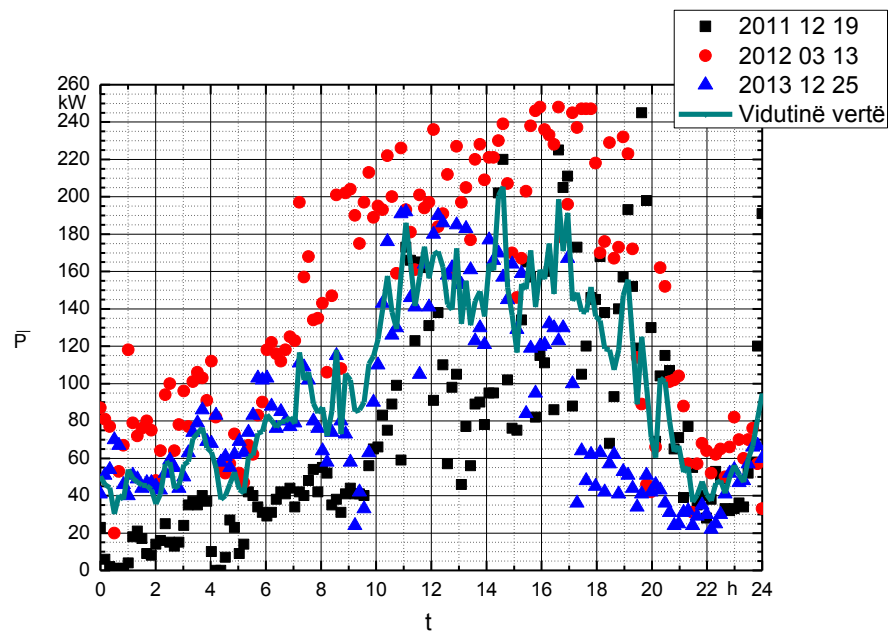


2.2 pav. Vėjo elektrinės vidutinės generuojamos galios \bar{P} dienos laikinė diagrama, kai generuojama galia buvo didžiausia

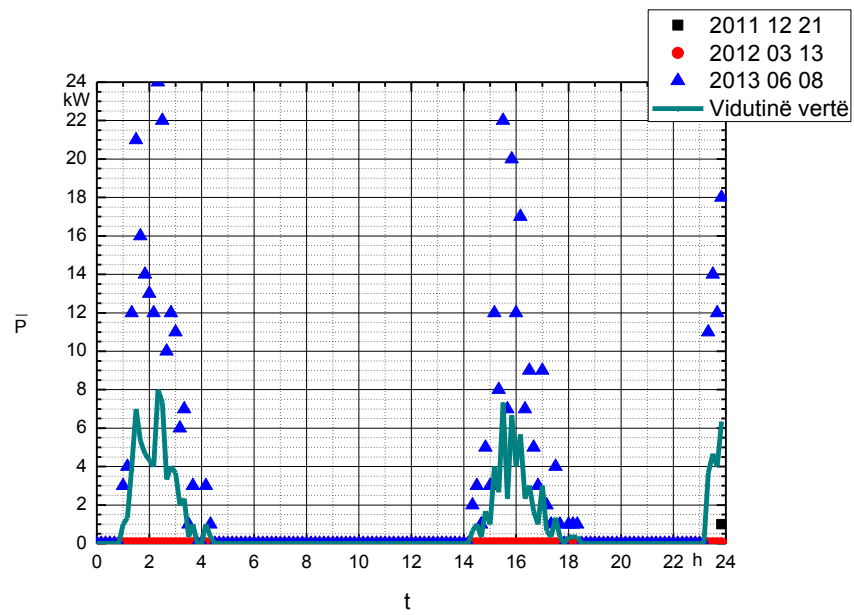


2.3 pav. Vėjo elektrinės generuojamos galios \bar{P} dienos laikinė diagrama, kai generuojama galia buvo mažiausia

2.4 ir 2.5 paveiksluose pavaizduotos charakteringų mėnesių, kai generuojama galia buvo mažiausia, dienų, kai buvo generuojamos atitinkamai didžiausia ir mažiausia galia, laikinės charakteristikos.



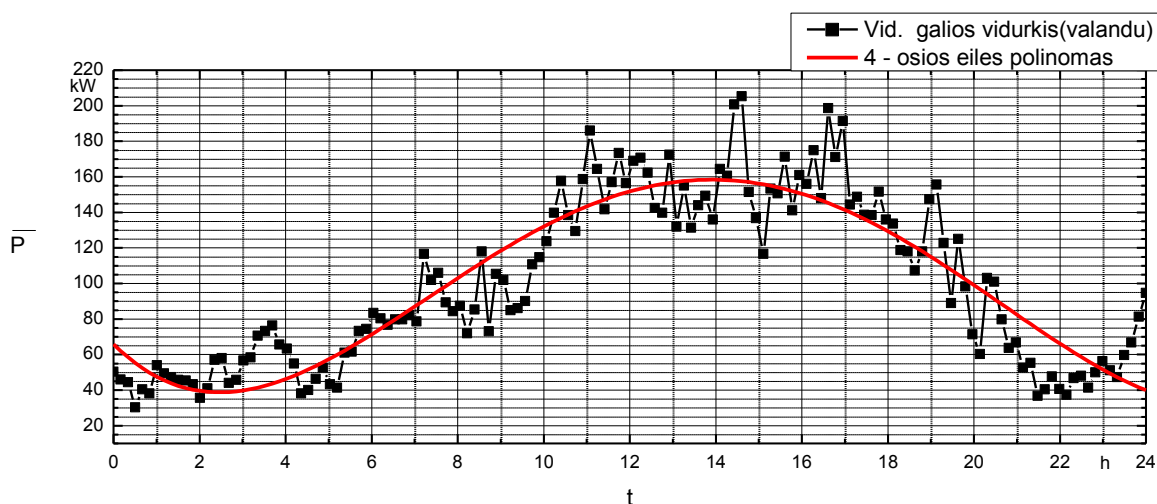
2.4 pav. Vėjo elektrinės vidutinės generuojamos galios \bar{P} laikinė diagrama



2.5 pav. Vėjo elektrinės vidutinės generuojamos galios \bar{P} laikinė diagrama

Atlikus vėjo elektrinės generuojamos galios kitimą paros laikotarpyje, įsitikinta, jog generuojama galia yra nepastovi, stebimi švytėjimai. Akivaizdu, jog toks nepastovus generuojamos galios nepastovumas turi neigiamą įtaką bendrajam elektros energetikos tinklui.

Norint ženkliai sumažinti staigius vėjo elektrinės generuojamos galios svyravimus, turime nustatyti norimas generuojamos galios vertes. Šiam tikslui įgyvendinti naudosime turimų generuojamos galios vidutinių verčių aproksimacijas. Kitaip tariant, nustatysime norimą atiduoti į elektros tinklą galią, taigi aproksimacijos kreivę laikysime atskaitos tašku. Pavyzdžiui, 2.6 paveiksle yra pateikta vėjo elektrinės generuojamos galios vidutinių verčių tų mėnesių, kai generuojama galia buvo mažiausia, dienų, kurių generuojama galia yra didžiausia, aproksimacija 4 – ojo laipsnio polinomu. Ši vidutinės galios laikinė priklausomybė yra pasirinkta dėl to, kad yra stebimas galios pokytis praktiškai elektrinės generavimo diapazone, t.y. nuo 26kW iki 210kW vėjo elektrinės generuojamos galios. Tai pavaizduota 2.6. paveiksle. Taigi tarsime, jog aproksimacinės kreivės vertės atitinka norimos generuoti galios vertes.



2.6 pav. Vidutinės per parą generuojamos galios grafikas

Tikrosios vėjo elektrinės generuojamos galios nuokrypis nuo norimos generuoti galios vertės išreiškiamas taip:

$$P_{nuokrypio} = P_{norima} - P_{reali} \quad (2.1)$$

Čia P_{norima} – norimos generuoti galios vertė,

P_{reali} – tikroji generuojama galia.

Taigi, vėjo elektrinės generuojamos galios nuokrypis nuo norimos generuoti vertės yra tokia galios vertė, kurią reikia kompensuoti siekiant gauti norimą galios vertę. Šiam tikslui įgyvendinti naudosime akumuliatorinį kaupiklį.

Norint vėjo elektrinės generuojamos galios perteklių ar trūkumą kompensuoti akumuliatoriniu kaupikliu, turime atlikti minėtą turimų duomenų analizę ir tinkamai parinkti naudojamos akumuliatorių baterijos talpą.

Siekiant išsiaiškinti, kokios talpos akumuliatorių baterijos reikės, pirmiausia turime matematiškai aprašyti vykstančius procesus. Baterijos energiją išreiškiame tokia formule:

$$E_{bat} = \int_0^t P_{nuokrypio}(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

čia E_{bat} – akumuliatorių baterijos energija,

τ – integravimo kintamasis, apimantis laiko vertes nuo 0 iki t .

Taip pat reikia įvertinti ir akumuliatorių baterijos įkrovimo/ iškrovimo ciklo nuostolius. Jie aprašomi tokia formule:

$$P_{nuost} = -|P_{nuokrypio}|(1 - \sqrt{\eta}), \quad (2.3)$$

čia η – baterijos naudingumo koeficientas.

Laikykime, jog energijos vertė yra teigiama kai baterija ją atiduoda, ir neigiama, kai baterija energiją ima. Remiantis tuo, (2.3) išraiškoje yra minuso ženklas. Galutinę akumuliatorių baterijos energiją galime išreikšti kaip prieš tai buvusios baterijos energijos, sukauptos ar atiduotos baterijos galios bei ciklo nuostolių padaugintų iš laiko, sumą:

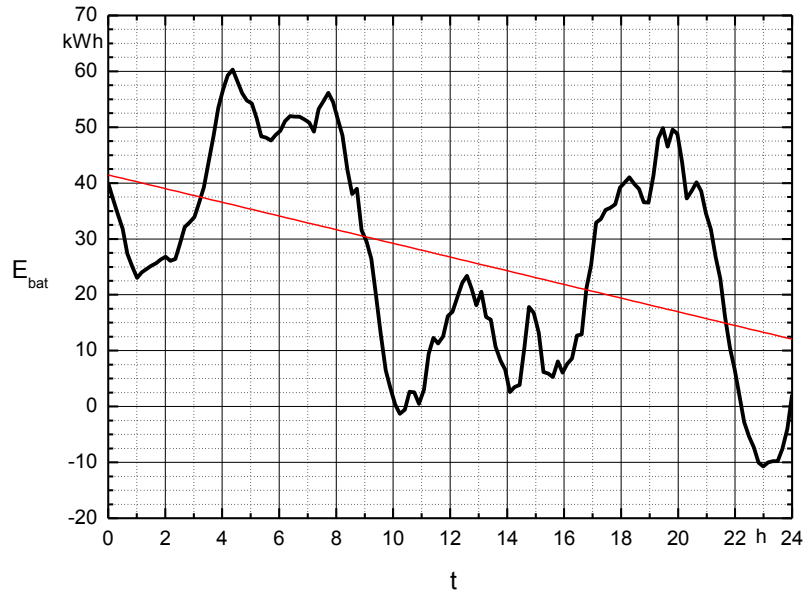
$$E_{bat\ n} = E_{bat\ n-1} + (-P_{bat\ n-1} + P_{nuost\ n-1}) \frac{t}{60} \quad (2.4)$$

čia $E_{bat\ n-1}$ – prieš tai buvusi baterijos energija,

$P_{bat\ n-1}$ – sukaupta arba atiduota baterijos galia,

$P_{nuost\ n-1}$ – ciklo nuostoliai.

Darome prielaidą, jog norima pastovi baterijos energija yra 40kWh. Tuomet, naudojame vienos paros vėjo elektrinės generuojamos galios duomenis tų mėnesių, kuriais generuojama galia buvo mažiausia, geriausių pagal generuojamą galią dienų valandinius duomenis. Baterijos energijos kreivė pateikiama 2.7. paveiksle.



2.7 pav. Akumulatorinio kaupiklio energijos priklausomybės nuo laiko grafikas kai norima pastovi baterijos energija yra 40kWh

2.2. Akumulatorinio kaupiklio įkrovimo ir iškrovimo algoritmas

Nubrėžus 2.7 paveiksle pateiktą grafiką susiduriame su dar viena problema. Nereguliuojant baterijos įkrovimo bei iškrovimo, esant nuostoliams baterijoje, akumuliatorių baterijos norima pastovi energijos vertė (šiuo atveju 40kWh) yra nepalaikoma dėl baterijos ciklo nuostolių, ir mažėja. Iš to darome išvadą, jog reikalingas algoritmas pastoviai akumulatorinio kaupiklio energijai palaikyti siekiant užtikrinti kokybiškos galios tiekimą į tinklą. Šiam tikslui pasitelkiame PID valdiklį. Jis dažnai naudojamas industrijoje įvairiems procesams reguliuoti. Dėl trijų atskirų proporcijos, integravimo bei diferenciacijos komponentių šis valdiklis turi platų pritaikymo spektrą ir gali būti lanksčiai panaudojamas. Norint pritaikyti PID valdiklį, reikia žinoti sistemos nuokrypį nuo norimos vertės. Tuomet baterijos energijos nuokrypis nuo norimos vertės išreiškiamas formule:

$$E_{\text{nuokrypio}} = E_{\text{norima}} - E_{\text{esama}} \quad (2.5)$$

Žinodami nuokrypį nuo norimos vertės ir siekdami jį sumažinti, iš pradžių naudojame pirmąją PID valdiklio komponentę. Pirmoji komponentė yra proporcinė ir yra išreiškiama tokia formule:

$$P_{i\dot{s}} = K_p e(t) \quad (2.6)$$

čia $P_{i\check{s}}$ – valdiklio išeiga,

K_p – proporcinis daugiklis,

$e(t)$ – nuokrypis nuo norimos vertės.

Proporcijos komponentė sąlygoja tai, jog valdiklio išeigos vertė yra proporcinga esamai paklaidos vertei. Tokiu būdu nuokrypis nuo norimos vertės yra sistemingai mažinamas. Norint efektyviau sumažinti esamos vertės nuokrypį nuo norimosios, taip pat naudojame ir integruojančią komponentę. Jos dėka yra pagreitinamas proceso artėjimas link norimos vertės bei eliminuojama liekamoji pusiausvyros paklaida, atsirandanti dėl proporcinio nario. Integralo komponentės formulė užrašoma taip:

$$I_{i\check{s}} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.7)$$

čia $I_{i\check{s}}$ – valdiklio integralo komponentės išeigos dedamoji,

K_i – integralo daugiklis,

τ - integravimo kintamasis, apimantis laiko vertes nuo 0 iki t .

Diferenciovimo komponentė akumuliatorių baterijos atveju nėra naudojama, kadangi ji turi didelę įtaką sistemos stabilumui. Bet kokiu atveju, nenaudojant šios komponentės pastoviam baterijos energijos palaikymui, yra gaunamas optimalus rezultatas naudojant P bei I komponentes. Diferencialo komponentės indėlių prie bendros valdiklio išeigos prilyginame nuliui. Tuomet PID valdiklio išeigos išraiška yra tokia:

$$E_{PID} = P_{i\check{s}} + I_{i\check{s}} \quad (2.8)$$

Kadangi nenaudojame diferencijuojančio kintamojo, valdiklį vadinsime PI valdikliu.

Norint pritaikyti PI valdiklį valdomajai sistemai, reikia tinkamai parinkti proporcijos bei integravimo daugiklių vertes.

Siekiant gauti norimą proceso valdymą, valdiklio daugiklių vertės parenkamos rankiniu būdu siekiant gauti optimalų variantą. Šio metodo naudojimas taip pat svarbus tuo, kad nuo jo daugiklių parinkimo priklauso ir akumuliatorinio kaupiklio tapla, kurios skaičiavimai pateikiami vėliau.

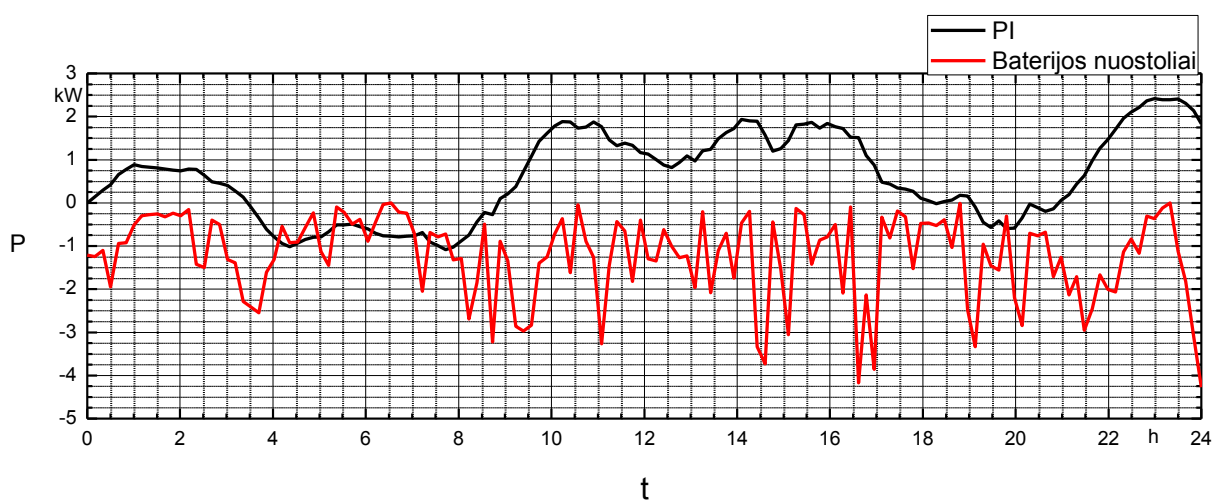
Valdiklio daugiklių parinkimas vyksta toliau išvardintu principu. Pirmiausia, visi daugikliai prilyginami nuliui. Proporcinį daugiklį reikia palaipsniui didinti, kol sistema taps nestabili ir presides svyravimai. Tuomet proporcinį daugiklį sumažiname per pusę, ir palaipsniui didiname integravimo daugiklį. Tokiu būdu pasiekiamo optimalų proceso reguliavimą. Reikia

atkreipti dėmesį į tai, jog baterijos reguliavimo procesas privalo būti pakankamai lėtas, o valdymo kreivė negali turėti staigių pokyčių, nes tai turi tiesioginę įtaką vėjo elektrinės generuojamai galiai, kas savo ruožtu sąlygoja staigiai kintančios galios perdavimą į tinklą. Taigi, naudojantis minėtuoju metodu, buvo parinktos tokios daugiklių vertės:

$$K_P = 0,05,$$

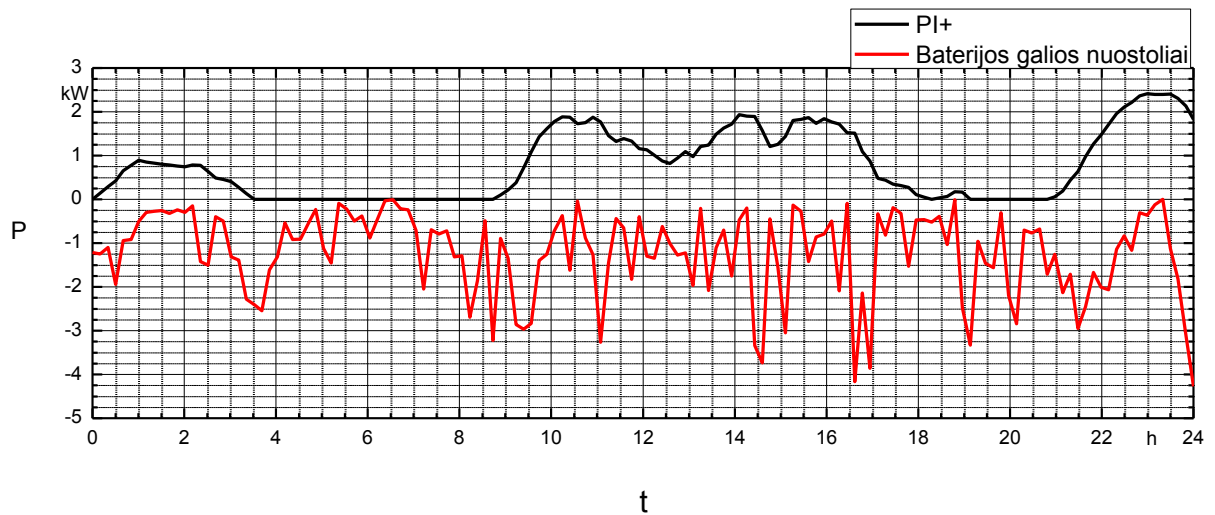
$$K_I = 0,001.$$

Valdiklio reguliuojamos galios bei baterijos nuostolių laikinės charakteristikos pateikiamos 2.8 paveiksle.



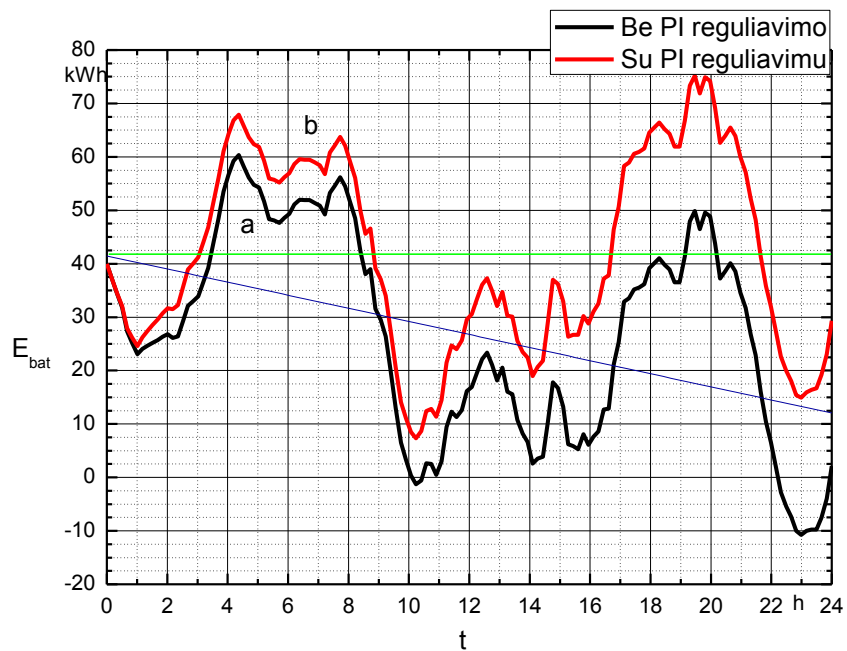
2.8 pav. PI valdiklio reguliavimo ir baterijos galios nuostolių laikinės charakteristikos

Iš 2.8 paveikslo matyti, jog PI valdiklio reguliavimo galia įgyja ne tik teigiamas, bet ir neigiamas vertes. Kai vėjo elektrinės generuojamo galios vertė yra didesnė už norimą, pertekline galia yra kraunama baterija. PI valdiklio teigiama vertė paspartina šį procesą, taigi jo dėka baterija įkraunama greičiau. Kai vėjo elektrinės generuojamos galios vertė yra mažesnė už norimą, galios trūkumas yra kompensuojamas iš baterijos, kitaip tariant, baterija yra iškraunama. PI valdiklio neigiama vertė taip pat paspartina šį procesą. Tai nėra naudinga, kadangi akumuliatorinio kaupiklio sukauptos galios resursas nėra begalinis, o vėjo elektrinės generuojama galia yra mažesnė už norimą. Iš to darome išvadą, jog PI valdiklio reguliuojama galios vertė privalo įgyti tik teigiamas vertes, kitaip tariant paspartinti baterijos įkrovimo procesą, kai vėjo elektrinės generuojama galia yra perteklinė norimos generuoti galios atžvilgiu. Pakoreguota PI valdiklio reguliavimo galios laikinė priklausomybė pateikiama 2.9 paveiksle. Patogumo dėlei valdiklį vadinsime PI+ valdikliu.



2.9 pav. PI+ valdiklio reguliavimo ir baterijos galios nuostolių laikinės charakteristikos

Parinkus PI regulatoriaus daugiklius, akumuliatorių baterijos energijos kreivė atrodo taip, kaip parodyta 2.10 paveiksle. Šiuo atveju norima pastovi energijos vertė yra 40kWh, reguliuojamasis laikotarpis – 24 valandos.



2.10 pav. Baterijos energijos laikinės priklausomybės grafikas
 a) Be PI reguliavimo
 b) Su PI+ reguliavimu

Šiame paveiksle pateiktos baterijos energijos laikinės charakteristikos be PI reguliavimo ir su juo. Matome, jog laikui bėgant baterijos energija naudojant PI reguliavimą ne mažėja, o svyruoja apie nustatytą vertę, kuri šiuo atveju yra 40 kWh. Matavimo laikotarpis – 24h.

2.3. Srautinės baterijos talpos skaičiavimas

Pritaikius akumuliatorių baterijos energijos nuostolių kompensavimo algoritmą bei parinkus tinkamus regulatoriaus daugiklius pasiekta, jog energija svyruoja apie nustatytą vertę. Toliau bus parinkta baterijos talpa, reikalingą 250kW galios vėjo elektrinei.

Akumuliatorių baterijos talpa turi būti parinkta tokia, kad užtektų palaikyti nustatytą vėjo elektrinės generuojamos galios lygį. Kadangi baterijos energijos kitimas laike (2.10 pav.) yra žinomas, galima nustatyti baterijos energijos kitimo diapazoną. Jis išreikštas tokia formule:

$$\Delta E_{bat} = E_{maks} - E_{min} \quad (2.9)$$

čia E_{maks} ir E_{min} yra atitinkamai didžiausia ir mažiausia baterijos energijos vertė. Iš 2.10 pav duomenų bei naudodami (2.9) formulę apskaičiuojame, jog baterijos talpa yra

$$\Delta E_{bat} = 75,23 - 7,34 = 67,89 \text{ kWh} \approx 70 \text{ kWh}$$

Dabar reikia nustatyti vertę, apie kurią svyruos baterijos galia. Norint kompensuoti vėjo elektrinės generuojamos galios netolygumus, baterija privalo gebėti tiek atiduoti, tiek kaupti analogišką energijos kiekį. Dėl to parenkame energijos vertę, lygią

$$0,5 \Delta E_{bat} = 33,94 \text{ kWh} \approx 35 \text{ kWh}.$$

Tiriamosios vėjo elektrinės galia yra 250kW. Taigi, vienam kilovatui vėjo elektrinės galios reikia 0,27 kWh baterijos talpos.

2.4. Vėjo elektrinės galios aproksimacija realiu laiku

Praeitame skyriuje buvo sukurtas baterijos įkrovimo ir iškrovimo algoritmas, įvertinti nuostoliai, aprašytas vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu bendrasis matematinis modelis. Kadangi vėjo stiprumas greitai kintantis dydis, jį sunku prognozuoti. Norint sukurti algoritmą, kuris vykdytų aproksimaciją duotuoju laiku, pirmiausia būtina sukurti baterijos, veikiančios kartu su vėjo elektrine, modelį. Šiam tikslui iš pradžių norima nustatytoji vertė buvo apskaičiuota taikant aproksimaciją ketvirtojo laipsnio polinomu. Skaičiavimo metu remtasi ankstesniais, 2011 – ujų, 2012 – ujų bei 2013 – ujų metų duomenimis.

Šiame skyriuje visi skaičiavimai išlieka tokie pat kaip praeitame, skirsis tik tai, jog reikia parinkti tinkamą aproksimaciją duotuoju momentu, tokiu būdu siekiant užtikrinti norimos galios kiekio atidavimą į bendrąją elektros energetikos sistemą. Tai realizuojama imant prieš tai buvusią aproksimacinę vertę, prie jos pridėjus esamos generuojamos galios ir prieš tai buvusios aproksimacinės verčių skirtumą, padaugintą iš konstantos. Nustatytosios galios aproksimacijos formulė išreiškiama taip:

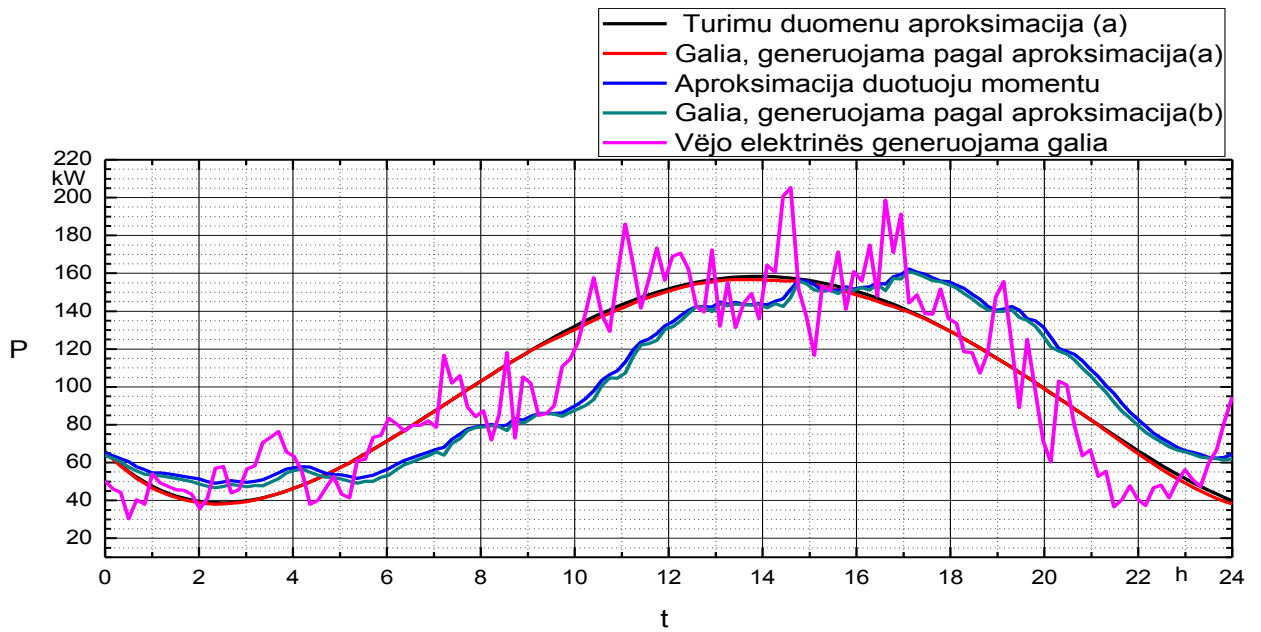
$$P_{aprosks} = P_{aprosks-1} + k_{aprosks}(P_{gen-1} - P_{aprosks-1}) \quad (2.10)$$

čia $P_{aprosks-1}$ – prieš tai buvusi galios aproksimacijos vertė,

P_{gen-1} prieš tai buvusi generuojamos galios vertė,

$k_{aprosks}$ – aproksimacijos konstanta.

$k_{aprosks}$ vertė šiuo atveju imama sąlyginai maža. Taip yra daroma todėl, kad būtų gauta „švelni“ aproksimacija, be didelių ir staigių šuolių. Ji buvo parinkta rankiniu būdu palaipsniui didinant ir mažinant minėtosios konstantos vertę, kol buvo gautas priimtinas rezultatas. Konstantos $k_{aprosks}$ vertė lygi 0,09.

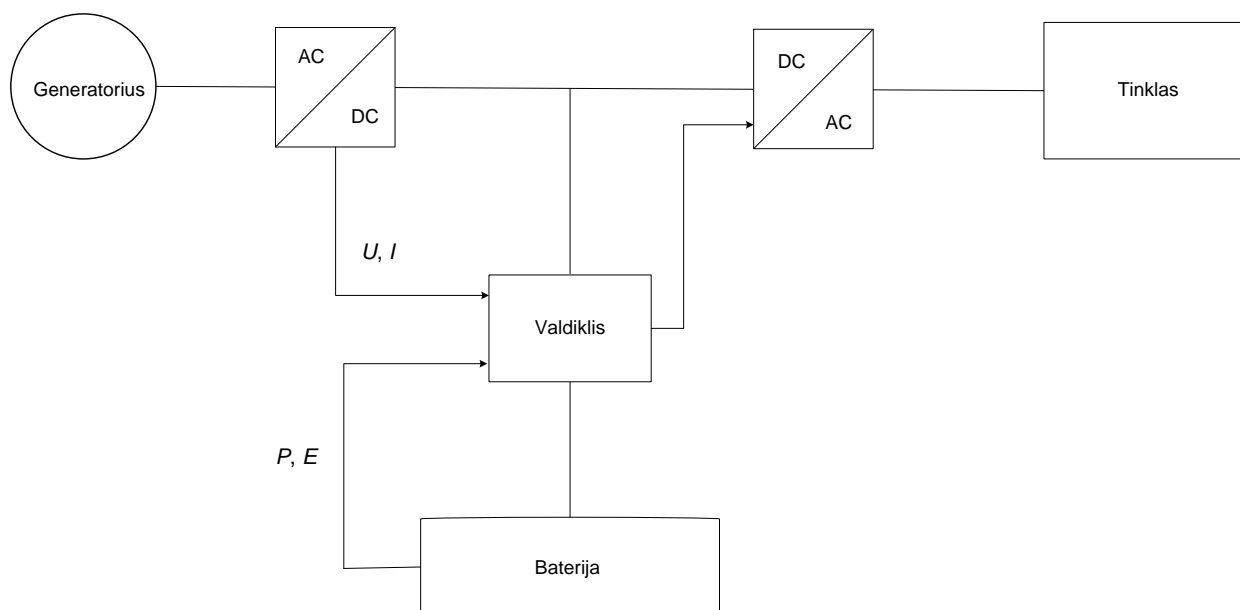


2.11 pav. Vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu galios laikinės priklausomybės taikant skirtingas aproksimacijas, grafikas

Iš 2.11 pav. matyti, jog generuojamų galių esant skirtingoms aproksimacijoms vertės yra mažesnės nei aproksimacijų. Taip pat reikia pabrėžti ir tai, jog vėjo elektrinės generuojamos galios aproksimacijos, vykstančios duotuoju momentu, kreivė yra pasislinkus laiko ašyje. Kitaip tariant, stebimas vėlavimas.

2.5. Vėjo elektrinės su srautine baterija schema

Pritaikius akumuliatorinį kaupiklį tiriamajai 250kW galios vėjo elektrinei, aprašoma tokios sistemos sandara. Peržvelgus literatūrą, aprašančią elektros energijos kaupiklių prijungimą prie vėjo elektrinių struktūrą, buvo sudaryta vėjo elektrinės su srautine baterija blokinė schema. Sistema susideda iš minėtosios vėjo elektrinės, AC / DC keitiklių, srautinės baterijos bei išmaniojo valdiklio. Vėjo elektrinės su srautine baterija blokinė schema pavaizduota 2.12 paveiksle.



2.12 pav. Vėjo elektrinės su srautine baterija blokinė schema

Iš vėjo elektrinės generuojamos galios per AC / DC keitiklį valdiklis matavimo įtaisų pagalba stebi generuojamos srovės ir įtampos vertes. Taip pat stebima srautinės baterijos įkrovimo ir iškrovimo galia bei bendra baterijos energija. Valdiklis apdoroja turimus duomenis ir įvertina, kiek galios reiks kompensuoti naudojant bateriją. Taip būdu pašalinami vėjo elektrinės generuojamos galios netolygumai. Tokia, pakoreguota vėjo elektrinės generuojama galia tiekama į bendrąjį elektros tinklą.

2.6 Ekonominis palyginimas

Šiame skyriuje pateikiamas ekonominis palyginimas, kiek procentaliai pabrangsta vėjo elektrinė, kai prie elektrinės prijungiama srautinė baterija su valdymu. Literatūroje rašoma, jog vėjo elektrinės su įrengimu kaštai siekia apie 434400€. Naujausios technologijos srautinių baterijų vienos kilovatvalandės baterijos kaina įskaičiavus įrengimą yra apie 269€. Srautinės baterijos valdiklio preliminarai kaina yra 300€. Bendrą srautinės baterijos kainą aprašome taip:

$$\text{Baterijos talpa} \cdot 1\text{kWh baterijos kaina} = \text{Baterijos kaina},$$

Tuomet, srautinės baterijos, reikalingos 250kW galios vėjo elektrinei, kaina yra

$$67,89 \cdot 269 = 18262,41\text{€}$$

Įvertinus valdiklio kainą, baterijos su valdikliu kaina yra

$$18262,41 + 300 = 18562,41\text{€}$$

Žinodami srautinės baterijos su valdikliu kainą, apskaičiuojame, kiek procentų vėjo elektrinės kainos sudaro srautinės baterijos su valdikliu kaina:

$$\frac{18562,41}{434400} \cdot 100\% = 4,27\%$$

Taigi, srautinės baterijos su valdikliu kaina sudaro 4,27% vėjo elektrinės kainos. Iš to darome išvadą, jog yra tikslinga naudoti vėjo elektrinę kartu su srautine baterija. Bendra elektrinės kaina padidėja nežymiai, o žvelgiant iš techninės pusės tiriamosios elektrinės su srautine baterija nauda akivaizdi, t.y sumažinami generuojamos galios švytavimai.

3.TYRIMO REZULTATŲ DALIS

Darbo metu ištirta vėjo elektrinės galios laikinė charakteristika 2011 -ųjų – 2013 -ųjų metų laikotarpyje. Taip pat pateikiami charakteringi laiko intervalai, kai generuojama galia buvo didžiausia ir mažiausia. Pastebėta, jog tikslinga naudoti dvidešimt keturių valandų trukmės vėjo elektrinės galios laikinę charakteristiką. Taip pat buvo atlikta elektros energijos kaupiklių analizė. Prieita prie išvados, jog optimalu tiriamajai 250kW galios vėjo elektrinei kaip akumuliatorinį kaupiklį naudoti srautinę bateriją.

Sukurtas algoritmas, reguliuojantis baterijos įkrovimo bei iškrovimo procesus. Realizacijai naudojamas PID valdiklis. 2.10 paveiksle pateikiama akumuliatorinio kaupiklio energijos laikinė priklausomybė nenaudojant įkrovimo ir iškrovimo valdymo, bei šio proceso kitimas laike taikant PID valdymą. Siekiant gauti norimą valdymą, rankiniu būdu parinktos PID valdiklio daugiklių vertės yra tokios:

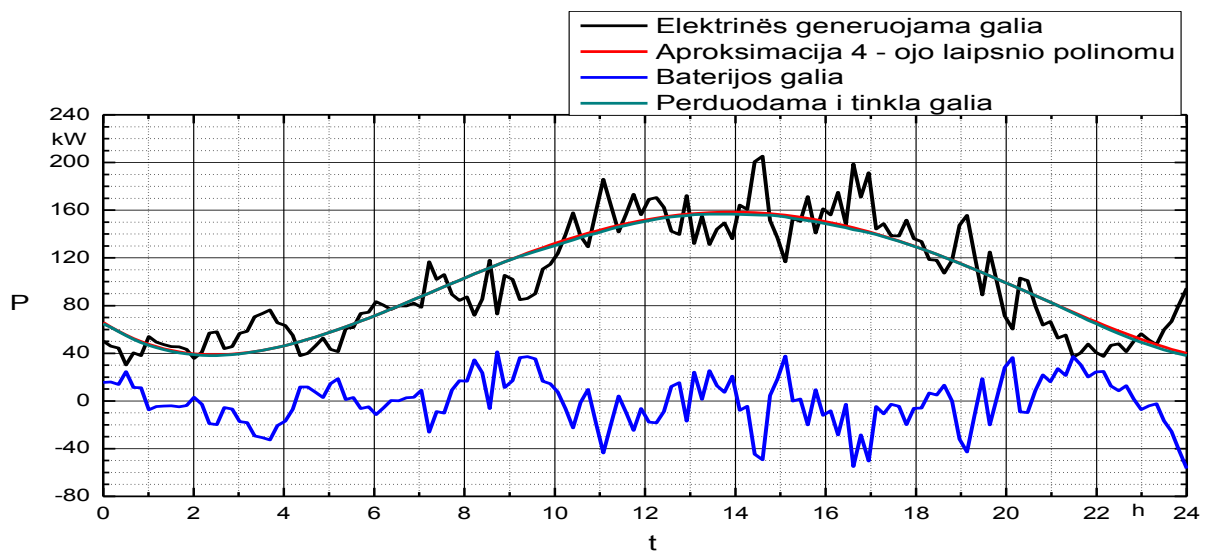
$$K_p = 0,05,$$

$$K_I = 0,001,$$

$$K_D = 0.$$

250kW galios vėjo elektrinei pritaikyta srautinė baterija, kurios talpa yra $\Delta E_{\text{bat}} = 67,89$ kWh. Apskaičiuota, jog vienam kilovatui vėjo elektrinės galios reikia 0,27 kWh baterijos talpos.

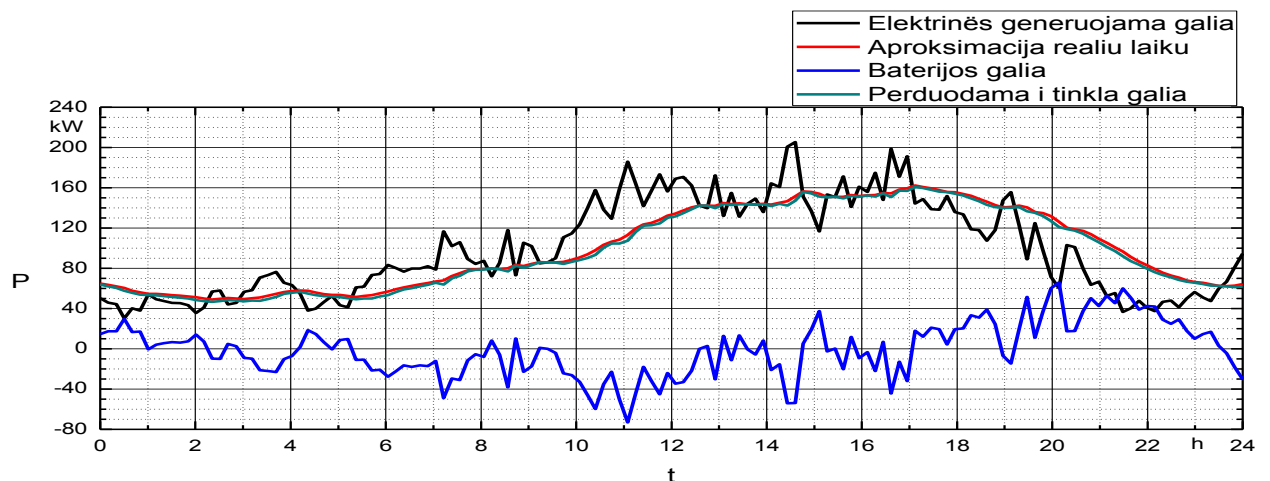
Sukurtas vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu valdymo modelis, skirtas sumažinti nepageidaujamus galios švytavimus. Sukurtas aproksimacijos realiu laiku algoritmas. To pasekoje, vykstant srautinės baterijos įkrovimo ir iškrovimo proceso valdymui vėjo elektrinės generuojamos galios vertė tampa artima aproksimacijos realiu laiku vertei. 2.13 paveiksle pateikiama vėjo elektrinės galios, aproksimuotos ketvirtojo laipsnio polinomu, baterijos galios bei perduodamos į tinklą galios laikinės charakteristikos.



2.13 pav. Vėjo elektrinės sistemos galios laikinės charakteristikos aproksimuojant 4 – ojo laipsnio polinomu

Iš 2.13 paveikslo matome, jog vėjo elektrinės su srautine baterija perduodamos į tinklą galios vertė yra artima nustatytajai, t.y. aproksimacijos vertei. Skirumą tarp perduodamos į tinklą galios ir aproksimacijos lemia srautinės baterijos valdymo ypatumai bei ciklo nuostoliai.

2.14 paveiksle pateikiama vėjo elektrinės galios naudojant realaus laiko aproksimaciją, baterijos galios bei perduodamos į tinklą galios laikinės charakteristikos.



2.14 pav. Vėjo elektrinės sistemos galios laikinės charakteristikos naudojant aproksimaciją realiu laiku

Iš 2.14 pav matome, jog vėjo elektrinės su srautine baterija perduodamos į tinklą galios vertė yra artima nustatytajai, t.y. realaus laiko aproksimacijos vertei. Skirumą tarp perduodamos į tinklą galios ir aproksimacijos lemia srautinės baterijos valdymas bei jos ciklo nuostoliai.

Aproksimacijų vertės skiriasi dėl to, kad aproksimacija realiu laiku yra lėtesnė. Taip yra dėl to, kad ateities duomenų apdoroti neįmanoma nes jų nežinome. Aproksimuojant remiamasi prieš tai buvusia vidutine galios verte. Taip pat yra sąlyginai maža aproksimacijos konstantos k_{apros} vertė, lygi 0,09. Tokiu būdu išvengiama staigių aproksimacinės kreivės šuolių, tačiau atsiranda minėtasis vėlavimas.

Atlikus ekonominį palyginimą, apskaičiuota, jog vėjo elektrinės su srautine baterija ir valdikliu sistema pabrangsta 4,27%. Taigi, įvertinus vėjo elektrinės naudą elektros tinklui, darome išvadą, jog tokias elektrines statyti apsimoka.

IŠVADOS

1. Atlikta akumuliatorinių kaupiklių analizė.
2. Ištirta vėjo elektrinės galios laikinė charakteristika.
3. Parinktas tinkamas akumuliatorinis kaupiklis tiriamajai 250kW galios vėjo elektrinei. Tai - 67,89kWh talpos srautinė baterija. Norint įrengti vėjo elektrinę su srautine baterija, 1kW elektrinės galios reikia 0,27 kWh baterijos energijos.
4. Sukurtas vėjo elektrinės su akumuliatoriniu kaupikliu valdymo modelis, sumažinantis generuojamos galios švytavimus. Tai pasiekta sukūrus baterijos įkrovimo ir iškrovimo algoritmą naudojant PID valdiklį, bei generuojamos galios aproksimacijos realiu laiku algoritmą.
5. Srautinės baterijos su valdikliu sistema sudaro 4,27% bendros vėjo elektrinės kainos. Atsižvelgus į techninę naudą ir ekonominį palyginimą daroma išvada, jog vėjo elektrinę su srautine baterija statyti yra naudinga.

LITERATŪRA

Knygos:

1. Sharad W. Mohod, Mohan V. Aware. Power Quality and Grid Code Issues in Wind Energy Conversion System. 2013, [Žiūrėta 2015 – 05 – 15]. Prieiga per internetą: http://cdn.intechopen.com/pdfs/43903/InTech-Power_quality_and_grid_code_issues_in_wind_energy_conversion_system.pdf

Moksliniai straipsniai:

2. Toshio SHIGEMATSU. Redox Flow Battery for Energy Storage. 2011. [Žiūrėta 2014 – 11 – 29]. Prieiga per internetą: <http://global-sei.com/technology/tr/bn73/pdf/73-01.pdf>
3. Audrius Baranauskas, Linas Gelažanskas, Mindaugas Ažubalis, Kelum A.A. Gamage. Control Strategy for Balancing Wind Power using Hydro Power and Flow Batteries. 2014. [Žiūrėta 2015 – 05 – 15]. Prieiga per internetą: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6850451>
4. Radil Lukas, Bartosik Tomas, Mastny Petr. Problems of wind power plants from point of view of grid. 2009, [žiūrėta 2014 – 06 – 18]. Prieiga per internetą: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/lalaguna/EPREWA/EPREWA58.pdf>.
5. K.C. Divya, Jacob Østergaard. Battery energy storage technology for power systems—An overview. 2008. [Žiūrėta 2014 – 09 – 15]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608002642>.
6. Yue Yuan, Xinsong Zhang, Ping Ju, Kejun Qian, Zhixin Fu. Applications of battery energy storage system for wind power dispatchability purpose. 2012, [žiūrėta 2014 – 06 – 18]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779612002088>.
7. H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron. Energy storage systems – characteristics and comparisons. 2008, [žiūrėta 2014 – 06 – 18]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>.
8. M. Khalid, A.V. Savkin. Minimization and control of battery energy storage for wind power smoothing: Aggregated, distributed and semi-distributed storage. 2013, [žiūrėta 2014 – 06 – 18]. Prieiga per internetą: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113005223>.

9. Toshikazu Shibata, Takahiro Kumamoto, Yoshiyuki Nagaoka, Kazunori Kawase, Keiji Yano. Redox Flow batteries for the Stable Supply of Renewable energy. 2013. [Žiūrėta 2015 – 03 – 13]. Prieiga per internetą:
<http://global-sei.com/technology/tr/bn76/pdf/76-03.pdf>
10. V. Adomavičius. Šiuolaikinės elektros energijos kaupikliai. Kaunas, 2011

Internetinė svetainė:

11. Tina Casey. Shot Of Adrenalin For Super-Hot Solar Market: Vanadium Flow Batteries. 2014, [Žiūrėta 2015 – 05 – 10]. Prieiga per internetą:
<http://cleantechnica.com/2014/10/23/shot-of-energy-storage-adrenaline-from-flow-batteries/>
12. PID Theory explained. [Žiūrėta 2015 – 04 – 05] Prieiga per internetą:
<http://www.ni.com/white-paper/3782/en/>
13. http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller. [Žiūrėta 2015 – 05 – 01]
14. <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/garg1/> [Žiūrėta 2014 – 11 – 23]
15. Z. Chen. Issues of Connecting Wind Farms into Power Systems. 2005. . [Žiūrėta 2015 – 04 – 05]. Prieiga per internetą:
<http://www.science.smith.edu/~jcardell/Readings/Wind/Chen%20-%20issues.pdf>

Straipsnis iš žurnalo

16. Informacija apie Lietuvos vėjo elektrinių teisinę ir finansinę situaciją. 2010. [Žiūrėta 2014 – 06 – 18]. Prieiga per internetą :
http://www.technologijos.lt/n/technologijos/energija_ir_energetika/S-11755/straipsnis/Vejo-jegaines-Lietuvoje:-teisine-ir-finansine-situacija?l=2&p=1.

1 PRIEDAS. PAGRINDINIŲ SKAIČIAVIMŲ REZULTATAI

1 lentelė. Pagrindinių skaičiavimų rezultatų lentelė

P_{gen}, kW	$P_{aprosk1}, kW$	P_{bat1}, kW	$P_{bendra1}, kW$	$P_{aprosk2}, kW$	P_{bat2}, kW	$P_{bendra2}, kW$
50,33	65,87	15,54	64,66	65,00	14,67	63,86
46,00	61,99	15,85	61,85	63,68	17,55	62,17
44,33	58,46	13,83	58,17	62,09	17,46	60,41
30,33	55,25	24,50	54,83	60,49	29,69	57,67
40,33	52,36	11,38	51,71	57,78	16,70	55,67
38,00	49,79	11,01	49,01	56,21	17,29	53,87
54,00	47,51	-7,38	46,62	54,57	-0,52	53,43
49,33	45,51	-4,67	44,67	54,52	4,08	53,01
47,33	43,80	-4,36	42,97	54,05	5,55	52,36
45,67	42,35	-4,12	41,55	53,45	6,54	51,60
45,33	41,16	-4,96	40,38	52,75	6,09	50,85
43,33	40,22	-3,87	39,46	52,08	7,35	50,00
35,67	39,52	3,12	38,78	51,29	14,13	48,58
41,00	39,05	-2,73	38,27	49,89	7,24	47,54
57,00	38,80	-18,97	38,03	49,09	-9,66	46,72
58,00	38,77	-19,87	38,13	49,80	-9,90	47,46
44,00	38,93	-5,56	38,44	50,54	4,89	48,38
45,67	39,29	-6,83	38,83	49,95	2,56	47,89
56,67	39,83	-17,24	39,42	49,56	-8,87	47,24
58,33	40,55	-18,06	40,27	50,20	-9,86	47,84
70,67	41,43	-29,37	41,30	50,93	-21,41	47,72
73,33	42,47	-30,86	42,47	52,71	-22,16	49,57
76,33	43,67	-32,66	43,67	54,57	-23,15	51,49
65,67	45,01	-20,66	45,01	56,52	-10,36	54,60
63,33	46,48	-16,85	46,48	57,35	-7,13	55,73
55,00	48,08	-6,92	48,08	57,89	1,78	56,56
38,00	49,80	11,80	49,80	57,63	18,49	54,96
40,00	51,63	11,63	51,63	55,86	14,54	53,31
46,33	53,57	7,23	53,57	54,43	6,63	52,33
52,67	55,60	2,93	55,60	53,70	-0,51	52,08
43,33	57,72	14,39	57,72	53,61	8,72	51,25
41,33	59,93	18,59	59,93	52,69	9,69	50,14
61,00	62,21	1,21	62,21	51,66	-11,11	49,16
61,67	64,56	2,89	64,56	52,50	-10,87	50,08
73,33	66,97	-6,36	66,97	53,33	-21,65	50,13
74,33	69,44	-4,90	69,44	55,13	-20,70	52,14
83,33	71,96	-11,38	71,96	56,86	-27,82	53,45
80,33	74,52	-5,82	74,52	59,24	-22,23	56,46
76,67	77,11	0,45	77,11	61,14	-16,50	58,96
79,67	79,74	0,08	79,74	62,54	-17,98	60,35
79,67	82,40	2,73	82,40	64,08	-16,30	62,15
82,00	85,07	3,07	85,07	65,48	-17,10	63,61

P_{gen}, kW	P_{aprosk}, kW	P_{bat}, kW	P_{bendra}, kW	$P_{aprosk2}, kW$	P_{bat2}, kW	$P_{bendra2}, kW$
78,67	87,76	9,09	87,76	66,97	-12,14	65,61
116,67	90,46	-26,21	90,46	68,02	-48,99	63,88
102,00	93,15	-8,85	93,15	72,40	-29,60	70,09
106,00	95,85	-10,15	95,85	75,06	-30,94	72,65
89,33	98,54	9,21	98,54	77,85	-11,49	76,95
84,33	101,22	16,89	101,22	78,88	-5,45	78,46
87,33	103,88	16,55	103,88	79,37	-7,96	78,75
72,00	106,52	34,52	106,52	80,09	8,09	79,46
85,33	109,13	23,80	109,13	79,36	-5,97	78,89
118,00	111,71	-6,29	111,71	79,90	-38,10	76,92
73,00	114,26	41,26	114,26	83,33	10,33	82,52
105,33	116,76	11,33	116,66	82,40	-22,94	80,61
102,00	119,23	17,02	119,02	84,46	-17,54	83,09
85,00	121,64	36,27	121,27	86,04	1,04	85,96
86,00	124,01	37,29	123,29	85,95	-0,05	85,94
90,00	126,32	35,24	125,24	85,95	-4,05	85,64
110,67	128,57	16,48	127,14	86,32	-24,35	84,42
114,67	130,77	14,49	129,15	88,51	-26,16	86,47
123,67	132,89	7,45	131,11	90,86	-32,80	88,30
139,67	134,95	-6,60	133,06	93,81	-45,85	90,24
157,67	136,94	-22,60	135,07	97,94	-59,73	93,28
138,33	138,85	-1,21	137,12	103,32	-35,02	100,58
129,33	140,69	9,60	138,94	106,47	-22,87	104,68
158,67	142,45	-18,09	140,57	108,53	-50,14	104,61
186,00	144,13	-43,64	142,36	113,04	-72,96	107,34
164,33	145,72	-20,07	144,26	119,60	-44,73	116,11
141,67	147,23	4,24	145,90	123,63	-18,04	122,22
157,00	148,65	-9,74	147,26	125,25	-31,75	122,78
173,33	149,98	-24,69	148,64	128,11	-45,22	124,58
156,33	151,21	-6,28	150,05	132,18	-24,15	130,30
169,00	152,36	-17,77	151,23	134,35	-34,65	131,65
170,67	153,40	-18,27	152,40	137,47	-33,19	134,88
162,33	154,35	-8,85	153,48	140,46	-21,87	138,75
142,33	155,21	12,06	154,39	142,43	0,10	142,42
139,67	155,96	15,36	155,02	142,42	2,75	142,21
172,33	156,62	-16,81	155,52	142,17	-30,16	139,82
132,00	157,17	24,20	156,20	144,89	12,89	143,88
155,00	157,62	1,41	156,41	143,73	-11,27	142,85
131,33	157,97	25,40	156,73	144,74	13,41	143,70
144,00	158,22	12,73	156,73	143,53	-0,47	143,50
149,33	158,36	7,40	156,73	143,58	-5,76	143,13
136,00	158,40	20,68	156,68	144,09	8,09	143,46
164,33	158,33	-7,94	156,40	143,37	-20,97	141,73
160,67	158,17	-4,40	156,26	145,25	-15,41	144,05
200,67	157,90	-44,67	156,00	146,64	-54,03	142,42

P_{gen}, kW	P_{aprosk}, kW	P_{bat}, kW	P_{bendra}, kW	$P_{aprosk2}, kW$	P_{bat2}, kW	$P_{bendra2}, kW$
205,33	157,52	-49,38	155,95	151,50	-53,83	147,30
151,33	157,04	4,51	155,84	156,35	5,01	155,96
136,67	156,46	18,54	155,21	155,90	19,23	154,40
116,67	155,78	37,67	154,34	154,17	37,50	151,24
153,33	155,00	-0,14	153,20	150,79	-2,54	150,59
150,67	154,12	1,62	152,29	151,02	0,35	150,99
171,33	153,14	-20,06	151,27	150,99	-20,35	149,40
141,00	152,06	9,33	150,33	152,82	11,82	151,90
161,00	150,88	-11,96	149,04	151,76	-9,24	151,03
156,00	149,61	-8,15	147,85	152,59	-3,41	152,32
175,00	148,25	-28,47	146,53	152,89	-22,11	151,17
148,00	146,80	-2,72	145,28	154,88	6,88	154,35
198,67	145,25	-54,92	143,74	154,26	-44,40	150,80
171,00	143,62	-28,47	142,53	158,26	-12,74	157,27
191,33	141,90	-50,30	141,03	159,41	-31,93	156,92
144,33	140,10	-4,71	139,62	162,28	17,95	160,88
148,67	138,22	-10,88	137,78	160,67	12,00	159,73
138,67	136,26	-2,75	135,92	159,59	20,92	157,95
138,33	134,23	-4,42	133,91	157,70	19,37	156,19
151,67	132,12	-19,82	131,85	155,96	4,29	155,62
136,00	129,94	-6,17	129,83	155,57	19,57	154,05
133,67	127,69	-6,02	127,65	153,81	20,14	152,24
118,67	125,38	6,71	125,38	152,00	33,33	149,40
118,00	123,01	4,98	122,98	149,00	31,00	146,58
107,33	120,58	13,18	120,52	146,21	38,88	143,17
118,00	118,10	-0,07	117,93	142,71	24,71	140,78
147,33	115,57	-31,93	115,41	140,49	-6,85	139,95
155,67	112,99	-42,68	112,99	141,10	-14,56	139,97
122,67	110,37	-12,30	110,37	142,41	19,75	140,87
89,00	107,71	18,71	107,71	140,64	51,64	136,61
125,00	105,02	-19,98	105,02	135,99	10,99	135,13
98,33	102,29	3,96	102,29	135,00	36,67	132,14
71,33	99,54	28,21	99,54	131,70	60,37	126,99
60,33	96,78	36,44	96,78	126,27	65,93	121,12
103,00	93,99	-9,01	93,99	120,33	17,33	118,98
101,00	91,20	-9,80	91,20	118,77	17,77	117,39
79,67	88,39	8,73	88,39	117,17	37,51	114,25
63,67	85,59	21,92	85,59	113,80	50,13	109,89
66,67	82,79	16,07	82,74	109,29	42,62	105,96
52,67	80,00	27,14	79,81	105,45	52,78	101,33
55,33	77,23	21,46	76,79	100,70	45,37	97,16
36,67	74,48	37,18	73,84	96,62	59,95	91,94
40,33	71,75	30,44	70,77	91,22	50,89	87,25
47,67	69,06	20,12	67,79	86,64	38,97	83,60
40,67	66,40	24,27	64,93	83,13	42,47	79,82

P_{gen}, kW	P_{aprosk}, kW	P_{bat}, kW	P_{bendra}, kW	$P_{aprosk2}, kW$	P_{bat2}, kW	$P_{bendra2}, kW$
37,33	63,79	24,75	62,08	79,31	41,98	76,04
46,67	61,23	12,60	59,27	75,53	28,87	73,28
48,00	58,73	8,62	56,62	72,94	24,94	70,99
41,33	56,29	12,74	54,07	70,69	29,36	68,40
50,00	53,92	1,56	51,56	68,05	18,05	66,64
56,33	51,63	-7,12	49,22	66,42	10,09	65,64
51,00	49,43	-3,97	47,03	65,52	14,52	64,38
47,33	47,31	-2,41	44,92	64,21	16,88	62,89
59,67	45,30	-16,77	42,89	62,69	3,02	62,46
66,67	43,39	-25,58	41,08	62,42	-4,25	62,09
81,33	41,59	-41,87	39,46	62,80	-18,53	61,35
94,67	39,92	-56,58	38,09	64,47	-30,20	62,11