

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JURGITA ČERNECKIENĖ

VĖJO ENERGIJOS NAUDOJIMO PASTATUI
ŠILDYTI TAIKANT HIDRAULINĘ SISTEMĄ
TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2017, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2017 metais Kauno technologijos universiteto Statybos ir architektūros fakulteto Pastatų energinių sistemų katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Tadas Ždankus (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:

<http://ktu.edu>

Redagavo:

Rozita Znamenskaitė (leidykla “Technologija”)

© J. Černeckienė, 2017

ISBN

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB)

PAGRINDINĖS DISERTACIJOJE VARTOJAMOS SANTRUMPOS

- ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos
- IPCC – Tarpvyriausybinė klimato kaitos komisija (angliškai – *Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- ES – Europos Sąjunga
- AEI – atsinaujinantys energijos išteklių
- EURIMA – Europos šiluminės izoliacijos gamintojų asociacija (angliškai – *European Insulation Manufacturers Association*)
- SAP – Jungtinės Karalystės pastatų energinio naudingumo vertinimo reglamentas (angliškai – *The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings*)
- VEN – vėjo energiją naudojančios (įrenginiai)
- HA – horizontaliosios ašies (vėjo jėgainė)
- VA – vertikaliosios ašies (vėjo jėgainė)
- ISO – Tarptautinė standartų organizacija (angliškai – *International Standard Organization*)
- EUROSTAT – Europos Sąjungos statistikos tarnyba
- EEA – Europos energetikos agentūra
- STR – statybos techninis reglamentas

TURINYS

IVADAS	5
1. LITERATŪROS APŽVALGA	8
1.1. Klimato kaita, pasaulinės, Europos Sąjungos ir Lietuvos Respublikos energetikos politikos gairės	8
1.2. Pastatuose naudojamos energijos rūšys ir pastatų energijos poreikiai	11
1.3. Vėjo energijos potencialo įvertinimas	13
1.4. Vėjo energijos konvertavimas	20
1.5. Šiluminės energijos generavimas ir kaupimas	24
1.6. Literatūros apžvalgos išvados	31
2. MECHANINĖS VĖJO ENERGIJOS KONVERTAVIMO Į ŠILUMINĘ ENERGIJĄ EKSPERIMENTINIAME HIDRAULINIAME ĮRENGINYJE TYRIMAS	32
2.1. Eksperimentinio įrenginio konstrukcija ir matavimo įranga	32
2.2. Tyrimo metodika	36
2.2.1. Simuliuojamo vėjo energijos šaltinio mechaninių savybių nustatymas	37
2.2.2. Hidraulinio įrenginio šilumos konvertavimo savybių nustatymas	42
2.3. Eksperimentinio tyrimo eiga ir rezultatai	45
2.4. Hidraulinio įrenginio darbo optimizavimas	55
2.5. Išvados	58
3. KONVERTUOTOS MECHANINĖS VĖJO ENERGIJOS PRITAIKYMAS PASTATO ENERGIJOS POREIKIAMS	59
3.1. Energijos poreikių pastate tyrimas	59
3.2. Vėjo energiją į šilumą konvertuojančių įrenginių integravimas į pastato šildymo sistemą	67
3.3. Vėjo energijos integravimo į pastato šildymo sistemą algoritmas ..	71
3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų patikimumas ir atkuriamumas	74
3.5. Išvados	76
BENDROSIOS IŠVADOS	78
LITERATŪROS SĄRAŠAS	79
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	86
PRIEDAI	88

ĮVADAS

Pasaulinė bendruomenė jau nuo Jungtinių Tautų bendrosios klimato kaitos konvencijos Kioto protokolo paskelbimo reiškia aiškų susirūpinimą dėl klimato kaitos pokyčių, kuriuos sąlygoja vis didėjanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) koncentracija. 1997 m. 3-iosios Jungtinių Tautų klimato konferencijos metu išleistame dokumente pažymima, kad išsivysčiusios ir besivystančios šalys turi prisiimti didžiausią atsakomybę už pasauliniu mastu vykstančią ŠESD emisiją, kuri susidaro norint patenkinti augančius šalių vystymosi poreikius. Bendras ŠESD emisijų didėjimas sukelia Žemės paviršiaus bei atmosferos atšilimą, ir tai gali turėti neigiamą poveikį ekosistemoms bei žmonijai (United Nations, 1992). 2015 m. Paryžiuje vykusioje 21-ojoje Jungtinių Tautų klimato konferencijoje buvo aiškiai nubrėžtos gairės suvaldyti klimato kaitos procesą tokia apimtimi, kad vidutinė Žemės temperatūra iki 2020 m. nepakiltų daugiau kaip 2 °C, lyginant su priešindustriniais laikais (United Nations, 2015).

Daug dėmesio energijos naudojimui turi būti skiriama statybų sektoriuje, nes apgyvendinimo ir paslaugų sektoriuose, 2014 m. duomenimis, buvo sunaudota 43 proc. visos Europos Sąjungos (ES) sunaudojamos energijos, o bendrai visoms reikmėms 11 proc. energijos buvo sunaudota šiluminės energijos forma (Eurostat, 2015, Eurostat, 2016). Platesnis atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimas sudarytų geresnes sąlygas įgyvendinti išipareigojimą iki 2020 m. sumažinti bendrąją šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją 20 proc. ir kartu suvaldyti klimato šiltėjimą (Europos Parlamentas ir Taryba, 2010), nes 2014 m. duomenimis 92 proc. šiluminės energijos buvo pagaminta deginant kurą (Eurostat, 2016). Kaip pirmąją alternatyvą kuro deginimui renkama naudoti tiesioginę saulės energiją, tačiau vėsaus klimato zonose saulės energijos potencialo pikai yra atvirkščiai proporcingi šiluminės energijos poreikiui, todėl iškyla energijos kaupimo bei saugojimo inžinerinės problemos ir su tuo susiję energijos nuostoliai.

Darbo aktualumas

Vėjo energija gali užtikrinti dalį pastatų šiluminės energijos poreikio. Vėjo energijos pasiskirstymas per metus koreliuoja su šiluminės energijos poreikiais vėsaus klimato zonoje (Černeckienė ir Ždankus, 2015; Galvonaitė ir kt., 2013). Pastatų šiluminės energijos poreikių užtikrinimas iš atsinaujinančių energijos šaltinių prisideda prie nulinės anglies dioksido emisijos technologijų plėtros ir klimato kaitos suregulavimo.

Tyrimo objektas

Vėjo energijos konvertavimas į šiluminę energiją hidrauliniame įrenginyje ir jos naudojimas pastatams šildyti.

Darbo tikslas

Išanalizuoti mechaninės vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją galimybes ir pritaikymą mažai energijos naudojančių pastatų šiluminės energijos

poreikiams, mechaninę vėjo energiją konvertuojant į šiluminę energiją hidrauliniam įrenginyje.

Darbo uždaviniai

1. Įvertinti būdingų mažai energijos naudojančių pastatų šildymo ir vėdinimo energijos poreikius, nustatant pastato šildymo sistemos šiluminę galią.
2. Išanalizuoti vėjo energetikos aspektu būdingų Lietuvos vietovių metinio vėjo energijos potencialo dinamiką ir jos atitikimą pastato šiluminės energijos poreikiams.
3. Elektros varikliu imituojant vėjo jėgainės darbą eksperimentiškai ištirti hidraulinio įrenginio šilumos gamybos dėsningumus, sudaryti hidraulinio įrenginio darbo kreives esant skirtingiems darbo režimams.
4. Išanalizuoti eksperimentinės hidraulinės sistemos automatinio reguliavimo galimybes, įvertinant energijos konvertavimo hidraulinėje sistemoje specifiką.
5. Sudaryti algoritmą, kuriuo vadovaujantis iš vėjo energijos konvertuota šiluminė energija gali būti integruota į pastato šildymo sistemą.

Mokslinių tyrimų metodai

Analitinis individualaus gyvenamojo pastato šilumos poreikių įvertinimas.

Analitinis klimatologinių sąlygų įvertinimas.

Hidraulinio įrenginio darbo režimų eksperimentinis tyrimas.

Mokslinis naujumas

Mechaninės energijos konversija į šiluminę energiją nagrinėta hidraulinėse sistemose kaip nepageidaujamas šalutinis reiškinys, bet nėra darbų, kuriuose nagrinėjamas šiluminės energijos generavimo procesas kaip pagrindinis sistemos uždavinys. Siekiant panaudoti vėjo, kaip atsinaujinančio energijos šaltinio, energiją pastatų šildymo sistemose, buvo sukurta eksperimentinė šilumą generuojanti hidraulinė sistema ir nustatyta šilumą generuojančios hidraulinės sistemos optimalaus darbo režimo valdymo lygtis, leidžianti suderinti hidraulinės sistemos darbą su pirminiu energijos šaltiniu – vėju. Modeliuojant hidraulinės sistemos darbą buvo atliekamos vėjo energijos simuliacijos apimant mažų vėjo greičių intervalą. Gauti tyrimo rezultatai ir sudarytas vėjo energijos integravimo į pastato šildymo sistemą algoritmas praplečia statybos inžinerijos mokslo šaką.

Praktinė darbo vertė

1. Atliekamo eksperimentinio tyrimo rezultatai gali būti taikomi ekonominiam vėjo energiją konvertuojančių hidraulinių sistemų įvertinimui.
2. Pagal atlikto tyrimo metodiką galimi įvairių techninių parametru hidraulinių sistemų, mechaninę energiją konvertuojančių į šiluminę energiją, tyrimai.
3. Atlikti tyrimai gali palengvinti prototipinio hidraulinio įrenginio ir jo automatizavimo sistemos sukūrimą bei įdiegimą realių pastatų šildymo sistemose.

Ginamieji disertacijos teiginiai

Tiesioginis mechaninės vėjo energijos konvertavimas į šiluminę energiją hidraulinėje sistemoje ir jos naudojimas pastato šildymui leidžia praplėsti vėjo energijos, kurios naudojimo metu nesusidaro ŠESD emisijos, taikymo ribas.

Vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją efektyvumas hidraulinėje sistemoje yra ne mažesnis nei 90 proc., ir išnaudoja vėjo energijos potencialą plačiose ribose.

Darbo aprobavimas

Disertacijos tema išspausdinti trys moksliniai straipsniai tarptautinėse duomenų bazėse esančiuose mokslo leidiniuose. Iš jų vienas straipsnis Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „Web of Science“ leidinyje, turinčiame citavimo indeksą ir du straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti dviejose tarptautinėse mokslinėse konferencijose.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro: įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas ir priedai.

Bendra disertacijos apimtis – 93 puslapiai. Disertacijoje yra 52 paveikslai, 21 lentelė. Rašant disertaciją buvo panaudotas 101 literatūros šaltinis.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Klimato kaita, pasaulinės, Europos Sąjungos ir Lietuvos Respublikos energetikos politikos gairės

Viena iš didžiausių autoritetą turinčių pasaulinių organizacijų, Tarpvyriausybinė Klimato Kaitos Komisija (IPCC), naujausiose savo ataskaitose (Pachauri ir Meyer, 2014; Stocker, Qin ir kt., 2013) kaip daugelio pasaulyje vykstančių gamtos anomalijų priežastį įvardija didėjančią anglies dioksido (CO₂) dujų emisiją dėl didėjančių iškastinio kuro naudojimo apimčių. Nors pati IPCC nėra mokslinė organizacija, ji remiasi tik moksliniais tyrimais bei stebėjimais pagrįstomis išvadomis ir, apibendrinusi mokslinius duomenis, formuoja pasaulinę energetikos politiką. Klimato kaitos klausimai sulaukia vis platesnio požiūrio į problemą ir vis dažniau nagrinėjami tarpdisciplininiame kontekste, kai suvokiama, kad energijos poreikių mažinimo ir tvarių energijos gamybos būdų problemos turi būti sprendžiamos lygiagrečiai bendradarbiaujant įvairių sričių specialistams (Girod et al., 2014, Heubaum ir Biermann, 2015).

Europos Sąjunga (ES) klimato kaitos problemas sprendžia formuluodama inžinerinių ir socialinių sričių uždavinius, kurie išdėstyti Europos Bendrijų Komisijos komunikate KOM(2006)545 „Efektyvaus energijos vartojimo veiksmų planas: išnaudoti potencialą“ (Europos Bendrijų Komisija, 2006). Sritis, į kurias ES atkreipia dėmesį kaip į turinčias didžiausią efektyvesnio energijos naudojimo potencialą, yra efektyvesnis energijos naudojimas pastatuose bei įrenginiuose, efektyvesnis energijos transformavimas bei transporto sektoriaus pertvarka (Europos Parlamentas ir Taryba, 2002). Taip pat atkreipiamas dėmesys į socialinį siūlomų pokyčių aspektą siekiant, kad visuomenę pasiektų aiški ir suprantama informacija apie energiją gaminančias bei naudojančias technologijas ir jų efektyvumą.

Kadangi, remiantis ES duomenimis, 40 proc. energijos sunaudojama gyvenamųjų pastatų ir paslaugų sektoriuje (Europos Parlamentas ir Taryba, 1993), pokyčiai šiame sektoriuje gali turėti pastebimą įtaką CO₂ emisijų mažinimui. Taip pat atkreipiamas dėmesys į ES energijos transformavimo sektoriaus efektyvumą, nes, remiantis 2005 m. duomenimis, transformavimo nuostoliai sudaro 33 proc. pirminės energijos sunaudojimo (Europos Bendrijų Komisija, 2006) ir šioje srityje matomas potencialas skatinti efektyvesnę energijos gamybą taikant prekybos taršos leidimais sistemą (Europos Parlamentas ir Taryba, 2003). Vėlesniuose ES komunikatuose, pavyzdžiui, KOM (2010) „2020 m. Europa. Pažangaus, tvaraus ir integracinio augimo strategija“ (Europos Komisija, 2010) jau iškeliami tikslai iki 2020 m. 20 proc. visos sunaudojamos energijos pagaminti naudojant atsinaujinančius energijos išteklius (AEI) ir energijos naudojimo efektyvumą padidinti 20 proc.. Įgyvendinant minėtas priemones ir pasiekus užsibrėžtus tikslus, būtų sukurta atitinkamai iki 600 tūkst. arba iki 1 mln. naujų darbo vietų ES, todėl kartu Europa spręstų ir nedarbo bei kitas socialines problemas.

Analogiška klimato taršos situacija susiklosčiusi ir Jungtinėse Amerikos Valstijose – pastatų sektoriaus inžinerinių sistemų eksploatacijos metu susidarancio CO₂ emisija sudaro 40 proc. visos valstijų taršos (United States Department of Energy, 2016).

Pasaulinė bendruomenė, ieškodama priemonių mažinti ŠESD emisijas, sprendžia visuotines klimato kaitos problemas, o atskiros šalys, kurių iškastiniai energijos ištekliai yra riboti ir nepatenkina šalies energijos poreikių (tarp jų yra ir Lietuva), lygiagrečiai sprendžia ir geopolitines bei šalies vystymosi problemas (Valodka ir Valodkienė, 2015, Blazev, 2015). Carvalho et al. (2017) prognozuoja, kad Rytų Europa, o ypač Baltijos šalys, turi didelį vėjo energetikos augimo potencialą (apie +30 proc.) ir pažymi, kad šaltuoju metų laikotarpiu rytinėje Europos dalyje turimas didesnis vėjo energijos srautas negu šiltuoju.

ES energiškai efektyvesnių, o kartu ir mažiau taršių technologijų skatinimas reglamentuotas direktyvomis, kurių svarbiausios statybos sektoriui yra 2002 m. gruodžio 16 d. direktyva dėl pastatų energinio naudingumo – 2002/91/EB, bei 2010 m. gegužės 19 d. nauja šios direktyvos redakcija – 2010/31/ES. Pastatų energinio naudingumo direktyvos nustato ir reglamentuoja pastatų energinio naudingumo sertifikavimo sistemą kaip pagrindinę priemonę bei įrankį ES narėms pasiekti tvaresnę statybos sektoriaus plėtrą ir įgyvendinti klimato apsaugos uždavinius. Ir nors ES kelia bendrus tikslus valstybėms narėms, dėl skirtingų klimato sąlygų bei statybos sektoriaus situacijos leidžiama pastatų energinio naudingumo direktyvų įgyvendinimą priderinti prie atskiros šalies poreikių. Atskirų šalių pastatų energinio naudingumo vertinimo pažanga apžvelgiama ataskaitose (Maldonado et al., 2015), kurios rengiamos Europos Komisijos iniciatyva.

Energinio naudingumo sertifikavimo proceso esmė yra įvertinti pastato eksploatavimo metu sunaudojamą energijos kiekį, analizuojant jį pagal skirtingas energijos rūšis bei energijos gamybos būdus, ir energijos gamybos metu išskiriamą CO₂ kiekį. Iškelti CO₂ kiekio mažinimo taikant pastatų energinio naudingumo reglamentavimo sistemą tikslai įgyvendinami keliomis pakopomis, kartu siekiama nesudaryti didelių kliūčių statybos inžinerijos procesuose, kadangi jie yra ganėtinai inertiški.

Pastatų energinio efektyvumo vertinimas įgyvendinamas pastatą analizuojant įvairiais aspektais, t. y. energijos sąnaudų aspektu, energijos naudojimo efektyvumo aspektu ir pastato energiniam poreikiams užtikrinti įdiegtų AEI naudojimo aspektu. Šie vertinimo aspektai gali būti analizuojami ir atskirai, nes jie atspindi technologiškai tiesiogiai nesusietas pastato atitvaras bei inžinerines sistemas, tačiau pokyčiai viename segmente turi tiesioginę įtaką kitam segmentui. Ši tendencija ypač pastebima vertinant sumažėjusius pastatų energijos poreikius šildymui bei galimybę šiuos poreikius užtikrinti ekonomiškai patraukliomis AEI naudojančiomis sistemomis.

Pastatų energinio naudingumo didinimas siejamas ne tik su naujų pastatų statyba, bet ir su pastatų renovacija. Skirtingi ES pastatų renovavimo scenarijai ir jų įtaka CO₂ emisijoms analizuojama Europos šiluminės izoliacijos gamintojų asociacijos EURIMA (*European Insulation Manufacturers Association*) ataskaitoje (Boermans, Bettgenhäuser, Offerman, & Schimschar, 2012), kur teigiama, kad 2,3 proc. Europos pastatų renovavimo sparta per metus, sumažinant pastatų energijos poreikius maždaug 58 proc., ir AEI diegimas leistų dėl pastatų šilumos poreikių išmetamų CO₂ dujų metines emisijas sumažinti 88–91 proc., lyginant 1990-ųjų ir prognozuojamų 2050-ųjų laikotarpį.

Prie AEI priskiriama saulės, vėjo, upių, grunto, buitinių atliekų ir biokuro energija, t. y. tokie energijos šaltiniai, kurių atsinaujinimas vyksta sąlygiškai trumpame cikle.

Saulės ir vėjo energija jos konvertavimo ir transformavimo į vartotojui reikalingą energijos formą metu neišmeta šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) ir jų priskyrimas „švariems“ energijos šaltiniams vienareikšmis. Fotovoltiniuose ar vandenį šildančiuose saulės kolektoriuose gaminama šiluminė bei elektros energija ir vėjo elektrinėse gaminama elektros energija apibūdinama nuliniu CO₂ emisijų faktoriumi, t. y. M_{CO2}=0 kg CO₂/kWh (Lietuvos Respublikos Aplinkos ministerija, 2015).

Grunto energija suprantama ir kaip požeminių šilto vandens telkinių ar srovių šiluminė energija, ir kaip giluminio bei paviršinio grunto masės energija. Požeminiai šilto vandens telkiniai yra sąlygiškai aukštos temperatūros (+30—+90 °C), tačiau jų išgavimas technologiškai sudėtingas ir ribotas teritorijose, todėl šis šaltinis naudojamas tik centralizuoto tipo sistemose, kur šiluminė energija tiekama daugeliui vartotojų. Grunto masės energija gali būti naudojama tiek urbanizuotose, tiek rečiau apgyvendintose teritorijose, gali būti kaip perteklinės šiluminės energijos akumulatorius (Allaerts, Coomans, Salenbien, 2015), tačiau jos konvertavimas ir transformavimas susijęs su papildomomis elektros energijos sąnaudomis. Grunto masės šiluminės energijos naudojimas apibūdinamas M_{CO2}=0,041–0,03 kg CO₂/kWh emisijų faktoriumi įvertinant, kad šiluminė energija transformuojama šilumos siurbliais. Šis dydis pateikiamas remiantis Jungtinės Karalystės pastatų energinio naudingumo sertifikavimo reglamentavimo baze (United Kingdom Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2014) ir šio šilumos šaltinio CO₂ emisijų faktorius tiesiogiai susijęs su tos vietovės, kurioje naudojamas šilumos siurblys, elektros energijos gamybos CO₂ emisijų faktoriumi.

Buitinių atliekų deginimas šilumos energijos gamybai apibūdinamas M_{CO2}=0,047 kg CO₂/kWh (United Kingdom Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2014) faktoriumi, todėl galima teigti, kad tai sąlygiškai „švarus“ energijos šaltinis. Buitinių atliekų sąvartynuose utilizuojamos atliekos taip pat irdamos išskiria CO₂, todėl atliekų deginimas traktuojamas kaip jų utilizavimas tvariu būdu.

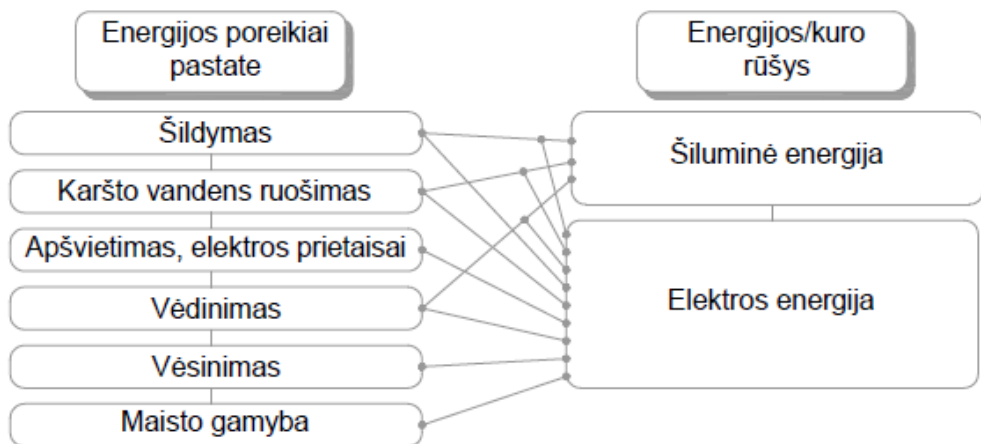
Biokuro sąvoka labai plati – šis terminas apima biodujų, bioalyvos, medienos, medienos atliekų, šiaudų deginimą, ir skirtingose šalyse biokuro tarša vertinama skirtingai. Remiantis Lietuvos Statybos techniniame reglamente STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ pateikiamomis vertėmis biokuras vertinamas nuliniu CO₂ emisijų faktoriumi, t. y. M_{CO2}=0 kg CO₂/kWh, tačiau, pavyzdžiui, Jungtinės Karalystės analogiškas dokumentas „The Government’s Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings“ (trumpinys – SAP 2012), biokurui priskiria nuo M_{CO2}=0,019 kg CO₂/kWh šilumos gamybai deginant medieną iki M_{CO2}=0,098 kg CO₂/kWh, kai šilumos gamybai deginamos biodujos.

Platus biokuro naudojimas energetikoje nėra vertinamas vienareikšmiškai (Haberl ir kt., 2010; Popp ir kt., 2014), todėl, sukūrus technologiškai racionalius būdus, kitų AEI diegimas turėtų vykti kiek įmanoma plačiau.

Jacobson ir Delucchi (2011) analizuoja galimybes visą pasaulio poreikius patenkinantį energijos kiekį pagaminti iš atsinaujinančių šaltinių – vėjo, vandens bei saulės teikiamos energijos, tačiau taip pat iškelia prielaidą, kad vėjo energijos konvertavimo į elektros energiją galios didinimas gali būti komplikuoatas dėl kai kurių medžiagų (pavyzdžiui, *neodymium*), reikalingų nuolatinių magnetų gamybai, ribotų išteklių. Dviejų dalių studijoje taip pat atkreipiamas dėmesys, kad didesnio vėjo energijos integravimo į bendrą energetikos sektorių procesas nebūtų toks jautrus plieno išteklių atsargoms, nes šis metalas yra efektyviai perdirbamas. Jacobson ir Delucchi (2011) taip pat prognozuoja, kad 2030 m. vėjo energetika, plėtojama sausumoje, bus pigiausia lyginant su kitomis energijos rūšimis ir jos savikaina bus 0,03 \$/kWh.

1.2. Pastatuose naudojamos energijos rūšys ir pastatų energijos poreikiai

Įvairios paskirties pastatų mikroklimato sąlygų bei kitų žmogaus poreikių užtikrinimui pastatuose gali būti naudojamos skirtingos energijos formos. 1.1 pav. pavaizduotoje pagrindinių pastatuose naudojamų energijos formų ir pastatų poreikių funkcinių sąsajų schemoje matome, kad nors elektros energija, kaip universaliausia energijos forma, gali užtikrinti visų pastatų inžinerinių sistemų funkcionavimą, ji, kur įmanoma, keičiama tiesiogine šilumine energija dėl mažesnės šiluminės energijos kainos. Elektros energijos tiekimas taip pat siejamas su mažu transformacijos efektyvumu bei skirstymo nuostoliais, o tai didina pirminių energijos šaltinių, tarp jų ir taršaus iškastinio kuro, naudojimą (Europos Bendrijų Komisija, 2006).



1.1 pav. Pagrindinių pastatuose naudojamų energijos formų ir pastatų poreikių funkcinės sąsajos (pav. autorės)

Taip pat neabejojama, kad net maksimaliai pastate naudojant šiluminę energiją, šiuolaikinės patalpų mikroklimato sąlygas užtikrinančios sistemos negali funkcionuoti be elektros energijos dėl cirkuliacinių siurblių, ventiliatorių, automatizavimo sistemų elementų.

Įgyvendinant pastatų energinio naudingumo direktyvas, Lietuvoje sukurta pastatų energinio naudingumo sertifikatų duomenų bazė. Ši duomenų bazė leidžia atlikti naujos statybos pastatų, pastatytų po atitinkamų ES teisės aktų perkėlimo į

nacionalinę šalių narių teisę, šiluminės energijos, naudojamos pastatams šildyti, poreikių analizę. Lietuvoje pastatų energinio naudingumo sertifikatų duomenų bazę administruoja Aplinkos ministerijos įsteigtas Statybos produkcijos sertifikavimo centras, kurio duomenų bazė yra visuomenei laisvai prieinama (Statybos produkcijos sertifikavimo centras, 2016). 1.1 lentelėje pateikiamos būdingo dydžio skirtingų energinio naudingumo klasių pastatų šildymo energijos sąnaudos.

1.1 lentelė. Šildymo energijos sąnaudos (Statybos produkcijos sertifikavimo centras, 2016)

Pastato energinio naudingumo klasė (analizuotų pastatų skaičius*)	Vidutinis pastato šildomas plotas, m ²	Energijos sąnaudos šildymui, kW/m ² /metai
C (analizuoti 268 pastatai)	180,01	165,60
B (analizuoti 309 pastatai)	180,79	66,60
A ir A+ (analizuoti 55 pastatai)	180,30	22,02

*analizuoti gyvenamosios paskirties pastatai

Iš 1.1 lentelėje pateiktų duomenų matoma, kad Lietuvoje įdiegtas STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“, kurio vienas iš tikslų – mažinti pastatuose naudojamos energijos poreikį, atspindi sėkmingai įgyvendinamos planuotos tvarios statybos sektoriaus plėtros tendencijas. Skirtingų energinio naudingumo klasių 632 gyvenamosios paskirties pastatų energijos naudojimo charakteristikų analizė rodo, kad naujos statybos pastatų, kurių energinio naudingumo charakteristikoms keliami tam tikros energinio naudingumo klasės reikalavimai, energijos sąnaudos šildymui turi tendenciją pastebimai mažėti, t. y. vidutiniškai 2,5 karto, lyginant laikotarpius nuo 2006 m. sausio 4 d., kai buvo pradėtos diegti energinio naudingumo direktyvos ir pastatams buvo keliamas reikalavimas pasiekti ne žemesnę nei C energinio naudingumo klasę, iki 2016 m. lapkričio 1 d., kai pastatams keliamas reikalavimas pasiekti ne žemesnę nei B energinio naudingumo klasę. Po 2016 m. lapkričio 1 d. pastatams keliamas reikalavimas pasiekti ne žemesnę nei A energinio naudingumo klasę, ir šio reikalavimo rezultatus galima prognozuoti jau dabar, nes daugelis statytojų aukštesnių energinio naudingumo charakteristikų siekia savo iniciatyva. Sertifikuoti 55 (2016-06-10 duomenimis) A ir A+ energinio naudingumo klasės pastatai, lyginant su analogiško dydžio C energinio naudingumo klasės pastatais naudoja vidutiniškai 7,5 karto mažiau šiluminės energijos. 2016-06-10 duomenimis, Lietuvoje dar nebuvo baigtų statyti A++ energinio naudingumo klasės pastatų, tačiau nuo 2021 m. tokios energinio naudingumo klasės reikalavimai bus taikomi visiems naujai statomiems pastatams.

Mažėjant pastatų šilumos nuostoliams, kartu kinta ir pastatų šildymo sistemų techninės charakteristikos. Pirmiausia šildymo sistemos pokyčiai atsispindi bendroje šildymo sistemos galioje, šildymo prietaisų matmenyse ir į pastatą tiekiamo šilumnešio temperatūrose. Pagal šią tendenciją tam tikros galios šiluminę energiją generuojantys įrenginiai gali užtikrinti didesnę dalį pastatui reikalingos šiluminės energijos kiekio (Černeckienė ir Ždankus, 2015), lyginant su energiška mažiau efektyviais pastatais (C ir žemesnės energinio naudingumo klasės, t. y. pastatai, kurių

energijos naudojimo savybės buvo pasiektos praktiškai iki STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“ įsigaliojimo). Mažėjant reikalingai šildymo sistemų galiai, AEI energiją konvertuojantys įrenginiai tampa mažesni ir priimtini platesniam inžineriniam pritaikymui tiek užmiesčio, tiek urbanizuotose vietovėse.

Analizuojant pastato šiluminės energijos poreikius ir jos generavimą iš AEI, svarbu atsižvelgti į šiluminės energijos poreikių dinamiką per metus. Lietuvos teritorija yra vidutinių platumų klimato zonoje (Galvonaitė ir kt., 2007), kurioje išskiriamas Baltijos pajūrio regionas ir likusi Lietuvos dalis. Baltijos pajūrio regionas priskiriamas Pietinės Baltijos klimato posričiui (pagal B. Alisovo klimatų klasifikaciją), kuriame šalčiausio mėnesio vidutinė temperatūra svyruoja nuo $-1,4^{\circ}\text{C}$ iki $-1,9^{\circ}\text{C}$, o likusi Lietuvos dalis – Atlanto kontinentinės miškų srities pietvakariniam posričiui, kuriame šalčiausio mėnesio vidutinė temperatūra svyruoja nuo $-2,9^{\circ}\text{C}$ iki $-4,8^{\circ}\text{C}$ (Galvonaitė ir kt., 2013), remiantis 1981–2010 m. matavimų duomenimis. Tačiau pagal pastato masyvumą ir ištiklintų paviršių ploto procentinę dalį projektuojant pastato šildymo sistemas klimatas vertinamas išsamiau. Skaičiuojant pastato šildymo sistemos galią gali būti vertinama vietovės šalčiausios paros temperatūra, šalčiausio penkiadienio temperatūra arba šių temperatūrų vidurkis (Statybinė klimatologija RSN 156-94, 1995). Vidutinė paros temperatūra aktuali ir dėl energijos sąnaudų pastato šildymui prognozavimo, ir dėl šiluminės energijos kaupimo poreikių nustatymo. Nors naudojant tik vėjo energiją paros energijos svyravimai nėra aktualūs, tai aktualu į šildymo sistemą integruojant ir saulės energiją konvertuojančius įrenginius.

1.3. Vėjo energijos potencialo įvertinimas

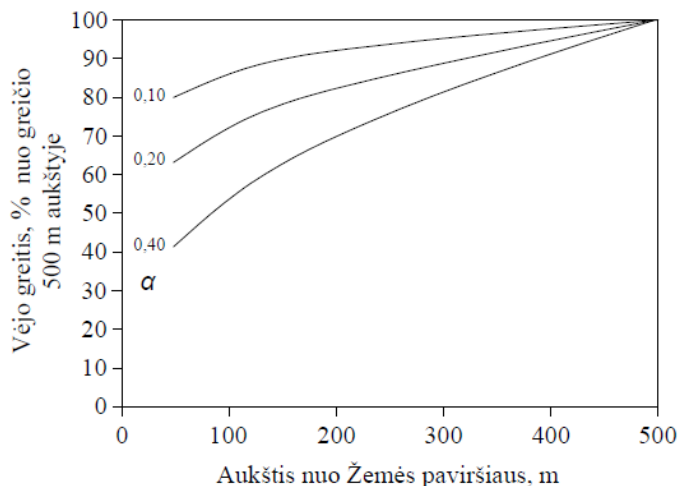
Vėjas yra horizontalus oro masės judėjimas, kuris susidaro dėl Žemės paviršiaus temperatūrų skirtumo, nes Saulė įšildo Žemės paviršių ir atmosferos orą nevienodai. Šaltas oras yra sunkesnis – atmosferoje jis leidžiasi žemyn, taip sukurdamas aukštojo slėgio zonas. Šiltas oras yra lengvesnis ir atmosferoje kyla aukštyn, taip sukurdamas žemojo slėgio zonas. Oras juda iš aukštojo slėgio zonos į žemojo slėgio zoną, kol jų slėgiai susilygina. Nors vėjas įvardijamas kaip atskiras AEI, jis savo kilme yra dėl Saulės spinduliuotės poveikio susiformavęs reiškinys. Analizuojant pagal vertikalųjį atmosferos pjūvį, vėjas skirstomas į geostrofinį ir paviršinį (Kytra, 2006). Geostrofiniu vadinamas tas vėjas, kuris susidaro aukščiau kaip 1 km aukštyje, žemiau susiformuojantis vėjas – paviršinis. Paviršinio vėjo sluoksnyje gali būti išskiriama vėjo zona, kurios aukštis yra iki 100 m, nes šioje zonoje oro masių judėjimas yra stipriai veikiamas paviršiaus šiurkštumo, t. y. Žemės paviršiaus nelygumų, statinių, želdinių ir pan. Natūralu, kad kliūtys mažina vėjo greitį, todėl didesnis vėjo greitis stebimas atvirose teritorijose, virš vandenynų ir jūrų. Prie kliūčių stebimos priešvėjinės ir pavėjinės zonos, kurios pasireiškia vėjo turbulentiškumu ir greičio sumažėjimu.

Pagal vietovės paviršiaus charakteristikas dažniausiai išskiriamos 4–6 vietovės šiurkštumo klasės arba šiurkštumo laipsniai (Hau, 2006; Kytra, 2006; Mukund, 2006), jų apibūdinimas pateikiamas 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Vietovės paviršiaus šiurkštumo charakteristikos vėjo energijos analizei (Hau, 2006; Kytra, 2006; Mukund, 2006)

Paviršiaus apibūdinimas	Šiurkštumo koeficientas	Šiurkštumo klasė
Vandens paviršius, tvirtas grunto paviršius	0,10	0
Atviras kraštovaizdis	0,15	1
Dirbamos žemės teritorija su pavienėmis sodybomis, gyvatvorėmis, krūmynais	0,20	2
Miškinga teritorija su kaimais	0,25	3
Dirbamos žemės teritorija su nedidelėmis gyvenvietėmis, giraitėmis	0,30	
Miesto teritorija su aukštais pastatais	0,40	–

Skirtingi šaltiniai pateikia ir dar išsamesnes vietovės paviršiaus šiurkštumo charakteristikas (Ackermann, 2012; Petrauskas, 2012; Troen ir Lundtang, 1989), tačiau vienos standartizuotos metodikos paviršiaus šiurkštumui vertinti nėra. Analizuojant duomenis, kuriuose nurodomos šiurkštumo charakteristikos, reikia atsižvelgti į tame pačiame šaltinyje pateikiamą vietovės paviršiaus šiurkštumo aprašymą.



1.2 pav. Vėjo greičio kitimo priklausomybė nuo paviršiaus šiurkštumo laipsnio (Mukund, 2006)

1.2 pav. pavaizduota vėjo greičio kitimo priklausomybė nuo aukščio ir vietovės paviršiaus charakteristikų; pagal ją galima spręsti, kaip skirtingas vietovės šiurkštumas paveikia vėjo greitį skirtinguose aukščiuose lyginant su vėjo greičiu 500 m aukštyje.

Greitis v yra pagrindinė charakteristika vėjo energetikos analizei. Oro masės, t. y. vėjo srauto judėjimo kinetinė energija E , remiantis klasikinės mechanikos teorija (Augulis ir kt., 2012), išreiškiama taip:

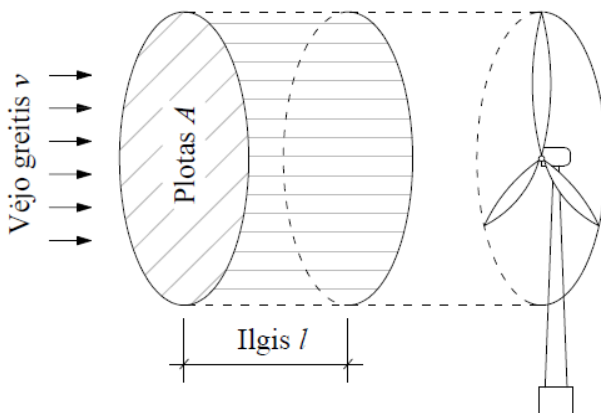
$$E = \frac{1}{2}mv^2; \quad (1)$$

čia: v – vėjo greitis, m/s; m – oro masė, kg.

Per vėjaratį pratekanti oro masė gali būti išreiškiama taip (Boyle G., 2012):

$$m = \rho V = \rho Al = \rho Avt; \quad (2)$$

čia: ρ – oro tankis, kg/m³; V – oro tūris, m³; A – plotas, m²; l – ilgis, m; v – vėjo greitis, m/s; t – laikas, s.



1.3 pav. Per vėjaratį pratekančios oro masės schema (Boyle G., 2012)

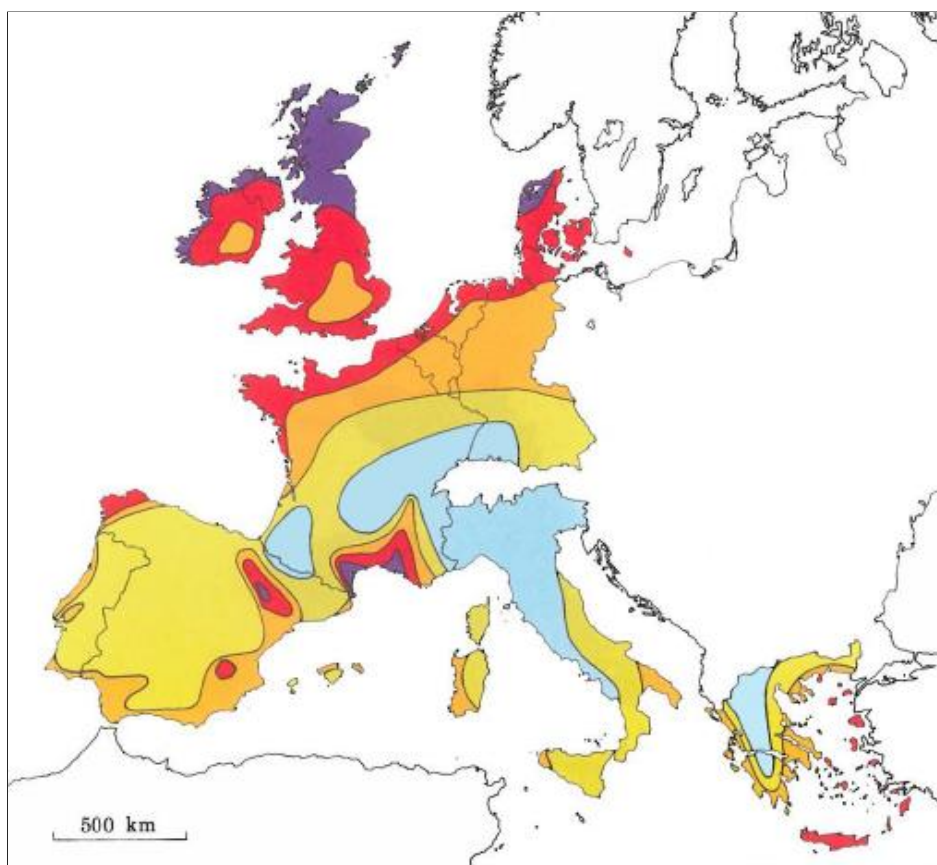
Taigi (1) formulė gali būti išreiškiama šitaip (Mukund, 2006):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Avt)v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \quad (3)$$

Galia P , kurią turi oro masė arba vėjo srautas, išreiškiama kaip energijos pokytis per laiko vienetą (Mukund, 2006):

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{1}{2}\rho Atv^3}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (4)$$

Pagal (3) formulę matome, kad maksimali teorinė vėjo srauto galia tiesiogiai priklauso nuo vėjo greičio trečiame laipsnyje, todėl vėjo greitis yra pagrindinis parametras, pagal kurį nustatomas vietovės tinkamumas vėjo energetikai ir kitos techninės bei ekonominės charakteristikos.

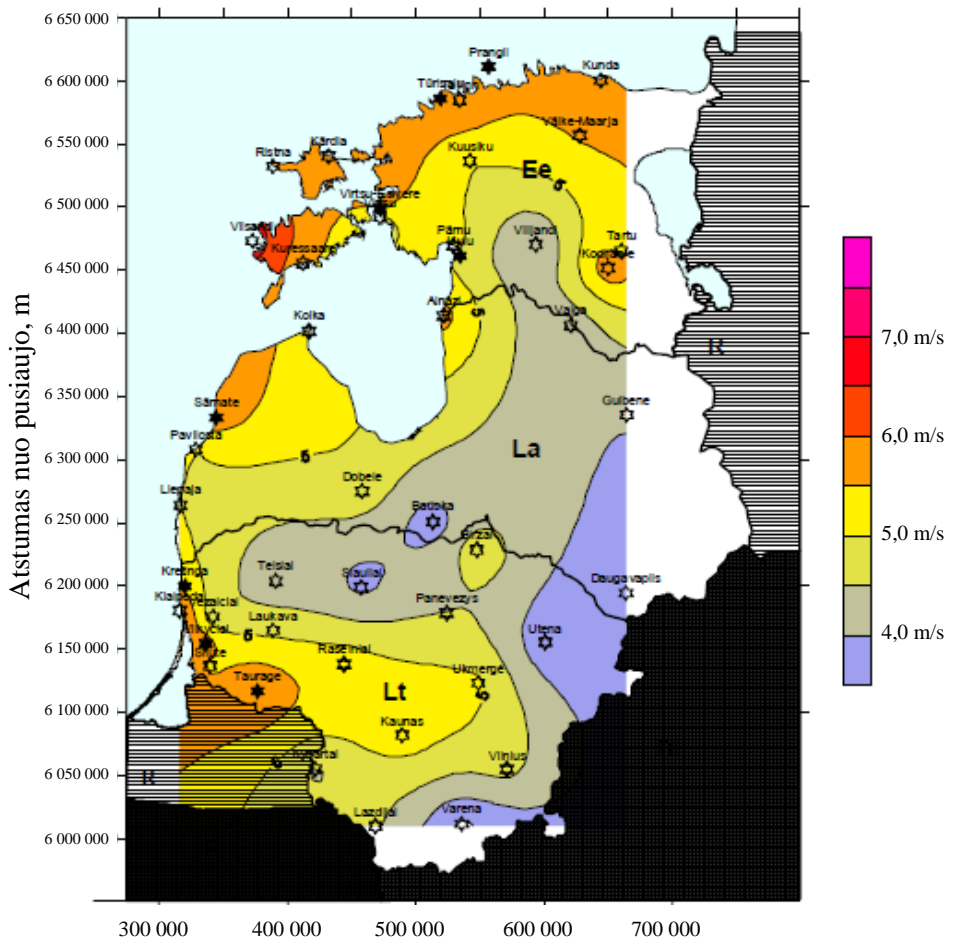


	Apgyvendinta teritorija		Atviras kraštovaizdis		Jūros pakrantės teritorija		Atvira jūra		Kalnuota teritorija	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
Purple	>6,0	>250	>7,5	>500	>8,5	>700	>9,0	>800	>11,5	>1800
Red	5,0–6,0	150–250	6,5–7,5	300–500	7,0–8,5	400–700	8,0–9,0	600–800	10,0–11,5	1200–1800
Orange	4,5–5,0	100–150	5,5–6,5	200–300	6,0–7,0	250–400	7,0–8,0	400–600	8,5–1,0	700–1200
Yellow	3,5–4,5	50–100	4,5–5,5	100–200	5,0–6,0	150–250	5,5–7,0	200–400	7,0–8,5	400–700
Light Blue	<3,5	<50	<4,5	<100	<5,0	<150	<5,5	<200	<7,0	<400

1.4 pav. Vidutinis vėjo greitis Europoje (50 m aukštyje, esant skirtingoms teritorijos paviršiaus šiurkštumo klasėms) (Troen & Lundtang Petersen, 1989)

Vėjo greičių matavimai įvairiose vietovėse atliekami meteorologinėse stotyse. Standartinis vėjo greičio matavimas meteorologinėje stotyje atliekamas 10 m aukštyje. Gautas matavimo rezultatas gali būti perskaičiuojamas pagal kitokį aukštį atsižvelgiant į vietovės paviršiaus šiurkštumą. Remiantis gautais matavimo rezultatais sudaromi teritorijų vėjo atlasai, kurie yra pagalbinis informacijos šaltinis vėjo energetikos plėtrai. Didelį įdirbį apibendrinant, standartizuojant įvairių meteorologinių stočių duomenis bei apdorojant juos specializuotomis kompiuterinėmis programomis yra padarę Danijos technikos universiteto (DTU) Vėjo energijos departamento mokslininkai. Remiantis meteorologinių stočių duomenimis

bei sukurto programinio paketo „WASP“ (angl. *Wind Atlas Analysis and Application Program*) sugeneruotais rezultatais, DTU mokslininkai yra sudarę daugiau kaip 35 pasaulio šalių ir regionų vėjo atlasus (1.4 pav. pateikiamas vidutinio vėjo greičio Europoje žemėlapis).



1.5 pav. Vidutinis vėjo greitis Lietuvos, Latvijos ir Estijos teritorijose (50 m aukštyje, teritorijos paviršius homogeniškas, 2-oji šiurkštumo klasė) (Rathmann, 2003)

Baltijos šalims – Lietuvai, Latvijai ir Estijai – sudarytas bendras Baltijos šalių vėjų atlasas (Rathmann, 2003). 1.5 pav. grafiškai pavaizduotas vidutinis vėjo greitis regione 50 m aukštyje, kai teritorijos paviršius homogeniškas ir apibūdinamas 2-ąja šiurkštumo klase. Baltijos šalių vėjo atlasas sudarytas pagal ilgamečius Lietuvos (1980–1990 m. ir 1993–1998 m. laikotarpių, 16 meteorologinių stočių), Latvijos (1992–2001 m. laikotarpio, 8 meteorologinių stočių) bei Estijos (1980–2001 m.

laikotarpio, 14 meteorologinių stočių) matavimų duomenis ir trumpalaikius DTU mokslininkų matavimų duomenis.

Lietuvos teritorijos vėjo energetinis potencialas atskirais metų mėnesiais gali būti skaičiuojamas taikant apibendrintus mėnesinių vėjo greičių skirtingose vietovėse duomenis (STR 2.01.02:2016 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas), kurie pateikiami priedų 1 lentelėje.

Vieno standartizuoto metodo, pagal kurį apibūdinamas teritorijos tinkamumas vėjo energetikai, nėra; galima remtis tik atskirų šaltinių siūlomais teritorijos įvertinimo metodais. Preliminarus vėjo, kaip energijos šaltinio, tinkamumo energetikai įvertinimas gali būti atliekamas pagal F. Boforto vėjo greičių skalę (Kytra, 2006; Rimkus, 2011), kuri buvo pirmąkart sudaryta 1806 m. Didžiojoje Britanijoje laivininkystės reikmėms, o XX a. trečiajame dešimtmetyje kategorizuota, susieta su tikslaus vėjo greičio matavimo rezultatais ir vietovės tinkamumu vėjo energetikai (1.3 lentelė).

1.3 lentelė. F. Boforto vėjo greičių skalė (Kytra, 2006)

Kategorija	Greitis, m/s	Charakteristika	Veikimo efektas	Sąlygų tinkamumas vėjo energetikai
0	0,0–0,4	Štilis	Dūmai kyla vertikaliai	Neveikia
1	0,4–1,8	Tylus	Dūmai kyla įstrižai	Neveikia
2	1,8–3,6	Lengvas	Šlama medžių lapai	Blogos
3	3,6–5,8	Silpnas	Medžių lapai svyruoja	Patenkinamos kai kuriems tipams
4	5,8–8,5	Vidutinis	Svyruoja plonos šakos	Geros
5	8,5–11	Gaivus	Pradeda svyruoti lapuočiai	Labai geros
6	11–14	Smarkus	Svyruoja storos šakos	Priimtinos mažoms vėjo jėgainėms
7	14–17	Stiprus	Svyruoja medžiai	Ribinės leistinos
8	17–21	Labai stiprus	Lūžta šakos	Neleistinos
9	21–25	Štormas	Nedideli sugriovimai	Neleistinos
10	25–29	Stiprus štormas	Ryškūs sugriovimai	Neleistinos
11	29–34	Labai stiprus štormas	Platūs sugriovimai	Neleistinos
12	>34	Uraganas	Naikinantys sugriovimai	Neleistinos

Naujesnę klasifikaciją siūlo Kreith ir Kreider (2011) skirstant teritorijas pagal tinkamumą vėjo energetikai į 7 klases (1.4 lentelė).

1.4 lentelė. Vėjo energijos potencialo klasifikavimas (Kreith & Kreider, 2011)

Vėjo galios klasė	Tinkamumas vėjo energetikai	Vėjo galios tankis 50 m aukštyje, W/m ²	Vidutinis vėjo greitis 50 m aukštyje, m/s
1	Nepakankamas	0–200	0,0–5,9
2	Nedidelis	200–300	5,9–6,7

3	Tinkamas	300–400	6,7–7,4
4	Geras	400–500	7,4–7,9
5	Labai geras	500–600	7,9–8,4
6	Išskirtinai geras	600–800	8,4–9,3
7	Puikus	>800	>9,3

Tiksliausias vietovės vėjo energetikos potencialo įvertinimas galimas atliekant konkrečios vietovės, kurioje planuojama vėjo energetikos plėtra, natūrinį vėjo greičių matavimą (Marčiukaitis, 2009). Turimi vėjo greičių matavimų konkrečioje vietovėje rezultatai apdorojami matematinės statistikos metodais įvertinant, kad vėjo greičio pasiskirstymas per metus tiksliausiai aprašomas Veibulo skirstiniu (Harris&Cook, 2014; Bilir et al., 2015), kai žinomi šio Veibulo skirstinio skalės ir formos parametrai.

Žvelgiant į vėjo energijos naudojimą pasauliniu lygiu, aktualus tampa bendras pasaulinis technologiškai ir ekonomiškai pagrįstas vėjo naudojimo energetikai potencialas. Čia egzistuoja daug šaltinių ir teorijų (Schindler ir kt., 2006, Johansson ir kt., 2004, Global Wind Energy Council, 2014) ir dažna bendra išvada yra tokia, kad egzistuojantis vėjo energijos potencialas gali užtikrinti didesnius energijos (konvertuojant vėjo energiją į elektros energiją) kiekius negu yra dabartiniai žmonijos poreikiai (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011; Lu et al., 2009).

Europos Energetikos Agentūra (EEA) savo 2009 m. techninėje ataskaitoje teigia, kad vėjo kaip pirminio energijos šaltinio potencialas vien Europoje yra 8,6 TW, vertinant techninį potencialą, ir 3,5 TW, taip pat vertinant ekonominį šio energijos šaltinio diegimo pagrįstumą (Cleveland, 2013).

Castro et al. (2011) siūlo pasaulinį vėjo energijos potencialą vertinti pagal principą „nuo viršaus – žemyn“, mažinant visuminę atmosferos kinetinę energiją P_0 (1200 TW) iki technologiškai prieinamo vėjo energijos potencialo P_T (~1 TW) šešiais koeficientais:

- $f_1=0,083$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kad ne visa atmosferos kinetinė energija yra technologiškai prieinama vėjo energetikai, t. y. galima išnaudoti tik iki 200 m aukščio egzistuojantį vėjo energijos potencialą;

- $f_2<0,2$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kad ne visas planetos paviršius tinkamas vėjo energetikai, t. y. eliminuojant daugiau kaip 200 m gylio jūras ir vandenynus, ledu padengtas teritorijas, miestus, miškus, parkus ir dėl kitų priežasčių saugomas teritorijas;

- $f_3<0,3$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kad tik dalis vėjo srauto kontaktuoja su vėjaračio mentėmis ir sukuria naudingą energiją konvertuojančio įrenginio sukimo momentą;

- $f_4<0,5$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kad tik dalis technologiškai vėjo energetikai priimtinių teritorijų bus tam pritaikytos;

- $f_5=0,75$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kad ne visą laiką vėjo jėgainė dirbs dėl per mažo arba per didelio vėjo greičio;

- $f_6=0,5$ – koeficientas, kuriuo įvertinama, kokia dalis su vėjaračiu kontaktuojančio srauto energijos paverčiama vartotojui naudinga energija.

Lu et al (2009) pateikia dešimties daugiausia CO₂ išskiriančių šalių duomenis ir vėjo energetikos potencialo prognozes, remiantis 2005 m. elektros energijos sunaudojimo duomenimis (1.5 lentelė).

1.5 lentelė. Metinis vėjo energijos potencialas, CO₂ emisijos ir elektros energijos sunaudojimas dešimtyje daugiausiai CO₂ išskiriančių šalių (Lu et al., 2009)

Šalis	CO ₂ emisijos, mln. t	Elektros energijos sunaudojimas, TWh	Vėjo energijos potencialas, TWh	
			Sausumoje	Jūroje
JAV	5956,98	3815,9	74 000	14000
Kinija	5607,09	2398,5	39 000	4600
Rusija	1696,00	779,6	120 000	23 000
Japonija	1230,36	974,1	570	2700
Indija	1165,72	488,8	2900	1100
Vokietija	844,17	545,7	3200	940
Kanada	631,26	540,5	78 000	21 000
Jungtinė Karalystė	577,17	348,6	4400	6200
Šiaurės Korėja	499,63	352,2	130	990
Italija	466,64	307,5	250	160

1.4. Vėjo energijos konvertavimas

Ankstesniame skyriuje aptartas vėjo energijos potencialas, tačiau ne visa energija, kurią turi judantis oro srautas, yra technologiškai paverčiama į vartotojui naudingą energiją. Pirminis technologinis įrenginys, kuris kontaktuoja su oro srautu, yra vėjaratis. Vėjaračio perimama galia P_{m_in} , t. y. iš vėjo srauto gaunamas energijos kiekis per laiko vienetą gali būti apskaičiuojamas pagal (1) formulę įvertinant, kad vėjaratis perima tik tiek energijos iš oro srauto, koks yra skirtumas tarp oro greičio prieš vėjaratį v ir už jo v_0 (Mukund, 2006):

$$P_{m_in} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} (v^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} G (v^2 - v_0^2); \quad (5)$$

čia: v – vėjo greitis prieš vėjaratį, m/s; v_0 – vėjo greitis už vėjaračio, m/s; G – masinis oro srautas, kg/s.

Masinis oro srautas G , remiantis (2) formule gali būti išreikštas kaip vėjo greičio prieš vėjaratį ir už vėjaračio aritmetinis vidurkis (Mukund, 2006):

$$G = \rho A \frac{v + v_0}{2}; \quad (6)$$

tada:

$$P_{m_in} = \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{v + v_0}{2} \right) \cdot (v^2 - v_0^2) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_0}{v} \right)^2 \right)}{2}. \quad (7)$$

Paskutinis narys (7) formulėje išskiria santykį tarp vėjo greičio prieš vėjaratį ir už vėjaračio, taip apibūdinant vėjaračio savybes naudingai perimti kinetinę vėjo energiją, ir šis nedimensinis dydis vadinamas vėjaračio efektyvumu arba vėjaračio galios koeficientu c_p :

$$c_p = \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right)}{2}; \quad (8)$$

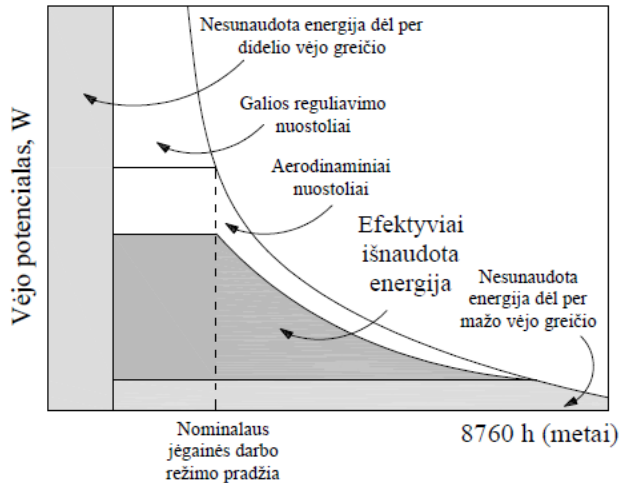
tada (Wu, 2011; Ginley ir Cahen, 2012):

$$P_{m_in} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_p. \quad (9)$$

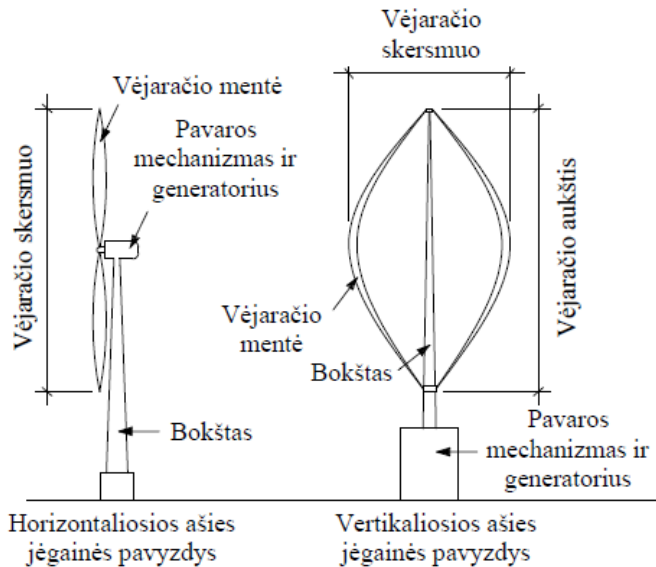
Maksimalus idealaus vėjaračio galios koeficientas c_p lygus 0,593 ir susidaro tokiomis sąlygomis, kai vėjo greitis už vėjaračio pristabdomas santykiu 2/3 lyginant su vėjo greičiu prieš vėjaratį. Šį dėsnį 1919 m. suformulavo ir įrodė vokiečių mokslininkas Albertas Betzas. A. Betzas publikavo savo studijos rezultatus 1920 m. straipsnyje „Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren“ („Teorinė maksimaliai vėjo energiją naudojančios vėjo jėgainės galios riba“), ir nuo to laiko A. Betzo dėsnis nėra pakeistas ar įrodytas kitaip (Jiang et al., 2015). A. Betzo dėsniumi apibūdinamas tam tikro darbinio taško energijos transformavimo maksimumas, tačiau eksploatuojant vėjo jėgainę susidaro ir daugiau nuostolių, kurie iš dalies buvo aptarti 1.3 skyriuje „Vėjo energijos potencialo įvertinimas“.

1.6 pav. pateikta Zafirakis et al. (2012) sudaryta energijos nuostolių dedamųjų schema; šie nuostoliai atsiranda konvertuojant vėjo energiją į elektros energiją per metų ciklą (Cleveland, 2013).

Vėjaračių konstrukcija gali būti labai įvairi, ir jų techninės savybės bei vėjo energijos konvertavimo savybės yra skirtingos. Vėjaračiai pagal savo konstrukciją skirstomi į dvi stambias grupes – vėjaračiai, kurių mentės sukasi apie horizontaliąją ašį (HA), ir vėjaračiai, kurių mentės sukasi apie vertikaliąją ašį (VA). Pagrindiniai HA ir VA vėjaračių konstrukcijos skirtumai ir jėgainės sudarančių elementų išsidėstymas pavaizduoti 1.7 pav.



1.6 pav. Energijos nuostolių pasiskirstymo metų cikle schema, kai vėjo energija konvertuojama į elektros energiją (Cleveland, 2013)



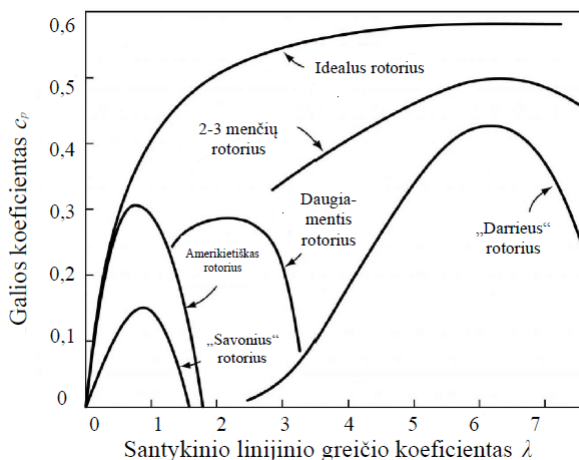
1.7 pav. Pagrindiniai horizontaliosios ir vertikaliosios ašies jėgainės sudarantys elementai (Cleveland, 2013)

Konkrečios vietovės vėjo charakteristikoms geriausiai pritaikytas vėjaratis gali būti parenkamas įvertinant vėjaracio galios koeficiento c_p priklausomybę nuo santykinio linijinio greičio koeficiento λ . Santykinio linijinio greičio koeficientas λ nurodo santykį tarp vėjaracio sukimosi kampinio greičio, vėjaracio skersmens, vėjo greičio ir yra apskaičiuojamas pagal formulę (Ackermann, 2012):

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}; \quad (10)$$

čia: ω – vėjaračio sukimosi kampinis greitis, rad/s; R – vėjaračio skersmuo, m; v – vėjo greitis, m/s.

Vienas iš šaltinių, pagal kurį gali būti atliekamas pirminis vėjaračio tipo parinkimas, yra 1974 m. sudaryta R.E. Wilson ir P.B.S. Lissaman skirtingo tipo vėjaračių galios koeficiento c_p priklausomybės nuo santykinio linijinio greičio koeficiento λ diagrama (1.8 pav.) (Kreith, 2011). Šioje diagramoje parodytos populiariausios konstrukcijos VA ir HA vėjaračių charakteristikos, tačiau egzistuoja ir daugiau įvairios konstrukcijos vėjaračių, kurių techninius parametrus tiria ir nurodo jų gamintojai. Vėjaračių menčių geometriją ir efektyvumą, jėgainės galios reguliavimą keičiant vėjaračio menčių padėtis, vėjaračio mentes veikiančias jėgas nagrinėja aerodinamikos mokslas (Herbert et al., 2007).



1.8 pav. Vėjaračių galios koeficiento c_p priklausomybė nuo vėjaračio santykinio linijinio greičio koeficiento: VA jėgainės – „Darrieus“, „Savonius“ rotorius; HA jėgainės – amerikietiškas, daugiamentis, 2–3 menčių rotorius (Wu, 2011)

Pagal 1.8 pav. pavaizduotas priklausomybes matoma, jog efektyviam vėjaračio darbui svarbu, kad vėjaračio sukimosi greitis būtų suderintas su vėjo greičiu, ir tik optimaliu kampiniu greičiu besisukantis vėjaratis vėjo energiją išnaudos maksimaliai.

Adomavičius (2009) atliko 5 geriausių HA bei VA jėgainių, naudojamų elektros energijos konvertavimui, daugiakriterinį palyginimą ir siūlo HA bei VA jėgainės lyginti pagal jų sąlyginę įrengimo kainą galios vienetui, Eur/W, sąlyginę galią, išgaunamą iš jėgainės konstrukcijos svorio vieneto, W/kg, bei sąlyginę galią, išgaunamą iš efektyvaus vėjaračio ploto vieneto, W/m². Šie kriterijai atspindi skirtingus, bet vienodai aktualius vėjo energetikos plėtrai, kriterijus – ekonominį (energijos savikaina K_{ew} , Eur/W), aplinkosauginį (jėgainei pagaminti reikalingų medžiagų kiekis K_{wk} , W/kg) ir urbanistinį/kraštovaizdinį (jėgainės dydis K_{vm} , W/m²).

1.6 lentelė. Geriausių HA vėjo elektrinių ir VA vėjo elektrinių pavyzdžių lyginamoji lentelė (Adomavičius, 2009)

	Lyginamųjų indeksų vertės		
	K_{ev} , Eur/W	K_{wk} , W/kg	K_{wm} , W/m ²
HA vėjo elektrinė	1,21	42,8	308,64
	<i>Proven 15</i>	<i>Simplex 350</i>	<i>Keith 2K</i>
VA vėjo elektrinė	2,63	16,67	384,62
	<i>Vertikalrotor</i>	<i>WindGen 1000</i>	<i>WindGen 1000</i>

Iš palygintų vėjo elektrinių charakteristikų, kurios pateiktos 1.6 lentelėje, matome, kad analizuotų HA vėjo jėgainių privalumai yra žemesnė energijos savikaina bei mažesnis sąlyginis jėgainės svoris. Tačiau norint vėjo energetiką plėtoti urbanizuotose teritorijose, VA jėgainės gali turėti svarių pranašumų dėl mažesnės užimamos erdvės.

1.5. Šiluminės energijos generavimas ir kaupimas

ES šiuo metu beveik visa vėjo energija yra konvertuojama į elektros energiją – taip galima teigti remiantis EUROSTAT (ES statistikos įstaiga) duomenimis, nes statistikoje nėra duomenų apie kitokios energijos formos, gaunamos iš vėjo energijos, kiekius. Remiantis stažuotės Danijos technikos universiteto Vėjo energetikos departamente patirtimi, yra duomenų, kad vėjo energija naudojama ir kitiems tikslams, tačiau pagaminami energijos kiekiai yra nežymūs ir daugiau eksperimentinio nei masinio technologijos diegimo pobūdžio. Kadangi vėsaus klimato zonose didelė dalis energijos sunaudojama šiluminės energijos forma, papildomas energijos konvertavimas nėra racionalus technologiniu požiūriu, ir šiluminės energijos generavimas iš vėjo energijos tampa aktualiu studijų objektu. Antras svarbus argumentas konvertuoti vėjo energiją tiesiogiai į šiluminę – energijos kaupimo galimybė. Bet kurio AEI didžiausias sprendžiamas iššūkis – tokio tipo energijos ir naudojimo poreikio nevienalaikiškumas, todėl energijos kaupimo sistema tampa viena aktualiausių AEI sistemos dedamųjų. Energijos kaupimo sistemos įdiegimas leidžia stabilizuoti bendrą centralizuoto energijos tiekimo tinklą bei padidinti energijos tiekimo patikimumą.

Kol vėjo energetikos dalis bendroje energetikos sistemoje yra nedidelė, išskylantys tinklo balansavimo uždaviniai yra išsprendžiami turimomis techninėmis priemonėmis, tačiau norint didinti vėjo energetikos skverbtį, elektros energijos tinklo balansavimo uždaviniui spręsti reikia papildomų investicijų į energetikos infrastruktūrą. Tam, kad vėjo jėgainių gaminami elektros energijos srautai nesudarytų tinklo balansavimo problemų, taip pat dėl ekonominių šios energetikos šakos subsidijavimo priežasčių atskirose šalyse nustatomos vėjo jėgainių statybos kvotos. Lietuvoje ši kvota sudaro 500 MW vertinant pagal įdiegtą galią (Lietuvos Respublikos Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas, 2011) ir buvo išdalyta jau 2015 m. viduryje. Iki 2017 m. pradžios Lietuvoje kvota padidinta nebuvo, siejant tokį vėjo energetikos skverbties pristabdymą ne tik su ekonominėmis priežastimis, bet ir su siekiu išlaikyti kokybiškai stabilų elektros energetikos tinklą. Kadangi formuojant bendrą energetikos politiką siekiama plačiau naudoti AEI, į vėjo energijos konvertavimą turi būti žvelgiama plačiau. Šiam tikslui gali pasitarnauti vėjo energijos

integravimas į vietinius energetikos tinklus bei vėjo konvertavimas į šiluminę energiją.

G. Xydis (2012) analizuoja 9,9 MW ir 4,95 MW galios elektros energiją gaminančias vėjo jėgaines ir nurodo, kad perteklinės vėjo energijos konvertavimas į šiluminę energiją yra pelningas investuotojui net įvertinant tai, kad už neparduotą energijos dalį gamintojams yra mokamos subsidijos. Jis nurodo, kad visoms suinteresuotoms šalims naudinga vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją forma leistų užtikrinti platesnę vėjo energetikos kaip vienos iš atsinaujinančių energijos formų integraciją. Kitoje G. Xydis et al. (2015) studijoje įvertinami elektros energiją generuojančioje vėjo jėgainėje susidarantys šiluminės energijos nuostoliai, kurie sudaro 5,9 proc., kai vėjo greitis viršija 13 m/s, o kai vėjo greitis svyruoja tarp 4 ir 7 m/s, energijos nuostoliai šilumos forma svyruoja nuo 20,4 iki 38,8 proc. 4–7 m/s vėjo greičių intervalas aktualus tokioms šalims kaip Lietuva, kurioje daugiau kaip pusę laiko pučia 4–7 m/s greičio vėjai (Rathmann, 2003).

Danijos technikos universiteto Nacionalinės tvarios energetikos laboratorijos mokslininkai 2013 m. Tarptautinės energetikos ataskaitoje „Energy Storage Options for Future Sustainable Energy Systems“ pažymi, kad energijos kaupimas šiluminės energijos forma šiandien yra nepelnytai primirštas, bet jo svarba ateityje augs (Larsen, 2013). H. Lund ir kt. vėjo energijos kaupimą šiluminės energijos forma mato kaip svarbią Danijos energetikos sistemos dedamąją, kuri leistų geriau subalansuoti energetikos sistemą ir padidinti vėjo energijos integraciją. Taigi matant šiluminės energijos kaupimo perspektyvą, aktualūs tampa švarios ir atsinaujinančios energijos konvertavimo į šiluminę energiją būdai.

Šilumos gamybos tiesiogiai iš mechaninės vėjo energijos principai jau yra aprašyti įvairių inžinierių ir mokslininkų darbuose. Tokio tipo įranga dažniausiai remiasi tūrinių hidraulinių mašinų (siurblių) naudojimu, kuriose kinetinė vėjaračio veleno energija verčiama potencine skysčio energija ir, sudarius dirbtinę kliūtį, dėl trinties į ją skysčio potencinė energija paverčiama šilumine (Maegaard et al., 2013). Originalios konstrukcijos prietaisus, naudojančius skysčio potencinę energiją 1950 m. aprašė ir užpatentavo Thomas E. Raymond („Fluid pressure energy translating device“, JAV) (Raymond, 1950), 1979 m. – W. J. Grenier („Fluid friction heater“, JAV) (Grenier, 1979). 1973–1974 m. B. Ashiklan („Wind operated heating system“) (Ashiklan, 1973, 1974) ir 1983 m. J. E. Knecht („Wind driven heating system“, JAV) (Knecht, 1978) užpatentavo analogiško tipo įrenginius, kuriems ne tik siūlė naudoti dėl skysčio trinties atsirandančią šilumą, bet ir kaip pirminės energijos šaltinį panaudojo vėjaratį. Manoma, kad toks susidomėjimas alternatyvia energija XX a. aštuntajame–devintajame dešimtmetyje galėjo būti sąlygotas 1973 m. kilusios pasaulinės naftos krizės, kai didelė žmonijos dalis pajuto aiškų iškastinio kuro trūkumą.

Paminėtinas ir Danijos mokslininkų bei technikos entuziastų indėlis į šilumą gaminančių vėjo jėgainių plėtrą. Danija tiek šiomis dienomis, tiek aštuntajame praėjusio amžiaus dešimtmetyje buvo viena iš pirmaujančių šalių vėjo energijos naudojimo srityje, vertinant pagal vienam šalies gyventojui tenkančią įdiegtą vėjo jėgainių galią (Ratinen & Lund P., 2015). Inžinieriai S. S. Kofoed ir R. Matzen iš Žemės ūkio inžinerijos instituto (Taastrup, Danija) 1973 m. sukūrė, išbandė ir po

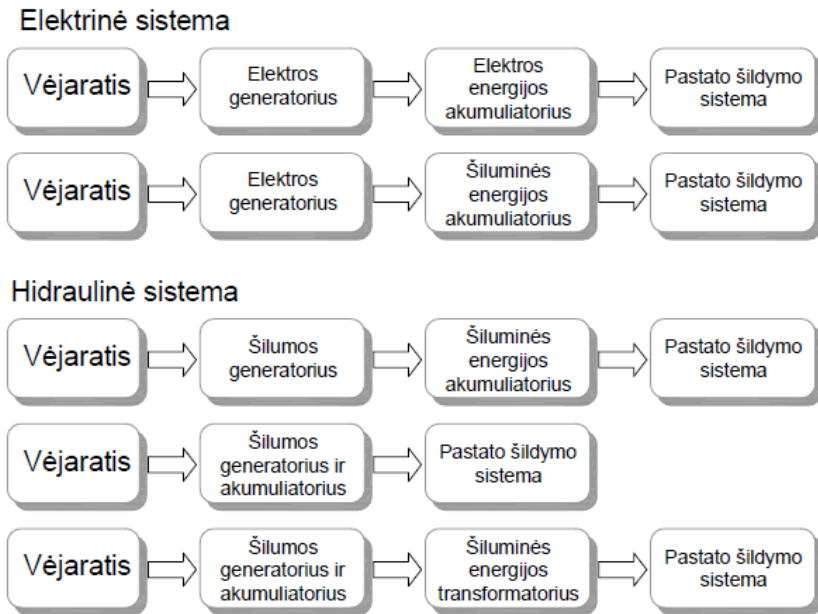
keleto metų patobulino vėjo jėgainę „Mark“ (versijos „Mark I“ bei „Mark II“), kuri gamino šiluminę energiją iš vėjo mechaninės energijos (Maegaard et al., 2013). Šiek tiek vėliau H. H. Ekner sukūrė vėjo jėgainę „Calorius“, kuri sulaukė ir mokslininkų dėmesio – šios konstrukcijos jėgainėi buvo atlikti galios ir triukšmo lygio bandymai (Paulsen, 1996) ir 1993–2000 m. Danijos įmonėje „Westrup“ sumontuotos ir paleistos eksploatuoti 34 „Calorius“ jėgainės (2012 m. duomenimis, 17 jų vis dar veikė). Literatūroje nedetalizuojama „Calorius“ konstrukcija, bet nurodomas bendras energijos konvertavimo principas – t. y. „vandens stabdžio“ jėgainė, kurioje vanduo šildomas jį maišant. Nors daugelis mokslininkų ir inžinierių išvelgia nemažai šilumą gaminančių vėjo jėgainių privalumų, platesnio pritaikymo praktikoje tokio tipo jėgainės kol kas nesulaukė.

Weng-Long Cheng et al. savo studijoje teoriškai analizuoja vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją bei energijos transportavimo dideliu atstumu sistemą, kurioje šiluma generuojama hidraulinėje sistemoje ir konvertuojama šilumos siurbliu. Studijoje koncentruojamasi į ekonominius skaičiavimus, energijos nuostolių analizę tiekimo trasose, kai pagrindinis energijos nešėjas yra šilumos siurblio šaltnešis (nagrinėjamu atveju – amoniakas). Darbe nėra akcentuojamas nagrinėjamos sistemos suderinamumo su įvairių konstrukcijų vėjaračiais klausimas, taip pat vėjo energijos potencialo ir šiluminės energijos poreikių suderinimas bei įtaka bendram sistemos efektyvumui.

Lietuvoje vėjo energijos naudojimo galimybės plačiau buvo tiriamos ir įvairios publikacijos rengiamos A. Stulginskio universitete (buvęs Lietuvos žemės ūkio universitetas). Vėjo energijos naudojimo įrenginių diegimas pirmaisia buvo aktualus nuo centralizuotų tinklų nutolusiose kaime vietovėse, todėl šio universiteto mokslininkai skyrė minėtai temai didesnę dėmesį. 2001 m. Lietuvos žemės ūkio universiteto Žemės ūkio inžinerijos institute A. Gulbinas parengė ir apgynė daktaro disertaciją tema „Vėjo energijos įrenginių naudojimo efektyvumo žemės ūkyje tyrimas“. Šiame darbe nagrinėtas hidrodinaminės apkrovos įrenginys, kurio veikimo principas paremtas su vėjaračiu sujungto rotoriaus trinties su darbinio skysčiu metu išskiriama šilumine energija (Gulbinas, 2001). 2011 m. A. Kavolynas taip pat A. Stulginskio universitete apgynė daktaro disertaciją tema „Saulės ir vėjo energijos naudojimas pastatų kaimo vietovėse šilumos poreikiams tenkinti“, tačiau šiame darbe autorius daugiau dėmesio skyrė saulės energijos naudojimo ir kaupimo tyrimams, o vėjo energijos tema analizuota per kitų autorių darbus (Kavolynas, 2011).

Okazaki, Shirai ir Nakamura (2015) savo koncepcinėje studijoje pristato metodą, kuriuo mechaninė vėjo energija konvertuojama į šilumą pasitelkiant elektromagnetinę indukciją, kaupiama šiluminės energijos forma ir pagal vartotojų poreikį konvertuojama į elektros energiją. Straipsnyje pažymima, kad toks vėjo energijos pritaikymas leidžia geriau išnaudoti vietovės vėjo išteklių potencialą negu tiesioginis elektros energijos generavimas, šiluminę energiją generuojanti vėjo jėgainė sukelia mažesnę triukšmą ir vibracijas, lyginant su elektros energiją generuojančiomis analogiškos galios jėgainėmis bei turi teigiamą įtaką tokias sistemas diegiančių šalių ekonomikai (Okazaki et al., 2015).

Vertinant vėjo energijos naudojimo šildymui technologijas, jas galima struktūriškai sugrupuoti ir suskirstyti (1.9 pav.).



1.9 pav. Vėjo energijos transformavimo į šiluminę energiją sistemų struktūrinės schemas (pav. autorės)

Šiuo metu norint išnaudoti vėjo energiją pastatams šildyti, tai gali būti daroma šildant patalpas elektriniais šildytuvais, o jiems reikalingą elektros energiją gaminant vėjo jėgainėse. Tai atitiktų schemą: „Vėjaratis (mechaninė vėjo energija)–elektros generatorius (mechaninės energijos konvertavimas į elektros energiją)–elektros energijos akumulatorius–pastato šildymo sistema (elektros energiją naudojantys šildymo prietaisai – oriniai šildytuvai, tepaliniai radiatoriai, spinduliniai šildytuvai ir t. t.)“. Pagal šią schemą, turint vietinį elektros energijos gamybos įrenginį, atsiranda elektros energijos akumuliavimo poreikis dėl vėjo energijos potencialo ir energijos poreikio skirtumų, taip pat poreikis turėti rezervinę pastato šildymo sistemą. Paminėti sprendiniai brangina tokių sistemų diegimą ir daro jas technologiškai sudėtingesnes. Naudojant centralizuotai tiekiamą ir iš vėjo energijos gaminamą elektros energiją, energijos akumuliatoriaus ir rezervinio šaltinio funkciją atlieka skirstomieji tinklai ir diversifikuotas elektros energijos gamybos tinklas; sistema veiksminga ir galima, tik tokiu atveju iškyla sistemos efektyvumo įvertinimo klausimas dėl papildomų energijos nuostolių skirstomuosiuose tinkluose.

Dar viena schema, kuri gali būti taikoma vėjo energijai transformuoti: „Vėjaratis–elektros generatorius–šiluminės energijos akumulatorius (vandeniu arba vandens ir neužšalusių skysčių tirpalu užpildyta talpa arba grunto masė)–pastato šildymo sistema (tradicinė šildymo sistema, kurios šilumnešis yra vanduo ar jo tirpalai)“. Salpakari et al. (2016), remdamiesi Helsinkiu (Suomija) atlikta studija, mano, kad tokio tipo sistemų taikymas ypač palankus urbanizuotose teritorijose, kur yra didelis energijos sunaudojimo intensyvumas, o kartu ir galimybės sumažinti

atsinaujinančių energijos šaltinių galios svyravimus. Ši schema turi privalumą, kad tu pačių šiluminės energijos akumuliatorių įkrovimui galima naudoti papildomus kontūrus, kuriems energiją tiekis ir kiti energijos šaltiniai – kietojo arba dujinio kuro katilai, saulės energijos kolektoriai, tam tikrų technologinių įrenginių aušinimo kontūrai ir pan. Šioje schemeje pastato šildymo sistema bet kuriuo atveju naudojama ta pati, ir šios schemos atveju galimas elektros energijos gamybos decentralizavimas. Šita schema gali būti taikoma ir centralizuotos elektros energijos gamybos sistemai plačiau diegiant šilumos siurblius kaip šiluminės energijos konvertavimo įrenginį bei pastato šildymo sistemas kaip energijos akumulatorius. M. Waite (2014) teigia, kad urbanizuotose vietovėse padidinus šilumos siurblių kaip pastato šiluminės energijos generatorių naudojimą, galima būtų labiau sumažinti ŠESD emisiją, lyginant su konservatyviu scenarijumi, kai šilumos siurbliai šildymo poreikiams nenaudojami. Niujorko miestui atlikta studija rodo, kad 20 proc. pastatų šiluminės energijos poreikių gamybai naudojant šilumos siurblius, galima 1,5 karto padidinti įdiegtą vėjo elektrinių galią (nuo 3 GW iki 5 GW), kartu išlaikant analogišką vėjo energijos potencialo išnaudojimo procentą (78,5 proc.). Ši studija atlikta vertinant, kad vėjo energija užtikrina 20 proc. didmiesčio elektros energijos poreikių.

Nors šiluminės energijos akumuliavimas, kaip vienas iš energetikos sistemos elementų, taikytas jau po 1970-ųjų naftos krizės (Cabeza, 2015), pastaruoju metu jaučiamas didesnis susidomėjimas šiluminės energijos kaupimo technologijomis, nes jos leidžia derinti energijos poreikio ir atsinaujinančių energijos šaltinių galios potencialo skirtumus (Parameshwaran et al., 2012; Gang, 2016). Jradi et al. (2017) Danijos klimato sąlygomis 1000 m² pastatui sumodeliavo inžinerinę sistemą „Fotovoltiniai kolektoriai–šilumos siurblys (oras–vanduo)–šiluminės energijos kaupykla grunte“, kuriai atliko sistemos energinio efektyvumo skaičiavimus ir nustatė, kad sistema su energijos kaupykla grunte yra 3,1 proc. efektyvesnė lyginant su analogiška sistema be kaupyklos. 3,1 proc. efektyvumo padidėjimas – sąlygiškai nedidelis, ir tai galėjo būti sąlygota tos priežasties, kad naudotos saulės energijos potencialo pasiskirstymas metų cikle skiriasi nuo energijos poreikių šildymui pasiskirstymo nagrinėtu atveju (Jradi et al., 2017), ir šis skirtumas lėmė didelius šiluminės energijos praradimus.

Vėjo energiją galima transformuoti į šilumą vietoj elektrinės sistemos naudojant hidraulinę. Tokiu atveju gali būti taikoma schema: „Vėjaratis–šilumos generatorius (hidraulinė sistema)–šiluminės energijos akumuliatorius–pastato šildymo sistema“.

Skysčio temperatūros padidėjimas skysčiui pratekant pro įvairius vožtuvus, droselius, skirstytuvus dažnai pastebimas hidraulinėse pavarose (Ziedelis, 2009). Taip pat ir energetikoje, ruošiantis užkurti vandens ar garo katilą, įjungus maitinimo arba tinklo siurblių, kai vanduo teka uždaru ratu, galima pastebėti, kad vandens temperatūra vien tik dėl recirkuliacijos per trumpą laiko intervalą pakyla keliais laipsniais. Abiem minėtais atvejais dėl trinties tarp skysčio dalelių ir skysčio dalelių bei kietų paviršių, taip pat ir dėl kontakto (skysčio dalelėms keičiant judėjimo trajektorijas atsimušus ar aptekant kietus paviršius) su tėkmę ribojančiais paviršiais skysčio dalelių mechaninė energija virsta šilumine ir skysčio temperatūra padidėja. Šiais atvejais tai energijos nuostoliai, o hidraulinėse pavarose skysčio temperatūros augimas yra dar ir nepageidaujamas reiškinys – didėja sistemos išsisandinimo tikimybė, nes

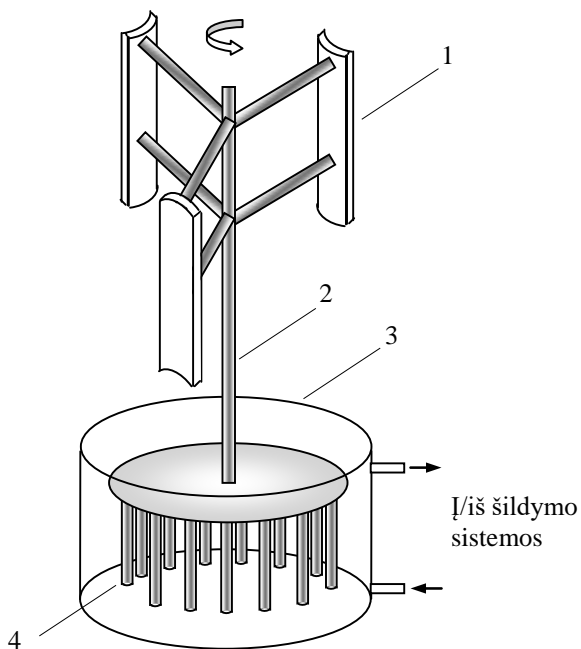
sandaravimo medžiagos greičiau dėvėti esant didelei temperatūrai, alyvą reikia papildomai aušinti ir pan. (Johnson, 2000). Tačiau abu šie atvejai demonstruoja praktinę galimybę generuoti šilumą praleidžiant skystį pro įvairiausias kliūtis.

Hidraulinėje sistemoje mechaninė hidraulinio siurblio veleno energija verčiama į skysčio mechaninę energiją, vėliau skystis vamzdžiais gali būti transportuojamas į reikiamą vietą ir praleidžiamas pro įvairias kliūtis: angas, diafragmas, droselius ir pan., tokiu būdu generuojant šiluminę energiją. Kaip ir elektrinėje sistemoje, dalis iš vėjaračio gaunamos mechaninės energijos pačiame hidrauliniame siurblyje virsta šiluma, tačiau viena šios šilumos dalis išsisklaido į aplinką, o kita atiduodama skysčiui – didėja skysčio temperatūra, taigi jau antroje grandyje generuojama šiluma. Hidraulinio siurblio korpusą padengus termoizoliacija, sumažinami šilumos nuostoliai į aplinką, tada pagrindinė siurblyje išsiskiriančios šilumos dalis atitenka skysčiui – šilumnešiui. Siurbliui perkaisti neleidžia pats skystis: atidavusio šilumą akumuliacinėje talpoje arba šilumokaityje, į siurblių įsiurbiamo (grįžtančio) skysčio temperatūra yra sumažėjusi, ir jis aušina siurblių.

Patalpinus hidraulinį siurblių į skystį, visa siurblyje išsiskirianti šiluma būtų atiduodama skysčiui, t. y. šilumnešiui. Esant techninėms galimybėms, racionalu visą hidraulinę sistemą (siurblių su vamzdžiais, hidraulinėmis kliūtėmis ir šilumokaičiu) patalpinti į akumuliacinę talpą, o siurblio veleną sujungti su vėjaračio veleno. Toks sprendimas atitinką schemą „Vėjaratis–šilumos generatorius ir akumuliatorius–pastato šildymo sistema“.

Hidrauline sistema galima būtų vadinti ir kito tipo įrenginį, veikiančią vandens maišytuvo principu – tokiu atveju jis būtų talpinamas tiesiai į akumuliacinę talpą (1.10 pav.).

Dažniausiai maišytuvai – tai vertikalus velenas (1.10 pav., 2), prie kurio tam tikra tvarka pritvirtintos įvairių formų ir dydžių mentės (1.10 pav., 4). Šiuo atveju turi būti suderinamumas tarp maišytuvo ir akumuliacinės talpos (1.10 pav., 3) matmenų. Taip pat ant akumuliacinės talpos sienelių gali būti montuojamos kreipiančiosios mentės skysčio turbulizacijai padidinti. Maišytuvo ašis jungiama su vėjaračio ašimi per movą arba reduktorių. Maišytuvo mentės gali būti montuojamos ir tiesiai ant prailgintos vėjaračio ašies. Taip pat, kaip ir naudojant hidraulinį siurblių, beveik visa išsiskyrusi šiluma atiduodama skysčiui. Šio tipo įrenginio tyrimams rengiamasi, ir artimiausiu metu jie taip pat bus vykdomi.



1.10 pav. Vėjo mechaninės energijos transformavimo į šilumą įrenginys naudojant skysčio maišytuvą: 1 – vėjaratis; 2 – vėjaračio velenas; 3 – akumuliacinė talpa; 4 – maišymo mentės (pav. autorės)

Lyginant šitas sistemas pagal šilumos paskirstymą patalpose, elektrinė sistema yra universalesnė, nes tokiu atveju yra galimybė ir šildyti patalpas tiesiogiai elektros prietaisais, ir kaupti šiluminę energiją šildant akumuliacinės talpos vandenį. Nors svarbu paminėti, kad tiesioginio šildymo elektra galimybė nėra didelė dėl generuojamos energijos ir poreikio netolygumo. Hidraulinei sistemai visada bus reikalinga akumuliacinė talpa, kuri sudaro sąlygas į šildymo sistemą integruoti dar daugiau atsinaujinančiųjų ar alternatyviųjų energijos šaltinių – saulės kolektoriuose gaminamą energiją, nuotekų šiluminę energiją ir pan.

Vėjo energija generuotą šilumą galima naudoti pastatams šildyti ir per tarpinį šiluminės energijos transformavimo įrenginį – šilumos siurblių. Gauta šiluma galima „įkrauti“ gruntą ir tokiu būdu akumuliuoti šiluminę energiją, išvedžiojus hidraulinės sistemos vamzdžius grunte šalia pastato, kur įrengtas šilumos siurblio grunto kolektorius (Ozgener, 2010).

Nors vėjo energijos konvertavimo į šilumą hidraulinės sistemos turi daug privalumų, vis dar manoma, kad tokiu būdu generuojamos energijos kiekiai per maži, o didesnės galios vėjo jėgainėse tiksliau gaminti elektrą ir dalį jos vėliau pagal poreikius panaudoti šilumos gamybai. Jei pastato energinis naudingumas yra nedidelis (vertinant pagal energinio naudingumo klases, „G“, „D“ klases), tam kad pastato šiluminės energijos poreikius užtikrintų vėjo jėgainė, ji turi būti sąlygiškai didelė, o kartu ir triukšminga bei brangi, tačiau mažėjant pastatų šiluminės energijos poreikiams („C“, „A++“ energinio naudingumo klases), pastato šiluminės energijos

poreikius gali užtikrinti kelis kartus mažesnių matmenų vėjo jėgainė. Vėjo energijos transformavimo į šilumą hidraulinės sistemos praktiškai naudojamos labai retai.

1.6. Literatūros apžvalgos išvados

Pasaulinei bendruomenei aktyviai ieškant sprendimų ir priemonių mažinti ŠESD emisijas bei suvaldyti klimato kaitos procesus, pastatų sektoriui skiriamas didelis dėmesys, dėl palyginti mažo pastatų energinio efektyvumo ir dėl to susidaranti didelių energijos sąnaudų. Remiantis atlikta literatūros, kurioje nagrinėjamos pasaulio klimato kaitos, vėjo energetikos, pastatų energinio efektyvumo temos, apžvalga, galima daryti tokias išvadas.

1. Vertinant vėjo, kaip energijos šaltinio, potencialo aspektu, vėjo energetikos plėtrai numatomos platesnės perspektyvos dėl švaraus energijos konversijos proceso, kurio metu į aplinką neišskiriamos ŠESD, lyginant su biokuro energetika.
2. Visa statistikoje atspindinti vėjo energija šiuo metu konvertuojama į elektros energiją.
3. Nors vėjo energijos konvertavimas į šilumą taikant hidraulinę sistemą yra nagrinėtas, tokio tipo sistemoms trūksta įvairiapusio mokslinio įvertinimo bei integracijos į pastatų šildymo sistemas analizės.

2. MECHANINĖS VĖJO ENERGIJOS KONVERTAVIMO Į ŠILUMINĘ ENERGIJĄ EKSPERIMENTINIAME HIDRAULINIAME ĮRENGINYJE TYRIMAS

2.1. Eksperimentinio įrenginio konstrukcija ir matavimo įranga

Mechaninės vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją tyrimui buvo sukurtas eksperimentinis hidraulinis įrenginys, kurio bendras vaizdas parodytas 2.1 pav. Mechaninės vėjo energijos simuliacijai naudojamas elektros variklis, kad laboratorinėmis sąlygomis būtų sudaryta galimybė nesudėtingai keisti menamo vėjaračio darbo charakteristikas. Eksperimentinį hidraulinį įrenginį sudaro šie pagrindiniai elementai: alyvos talpa, hidraulinis siurblys, vamzdynų sistema, alyvos srauto reguliavimo ventilis. Šilumos nuostoliams sumažinti buvo naudojama pūsto polietileno vamzdynų sistemos šiluminė izoliacija. 2.2 pav. pavaizduota eksperimentinio hidraulinio įrenginio principinė schema (standartiniai simboliai pagal ISO 1219-1:2012).

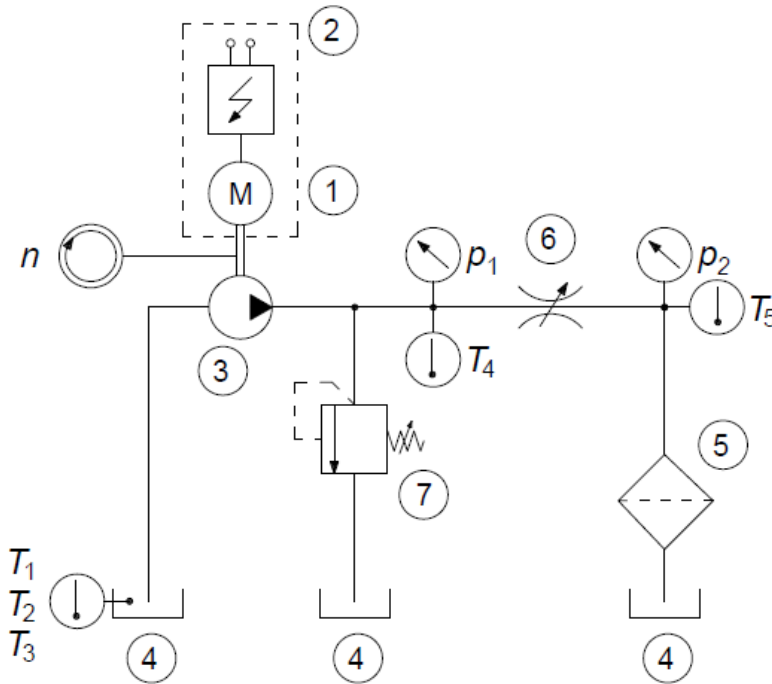


2.1 pav. Eksperimentinis hidraulinis įrenginys mechaninės vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją tyrimui: 1 – elektros variklis; 2 – alyvos talpos užpildymo čiaupas; 3 – slėgio indikatorius; 4 – išorinės talpos užpildymo čiaupas; 5 – apsauginis vožtuvas; 6 – srauto reguliavimo ventilis; 7 – slėgio jutiklis; 8 – temperatūros jutiklis

Vėjaračio darbo simuliacijai panaudotas trifazis asinchroninis keturpolis elektros variklis 4AK2 90L-4B14 (*Bevi, Blomstemała, Švedija*), kurio galia 1,5 kW, galios koeficientas $\cos\varphi = 0,77$, naudingumo koeficientas $\eta_{motor} = 0,828$ (2.2 ir 2.3 pav., 1). Tyrimo metu laikoma, kad variklis imituoja sukamąjį vėjaračio veleno judesį už apsisukimų dažnį keičiančios transmisijos sistemos. Elektros variklis buvo pritvirtintas prie alyvos rezervuaro dangčio, vertikaliajose pozicijoje, jo velenas standžia

jungtimi (per movą) sujungtas su hidraulinio krumpliaratinio siurblio velenu. Elektros variklio galios pasirinkimas grindžiamas pastato šiluminės energijos šaltinio galios modeliavimo analize, kuri pateikiama 3.1 skyriuje.

Variklio sukimosi dažnis buvo keičiamas trifaziu 1,5 kW galios elektros dažnių keitikliu FR-D740-036SC-EC (*Mitsubishi Electric*, Tokijas, Japonija), kurio elektros srovės dažnio reguliavimo ribos yra 0,2–400 Hz (2.2 ir 2.3 pav., 2).



2.2 pav. Eksperimentinio hidraulinio įrenginio principinė schema: 1 – elektros variklis; 2 – elektros srovės dažnio keitiklis; 3 – hidraulinis siurblys; 4 – vidinis alyvos bakas; 5 – filtras; 6 – srauto reguliavimo ventilis; 7 – apsaugos nuo slėgio perviršio vožtuvas; T_1 – T_5 – temperatūros matavimo taškai; p_1 – p_2 – slėgio matavimo taškai; n – sukimosi dažnio matavimo taškas

Tyrimė naudotas hidraulinis siurblys X2P5702 (*Vivolo, Budrio, Italija*). Siurblio santykinis darbinis tūris $V_p=26,2 \text{ cm}^3/\text{aps}$ (2.2 ir 2.3 pav., 3).

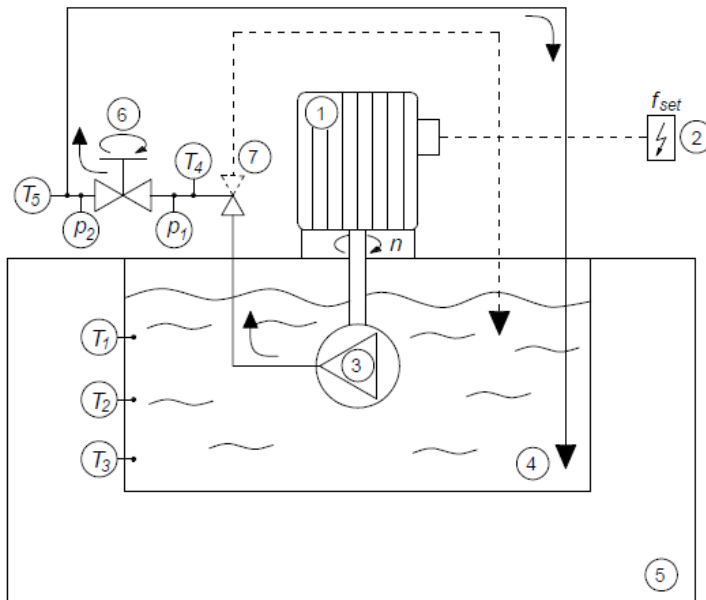
Hidraulinis siurblys panardintas į alyvą, esančią vidiniame stačiakampio formos plieniniame alyvos rezervuare BEK 20/E/E (*KTR, Reinas, Vokietija*), kurio matmenys – $0,40 \times 0,298 \times 0,27 \text{ m}^3$, sienelės storis $\delta = 4 \text{ mm}$ (2.2 ir 2.3 pav., 4). Buvo pasirinktas tipinis hidraulinis bakas, priimant prielaidą, kad bako geometrinės savybės neturi įtakos tyrimo rezultatams. Vidinis alyvos bakas sumontuotas išoriniame bake BEK 150/E/E, matmenys – $0,488 \times 0,620 \times 0,750 \text{ m}^3$, sienelės tarp bakų užpildytos šilumine izoliacija. Išorinis bakas gali atlikti akumuliacinės talpos

funkciją (2.3 pav., 5), šiuo atveju jis buvo naudojamas tam, kad eksperimentą atlikti būtų patogiau.

Hidraulinėje sistemoje naudojama 20 l mineralinės alyvos *Tellus S2 M 46* (*Shell, Haga, Olandija*) – ISO 3448 klampos laipsnis 46, tankis $\rho_{15\text{ }^\circ\text{C}} = 879\text{ kg/m}^3$, kinematinė klampa $\nu_{20\text{ }^\circ\text{C}} = 104\text{ cSt}$, savitoji šiluminė talpa $c = 1,67\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$. Alyvos tipas buvo pasirinktas atsižvelgiant į hidraulinio siurblio gamintojų rekomendacijas.

Alyva cirkuliuoja uždaru hidrauliniu kontūru: alyvos talpa–hidraulinis siurblys–slėgiminė linija–reguliavimo ventilis–grąžinimo linija su šilumokaičiu–alyvos talpa. Vidinis cirkuliacinio vamzdžio linijos skersmuo $d_i = 20\text{ mm}$. Vamzdynas izoliuotas pūsto polietileno izoliacija.

Srauto reguliavimo ventilis (2.2 ir 2.3 pav., 6) atlieka keičiamos hidraulinės apkrovos reguliavimo funkciją. Hidraulinės sistemos apkrova buvo keičiama mažinant reguliavimo ventilio pralaidumą. Eksperimentiniame įrenginyje sumontuotas VRFB $90^\circ\text{ }^{\frac{3}{4}}\text{''}$ (*Contarini, Lugo, Italija*) ventilis. Ventilio atidarymo laipsniui apibūdinti taikomas parametras γ , kuris apibūdina ventilio padėties φ santykį su visiškai atidaryto ventilio padėtimi φ_{max} : $\gamma = \varphi / \varphi_{max}$.



2.3 pav. Eksperimentinio hidraulinio įrenginio principinė veikimo schema ir matavimo taškų vietas: 1 – elektros variklis; 2 – elektros srovės dažnio keitiklis; 3 – hidraulinis siurblys; 4 – vidinis alyvos bakas; 5 – išorinis bakas; 6 – srauto reguliavimo ventilis; 7 – apsaugos nuo slėgio perviršio vožtuvas

Eksperimentinio tyrimo metu buvo atliekami apskukų, sukimo momento, slėgio, srauto ir temperatūros matavimai įvairiuose matavimo taškuose.

Alyvos slėgis p_1 už hidraulinio siurblio buvo matuojamas slėgio jutikliu NAH 8253.83.2317 25.0 A (*Trafag, Bubikonas, Šveicarija*), alyvos slėgis už slėgio reguliavimo ventilio p_2 buvo matuojamas slėgio jutikliu NAH 8253.75.2317 2.5 A.

Matavimo jutiklių signalo keitimui ir vizualizacijai naudojami du programuojami indikatoriai N20–6112008 (*Lumel, Zielona Góra, Lenkija*). Rodmenys buvo nuskaityti ir įrašomi į kompiuterį.

Hidraulinio siurblio ašies apskos n matuojamos bekontakčiu tachometru *Testo* 465 (*Testo, Lenckirchas, Vokietija*).

Alyvos temperatūra matuojama platininiais varžos jutikliais TJ-Pt100 (*Auregis, Kaunas, Lietuva*) šešiuose matavimo taškuose – vidiniame alyvos bake (3 matavimo taškai – T_1, T_2, T_3), prieš slėgio reguliavimo ventilių (T_4), už slėgio reguliavimo ventilio (T_5). Matavimo signalai viso eksperimento metu kaupiami temperatūros konverteryje ir duomenų kaupiklyje PT-104 (*Pico Technology, Kembridžšyras, Jungtinė Karalystė*).

Visos eksperimento serijos pradedamos patalpos ir alyvos temperatūrai esant 20–21 °C. Eksperimentiniame stende matomas sumontuotas apsaugos nuo slėgio perviršio vožtuvas ir apsauginė linija (2.2 ir 2.3 pav., 7), tačiau ribinės slėgio sąlygos (50 bar) nebuvo pasiektos ir apsauginėje linijoje alyvos cirkuliacija nevyko.

Tyrimė naudotos matavimo įrangos techninės charakteristikos pateikiamos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Hidraulinės sistemos tyrimui naudotos matavimo įrangos techninės charakteristikos

Slėgio jutiklis	Gamintojas	<i>Trafag, Bubikonas, Šveicarija</i>
	Tipas	8253.83.2317 25.0 A
	Matavimo ribos	0–25 bar
	Maksimalus darbinis slėgis	50 bar
	Matavimo tikslumas	±0,3 %
Slėgio jutiklis	Gamintojas	<i>Trafag, Bubikonas, Šveicarija</i>
	Tipas	8253.75.2317 2.5 A.
	Matavimo ribos	0÷2,5 bar
	Maksimalus darbinis slėgis	5 bar
	Matavimo tikslumas	±0,3 %
Slėgio indikatoriai	Gamintojas	<i>Lumel, Zielona Góra, Lenkija</i>
	Tipas	N20–6112008
	Matavimo ribos	0–20 mA
	Matavimo tikslumas	±0,2 % nuo maksimalios reikšmės
Tachometras	Gamintojas	<i>Testo, Lenckirchas, Vokietija</i>
	Tipas	465
	Matavimo ribos	1–99999 aps/min
	Matavimo tikslumas	±0,02 %
	Skiriamoji geba	0,01 aps/min (ribose 1–99,99 aps/min) 0,1 aps/min (ribose 100–999,9 aps/min) 1 aps/min (ribose 1000–99999 aps/min)

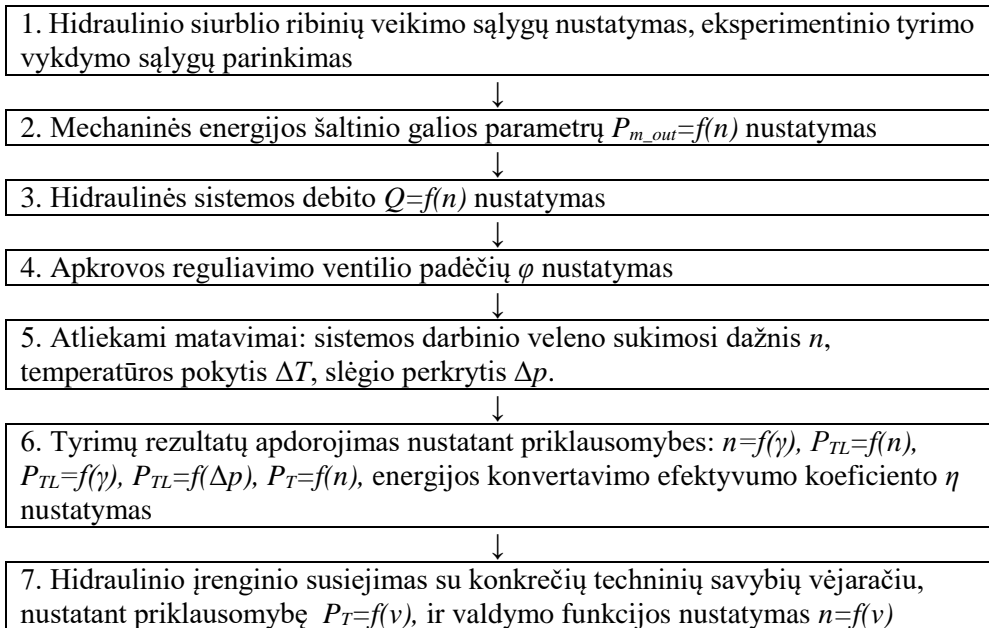
lentelės tęsinys kitame puslapyje

2.1 lentelės tęsinys

Temperatūros jutikliai	Gamintojas	<i>Auregis</i> , Kaunas, Lietuva
	Tipas	TJ-Pt100
	Matavimo ribos	-50 °C–400 °C
	Matavimo tikslumo klasė	1/3B
	Matavimo tikslumas	±0,1–0,26 °C (±0,04–0,1 Ω), kai matuojama temperatūra 0–+100 °C
Temperatūros indikatoriai ir duomenų kaupikliai	Gamintojas	<i>Pico Technology</i> , Kembridžšyras, Jungtinė Karalystė
	Tipas	PT-104
	Matavimo ribos	0÷375 Ω
	Matavimo tikslumas	±0,015 °C
	Skiriamoji geba	0,001 °C

2.2. Tyrimo metodika

Uždaros sistemos su hidrauliniu siurbliu šiluminės energijos generavimo savybių nustatymo algoritmas:



Hidraulinio įrenginio darbas tiriamas jam veikiant su skirtingomis charakteristikomis. Elektros variklio srovės dažnis f_{set} tyrimo metu keičiamas nuo 1 iki 50 Hz. Ventilio atidarymo padėtis eksperimento metu buvo keičiama nuo visiškai atidaryto $\varphi_{max}=9$ aps. ($\gamma=1$) iki visiškai uždaryto $\varphi=0$ aps. ($\gamma=0$). Mažiausias ventilio atidarymo padėties pokytis: $\varphi=0,05$ aps (1/20 viso apsisukimo, arba 18°). Esant skirtingiems elektros variklio veikimo režimams apskaičiuojamas menamas jį

atitinkantis vėjo greitis v^* , laikant, kad vėjaračio plotas yra 10 m², vėjo energijos konversijos vėjaračio ir pavaros mechanizme koeficientas yra 0,45 (Sarkar et al., 2012, Klebanov et al., 2016), oro tankis – 1,293 kg/m³ pagal (9) formulę. Eksperimentinio tyrimo vykdymo sąlygos pateikiamos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Eksperimentinio tyrimo vykdymo sąlygos

Elektros variklio srovės dažnis f_{set} , Hz	1	2	3	4	5	6	7	8
Vėjo greičio atitikmuo v^* , m/s	1,18	1,79	2,16	2,50	2,76	2,97	3,10	3,29
Lietuvos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	2,52–4,55							
Latvijos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	2,68–4,22							
Estijos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	3,95–6,86							

Elektros variklio srovės dažnis f_{set} , Hz	10	12	14	16	20	30	40	50
Vėjo greičio atitikmuo v^* , m/s	3,51	3,83	4,09	4,35	4,76	5,67	6,36	6,97
Lietuvos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	2,52–4,55							
Latvijos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	2,68–4,22							
Estijos teritorijos vidutinis vėjo greitis v , m/s	3,95–6,86							

Palyginimui pateikiamas vidutinis Lietuvos, Latvijos ir Estijos teritorijos vėjo greitis v , išmatuotas skirtingose meteorologinėse stotyse standartiniame 10 m matavimo aukštyje esant antrai paviršiaus šiuurkštumo klasei (Rathmann, 2003). Šiame ir tolimesniuose skaičiavimuose pateikiamas susiejimas su vėjo greičiu v^* galioja tik aprašytoms vėjaračio sąlygoms, esant kitų parametų vėjaračiui, susietas vėjo greitis v^* turi būti perskaičiuotas. Atliekamais eksperimentiniais matavimais siekiama nustatyti mechaninės vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją naudingumo koeficientą. Konvertavimo naudingumo koeficientas apskaičiuojamas kaip gaunamos mechaninės ir pagaminamos šiluminės energijos santykis.

2.2.1. Simuliuojamo vėjo energijos šaltinio mechaninių savybių nustatymas

Elektros varikliu buvo imituojamas vėjo jėgainės vėjaračio sukamasis judesys, kuris buvo perduodamas hidraulinio įrenginio siurblio velenui. Eksperimentiniame stende elektros variklio velenas su siurblio velenu buvo sujungtas standžia mova. Laikoma, kad variklio veleno judesys be nuostolių perduodamas siurblio velenui ir variklio galia P_{m_out} lygi siurblio P_{p_in} , o kartu ir hidraulinės sistemos P_{hs_in} , gaunami galiai (11):

$$P_{hs_in} = P_{p_in} = P_{m_out}. \quad (11)$$

Mechaninės variklio charakteristikos įvairiems darbo režimams buvo kalibruojamos Elektromechaninių keitiklių mokslinėje laboratorijoje (Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas). Kalibravimo tikslas – nustatyti maksimalią galią P_{m_out} , kurią gali pasiekti tyrime naudojamas variklis, esant skirtingiems elektros dažnio parametrams f_{set} . Maksimali variklio galia apskaičiuojama pagal (12) formulę (Bolton, 2006; Weidauer et al., 2014):

$$P_{m_out} = \omega_{el.motor} M_{el.motor} = 2\pi n M_{el.motor}; \quad (12)$$

čia: $M_{el.motor}$ – elektros variklio veleno sukimo momentas, N·m; $\omega_{el.motor}$ – elektros variklio veleno sukimosi kampinis greitis, rad/s; n – elektros variklio veleno sukimosi dažnis, aps/s.

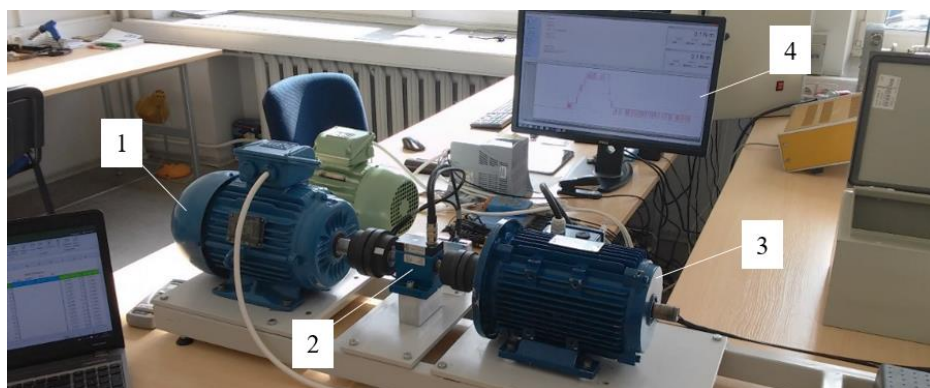
Elektros variklio kalibravimui taikytos matavimo įrangos techninės charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Elektros variklio kalibravimui taikytos matavimo įrangos techninės charakteristikos

Sukimo momento jutiklis	Gamintojas	<i>Lorenz Messtechnik</i> , Alfdorf, Vokietija
	Tipas	DR-2512
	Matavimo ribos	0–50 N·m
	Matavimo tikslumas	±0,1 %
Tachometras	Gamintojas	<i>Testo</i> , Lenckirchas, Vokietija
	Tipas	465
	Matavimo ribos	1–99999 aps/min
	Matavimo tikslumas	±0,02 %
	Skiriamoji geba	0,01 aps/min (ribose 1–99,99 aps/min) 0,1 aps/min (ribose 100–999,9 aps/min) 1 aps/min (ribose 1000–99999 aps/min)

Variklio sukimo momentas $M_{el.motor}$ buvo matuojamas sukimo momento jutikliu DR-2512 (*Lorenz Messtechnik*, Alfdorf, Vokietija) elektros variklių kalibravimo stende (2.4 pav.). Elektros variklio veleno sukimosi dažnis n buvo matuojamas bekontakčiu tachometru *Testo* 465 (*Testo*, Lenckirchas, Vokietija).

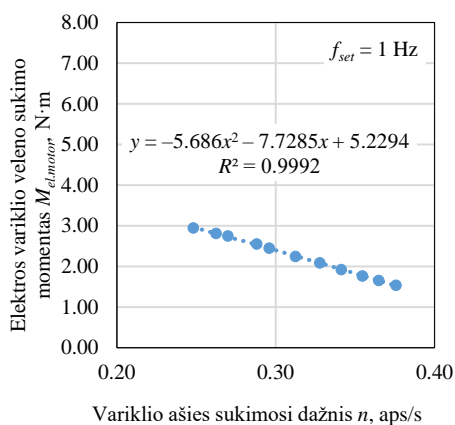
Tyrime naudojamas keturpolis variklis, jo ašies sukimosi dažnio n_{set} priklausomybė apibrėžiama taip: $n_{set} = f_{set}/2$.



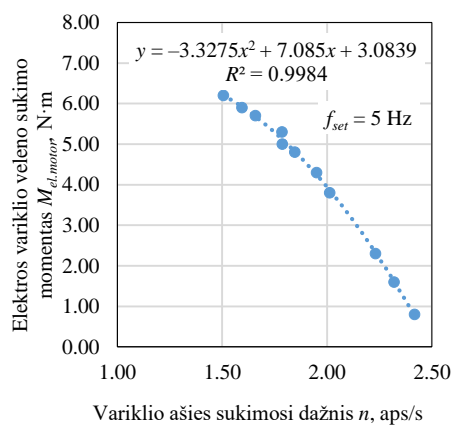
2.4 pav. Elektros variklio kalibravimo stendas Elektromechaninių keitiklių mokslinėje laboratorijoje: 1 – apkrovą formuojantis variklis; 2 – sukimo momento jutiklis; 3 – tiriamas elektros variklis; 4 – matavimo duomenis fiksuojančio kompiuterio monitorius

Buvo atliekama 16 bandymo serijų, keičiant elektros srovės dažnį f_{set} nuo 1 Hz iki 50 Hz ir apkraunant variklį iki didžiausiosios galios. Kalibruojamas variklis buvo apkraunamas 5 kW galios elektros varikliu, veikiančiu elektros generatoriaus režimu. Matavimų rezultatai pavaizduoti 2.5–2.10 pav.

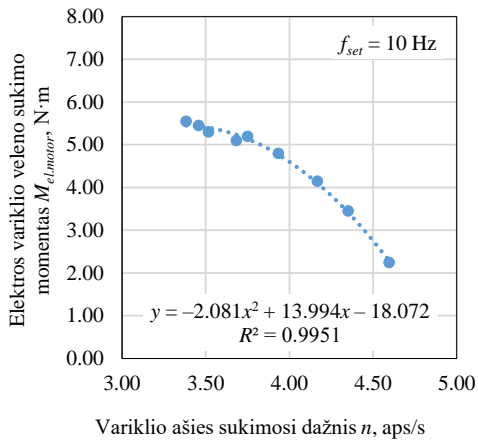
Pagal (12) formulę apskaičiuotos variklio galios, esant skirtingiems variklio darbo parametrams, skaičiavimų rezultatai pateikti 2.11–2.16 pav.



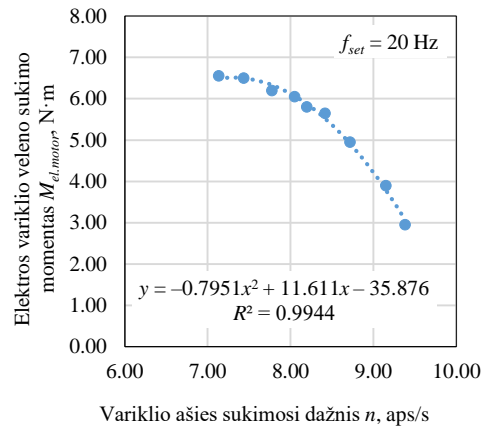
2.5 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=1$ Hz



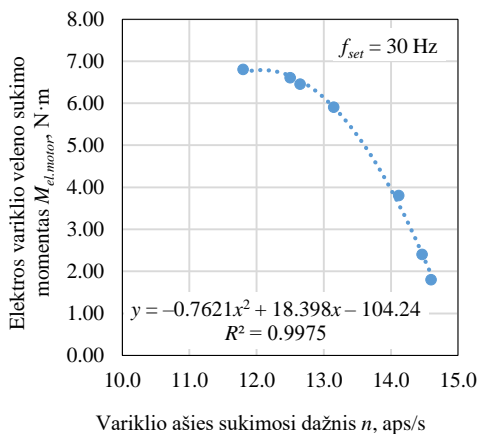
2.6 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=5$ Hz



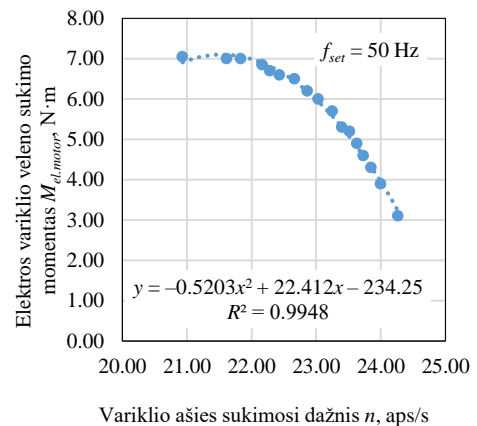
2.7 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=10$ Hz



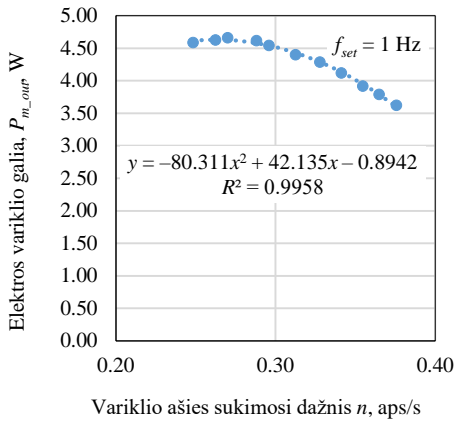
2.8 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=20$ Hz



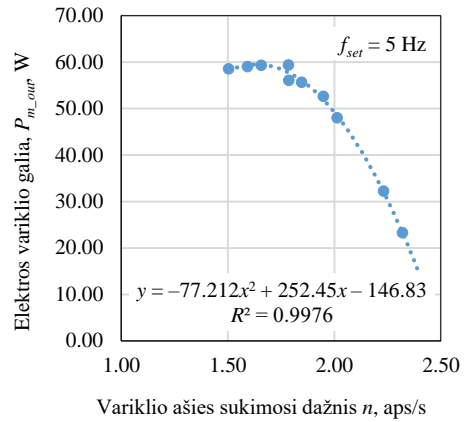
2.9 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=30$ Hz



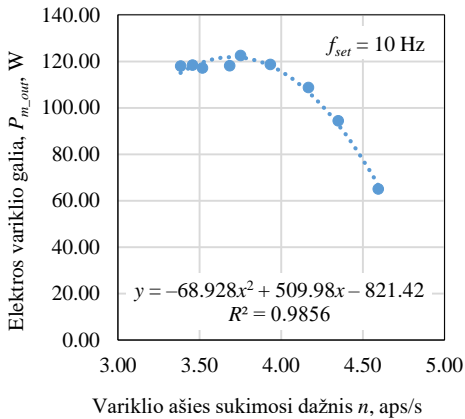
2.10 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=50$ Hz



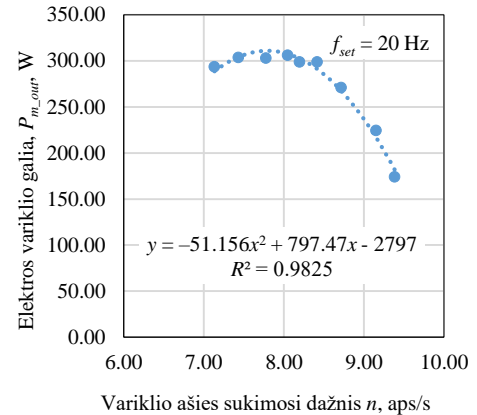
2.11 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=1$ Hz



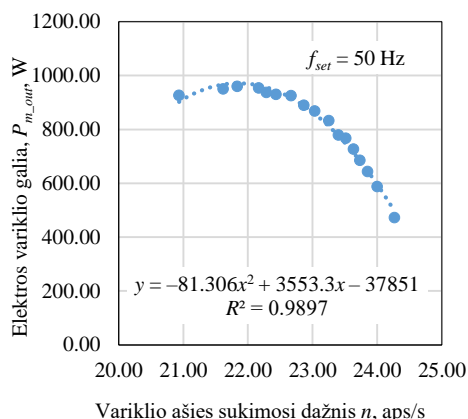
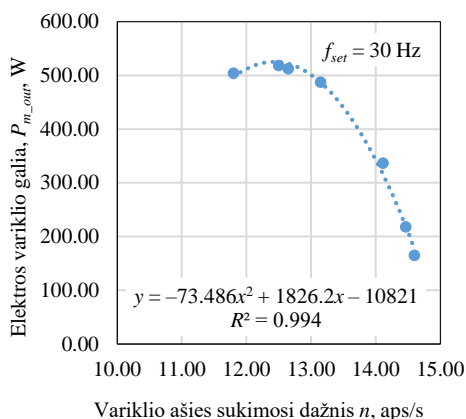
2.12 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=5$ Hz



2.13 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=10$ Hz



2.14 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=20$ Hz



2.15 pav. Elektros variklio galios $P_{m_{out}}$, W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=30$ Hz

2.16 pav. Elektros variklio galios $P_{m_{out}}$, W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=50$ Hz

Elektros variklio sukimo momento ir galios, esant kitiems maitinimo įtampos dažniams, matavimų rezultatai pateikiama prieduose. Tolimesnei studijai naudojami atskirų sukimosi dažnių n_{set} kalibravimo didžiausiosios galios taškai $P_{m_{out}}=f(n_{opt})$, kurių suvestinė pateikiama 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Elektros variklio mechaninių charakteristikų nustatymo matavimo ir skaičiavimų rezultatai

f_{sets} , Hz	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{set} , aps/s	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
n_{opt} , aps/s	0,27	0,52	0,90	1,34	1,79	1,97	2,34	2,60
$P_{m_{out}}$, W	4,7	16,3	28,4	44,5	59,4	74,2	84,6	100,7

f_{sets} , Hz	10	12	14	16	20	30	40	50
n_{set} , aps/s	5	6	7	8	10	15	20	25
n_{opt} , aps/s	3,75	4,26	5,32	6,08	8,05	12,50	16,82	21,83
$P_{m_{out}}$, W	122,5	159,9	193,8	233,0	305,9	518,1	728,7	959,8

Siekiant patikrinti eksperimentinių tyrimų matavimų atkartojamumą bei patikimumą, buvo apskaičiuoti kiekvieno tomis pačiomis sąlygomis atlikto serijos bandymo matavimų statistiniai parametrai. Apskaičiuotas Kochrano kriterijus ($C_j \leq 0,684$ keturių rodmenų serijai, esant trečiam laisvės laipsniui), variacijos koeficientas ($C_v \leq 5\%$) ir bendroji santykinė paklaida ($C_{err} \leq 5\%$). Gauti skaičiavimo rezultatai neviršijo ribinių verčių, todėl priimama, kad eksperimentų rezultatai patikimi ir atkuriami.

2.2.2. Hidraulinės sistemos šilumos generavimo savybių nustatymas

Hidraulinės sistemos gaunamos energijos galia $P_{hs_{in}}$, W yra lygi hidraulinio siurblio iš elektros variklio gaunamai galiai $P_{p_{in}}$: $P_{hs_{in}} = P_{p_{in}} = P_{m_{out}}$, kuri priklauso nuo variklio ašies sukimo momento M ir sukimosi dažnio n :

$$P_{hs_in} = 2\pi nM. \quad (13)$$

Kadangi sistemoje nėra hidraulinių variklių ar kitų varomųjų grandžių, o alyva cirkuliuoja ratu iš bako atgal į baką, tai, nusistovėjus cirkuliacijai, visa gaunama energija P_{hs_in} eikvojama hidrauliniam pasipriešinimui nugalėti, t. y. virsta į šilumą:

$$P_{hs_in} = P_{Tl} + P_{Tp} + P_{Tf}; \quad (14)$$

čia P_{Tl} – šiluminė galia, generuojama slėgio reguliavimo ventilyje (reguliuojamas sistemos elementas), W; P_{Tp} – šiluminė galia, generuojama hidrauliniame siurblyje (nereguliuojamas sistemos komponentas), W; P_{Tf} – šiluminė galia, generuojama vamzdynų sistemoje (nereguliuojamas sistemos komponentas).

Hidraulinėje sistemoje dalis energijos sunaudojama skysčio bei jį ribojančių kietų paviršių molekulinėms jėgoms įveikti. Dėl šių procesų kinta skysčio fizikinės savybės (mažėja skysčio klampa) ir dyla kietų kūnų paviršiai (mažėja paviršių šiurkštumas), todėl eksploatuojant hidraulines sistemas periodiškai keičiama cirkuliuojanti alyva ir susidėvėjusios mechaninės detalės. Kadangi mechaninis dėvėjimasis sparčiausiai vyksta didžiausių greičių zonoje, greičiausiai savo mechanines savybes praranda srautą ribojantys elementai. Šio tipo energijos virsmai yra nenaudingi, kai hidraulinės sistemos uždavinys – šiluminės energijos konvertavimas, ir jie mažina tokios sistemos naudingumo koeficientą.

Šiluminė galia P_{hs_in} , kuri generuojama hidraulinėje sistemoje, priklauso nuo vamzdynų ilgio bei stacionarių vietinių kliūčių pobūdžio ir gali būti aprašoma Darsi ir Veisbacho bei vietinių hidraulinių nuostolių skaičiavimo formulėmis (Johnson, 2000). Slėgio reguliavimo ventilis bei hidraulinis siurblys taip pat gali būti traktuojami kaip vietinės srauto tekėjimo kliūtys.

$$P_{hs_in} = P_{T_str} + P_{T_loc} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v_{fl}^2}{2g} + \sum \zeta \frac{v_{fl}^2}{2g}; \quad (15)$$

čia: P_{T_str} – tiesiose sistemos atkarpose susidaranti šiluminė galia; P_{T_loc} – vietinėse kliūtyse susidaranti šiluminė galia; λ – hidraulinės trinties koeficientas; l – vamzdžio ilgis, m; d – vamzdžio vidinis skersmuo, m; v_{fl} – tėkmės greitis, m/s; g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s².

Priimama prielaida, kad atliekant bandymus alyvos savybės nesikeičia. Hidraulinės sistemos geometriniai parametrai, išskyrus reguliavimo ventilio parametrus, yra nekintantys, visų eksperimento bandymų metu naudojama ta pati alyva, todėl pagal anksčiau pateiktas priklausomybes matome, kad šilumos kiekis, susidarantis tiriamoje hidraulinėje sistemoje, priklauso tik nuo skysčio tekėjimo greičio ir reguliavimo ventilio vietinės kliūties koeficiento. Ši teorinė analizė pagrindžia pasirinktą eksperimento metodiką.

Uždarai hidraulinei sistemai veikiant šiluminės energijos generavimo režimu, dalis jos gaunamos ir sistemai perduodamos energijos P_{hs_out} prarandama šiluminės energijos forma P_T :

$$P_{hs_out} = P_T - P_{T_loss}; \quad (16)$$

čia P_T – hidraulinėje sistemoje generuojamos šiluminės energijos galia: $P_T = P_{Tp} + P_{Ti} + P_{Tf}$. P_T gali būti apibrėžiama kaip naudinga šiluminė energija, kuri gali būti perduodama šildymo sistemai per šilumokaitį arba kaupiama akumuliacinėje talpoje.

Pagal klasikinę mechaniką ir termodinamiką (Švenčianas, 2013) (16) lygtis gali būti išreikšta kaip šilumos balanso lygtis:

$$m_r \cdot c \cdot (T_r - T_{r0}) = \eta_{pv} n V_p \rho c \cdot (T_{out} - T_r) \cdot t - P_{T_loss} t ; \quad (17)$$

čia: m_r – alyvos masė rezervuare, kg; c – alyvos specifinė šiluminė talpa, J/(kg·K); ρ – alyvos tankis, kg/m³; η_{pv} – tūrinis hidraulinio siurblio efektyvumo koeficientas (neeksplloatuotam siurbliui priimamas 1,0); V_p – santykinis hidraulinio siurblio darbinis tūris, cm³/aps; T – alyvos temperatūra: T_r – alyvos bake, K; T_{r0} – alyvos bake eksperimento pradžioje, K; T_{out} – už slėgio reguliavimo ventilio, K; t – laikas, s.

Šiluminė galia P_T :

$$P_T = \eta_{pv} n V_p \rho c (T_{out} - T_r). \quad (18)$$

Hidraulinės sistemos darbo režimų ir jų charakteristikų nustatymui pasirenkama šiluminės galios, generuojamos slėgio reguliavimo ventilyje P_{Ti} , kaip reguliuojamo dydžio dedamosios, analizė. Reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ keitimas leidžia keisti hidraulinės sistemos srautą, slėgį, kartu ir generuojamą šilumos kiekį. Generuojama šiluminė galia gali būti išreiškiama taip:

$$P_{Ti} = \Delta p Q ; \quad (19)$$

čia: Δp – slėgio perkrytis ventilyje, Pa; Q – tūrinis alyvos srautas, m³/s.

Eksperimentiškai slėgio perkrytis nustatomas pagal slėgio jutiklių p_1 ir p_2 (2.3 pav.) rodmenų skirtumą. Tūrinis alyvos srautas išreiškiamas per siurblio parametrus ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q = \eta_{pv} n V_p. \quad (20)$$

Slėgio perkrytis reguliavimo ventilyje taip pat gali būti aprašomas pagal formulę (21):

$$\Delta p = \rho g h = \rho g \frac{1}{2} \zeta \frac{v_{fl}^2}{g} = \frac{1}{2} \rho \zeta v_{fl}^2 ; \quad (21)$$

čia: ζ – ventilio vietinės kliūties koeficientas; v_{fl} – vidutinis alyvos greitis, m/s.

Vidutinis alyvos greitis v_{fl} apskaičiuojamas taip:

$$v_{fl} = Q/A = 4Q/(\pi d^2); \quad (22)$$

čia: A – angos skerspjūvio plotas, m²; d – angos skersmuo, m.

Transformavus (19–22) formules šiluminė galia, generuojama srauto reguliavimo ventilyje, gali būti apskaičiuojama taip:

$$P_{Ti} = 8 \rho \zeta \frac{\eta_{pv}^3 V_p^3}{\pi^2 d^4} n^3. \quad (23)$$

Srauto reguliavimo ventilio vietinės kliūties koeficientas buvo keičiamas eksperimento metu ir priklauso nuo ventilio atidarymo laipsnio koeficiento γ : $\zeta = f(\gamma)$.

Hidraulinės sistemos efektyvumo koeficientas konvertuojant mechaninę energiją į šiluminę apskaičiuojamas taip:

$$\eta_{hs} = \frac{P_{hs_out}}{P_{hs_in}} = \frac{P_T - P_{T_loss}}{P_{hs_in}}. \quad (24)$$

Siekiant, kad sistemos efektyvumo koeficientas būtų maksimalus $\eta_{hs} \rightarrow 1$, turi būti minimizuoti šilumos nuostoliai į išorę $P_{T_loss} \rightarrow 0$.

2.3. Eksperimentinio tyrimo eiga ir rezultatai

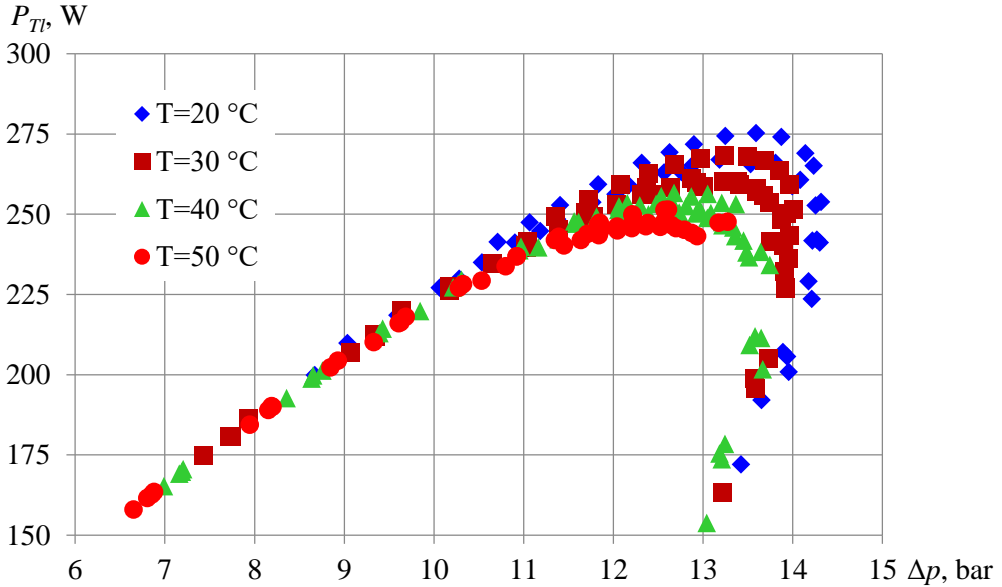
Kiekvienai eksperimento serijai (16 serijų) elektros srovės dažnių keitikliu buvo nustatomas fiksuotas srovės dažnis. Šilumos generavimo savybių tyrimui buvo pateikti elektros srovės parametrai, analogiškai variklio mechaninių savybių tyrimui (2.2 lentelė). Eksperimento serija buvo pradama visiškai atidarytu srauto reguliavimo ventiliu: $\gamma=1$. Srauto reguliavimo ventilis buvo laipsniškai uždarinėjamas iki visai uždaryto $\gamma \rightarrow 0$. Esant kiekvienai srauto reguliavimo ventilio padėčiai buvo matuojamas hidraulinio siurblio ašies sukimosi dažnis n , alyvos slėgis sistemoje prieš srauto reguliavimo ventilyje ir už jo. Pagal slėgio jutiklių rodmenis buvo apskaičiuojamas slėgio perkrytis srauto reguliavimo ventilyje. Sistemos tūrinis srautas apskaičiuotas pagal (20) formulę. Stebimos tiriamosios serijos, kai $f_{set}=const$, hidraulinės sistemos darbo režimai aprašyti 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. Hidraulinės sistemos darbo režimai

Eil. nr.	Sistemos darbo režimas	Reguliavimo ventilio atidarymo laipsnis γ	Sukimosi dažnis n ir sukimo momentas M	Slėgio pokytis Δp	Sistemos šilumnešio debitas Q	Sistemos galia, P_{TI}
1	Neapkrauta sistema	$\gamma = 1$	$n = n_{max}$ $M \approx 0$	$\Delta p \approx 0$	$Q = Q_{max}$	$P_{TI} \approx 0$
2	Sistemos apkrovimas	$\gamma \rightarrow \gamma_{opt}$ ($0 < \gamma < 1$)	$n \rightarrow n_{opt}$ $M \rightarrow M_{opt}$	$\Delta p \rightarrow \Delta p_{opt}$	$Q \rightarrow Q_{opt}$	$P_{TI} \rightarrow P_{TI\ opt}$
3	Optimalus darbo režimas	$\gamma = \gamma_{opt}$	$n = n_{opt}$ $M = M_{opt}$	$\Delta p = \Delta p_{opt}$	$Q = Q_{opt}$	$P_{TI} = P_{TI\ opt}$
4	Sistemos perkrovimas	$\gamma \rightarrow 0$ ($0 < \gamma < 1$)	$n \rightarrow 0$ $M \rightarrow M_{max}$	$\Delta p \rightarrow \Delta p_{max}$	$Q \rightarrow 0$	$P_{TI} \rightarrow 0$
5	Perkrauta sistema	$\gamma \approx 0$	$n \approx 0$ $M = M_{max}$	$\Delta p \downarrow$	$Q \approx 0$	$P_{TI} = 0$

Apkraunant hidraulinę sistemą siurblio ašies sukimosi dažnis n ir kartu srautas Q mažėjo, kol buvo pasiektas ribinis darbo taškas; sistema buvo perkrauta. Toks hidraulinės sistemos perkrovimas gali būti įvardijamas kaip hidraulinis stabdis ir praversti, kai vėjo sąlygos tampa ekstremalios, viršija ribines jėgainės veikimo sąlygas ir dėl to vėjaratį reikia sustabdyti. 2.17 pav. pavaizduota hidraulinės sistemos šiluminės galios priklausomybė nuo slėgio perkryčio $P_{TI}=f(\Delta p)$, pagal kurią stebimas

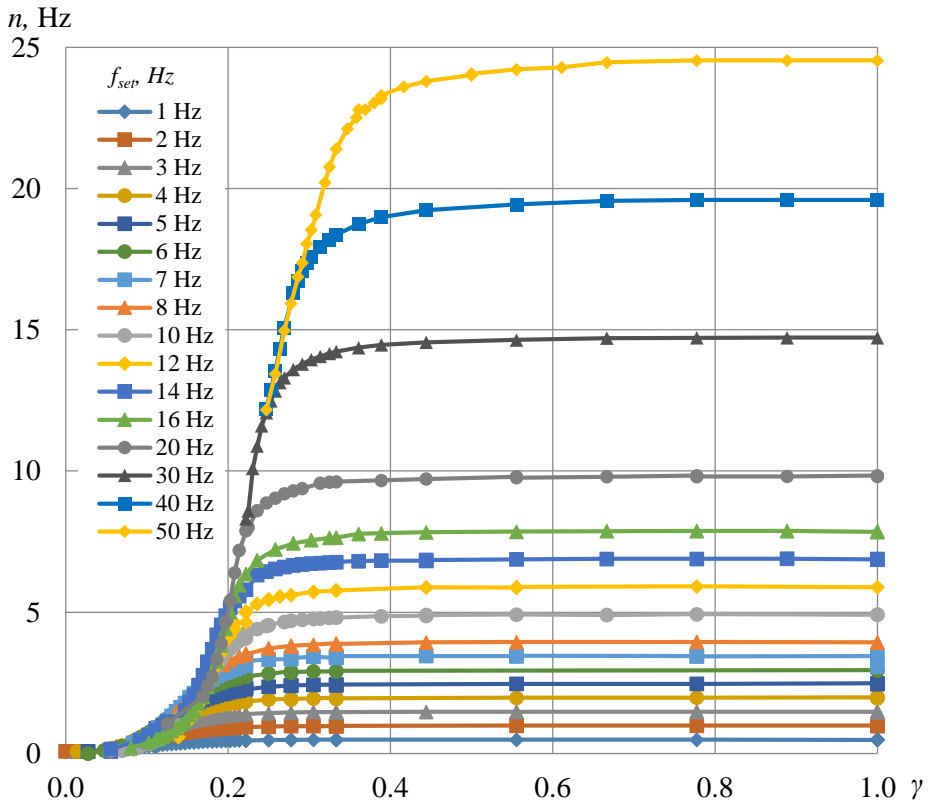
sistemos perkrovimo arba hidraulinio stabdymo režimas. Priklausomybė nustatyta tolygiai apkraunant hidraulinę sistemą, t. y. keičiant reguliavimo ventilio atidarymo laipsnį nuo $\gamma=1$ iki $\gamma \approx 0$, esant skirtingoms pradinėms alyvos temperatūroms T ir pastoviam elektros variklio sukimosi dažniui f_{set} .



2.17 pav. Hidraulinės sistemos šiluminės galios priklausomybė P_{Tl} nuo slėgio perkryčio Δp

Kai kuriuose šaltiniuose šilumą generuojančios hidraulinės sistemos vadinamos hidraulinio stabdžio sistemomis. Srauto reguliavimo elementas yra pagrindinis šiluminės energijos generavimo elementas, ir jo parametų reguliavimas leidžia jėgainės darbą reguliuoti plačiose ribose, taip prisitaikant ir prie mažo vėjo greičio sąlygų.

Hidraulinio siurblio sukimosi dažnio ir sistemos apkrovos laipsnio priklausomybė pateikta 2.18 pav.

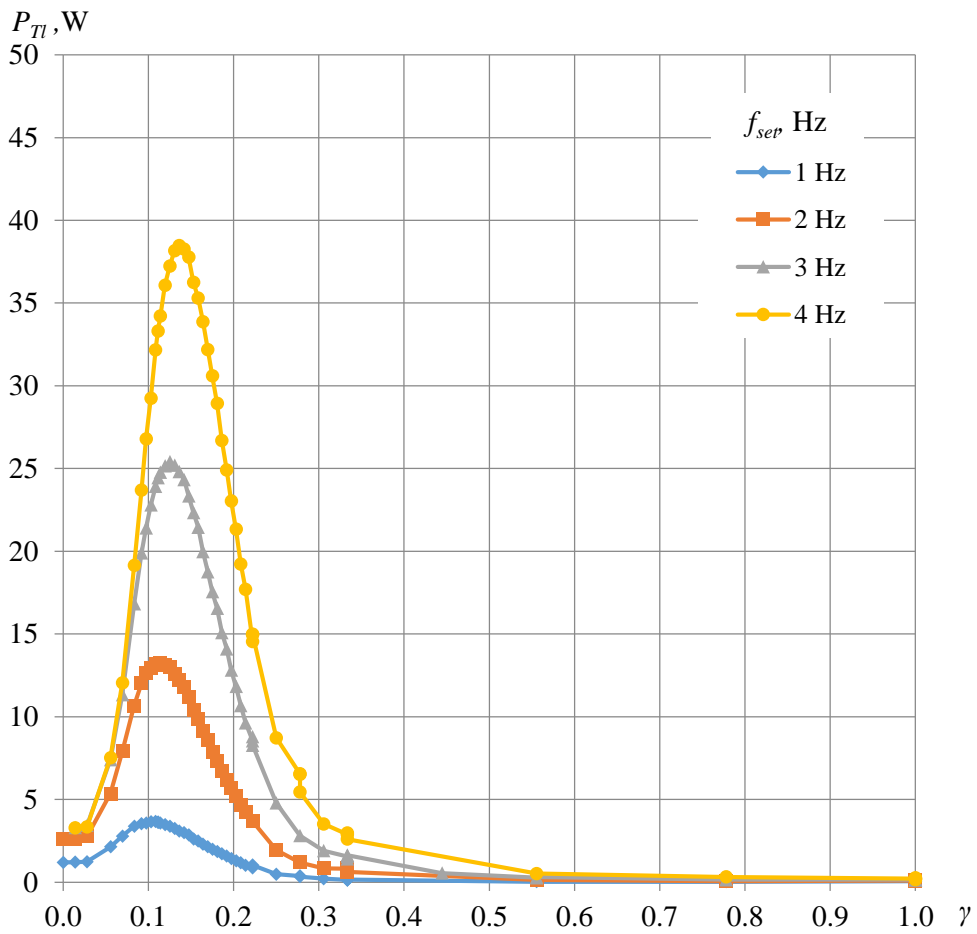


2.18 pav. Hidraulinio siurblio sukimosi dažnio n priklausomybė nuo ventilio atidarymo laipsnio γ

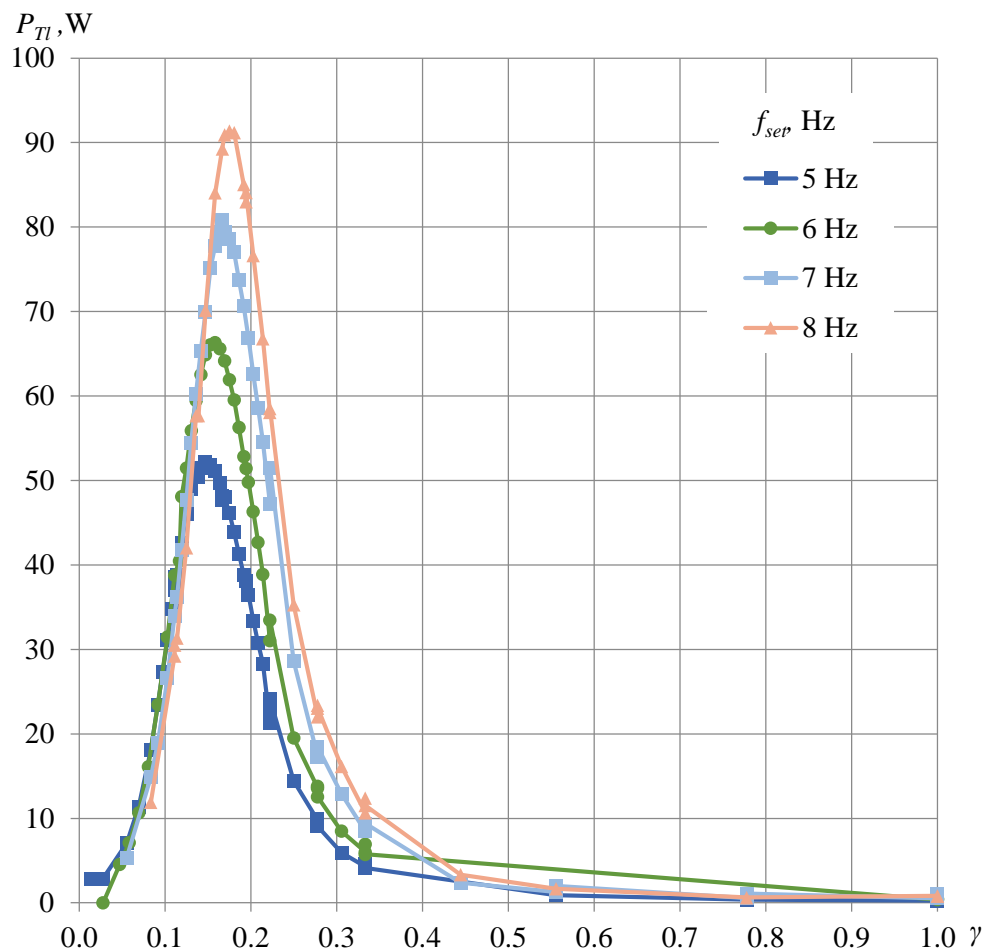
Kai vėjaratis veikia su hidraulinio siurblio be pavaros mechanizmo, γ tiesiogiai keičia vėjaračio santykinio linijinio greičio koeficientą, kuris taip pat priklauso nuo vėjo greičio ir turi įtakos vėjaračių galios koeficientui c_p (1.8 pav.). Siekiant, kad pasirinktam vėjaračio tipui galios koeficientas artėtų prie maksimumo $c_p \rightarrow max$, turi būti parinkta tokia hidraulinės sistemos apkrovos padėtis γ , kad vėjaratis veiktų optimalaus santykio linijinio greičio koeficiento λ zonoje. Bendras vėjaračio ir hidraulinės sistemos energijos konvertavimo efektyvumas yra maksimalus, kai $c_p \cdot \eta_{hs} \rightarrow max$.

Kai vėjaratis su hidraulinio siurblio veikia per pavaros mechanizmą, energijos konvertavimo proceso metu atsiranda papildomi energijos nuostoliai reduktoriuje. Bendras vėjaračio, redukavimo ir hidraulinės sistemos energijos konvertavimo efektyvumas yra maksimalus, kai $c_p \cdot \eta_{red} \cdot \eta_{hs} \rightarrow max$ (η_{red} – reduktoriaus naudingumo koeficientas).

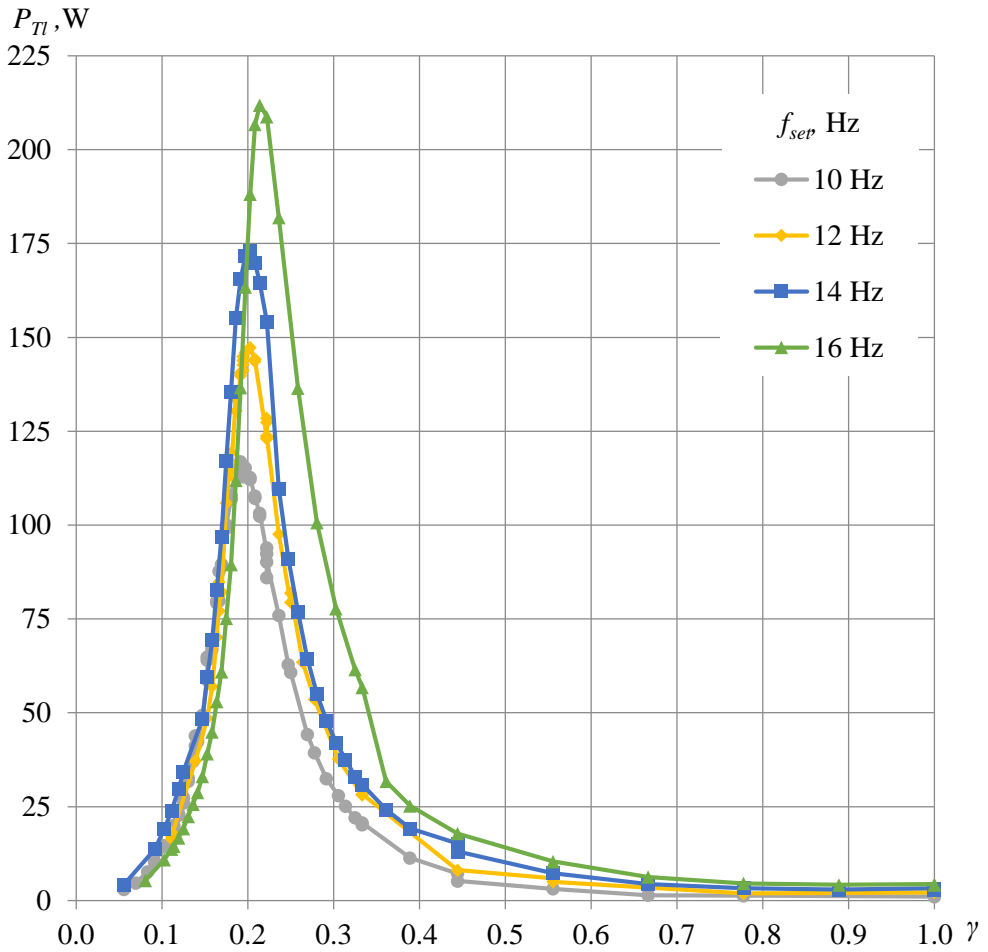
Toliau analizuojama, kokiai reguliavimo ventilio padėčiai esant kokio dydžio šiluminės energijos galia generuojama. Generuojama šiluminė galia apskaičiuojama pagal (19) formulę. Matavimų ir skaičiavimų rezultatai pateikiami 2.19–2.22 pav.



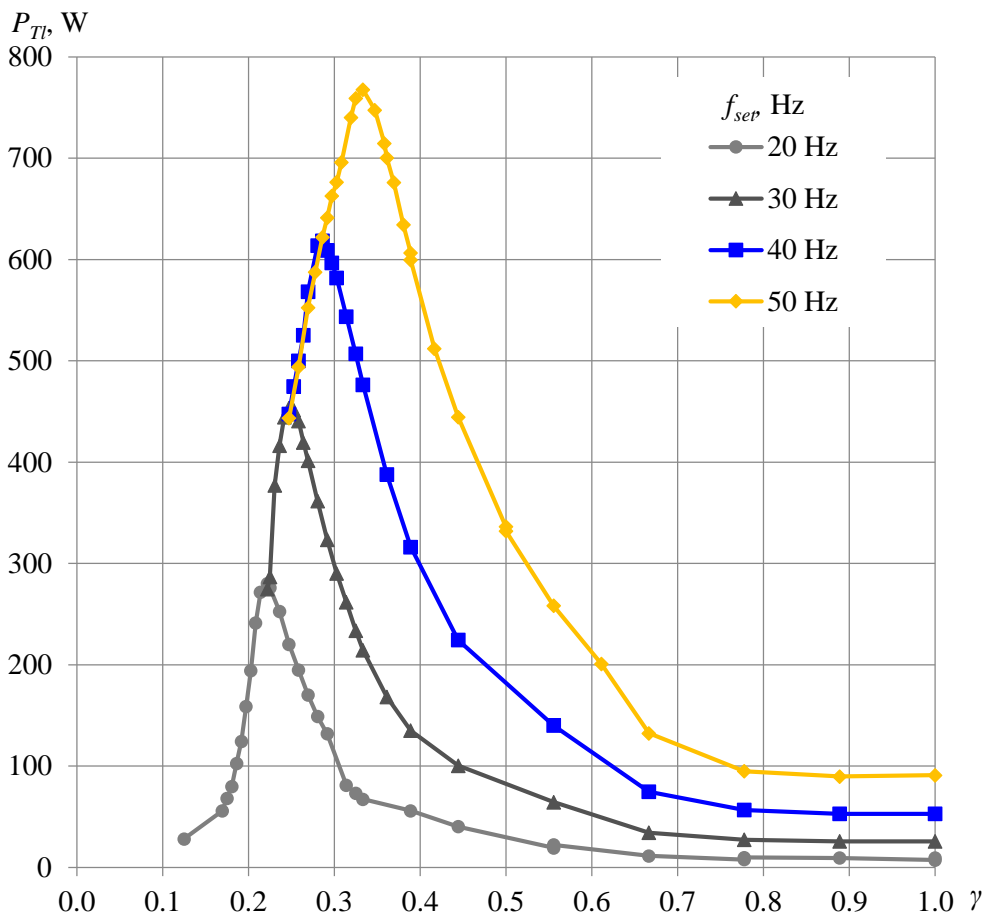
2.19 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai $f_{sep}=1-4$ Hz



2.20 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai $f_{sep}=5-8$ Hz



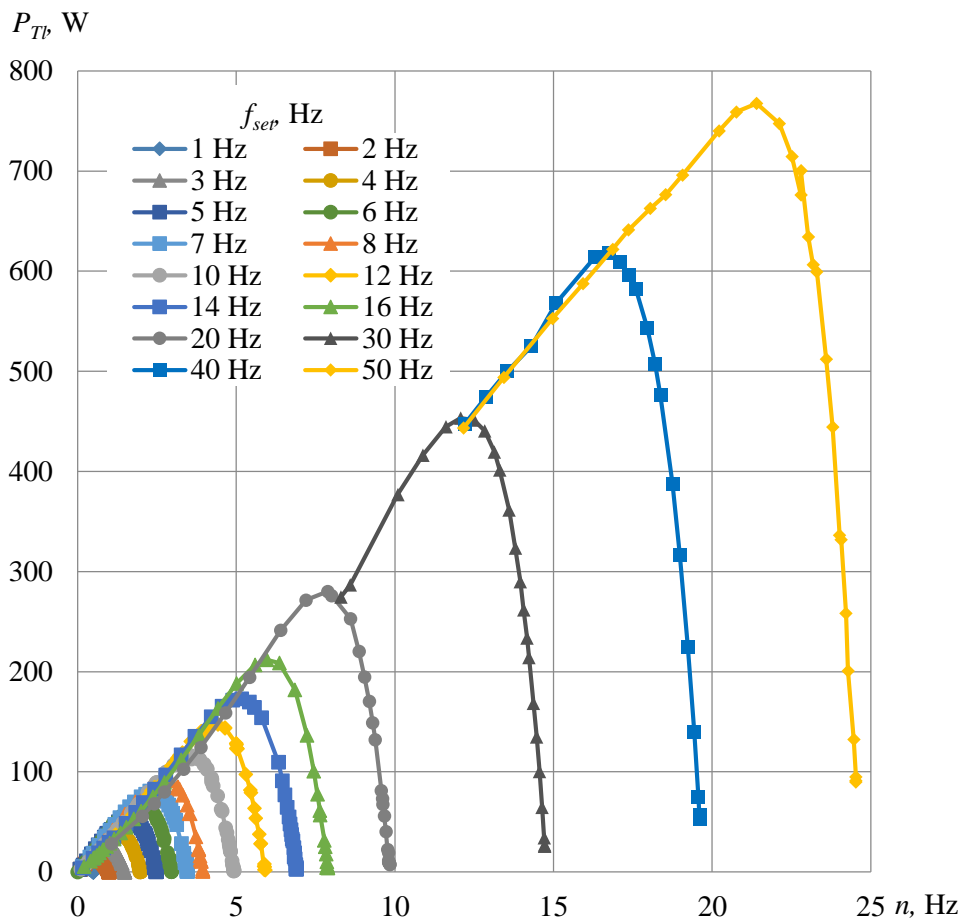
2.21 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai $f_{set}=10-16$ Hz



2.22 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai $f_{set}=20\text{--}50$ Hz

Didėjant siurblio sukimosi dažniui ir kartu sistemos srautui, reguliavimo ventilio padėties įtaka apkrovai kinta: kai $f_{set}=1$ Hz ir $n_{set}=0,5$ aps/s, aiški apkrovos įtaka stebima esant $\gamma=0,23$, kai $f_{set}=50$ Hz ir $n_{set}=25$ aps/s, aiški apkrovos įtaka stebima prie $\gamma=0,77$.

Vėjaračio ir hidraulinės sistemos darbo režimų suderinimui, kad sistema veiktų optimaliu šiluminės energijos generavimo režimu, aktualus hidraulinės sistemos sukimosi dažnio nustatymas. Tiriama hidraulinė sistema turi fiksuotą V_p – santykinį hidraulinio siurblio darbinį tūrį, todėl šiame tyrime $P_{Tl}=f(Q)$ (19) realizuojama per $P_{Tl}=f(n)$ (23). Hidraulinėje sistemoje naudojant kintamo tūrio hidraulinį siurblį būtų galimas tikslesnis optimalių hidraulinės sistemos darbo sąlygų parinkimas, tačiau pati sistema taptų sudėtingesnė ir brangesnė. 2.23 pav. pavaizduota nustatytoji generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo siurblio sukimosi dažnio n .

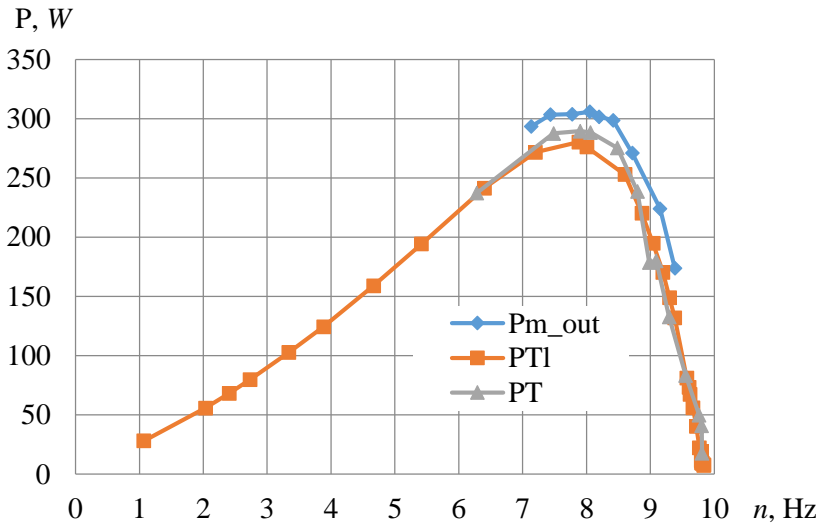


2.23 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo siurblio sukimosi dažnio n , kai $f_{set}=1-50$ Hz

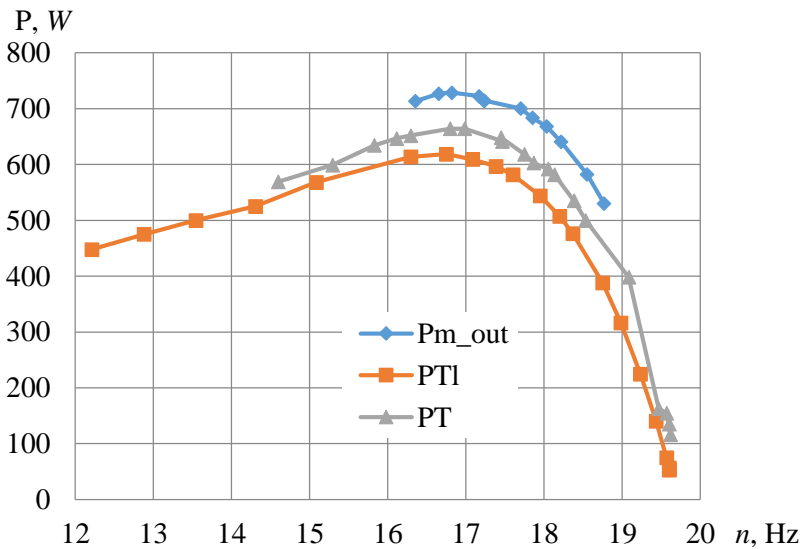
Pagal 2.23 pav. pavaizduotą $P_{Tl}=f(n)$ priklausomybę daroma išvada, kad jei norint pasiekti maksimalų bendrą vėjaračio-hidraulinės sistemos efektyvumą optimalaus dažnio taškas n_{opt} nėra palankus dėl pavaros mechanizmo ar vėjaračio darbo režimo ypatumų, sistema mažesnę šiluminę galią gali generuoti dirbdama 2 gretimais optimaliam hidraulinės sistemos darbo dažniais $n_{-opt}<n_{opt}<n_{+opt}$. Šiuo atveju n_{+opt} yra perkrautos sistemos darbinis dažnis, n_{-opt} – apkraunamos sistemos darbinis dažnis.

Tiesioginiai hidraulinės sistemos šiluminės galios P_T matavimai buvo atliekami pagal T_5 (T_{out}) temperatūros jutiklio bei T_1 , T_2 , T_3 (T_r) temperatūros jutiklių vidurkio (2.3 pav.) rodmenų skirtumą ir hidraulinio siurblio sukimosi dažnio n matavimų duomenis. Skaičiavimams taikyta (18) formulė, laikant $\eta_{pv}=1,0$; $V_p=26,2$ cm³/aps; $c=1,67$ J/(kg·K); $\rho=867$ kg/m³ (kai alyvos temperatūra +20 °C). Sąlygoms, kai $f_{set}=20$ Hz ir $f_{set}=40$ Hz, atliktas pilnas temperatūros matavimas nuo neapkrautos sistemos iki

perkrautos sistemos (pagal 2.5 lentelės darbo režimus). Matavimų ir skaičiavimų rezultatai pavaizduoti 2.24 pav. ir 2.25 pav.



2.24 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_T priklausomybė nuo siurblio sukimosi dažnio n , kai $f_{set} = 20$ Hz



2.25 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_T priklausomybė nuo siurblio sukimosi dažnio n , kai $f_{set} = 40$ Hz

Pagal 2.24 ir 2.25 pav. galima daryti išvadą, kad analizuojant hidraulinės sistemos darbą pagal slėgių ir pagal temperatūros matavimus gauti optimalaus hidraulinio siurblio sukimosi dažniai n_{opt} skiriasi nereikšmingai, todėl likusių f_{set}

variantų temperatūriniai matavimai atliekami sistemai veikiant optimalaus darbo režimo n_{opt} dažniu. Visų temperatūrinių matavimų ir galios skaičiavimų rezultatai pateikiami 2.6 lentelėje.

2.6 lentelė. Optimaliu darbo režimu veikiančios hidraulinės sistemos techniniai parametrai

f_{set} , Hz	1	2	3	4	5	6	7	8
n_{set} , Hz	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
v^* , m/s	1,18	1,79	2,16	2,50	2,76	2,97	3,10	3,29
γ_{opt} 20 °C	0,108	0,114	0,125	0,136	0,147	0,158	0,167	0,181
n_{opt} , Hz	0,28	0,57	0,90	1,23	1,56	2,01	2,27	2,79
Q , cm ³ /s	7,34	14,93	23,58	32,23	40,87	52,66	59,47	73,10
$P_{TL,max}$, W	3,7	13,3	25,4	38,5	52,2	66,3	80,8	91,2
$P_{T,max}$, W	4,4	15,4	26,5	41,9	56,1	69,1	79,8	95,1
η_{hs}	0,94	0,95	0,93	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94

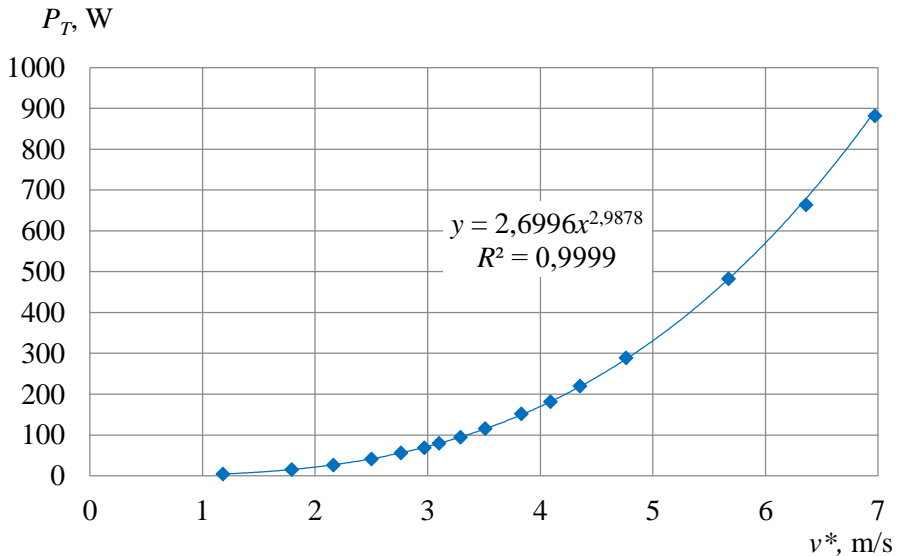
f_{set} , Hz	10	12	14	16	20	30	40	50
n_{set} , Hz	5	6	7	8	10	15	20	25
v^* , m/s	3,51	3,83	4,09	4,35	4,76	5,67	6,36	6,97
γ_{opt} 20 °C	0,192	0,203	0,203	0,214	0,222	0,247	0,286	0,333
n_{opt} , Hz	3,54	4,42	5,17	5,96	7,88	12,07	16,75	21,40
Q , cm ³ /s	92,75	115,80	135,45	156,15	206,46	316,23	438,85	560,68
$P_{TL,max}$, W	116,9	147,3	173,0	211,9	280,3	453,3	618,5	767,6
$P_{T,max}$, W	115,8	151,9	181,9	220,0	289,5	483,1	664,2	881,9
η_{hs}	0,95	0,95	0,94	0,94	0,95	0,93	0,91	0,92

2.6 lentelėje taip pat pateikiamas pagal (24) formulę ir 2.4 lentelės duomenis apskaičiuotas energijos konvertavimo naudingumo koeficientas η_{hs} , kuris nustatytas skirtingomis sąlygomis svyruoja 0,91–0,95 ribose. Pagal 2.6 lentelėje pateiktus duomenis taip pat matome, kad tiriamos sistemos startinis vėjo greitis (angl. termino atitikmuo „cut-in-speed“) gali būti mažesnis negu $v=1,18$ m/s. Eksperimentinių tyrimų metu mažesnis vėjo greitis negalėjo būti sumodeliuotas dėl elektros variklio veikimo ypatumų, t. y. perkaitimo, esant mažam sukimosi dažniui, kuris atitiko mažą imituojamą vėjo greitį. Palyginimui, panašios galios elektros energiją gaminančių vėjo jėgainių startinis vėjo greitis yra 3,2–3,3 m/s (modelis T701, gamintojas *Pika Energy, Inc.*, šaltinis – <http://www.pika-energy.com>; modelis XZERES *Skystream* 3.7, gamintojas XZERES *Wind*, šaltinis – <http://www.xzeres.com>). Startinio jėgainės vėjo greičio palyginimui pasirinktos elektrą generuojančios vėjo jėgainės, kurios yra sertifikuotos pagal Amerikos vėjo energetikos asociacijos (AWEA) standartą Nr. 9.1 – 2009.

2.4. Hidraulinio įrenginio darbo optimizavimas

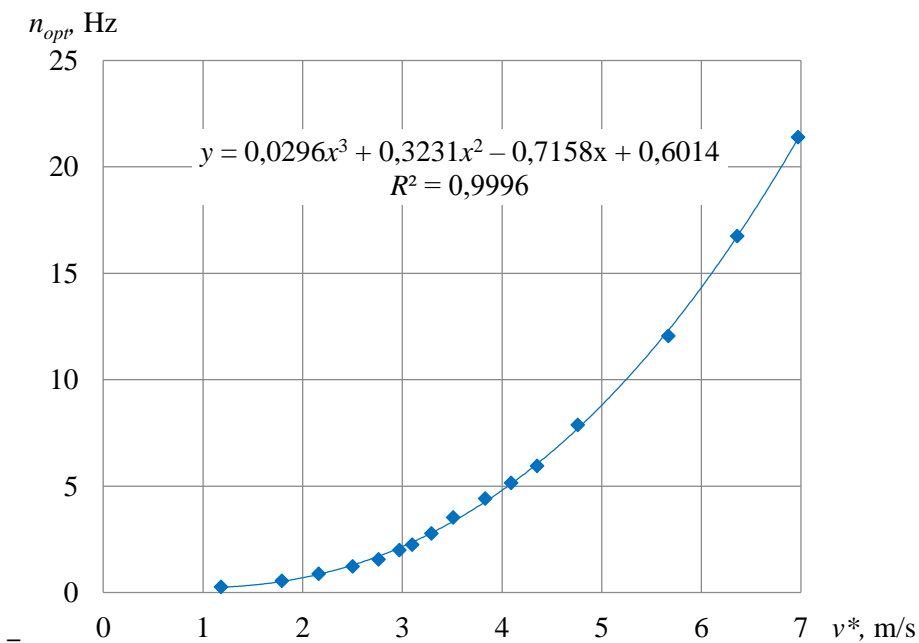
Optimaliu darbo režimu dirbančios sistemos galios priklausomybė nuo menamojo vėjo greičio v^* , nustatyta remiantis 2.6 lentelės duomenimis, pavaizduota 2.26 pav. ir gali būti aprašoma empirine funkcija:

$$P_{T_{max}} = 2,6996 \cdot v^{*2,9878}. \quad (25)$$



2.26 pav. Hidraulinės sistemos generuotos šiluminės galios P_T priklausomybė nuo menamojo vėjo greičio v^*

Kuriama vėjo energiją naudojanti hidraulinė sistema turi būti automatizuota reaguoti į nuolat besikeičiančias vėjo sąlygas. Pavyzdžiui, esant tyrimo (imituojamo vėjo energijos šaltinio) sąlygoms $f_{set} = 50$ Hz, 2.22 pav. pavaizduota priklausomybė $P_{Tl} = f(\gamma)$ rodo, kad didžiausioji energijos generavimo galia srauto reguliavimo ventilyje $P_{Tl} = 767,6$ W pasiekama, kai reguliavimo ventilio atidarymo laipsnis $\gamma = 0,333$. Pagal 2.18 pav. pavaizduotą $n = f(\gamma)$ nustatoma, kad $n_{opt} = 21,4$ aps/s, taigi sistema turi būti apkraunama dirbti 21,4 aps/s dažniu. Tačiau realiomis sąlygomis sistemą automatizuoti patogiausia tiesiogiai matuojant vėjo greitį ir pagal nustatytą funkciją apskaičiuojant reikalingą sistemos apkrovos laipsnį – tam gali būti nustatyta $n_{opt} = f(v)$ priklausomybė. Tiriamos eksperimentinės sistemos hidraulinio siurblio optimalaus sukimosi dažnio n_{opt} priklausomybė nuo menamojo vėjo greičio v^* pavaizduota 2.27 pav.



2.27 pav. Hidraulinės sistemos veleno apsisukimų dažnio n priklausomybė nuo menamojo vėjo greičio v^*

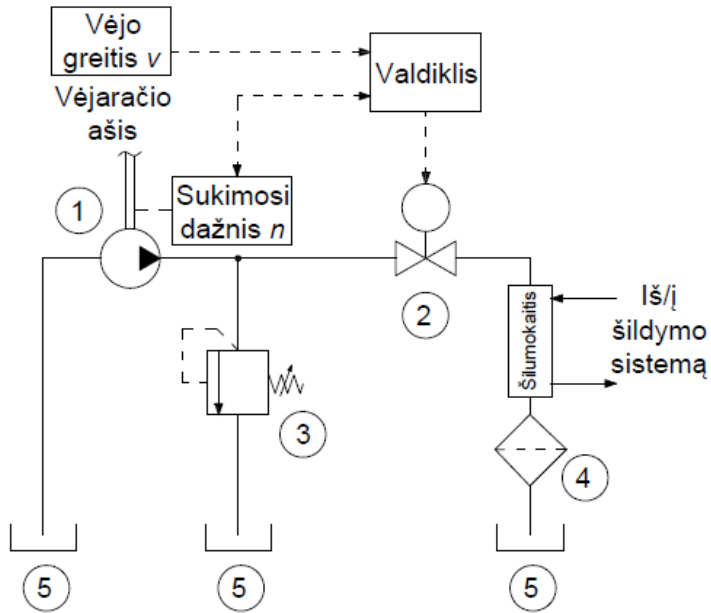
Pagal 2.27 pav. pavaizduotus matavimų duomenis eksperimentinio įrenginio priklausomybę $n_{opt}=f(v^*)$ aprašoma formule:

$$n_{opt}=0,0296 \cdot v^{*3}+0,3231 \cdot v^{*2}-0,7158 \cdot v^*+0,6014. \quad (26)$$

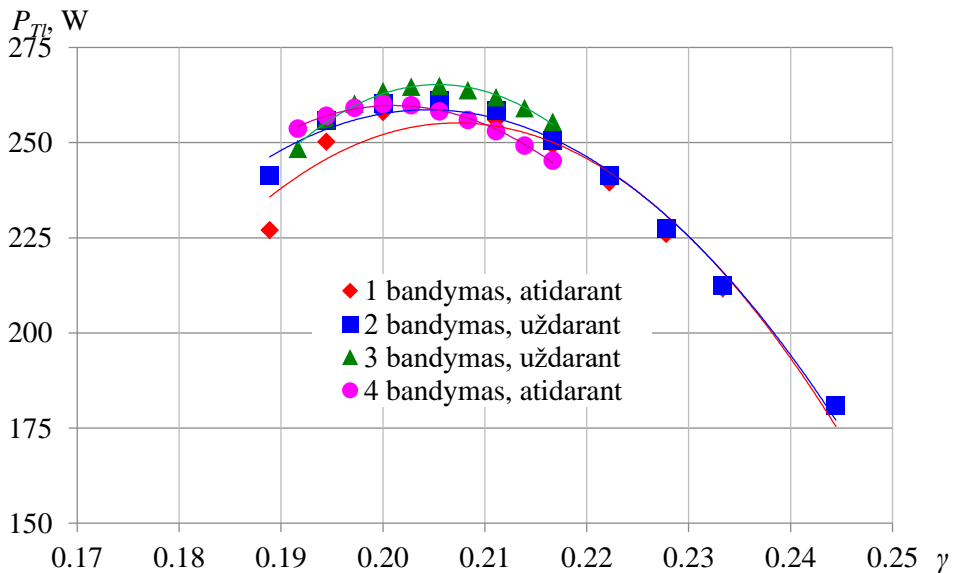
(26) formulė gali būti taikoma automatizavimo sistemos algoritmui sukurti.

2.28 pav. parodyta principinė vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją hidraulinėje sistemoje automatinio valdymo schema, pagal kurią automatinis valdiklis turi gauti vėjo greičio bei hidraulinio siurblio ašies sukimosi dažnio signalus ir pagal tai formuoti signalą srauto reguliavimo ventilio pavarai.

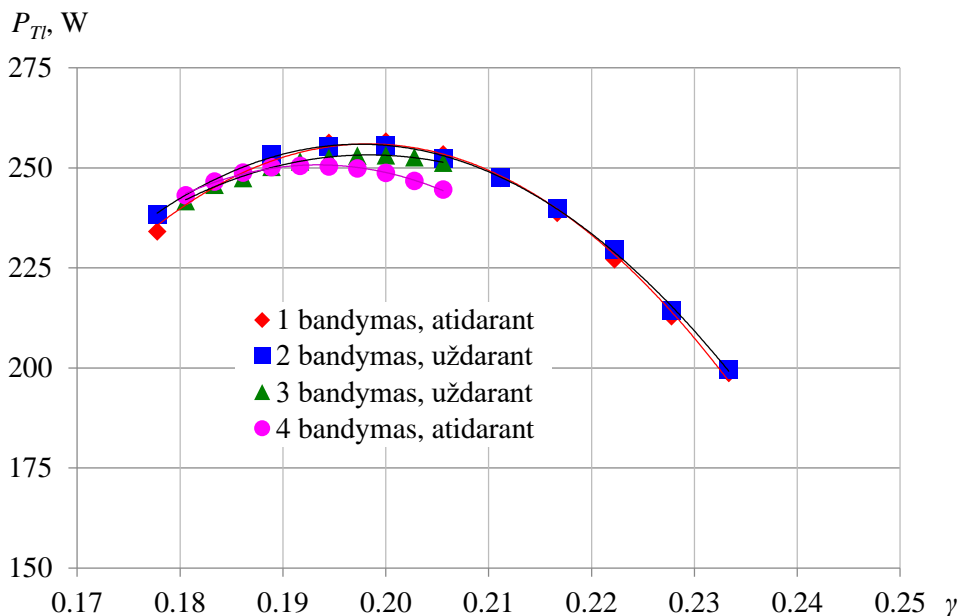
Hidraulinio įrenginio tyrimo metu taip pat buvo analizuojama, ar optimalaus sistemos darbo režimo padėtis, kai $P_{TI} \rightarrow P_{TI,max}$, priklauso nuo hidraulinės sistemos apkrovos didinimo ar mažinimo krypties. Šiai prielaidai paneigti arba patvirtinti buvo atlikta po dvi eksperimento serijas didinant ir mažinant sistemos apkrovą. Eksperimento serijos atliktos esant pastoviam elektros variklio sukimosi dažniui $f_{set}=20$ Hz ir skirtingoms pradinėms alyvos temperatūroms $T=30$ °C ir $T=40$ °C – tyrimo rezultatai pateikti 2.29 ir 2.30 pav.



2.28 pav. Vėjo energijos konvertavimo į šiluminę energiją hidrauliniėje sistemoje automatinio valdymo principinė schema: 1 – hidraulinis siurblys; 2 – srauto reguliavimo ventilis; 3 – apsaugos nuo slėgio perviršio vožtuvas; 4 – filtras; 5 – vidinis alyvos bakas



2.29 pav. Hidraulinės sistemos apkrovos reguliavimo ventilyje generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai elektros variklio sukimosi dažnis $f_{ser}=20$ Hz, pradinė alyvos temperatūra $T=30$ °C



2.30 pav. Hidraulinės sistemos apkrovos reguliavimo ventilyje generuotos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo ventilio atidarymo laipsnio γ , kai elektros variklio sukimosi dažnis $f_{set}=20$ Hz, pradinė alyvos temperatūra $T=40$ °C

Iš skirtingų bandymų rezultatų, gautų didinant ir mažinant hidraulinės sistemos apkrovą, išvesti aritmetiniai vidurkiai ir nustatyta, kad optimali sistemos apkrova, kai elektros variklio sukimosi dažnis $f_{set}=20$ Hz, o pradinė alyvos temperatūra $T=30$ °C, sutampa ir gaunama, kai reguliavimo ventilio atidarymo laipsnis $\gamma=0,205$. Kai elektros variklio sukimosi dažnis $f_{set}=20$ Hz, o pradinė alyvos temperatūra $T=40$ °C, optimalios sistemos apkrovos taškas svyruoja ir gaunamas, kai reguliavimo ventilio atidarymo laipsnis γ kinta nuo 0,195 iki 0,200. Kadangi tokios amplitudės svyravimas sudaro 0,5 % nuo viso apkrovos diapazono, laikoma, kad nustatant optimalų hidraulinės sistemos darbo režimą nėra svarbu, ar sistemos apkrova didinama ar mažinama, ir jai galioja (26) lygtis.

2.5. Išvados

1. Sukurta eksperimentinė šilumą generuojanti hidraulinė sistema leidžia įvairiapusiškai ($n=f(\gamma)$, $P_{Tl}=f(\gamma)$, $P_{Tl}=f(n)$) ir plačiose ribose (kai energijos šaltinio galia yra nuo 5 W iki 950 W) analizuoti mechaninės energijos konvertavimo į šiluminę energiją procesus.
2. Nustatytas eksperimentinės hidraulinės sistemos energijos konvertavimo proceso efektyvumas svyruoja 91–95 % ribose.
3. Nustatytas tiriamos eksperimentinės hidraulinės sistemos darbo automatizavimo sistemos algoritmas ir valdiklio įėjimo signalų tarpusavio ryšys (26) optimaliam energijos konvertavimo sistemos darbui.

3. KONVERTUOTOS MECHANINĖS VĖJO ENERGIJOS PRITAIKYMAS PASTATO ENERGIJOS POREIKIAMS

3.1. Energijos poreikių pastate tyrimas

Atliekamų eksperimentų tyrimų objektas – hidraulinė sistema, konvertuojanti mechaninę vėjo energiją į šiluminę, priderinta prie individualaus gyvenamojo namo poreikių ir vietovės vėjo sąlygų. Atsižvelgiant į reikalavimus naujų pastatų statybai, hidraulinės sistemos techninių parametrų nustatymui atliekama 120 m² šildomo ploto individualaus gyvenamojo namo šilumos poreikių šildymui analizė.

Analizuojamas pastatas dviejų aukštų, skaidrios atitvaros sudaro 19 proc. vertikalių atitvarų, 64 proc. skaidrių atitvarų orientuota į pietus (3.1. pav.). Pastatas suprojektuotas vadovaujantis efektyvaus energijos naudojimo principais siekiant, kad išlaidos pastato šildymui šaltuoju metų laikotarpiu ir vėsinimui šiltuoju metų laikotarpiu būtų minimalios.



3.1. pav. Pastato, naudojamo šilumos poreikių analizei, vizualizacija (a) – pietų–vakarų orientacijos fasadai; b) – šiaurės–rytų orientacijos fasadai, arch. A. Zaniauskas)

Šiluminės energijos poreikių šildymui skaičiavimai atliekami su keturiais pastato atitvarų šiluminių charakteristikų variantais – t. y. kai pastato išorinės atitvaros atitinka „B“, „A“, „A+“ ir „A++“ energinio naudingumo klasės pastatams keliamus pastatų atitvarų šilumos perdavimo koeficientų reikalavimus, kurie taikomi atitvarų norminių savitųjų šilumos nuostolių skaičiavimui (Statybos techninis reglamentas STR 2.01.09:2012 „Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas“). Skaičiuojant vadovaujama Lietuvos statybos techninių reglamentų (STR) baze, tačiau analogiškas skaičiavimas gali būti atliekamas ir pagal bet kurios kitos šalies teisinės bazės reikalavimus. 3.1. lentelėje pateikiami pradiniai skaičiavimų duomenys.

Šiluminės energijos poreikių pastato šildymui skaičiavimas atliekamas pagal metodiką, aprašomą STR 2.09.04:2008 „Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui“.

3.1 lentelė. Pradiniai skaičiavimų duomenys pastato šiluminės energijos poreikių šildymui skaičiavimams (STR 2.05.01:2013 ir STR 2.09.04:2008)

	Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė			
	B	A	A+	A++
Pastatų atitvarų šilumos perdavimo koeficientų U , W/m^2K vertės: <ul style="list-style-type: none"> • langai • durys • sienos • stogas • grindys ant grunto 	1,6	1	0,85	0,7
Vėdinimo sistemos šilumogražos įrenginio naudingumo koeficientas η	0,65	0,65	0,8	0,9
Oro apykaita dėl infiltracijos n_{in} , h^{-1}	0,3	0,3	0,3	0,3
Patalpos vidaus oro temperatūra	+20 °C			
Lauko oro temperatūros parametrai	pagal RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“, Galvonaitė, 2013 (Vidutinės klimatinių rodiklių reikšmės Lietuvoje 1981–2010 m.)			

Apskaičiuojami patalpų projektiniai savitieji šilumos nuostoliai H , W/K, susidedantys iš atitvarų projektinių savitųjų šilumos nuostolių H_{en} , W/K ir projektinių savitųjų vėdinimo šilumos nuostolių H_v , W/K. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2. lentelė. Patalpų atitvarų projektinių savitųjų šilumos nuostolių H , W/K dedamųjų vertės

	Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė			
	B	A	A+	A++
Atitvarų projektinių savitųjų šilumos nuostoliai H_{en} , W/K	185	90	76	64
Projektinių savitųjų vėdinimo šilumos nuostoliai H_v , W/K	74	74	59	48
$H = H_{en} + H_v$, W/K	259	164	134	112

Skaičiuojant savituosius vėdinimo šilumos nuostolius laikoma, kad pastate įrengta mechaninė vėdinimo sistema, kuri tiekia į patalpas 305 m³/h oro kiekį. Vėdinimo sistemos oro kiekis nustatytas pagal STR 2.09.02:2005 „Šildymas, vėdinimas ir oro kondicionavimas“. Skaičiavimo rezultatai rodo, kad tokio paties naudingo ploto, bet aukštesnės energinio naudingumo klasės pastate dėl vėdinimo susidarantys šilumos nuostoliai beveik prilygsta šilumos nuostoliams per atitvaras.

Skaičiuojant nevertinami šilumos nuostoliai dėl išorinių durų varstymo – nors šie nuostoliai neabejotinai atsiranda eksploatuojant pastatą, tačiau pastate projektuojant tambūrą su šildymo sistema be automatinio temperatūros reguliavimo, dėl durų varstymo susidarantys šilumos nuostoliai kompensuojami nebus. Tokiu atveju oro temperatūra tambūre svyruoja, tačiau šiai patalpai nėra keliami aukšti komforto reikalavimai, ir toks temperatūros svyravimas yra priimtinas vartotojui.

Toliau skaičiuojant analizuojamas kasmėnesinis pastato šiluminės energijos poreikis Q_h , kWh, tam, kad galima būtų palyginti šį rodiklį su vėjo energijos potencialu, kuris pagal vėjų atlasus (Troen, 1989, Rathmann, 2003) taip pat pateikiamas atskirais mėnesiais.

Skaičiuojamas mėnesio šilumos poreikis patalpų šildymui Q_h susideda iš mėnesio šilumos poreikio projektiniams šilumos nuostoliams per atitvaras padengti Q_{en} , mėnesio šilumos poreikio projektiniams šilumos nuostoliams dėl vėdinimo padengti Q_v , kWh, bei mėnesio projekcinio šilumos prietėkio į patalpą Q_{hg} , koeficientu η_0 įvertinant pastato atitvarų savybes įsisavinti pritekėjusią į patalpas šiluminę energiją, apskaičiuojamas pagal 27 formulę:

$$Q_h = Q_{en} + Q_v - \eta_0 \cdot Q_{hg}. \quad (27)$$

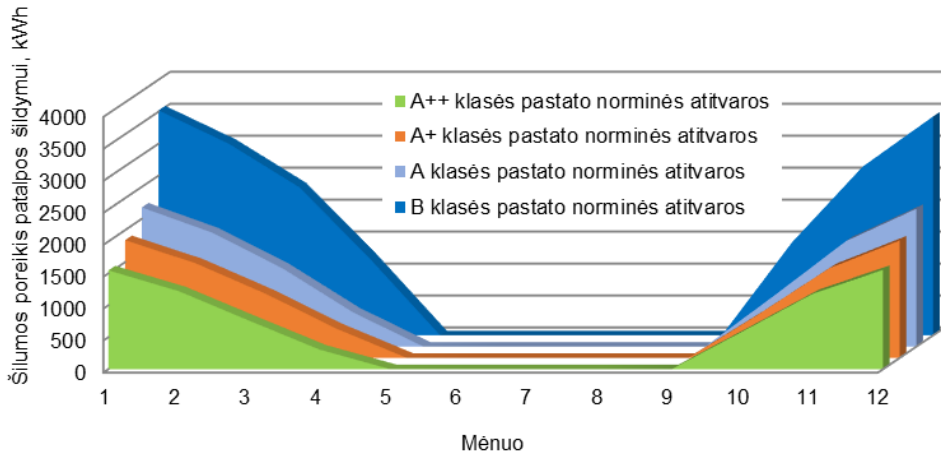
Mėnesinio šilumos poreikio skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje (šilumos poreikio skaitinė vertė su neigiamu ženklu reiškia šilumos pritekėjimus į pastatą).

3.3 lentelė. Skaičiuojamas šilumos poreikis patalpų šildymui Q_h , kWh

	Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė			
	B	A	A+	A++
Sausis	3520	2178	1843	1547
Vasaris	2997	1783	1481	1220
Kovas	2317	1224	1002	759
Balandis	1203	536	459	306
Gegužė	335	313	333	323
Birželis	195	135	105	60
Liepa	-191	-105	-96	-111
Rugpjūtis	-90	-24	-24	-46
Rugsėjis	436	280	335	329
Spalis	1459	814	684	586
Lapkritis	2639	1650	1402	1178
Gruodis	3424	2156	1837	1553

Nors pagal 3.3 lentelėje pateiktus skaičiavimo rezultatus gaunama, kad poreikis šildyti pastatą atsiranda ir gegužės–birželio bei rugsėjo mėnesiais, remiantis ilgamete praktika, šiais mėnesiais Lietuvos klimato sąlygomis pastatai dažniausiai nešildomi. Daroma prielaida, kad šiais mėnesiais poreikis šildyti pastatą nėra didelis ir tokia skaičiavimo paklaida gali atsirasti dėl patalpų gaunamos perteklinės šiluminės energijos įvertinimo netikslumų arba vidutinės daugiametės mėnesio temperatūros

nustatymo netikslumų. Toliau skaičiuojant laikoma, kad gegužės–birželio mėnesiais pastatas nenaudoja energijos šildymui. Priimama šiluminės energijos poreikių dinamika per metus pateikta 3.2 pav.



3.2 pav. Individualaus gyvenamojo namo šiluminės energijos poreikių dinamika per metus

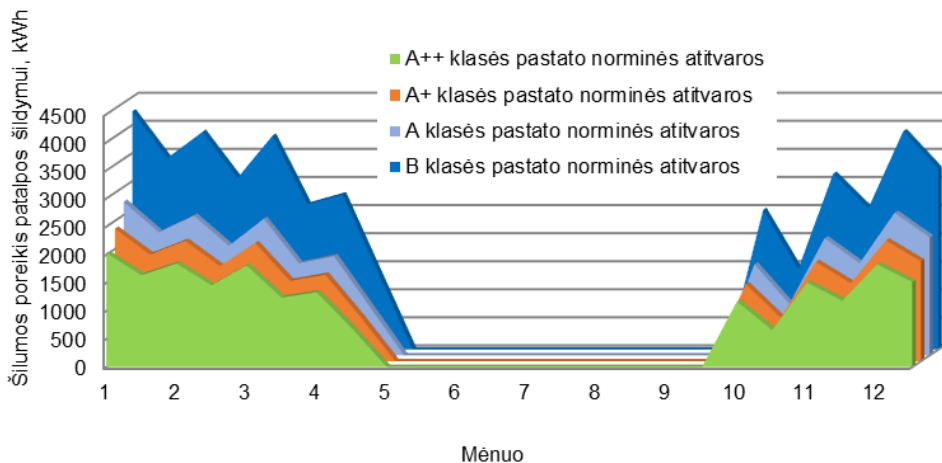
Skaičiuojant mėnesinius šilumos nuostolius vertinama vietovės vidutinė mėnesio temperatūra, kuri pagal šiuo metu galiojančius statybos reglamentus priimama pagal 1961–1990 metų meteorologinius stebėjimus (Lietuvos Respublikos Statybos ir urbanistikos ministerija, 1995). Vertinant, kad stebimas klimato šiltėjimas, šiame darbe skaičiavimams taikomi 1981–2010 metų meteorologinių stebėjimų duomenys Kauno mieste (Galvonaitė, 2013), kurie pateikiami 3.4 lentelėje. Palyginimui taip pat pateikiami 1961–1990 metų meteorologinių stebėjimų rodikliai.

3.4. lentelė. Vidutinės mėnesio lauko oro temperatūros (Kauno m.)

Mėnuo	Pagal statybos reglamentus taikytini 1961–1990 m. stebėjimų duomenys (Lietuvos Respublikos Statybos ir urbanistikos ministerija, Statybinė klimatologija RSN156-94, 1995)	Skaičiavimams taikomi 1981–2010 m. stebėjimų duomenys (Galvonaitė, 2013)
Sausis	-5,2	-3,25
Vasaris	-4,3	-3,25
Kovas	-0,4	0,75
Balandis	5,8	7,25
Gegužė	12,4	12,75
Birželis	15,8	15,75
Liepa	16,9	18,25
Rugpjūtis	16,4	17,75
Rugsėjis	11,9	12,75
Spalis	7,1	7,75
Lapkritis	1,8	1,75
Gruodis	-2,3	-2,23

Remiantis pateiktomis 3.4 lentelėje vidutinėmis mėnesių temperatūros vertėmis galima pastebėti, kad pagal pastarųjų trisdešimties metų stebėjimų duomenis jaučiamas klimatinė sąlygų pasikeitimas. Nors vidutinė mėnesio temperatūra turi tiesioginę įtaką mėnesio šiluminės energijos poreikiams šildymui, ji nebūtinai turi tiesioginę įtaką šildymo sistemos projektinei galiai, nes pagal naujesnius klimato duomenis nėra pateikiami šalčiausių penkiadienių rodikliai, nuo kurių priklauso šildymo sistemos galia.

Darbe siekiama nustatyti, kokių techninių parametru šilumos šaltinis galės dirbti didžiausia apkrova, todėl atliktas pastato šilumos poreikių skaičiavimas, įvertinant vidutinę lauko oro temperatūros svyravimo amplitudę ir nevertinant šilumos pritekėjimų bei inercijos. Skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.3 pav. Nors visas pastatas dėl didelės inercijos nereaguoja į atskiros paros lauko oro temperatūros svyravimus, tačiau į tokius svyravimus reaguoja šilumai laidesnės pastato atitvaros, t. y. langai, todėl skaičiuojant nutarta į tai atsižvelgti.



3.3 pav. Individualaus gyvenamojo namo šiluminės energijos poreikių dinamika per metus, įvertinant vidutinę mėnesio temperatūros svyravimų amplitudę

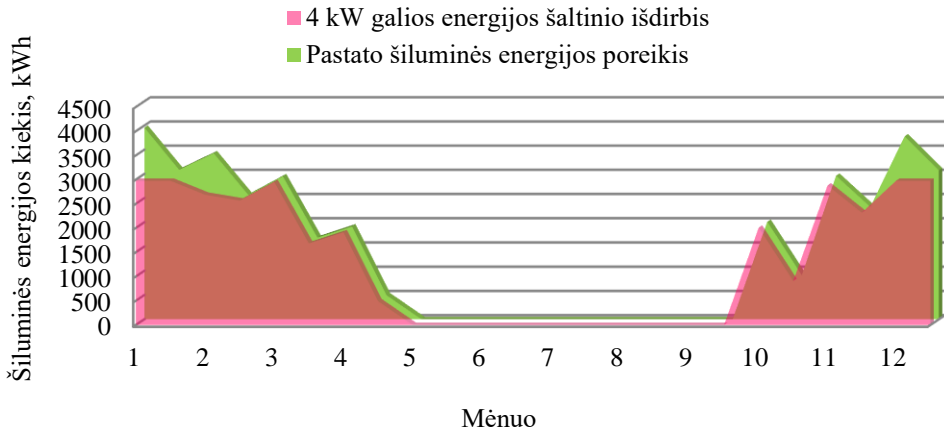
Analizuojamo pastato šildymo sistemos galia taip pat skaičiuojama pagal STR 2.09.04:2008 „Pastato šildymo sistemos galia. Šilumos poreikis šildymui“. Šio skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje. Skaičiuojant pastatui šildyti reikalingą galią nevertinami šilumos pritekėjimai į patalpą.

Pagal reikalingą šildymo sistemos galią galima įvertinti, kokios galios vėjo energijos šilumos šaltinis turi būti parenkamas pastatui. Kadangi vėjo energija dėl savo nepastovumo negali būti vienintelis energijos šaltinis pastato šildymui, analizuojama, kokios galios šaltinis ir kokią metinių šiluminės energijos poreikių dalį užtikrins. Šiai analizei pasirenkama pastato mėnesio šiluminės energijos poreikį vertinti atsižvelgiant į mėnesio vidutinę temperatūros svyravimų amplitudę. Parenkama vėjo energiją naudojančio (VEN) šilumos generatoriaus galia 1,0–1,5–2,0–4,0 kW, t. y. 33–40 proc. nuo pastato šildymo sistemos galios. Apskaičiuojama, kokią šiluminės energijos dalį bendruose pastato šiluminės energijos poreikiuose

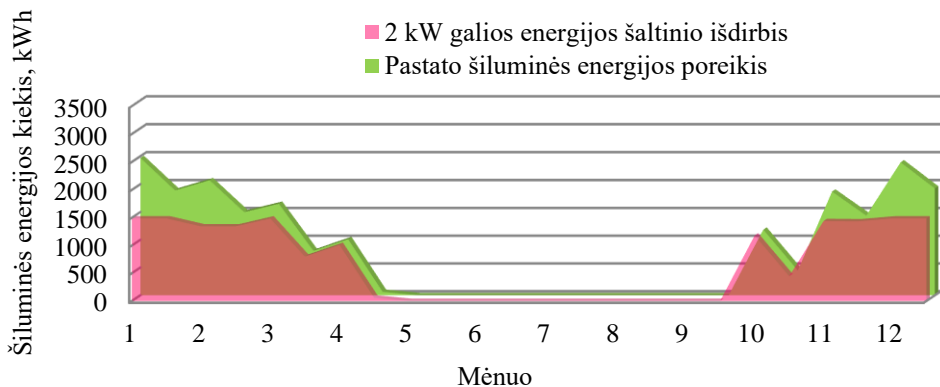
šildymui gali užtikrinti parinktos galios įrenginiai. Suminiai metiniai energijos poreikiai šildymui gaunami susumavus atskirų mėnesių poreikius. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje ir 3.4–3.7 pav.

3.5 lentelė. Pastato šildymo sistemos galia, W

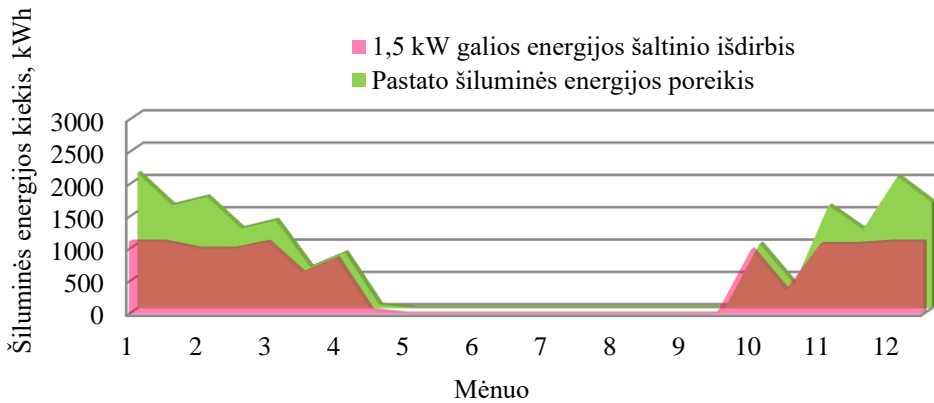
	Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė			
	B	A	A+	A++
Pastato šildymo sistemos galia P_h , W	9975	5041	3919	3054
Suminiai metiniai šiluminės energijos poreikiai Q_h , kWh	17558	10342	8708	7149
Sąlyginiai suminiai metiniai šiluminės energijos poreikiai, kWh/m ²	146	86	73	60
Alternatyvaus energijos šaltinio galia pastate P_{VEN} , W	4000	2000	1500	1000
VEN šilumos generatoriaus galios dalis bendroje pastato projektinės šildymo sistemos galioje, %	40 %	40 %	38 %	33 %
Suminis metinis VEN šilumos generatoriaus išdirbis Q_{VEN} , kWh	16157	8252	6340	4333
VEN šilumos generatoriaus išdirbio dalis bendruose metiniuose energijos poreikiuose šildymui, %	92 %	80 %	73 %	60 %



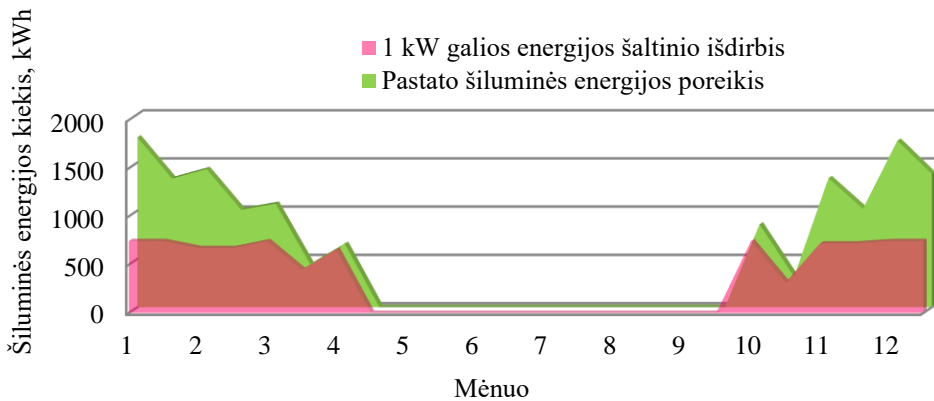
3.4 pav. Individualaus gyvenamojo namo, kurio atitvaros atitinka „B“ energinio naudingumo klasės reikalavimus šiluminės energijos poreikių dinamika per metus, įvertinus vidutinę mėnesio temperatūros svyravimų amplitudę, ir 4,0 kW galios energijos šaltinio išdirbis



3.5 pav. Individualaus gyvenamojo namo, kurio atitvaros atitinka „A“ energinio naudingumo klasės reikalavimus šiluminės energijos sąnaudų/poreikių dinamika per metus, įvertinus vidutinę mėnesio temperatūros svyravimų amplitudę, ir 2,0 kW galios energijos šaltinio išdirbis



3.6 pav. Individualaus gyvenamojo namo, kurio atitvaros atitinka „A+“ energinio naudingumo klasės reikalavimus šiluminės energijos sąnaudų/poreikių dinamika per metus, įvertinus vidutinę mėnesio temperatūros svyravimų amplitudę, ir 1,5 kW galios energijos šaltinio išdirbis



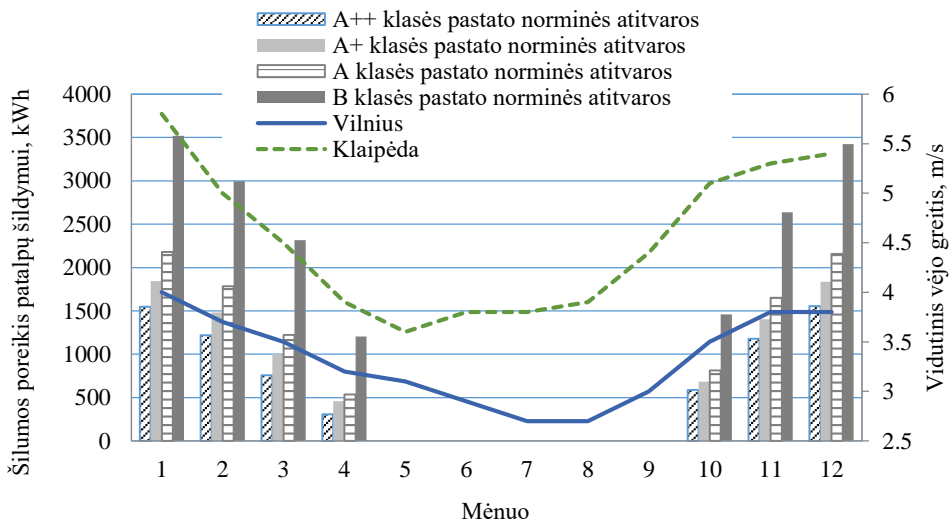
3.7 pav. Individualaus gyvenamojo namo, kurio atitvaros atitinka „A++“ energinio naudingumo klasės reikalavimus šiluminės energijos sąnaudų/poreikių dinamika per metus, įvertinus vidutinę mėnesio temperatūros svyravimų amplitudę, ir 1,0 kW galios energijos šaltinio išdirbis

Pagal analizuoto pastato šiluminės energijos poreikius ir galimas VEN šilumos generatoriaus galias, priimtas sprendimas eksperimento metu analizuoti 1,5 kW galios energijos šaltinį, kuris leidžia užtikrinti didelę šiluminės energijos poreikio dalį (73 proc.) tiek analizuotam pagal „A+“ klasės reikalavimus norminėms pastato atitvaros projektuojamam pastatui, tiek žemesnės „A“ bei aukštesnės „A++“ klasės reikalavimus norminėms atitvaroms atitinkančiam pastatui.

3.2. Vėjo energiją į šilumą konvertuojančių įrenginių integravimas į pastato šildymo sistemą

Vėjo energijos sistemų diegimas pastato poreikiams, kaip ir kitų atsinaujinančių energijos šaltinių bei išteklių – saulės, lietaus vandens, turi naudojimo poreikio ir potencialo disbalanso trūkumą. Nors 3.8 pav. pavaizduota individualaus gyvenamojo namo ir vidutinio mėnesinio vėjo greičio, nuo kurio priklauso vėjo energijos potencialas, metinė dinamika turi panašų charakterį, vis dėlto pasitaiko laikotarpiai, kada vėjo greitis yra minimalus ir technologiškai nepanaudojamas arba nepakankamas.

Pastato šildymo sistema yra inertiška ir pagal pastato energinį efektyvumą gali keletą ar keliolika valandų palaikyti higienos reikalavimus atitinkantį temperatūrinį režimą, tačiau pastate būtinas garantuotas rezervinis šiluminės energijos šaltinis dėl užsitęsiančių laikotarpių be vėjo. Rezervinis šiluminės energijos šaltinis gali būti naudojamas ir karšto vandens ruošimui, kurio naudojimo dinamika priklauso nuo individualių vartotojų įpročių arba veiklos specifikos, bet nėra susiejama su klimatinėmis sąlygomis.



3.8 pav. Individualaus gyvenamojo namo šiluminės energijos poreikių ir Vilniaus bei Klaipėdos meteorologinių stočių vėjo greičių dinamika per metus

Vėjo energijos potencialo ir pastato poreikių šildymui sąsąją galima įvertinti kiekybiškai, apskaičiuojant šių parametru pasiskirstymo koreliacinį ryšį. Koreliacinio ryšio glaudumą tarp skirtingų energinio naudingumo klasių pastatų energijos poreikių šildymui ir skirtingų vietovių vėjo energijos potencialo galima įvertinti apskaičiuojant vidutinio mėnesinio vėjo greičio, pakelto trečiuoju laipsniu (nuo šio kintamojo priklauso generuojama sistemos galia (9), kai energijos šaltinis yra vėjas), ir mėnesio šiluminės energijos poreikių šildymui koreliacijos koeficientą ρ . Koreliacijos

koeficientas ρ apskaičiuojamas kaip kovariacijos ir standartų sandaugos santykis pagal formulę (Aksomaitis, 2002):

$$\rho = \rho(v_m, Q_m) = \frac{\text{cov}(v_m, Q_m)}{\sigma_{v_m} \cdot \sigma_{Q_m}}; \quad (28)$$

čia: v_m – vietovės vidutinis mėnesinis vėjo greitis trečiuoju laipsniu; Q_m – skirtingų energinio naudingumo klasių pastatų mėnesiniai energijos poreikiai šildymui.

3.6 lentelėje pateikiami pradiniai duomenys koreliacijos koeficientui skaičiuoti. Koreliacija skaičiuojama šildymo sezono mėnesiams, sausio–balandžio ir spalio–gruodžio, t. y. tam laikotarpiui, kai iš vėjo pagaminta šiluminė energija gali būti naudojama tiesiogiai su minimaliu šilumos akumuliacijos poreikiu.

3.6 lentelė. Pradiniai duomenys koreliacijai tarp vėjo energijos potencialo ir pastato šiluminės energijos poreikių įvertinti

Mėnuo	Vietovė		Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė			
	Vilnius	Klaipėda	B	A	A+	A++
	v_{m1}	v_{m2}	Q_{m1}	Q_{m2}	Q_{m3}	Q_{m4}
1	64	195	3520	2178	1843	1547
2	51	125	2997	1783	1481	1220
3	43	91	2317	1224	1002	759
4	33	59	1203	536	459	306
...
10	43	133	1459	814	684	586
11	55	149	2639	1650	1402	1178
12	55	157	3424	2156	1837	1553

Standartas, arba vidutinis kvadratinis nuokrypis, apskaičiuojamas kaip kvadratinė šaknis iš dispersijos, t. y. nuokrypio nuo vidurkio kvadrato vidurkio, kovariacija – kaip nuokrypių nuo vidurkių sandaugos vidurkis (Aksomaitis, 2002):

$$\sigma_{v_m} = \sqrt{\frac{\sum_m \left(v_m - \frac{\sum v_m}{m} \right)^2}{m}} \quad \text{ir} \quad \sigma_{Q_m} = \sqrt{\frac{\sum_m \left(Q_m - \frac{\sum Q_m}{m} \right)^2}{m}}; \quad (29)$$

$$\text{cov}(v_m, Q_m) = \frac{\sum_m \left(v_m - \frac{\sum v_m}{m} \right) \cdot \sum_m \left(Q_m - \frac{\sum Q_m}{m} \right)}{m}. \quad (30)$$

Koreliacijos koeficiento skaičiavimo duomenys pateikiami 3.7 lentelėje.

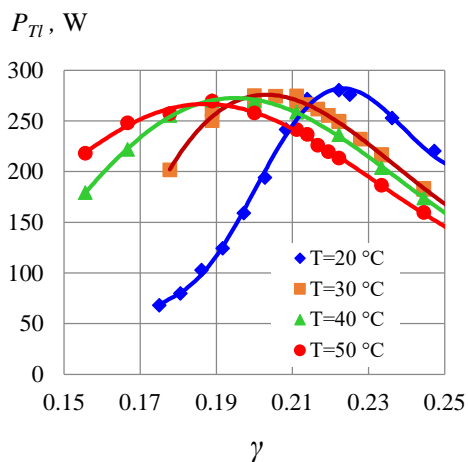
3.7 lentelė. Koreliacijos koeficiento tarp vėjo energijos potencialo ir pastato šiluminės energijos poreikių skaičiavimo rezultatai

Para- metras	Vietovė							
	Vilnius				Klaipėda			
	Projektuojama pastato energinio naudingumo klasė							
	B	A	A+	A++	B	A	A+	A++
σ_{v_m}	9,526				41,21			
σ_{Q_m}	841,9	593,6	504,4	446,1	841,9	593,6	504,4	446,1
$cov(v_m, Q_m)$	7275	5274	4493	4019	7275	20092	17220	15769
$\rho(v_m, Q_m)$	0,907	0,933	0,935	0,946	0,774	0,821	0,828	0,858

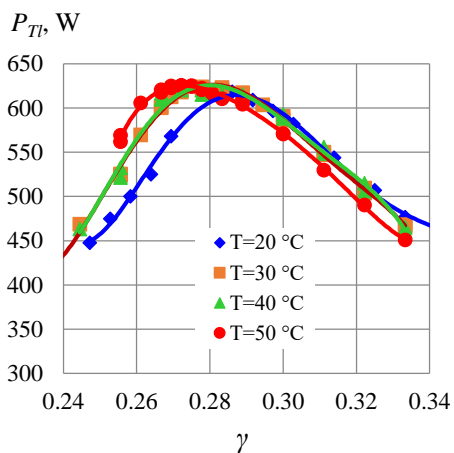
Kai koreliacijos koeficientas įgyja reikšmes intervale 0,7–1 (Aksomaitis, 2002), analizuojamų dydžių tarpusavio ryšys traktuojamas kaip stiprus. Pagal atliktus koreliacijos koeficiento tarp pastato energijos poreikių šildymui ir vėjo energijos potencialo skaičiavimus daroma išvada, kad šis ryšys stiprus ir turi tendenciją stiprėti didėjant pastato energinio naudingumo klasei.

Kai pastato šiluminės energijos poreikiai sutampa su generuojamos šiluminės energijos galia, šiluminė energija gali būti tiekiamą pastatui tiesiogiai, tačiau tokiu atveju tiekiamo šilumnešio temperatūra bus kintanti pagal lauko oro temperatūrą. Kintant sistemos šilumnešio temperatūrai, keičiasi skysčio kinematinė klampa ir kartu hidraulinės trinties koeficientas λ (Johnson, 2000), o tai turi įtakos generuojamai šiluminei galiai (15). Tokiu atveju hidraulinės sistemos automatizavimo sistema tampa sudėtingesnė, ir jai nepakaktų vienos funkcijos (26) bei vėjo greičio ir apskukų dažnio matavimo, kad būtų suformuotas signalas reguliavimo ventilio pavarai. Kintant šilumnešio temperatūrai, ji turėtų būti matuojama ir (26) funkcija modifikuojama pagal gautus temperatūros duomenis. Tyrimo metu šios prielaidos pagrindimui buvo atlikta skirtingos temperatūros (+20 °C, +30 °C, +40 °C, +50 °C) šilumnešio darbo analizė ir nustatytas srauto reguliavimo ventilio padėties pokytis, esant sąlygoms $f_{set}=20$ Hz ir $f_{set}=40$ Hz. Eksperimento metu buvo naudojama 46-ojo klamos laipsnio (pagal standartą ISO 3448) hidraulinė alyva, kurios kinematinės klamos koeficientas ν kinta nuo 104 cSt, kai alyvos temperatūra yra 20 °C iki 30 cSt, kai alyvos temperatūra yra 50 °C. Tyrimo rezultatai pateikiami 3.9 ir 3.10 pav.

Pagal 3.9 ir 3.10 pav. pateikiamus matavimų rezultatus matoma, kad, nors esant didesnei energijos šaltinio galiai ($f_{set}=40$ Hz), o kartu ir sistemos debitui, srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ pokytis yra nežymus ir sudaro $\Delta\gamma=0,014$; mažėjant energijos šaltinio galiai ($f_{set}=20$ Hz) jis didėja, sudaro $\Delta\gamma=0,039$, ir esant dar mažesnėms galioms gali pasidaryti reikšmingas. Tai rodo, kad vėjo energiją konvertuojančios hidraulinės sistemos valdymas būtų paprastesnis ir tikslesnis, jei sistema dirbtų kaip įmanoma pastovesnio temperatūrinio režimo sąlygomis, o tai įmanoma turint energijos šaltinio potencialą atitinkantį naudojimo režimą.

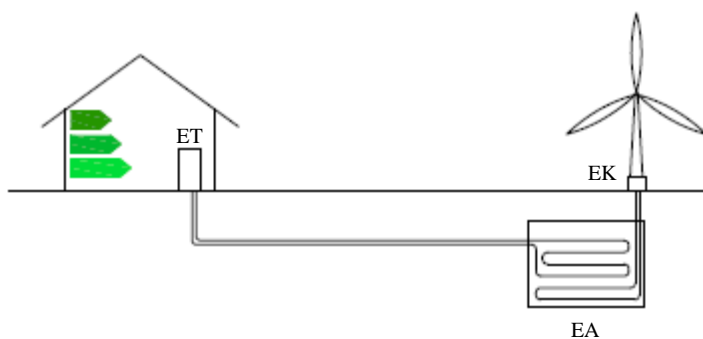


3.9 pav. Hidraulinės sistemos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , esant skirtingoms šilumnešio temperatūroms, kai $f_{set}=20$ Hz

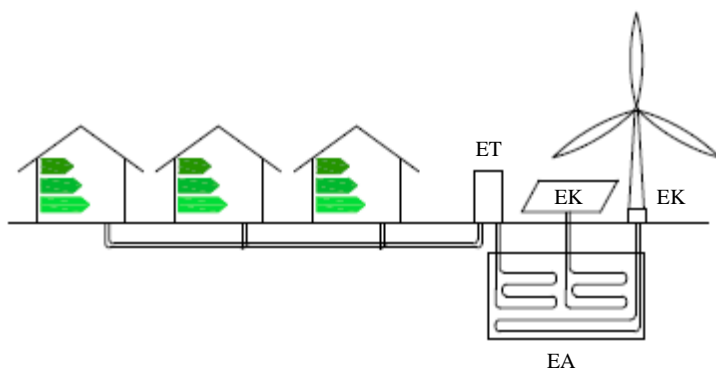


3.10 pav. Hidraulinės sistemos šiluminės galios P_{Tl} priklausomybė nuo srauto reguliavimo ventilio atidarymo laipsnio γ , esant skirtingoms šilumnešio temperatūroms, kai $f_{set}=40$ Hz

Pastovesnes temperatūrinio režimo sąlygas gali užtikrinti didelės šiluminės talpos energijos akumuliatoriai. Tokią funkciją gali atlikti gruntas, lygiagrečiai naudojant šiluminės energijos transformavimo įrenginius – šilumos siurblius. Šiuo atveju šilumos siurblys veiktų kaip garantuotas šiluminės energijos šaltinis ir būtų išnaudojamas šiltojo metų laikotarpio vėjo energijos potencialas. Tokios sistemos trūkumai – didelės pradinės investicijos. 3.11–3.12 pav. pateikiamos principinės vėjo energijos diegimo per šilumos siurblių schemas.



3.11 pav. Individualaus vartotojo vėjo energijos konvertavimo sistema „vėjaratis–šilumos generatorius (energijos konvertavimas EK)–šilumos akumuliatorius (energijos akumuliavimas EA)–sklypo šiluminė trasa–šilumos siurblys (energijos transformavimas ET)–pastato šildymo sistema“



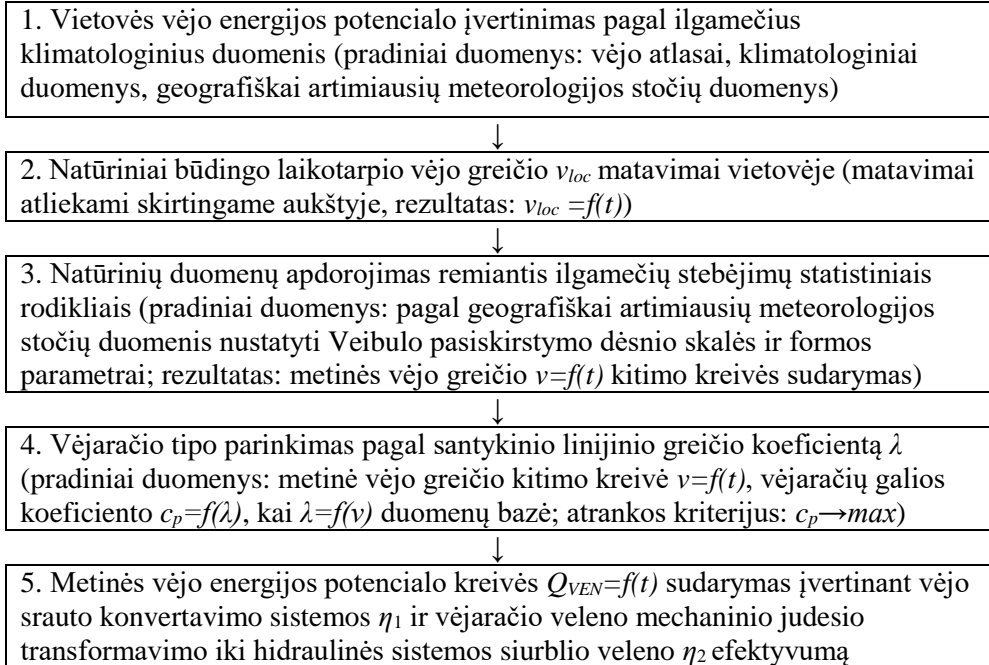
3.12 pav. Vartotojų grupės vėjo energijos konvertavimo sistema „vėjaratis–šilumos generatorius (energijos konvertavimas EK)–šilumos akumuliatorius (energijos akumuliavimas EA)–šilumos siurblys (energijos transformavimas ET)–teritorijos šiluminė trasa–pastato šildymo sistema“

Siūlomų schemų funkcinius blokus galima išskirti ir analizuoti pagal jų atliekamą funkciją: vėjaratis, šilumos generatorius – energiją konvertuojančios posistemės (EK); šiluminės trasos – energiją pernešančios posistemės; šilumos siurblys – energiją transformuojanti posistemė (ET). Visos posistemės turi savo energijos naudingumo koeficientus, kurios mažina pradinę gaunamą energiją, bet pritaiko jos parametrus pastato naudotojų poreikiams. Dar viena posistemė, labai svarbi atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimui, yra energijos akumuliavimas (EA), nes energijos „pernešimas“ laike yra bene aktualiausia problema naudojant atsinaujinančius energijos šaltinius. Žvelgiant į atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimo perspektyvas, aktualiausia turėtų tapti sistema, apimanti visas tokioms sistemoms svarbias posistemas: EK, EA ir ET. Daugelis šių grandžių gali būti įvertinamos analitiniais metodais arba surinkus statistinius duomenis ir kinta pagal konkretų objektą, tačiau pats energijos konversijos iš mechaninio judesio į šiluminę energiją procesas vyksta pagal tas pačias tendencijas, nepriklausomai nuo pastato ir jo vietovės.

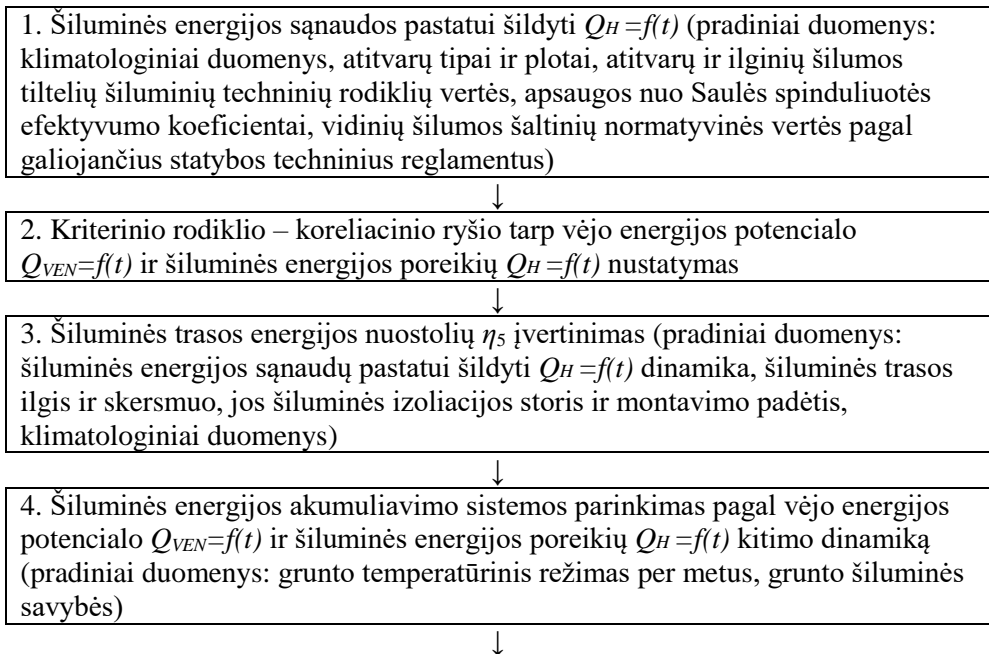
3.3. Vėjo energijos integravimo į pastato šildymo sistemą algoritmas

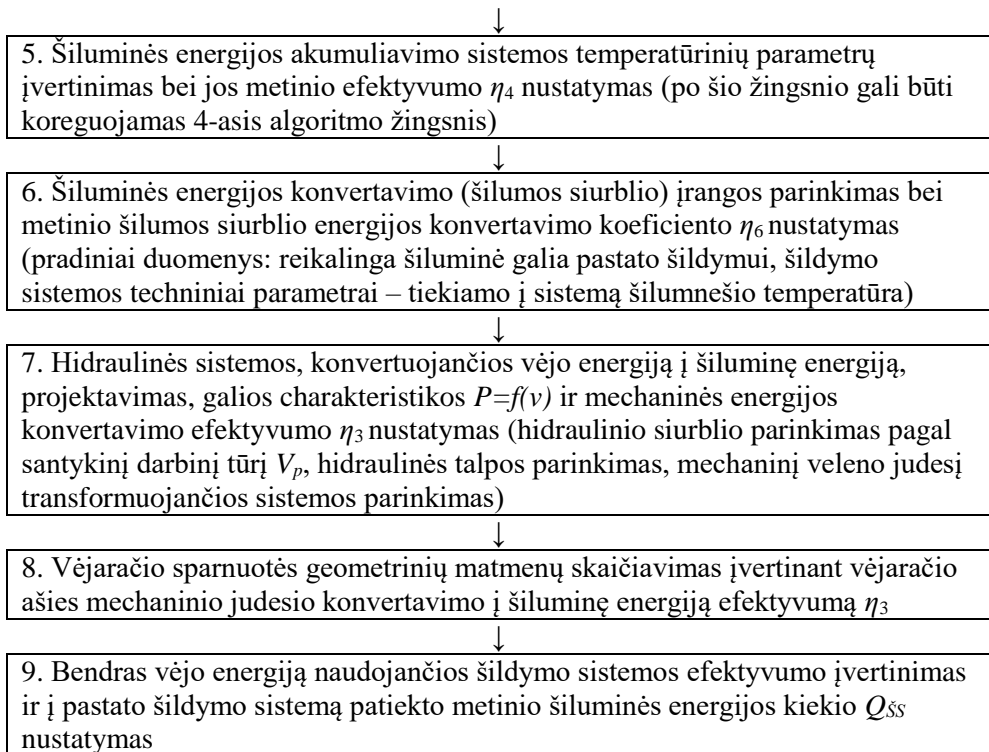
Vėjo kaip energijos šaltinio integravimo į pastato šildymo sistemą algoritmas artimas vėjo kaip pirminio šaltinio, naudojamo elektros energijos gamybai, algoritmui (Cetinay et al., 2017) ir susideda iš dviejų dedamųjų – energijos šaltinio ir vartotojo poreikių suderinimo.

Energijos šaltinio įvertinimas:



Vartotojo poreikių įvertinimas:





Projektuojant vėjo energiją į šilumą konvertuojančią sistemą, formuojamas uždavinys pasiekti maksimalų technologiškai prieinamą generuojamos šiluminės energijos Q_{VEN} kiekį, įvertinant turimą vėjo energijos potencialą:

$$Q_{VEN} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot P \cdot t; \quad (31)$$

čia: η_1 – vėjo srauto konvertavimo sistemos (vėjaračio) efektyvumas, η_2 – vėjaračio ašies mechaninio judesio konvertavimo sistemos efektyvumas, η_3 – šiluminės energijos konvertavimo iš mechaninės ašies energijos efektyvumas, P – galia, kurią turi judanti oro masė (vėjas), apskaičiuojama pagal (9) formulę, t – laiko tarpas, kuriame oro masė juda pastoviu greičiu.

Vėjo srauto konvertavimo sistemos (vėjaračio) efektyvumas yra vėjaračio charakteristika, būdinga tam tikros konstrukcijos vėjaračiui (1.8 pav.) ir kintanti keičiantis santykinio linijinio greičio koeficientui λ , kuris konkrečiam vėjaračiui priklauso nuo jo ašies sukimosi dažnio n_1 ir vėjo greičio v :

$$\eta_1 = f(n_1, v). \quad (32)$$

Vėjaračio ašies mechaninio judesio konvertavimo sistemos efektyvumas η_2 priklauso nuo vėjaračio n_1 ir hidraulinio siurblio ašies sukimosi dažnių n_2 (Klebanov, 2016; Verstraten et al., 2015):

$$\eta_2 = f(n_1, n_2). \quad (33)$$

Mechaninio judesio konvertavimo į šiluminę energiją efektyvumą η_3 galima laikyti pastoviu tam tikro dydžio hidraulinei sistemai. Pagal darbe aprašytą metodiką atlikus įvairių dydžių šilumą generuojančių hidraulinių sistemų tyrimus, galima būtų daryti apibendrintas išvadas apie energijos konvertavimo efektyvumo η_3 priklausomybę, tačiau kol tai nėra atlikta, priimama η_3 vertė ne mažiau kaip 91 proc.

Analizuojant sistemos pritaikomumą ir ekonominį atsipirkimą svarbiausia, kokia iš vėjo energijos pagaminta šiluminės energijos dalis bus sunaudota efektyviai ir pasieks pastatą, t. y. vartotoją. Šis energijos kiekis priklauso nuo šilumos akumuliacijos sistemos ir šiluminių trasų efektyvumo, o tai yra veikia atstumas tarp energijos gamintojo ir vartotojo, kurio dažnai negalima pakeisti dėl objektyvių priežasčių (palanki vėjo išteklių prasme vieta, vėjo jėgainės triukšmingumas, vizualinė tarša ir pan.). Kiti veikiantys parametrai – akumuliacijos sistemos dydis, temperatūriniai parametrai, šiluminė izoliacija, yra projektuojami ir keičiami atsižvelgiant į ekonominio sistemos atsipirkimo lūkesčius.

Į pastato šildymo sistemą patiekiamą metinį šiluminės energijos kiekį galima išreikšti taip:

$$Q_{SS} = \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot Q_{VEN}. \quad (34)$$

Pastato šildymui skiriamas energijos sąnaudas sudarytų elektros energija, kuri reikalinga šilumos siurblio darbui ir gali būti apskaičiuojama taip:

$$Q_{el} = Q_{VEN} / \eta_6. \quad (35)$$

Pagal pateiktą algoritmą sumodeliavus vėjo energiją konvertuojančios ir pastato šiluminės energijos poreikius užtikrinančios sistemos metinį išdirbį bei išorinių energijos šaltinių poreikį, galimas sistemos ekonominis pagrindimas. Šiuo metu rinkoje nėra masinės gamybos įrenginių, kurie konvertuotų vėjo energiją į šilumą. Eksperimentui buvo pagaminta hidraulinė sistema, susidedanti iš standartinių hidraulinių elementų, kurie kainavo 530 EUR. Lyginant elektros energijos gamybos iš vėjo technologiją, galima būtų generatorių keisti hidrauline sistema, likusius sistemos elementus paliekant analogiškos konstrukcijos.

3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatų patikimumas ir atkuriamumas

Siekiant užtikrinti atliekamų eksperimentų patikimumą, visi eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti ne mažiau kaip du kartus.

Bandymų rezultatams įtakos turintys veiksniai buvo: hidraulinių siurblių varančiam elektros varikliui dažnio keitikliu nustatytas dažnis f_{set} (keitimo diapozonas nuo 1 iki 50 Hz) ir hidraulinės sistemos apkrova, sudaryta keičiant reguliuojamo ventilio atidarymo laipsnį γ (keitimo diapozonas nuo 0 iki 1), alyvos pradinė temperatūra alyvos rezervuare $T_{0^\circ\text{C}}=T_{10^\circ\text{C}}=T_{20^\circ\text{C}}=T_{30^\circ\text{C}}$ (eksperimento pradžioje), aplinkos temperatūra T_{apl} ($T_{apl} \approx \text{const}$). Eksperimentinių bandymų rezultatai buvo: hidraulinio siurblio veleno sukimosi dažnis n (aps/s), slėgis prieš ir už reguliuojamo ventilio – slėgiai p_1 ir p_2 , alyvos temperatūros bake, prieš ir už reguliuojamo ventilio: T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 .

Remiantis eksperimentinių tyrimų rezultatais, buvo apskaičiuojamas generuojamos šilumos kiekis pagal (25) formulę ir nustatoma optimalaus hidraulinės

sistemos darbo kreivė pagal (26) formulę, kuriose apibrėžiama ieškomų dydžių priklausomybė nuo siurblio veleno sukimosi dažnio n , todėl būtent šio parametro statistinė analizė pateikta 3.9 lentelėje.

Eksperimentinių tyrimų rezultatų patikimumui nustatyti buvo įvykdyta po keturis ($i=1, \dots, 4$) bandymus su tais pačiais $x_{j1}=f_{set}$, $x_{j2}=\gamma$, $x_{j3}=T_0$, $x_{j4}=T_{apl}$, matuojant ir registruojant veleno sukimosi dažnį $y_{ji}=n$; čia i – bandymo numeris; j – bandymo serijos numeris. 3.8 lentelėje pateiktos aštuonių atliktų eksperimentinių bandymų serijų ($j=1, \dots, 8$) rezultatai pagal įtaką darančius veiksnius.

3.8 lentelė. Lygiagrečiai atliktų eksperimentinių bandymų rezultatai

j	x_{j1}	x_{j2}	x_{j3}	x_{j4}	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}	y_{j4}
1	20	0,33	20	20,0	9,5517	9,5600	9,6217	9,5733
2	20	0,22	20	20,0	8,4833	8,3833	8,3133	8,3700
3	20	0,33	40	20,5	9,7700	9,7467	9,6867	9,8000
4	20	0,22	40	20,5	8,7383	8,7683	8,7067	8,7150
5	40	0,33	20	20,0	18,3667	18,5000	18,4667	18,4500
6	40	0,28	20	20,0	16,2933	16,2567	16,1850	16,2050
7	40	0,33	40	20,5	18,6833	18,5500	18,6000	18,5500
8	40	0,28	40	20,5	16,8667	16,8167	16,8500	16,9500

Kai eksperimento metu atliktų to paties dydžio matavimų skaičius nedidelis, šio matavimo rezultato grupavimosi centrą apibūdina aritmetinis vidurkis (Aksomaitis, 2002), apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, (j=1, 2, \dots, N); \quad (36)$$

čia: k – vienodomis sąlygomis atliktų bandymų skaičius ($k=4$); y_{ji} – j -tosios bandymų serijos i -tasis bandymo rezultatas; N – bandymų serijų skaičius ($N=8$).

Eksperimentų atkuriamumui įvertinti skaičiuojama eksperimentinė Kochrano kriterijaus reikšmė G_p (Саутин, 1975). Ji randama pagal didžiausios dispersijos santykį su visų dispersijų suma:

$$G_p = \frac{\max s_j^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}; \quad (37)$$

čia: s_j^2 – eksperimentų serijos dispersija.

Eksperimentų serijos dispersija yra serijos matavimų rezultatų nuokrypio nuo vidurkio kvadrato vidurkis ir apskaičiuojama taip (Aksomaitis, 2002):

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \bar{y}_j)^2. \quad (38)$$

$$\text{Tada } G_p = \frac{0,005}{0,0219} = 0,2283.$$

Priimant eksperimentų atkūrimo tikimybę $P=0,95$, kai bandymų serijų skaičius $N=8$ ir laisvės laipsnių skaičius $f=k-1=3$, pagal žinyną (Саутин, 1975) randame Kochrano kriterijaus reikšmę: $G=0,4377$. Priimama, kad eksperimentų rezultatai atkuriami, kai $G_p \leq G$. Kadangi $0,2283 < 0,4377$, sąlyga yra išpildyta, ir eksperimentą galima traktuoti kaip atkuriamą.

Matavimo rezultatams įvertinti taip pat apskaičiuojamas vidutinis kvadratinis nuokrypis s_j , variacijos koeficientas V_j , atsitiktinė matavimo rezultato paklaida Δ , pasikliautinis intervalas I_β , santykinė atsitiktinė paklaida δ_{ats} , santykinė sisteminė paklaida δ bei bendroji rezultato santykinė paklaida δ_b (Aksomaitis, 2002).

Kai variacijos koeficientas $V_j \leq 5-10$, priimama, kad eksperimentų rezultatų sklaida yra nedidelė. Jeigu paklaida $\delta_b \leq 5\%$ laikoma, kad gauti rezultatai pakankamai tikslūs ir patikimi, jei $\delta_b = 5-10\%$, tai rezultatų tikslumas yra patenkinamas, o jei $\delta_b > 10\%$, rezultatų tikslumas yra nepatenkinamas.

Statistinių rodiklių skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Lygiagrečiai atliktų eksperimentinių bandymų statistinių rodiklių skaičiavimo rezultatai

j	\bar{y}_j	s_j^2	s_j	V_j	Δ	I_β	δ_{ats}	δ	δ_b
1	9,5767	0,0010	0,027	0,283	0,043	[9,5337; 9,6197]	0,450	0,017	0,450
2	8,3875	0,0050	0,061	0,730	0,097	[8,2905; 8,4845]	1,160	0,020	1,160
3	9,7508	0,0023	0,042	0,427	0,066	[9,6848; 9,8168]	0,680	0,017	0,680
4	8,7321	0,0008	0,024	0,274	0,038	[8,6941; 8,7701]	0,440	0,019	0,440
5	18,4458	0,0032	0,049	0,266	0,078	[18,3678; 18,5238]	0,420	0,090	0,430
6	16,2350	0,0024	0,043	0,263	0,068	[16,1670; 16,3030]	0,420	0,010	0,420
7	18,5958	0,0040	0,054	0,293	0,087	[18,5088; 18,6828]	0,470	0,090	0,470
8	16,8708	0,0032	0,049	0,291	0,078	[16,7928; 16,9488]	0,460	0,099	0,470
Σ		0,0219							

Pagal 3.9 lentelėje pateikiamus skaičiavimų rezultatus matoma, kad gauti eksperimentinių rezultatų variacijos koeficientas neviršija 1 % reikšmės, o santykinė paklaida $\delta_b \leq 1,16\%$, kai $k=4$. Taigi galima teigti, kad eksperimentų rezultatai su tikimybe $P=0,95$ yra pakankamai tikslūs, patikimi ir atkuriami.

3.5. Išvados

1. Nustatyti skirtingų energinio naudingumo klasių norminių atitvarų reikalavimus atitinkančio individualaus gyvenamojo namo metiniai šiluminės energijos poreikiai šildymui bei vėdinimui, kurie sudaro nuo 17558 iki 7149 kWh (nuo 146 iki 60 kWh/m²), kai pastato atitvaros atitinka „B“–„A++“ klasių norminių atitvarų reikalavimus.

2. „B“, „A“, „A+“, „A++“ klasių individualiame gyvenamajame pastate įdiegus atitinkamai 40, 40, 38, 33 proc. projektinės šildymo sistemos galios atitinkantį šilumos šaltinį bei įvertinus vidutinę mėnesinę šildymo sezono lauko oro temperatūros svyravimo amplitudę, šis šilumos šaltinis gali užtikrinti 92/80/73/60 proc. pastato metinių šiluminės energijos poreikių šildymui ir vėdinimui.

3. Vertinant tam tikros galios energijos šaltinio atitikimą pastato šiluminės energijos poreikiams, siūloma vertinti ne tik vidutinę mėnesinę temperatūrą, bet ir

vidutinę temperatūros svyravimo amplitudę; tai leidžia tiksliau nustatyti planuojamo energijos šaltinio galios poreikį bei išdirbį.

4. Pasiūlyta universali vėjo energiją pastato poreikiams naudojanti šildymo sistema su energijos akumuliatoriumi ir transformatoriumi, kuri leistų išnaudoti vėjo energijos išteklių koreliaciją su šiluminės energijos poreikiais Lietuvos klimato sąlygomis bei būtų naudojama kaip garantuotas energijos šaltinis.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę pastebima, kad klimato kaitos suvaldymo procese pastatų sektoriui skiriamas didelis dėmesys, dėl palyginti mažo pastatų energinio efektyvumo ir dėl jo susidarančių didelių energijos sąnaudų. Lietuvoje įvairių AEI integravimas į pastato energetines sistemas yra skatinamas ir reglamentuojamas valstybės.

2. Visa statistikoje atspindinti vėjo energija šiuo metu konvertuojama į elektros energiją, nors techniškai vėjo energijos konvertavimas į šilumą yra įgyvendinamas ir inžineriniu aspektu nagrinėtas. Vėjo energijos konvertavimo į šilumą procesas stokoja objektyvaus mokslinio įvertinimo, o tai gali būti trikdys diegiant tokio tipo sistemas praktiškai.

3. Nustatyti metiniai mažai energijos naudojančio individualaus gyvenamojo namo šiluminės energijos poreikiai šildymui ir vėdinimui sudaro nuo 17,558 MWh (146 kWh/m²) „B“ energinio naudingumo klasės pastatui iki 7,149 MWh (60 kWh/m²) „A++“ energinio naudingumo klasės pastatui (t. y. 2,46 karto mažiau), o pastatui reikalinga šildymo sistemos galia sudaro atitinkamai nuo 9,975 kW iki 3,054 kW.

4. Nustatyta, kad energijos beveik nenaudojančiame pastate įdiegus 33 proc. projekcinės šildymo sistemos galios atitinkantį šilumos šaltinį bei įvertinus vidutinę mėnesinę šildymo sezono lauko oro temperatūros svyravimo amplitudę, jis gali užtikrinti iki 60 proc. pastato metinių šiluminės energijos poreikių šildymui ir vėdinimui.

5. Lietuvos klimatinėmis sąlygomis atlikti koreliacijos koeficiento tarp skirtingų energinio naudingumo klasių individualaus gyvenamojo namo energijos poreikių šildymui ir skirtingų vietovių vėjo energijos potencialo skaičiavimai rodo, kad egzistuoja stiprus šių parametų koreliacinis ryšys $\rho > 0,70$ turintis tendenciją didėti, didėjant pastato energinio naudingumo klasei – nuo $\rho = 0,774$ „B“ energinio naudingumo klasės pastatui iki $\rho = 0,858$ „A++“ energinio naudingumo klasės pastatui Klaipėdoje ir nuo $\rho = 0,907$ „B“ energinio naudingumo klasės pastatui iki $\rho = 0,946$ „A++“ energinio naudingumo klasės pastatui Vilniuje.

6. Sukurta eksperimentinė šilumą generuojanti hidraulinė sistema leidžia įvairiapusiškai ($n=f(\gamma)$, $P_T=f(\gamma)$, $P_T=f(n)$) ir plačiose ribose (kai energijos šaltinio galia yra nuo 5 W iki 950 W) analizuoti mechaninės energijos konvertavimo į šiluminę energiją procesus. Nustatytas eksperimentinės hidraulinės sistemos energijos konvertavimo proceso efektyvumas didesnis nei 91 proc.

7. Nustatytas tiriamos eksperimentinės hidraulinės sistemos darbo automatizavimo sistemos algoritmas ir valdiklio įėjimo signalų tarpusavio ryšys optimaliam energijos konvertavimo sistemos darbui, aprašomas lygtimi: $n_{opt} = 0,0296v^{*3} + 0,3231v^{*2} - 0,7158v^{*} + 0,6014$.

8. Sudarytas vėjo energijos integravimo į pastato šildymo sistemą algoritmas, kai sistemą sudaro vėjaratis, mechaninę vėjo energiją į šiluminę energiją konvertuojantis hidraulinis įrenginys, šiluminės energijos kaupykla ir šilumos siurblys.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Monografijos, vadovėliai:

- ACKERMANN Thomas. *Wind power in power systems*. Chichester : Wiley, 2012.
- ADOMAVIČIUS Vytautas. *Atsinaujinančių išteklių energiją naudojančių mažos galios sistemų tyrimas: daktaro disertacija*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2011.
- AKSOMAITIS Algimantas. *Tikimybių teorija ir statistika*. Kaunas: Technologija, 2002.
- BLAZEVIČIUS Anco. *Energy security for the 21st century*. Lilburn, The Fairmont Press, 2015.
- BOLTON William. *Mechanical science*. Oxford, Blackwell Publishing, 2006.
- BOYLE Godfrey. *Renewable energy: power for a sustainable future*. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- CABEZA Luisa F. *Advances in Thermal Energy Storage Systems. Methods and Applications*. Amsterdam: Elsevier/Woodhead Publishing, 2015.
- CLEVELAND Cutler J., MORRIS Christopher. *Handbook of energy*. Waltham, Elsevier, 2013.
- GALVONAITĖ Audronė, MISIŪNIENĖ Monika, VALIUKAS Donatas et al., *Lietuvos klimatas: monografija*. Vilnius: Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba, 2007.
- GINLEY David S., CAHEN David. *Fundamentals of materials for energy and environmental sustainability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- GULBINAS Algirdas. *Vėjo energijos naudojimo efektyvumo žemės ūkyje tyrimas: daktaro disertacija*. Kaunas: Lietuvos žemės ūkio inžinerijos institutas, 2001.
- JOHNSON, R. W. *The Handbook of Fluid Dynamics*. Berlin, Springer-Verlag GmbH & Co, 2000.
- KAVOLYNAS Antanas. *Saulės ir vėjo energijos naudojimas pastatų kaimo vietovėse šilumos poreikiams tenkinti: daktaro disertacija*. Kaunas: Lietuvos žemės ūkio universitetas, 2011.
- KYTRA Stasys. *Atsinaujinantys energijos šaltiniai: vadovėlis aukštosioms mokykloms*. Kaunas, Technologija, 2006.
- KREITH Frank, KREIDER Jan F. *Principles of sustainable energy*. Boca Raton, CRC Press, 2011.
- MAEGAARD Preben, KREINZ Anna, PALZ W. *Wind power for the world: the rise of modern wind energy*. Boca Raton, Pan Stanford Publishing, 2013.
- MARČIUKAITIS Mantas. *Vėjo energijos tyrimai, modeliavimas ir prognozė: daktaro disertacija*. Kaunas, Lietuvos energetikos institutas, 2009.
- MUKUND R. Patel. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. Boca Raton, Taylor & Francis, 2006.
- RIMKUS, Egidijus. *Meteorologijos įvadas*. Vilnius, Vilniaus universitetas, 2011. ISBN: 9789955634591.
- САУТИН Станислав Николаевич. *Планирование эксперимента в химии и химической технологии*. Ленинград, Химия, 1975.
- ZIEDELIS Stanislovas. *Hidraulinės ir pneumatinės sistemos: mokomoji knyga*. Kaunas, Technologija, 2011.
- WEIDAUER Jens, MESSER Richard. *Electrical drives: principles, planning, applications, solutions*. Erlangen, Publicis, 2014.
- WU Bin, LANG Yongqiang, ZARGARI Navid, KOURO Samir. *Power conversion and control of wind energy systems*. Hoboken, John Wiley & Sons, 2011.

Straipsniai iš žurnalų:

ALLAERTS, K., COOMANS M., SALENBIEN R. Hybrid ground-source heat pump with active air source regeneration. *Energy Conversion and Management*. 2015, 90, p. 230–237.

ČERNECKIENĖ Jurgita, ŽDANKUS Tadas. Usage of the Wind Energy for Heating of the Energy-Efficient Buildings: Analysis of Possibilities. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2015, 10 (1), p. 58–65. ISSN 2029-9990.

HERBERT G. M. Joselin, INIYAN S., SREEVALSAN E., RAJAPANDIAN S. A review of wind energy technologies. *Renewable & Sustainable energy Reviews*. 2007, 11, p. 1117–1145. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>

Straipsniai iš mokslo darbų rinkinių, konferencijų medžiagos rinkinių:

ADOMAVIČIUS Vytautas, WATKOWSKI Thomas, ŽILINSKAS Edmundas, ADOMAVIČIUS Alfonsas. Comparison of Small Scale Wind Turbines' Properties. In *Proceedings of International Conference „Electrical and Control Technologies – 2009“*. 2009, Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, p. 374–379.

JOHANSSON Thomas B., MCCORMICK Kes, NEIJ Lena, TURKENBURG Wim. The Potentials of Renewable Energy: Thematic Background Paper. In *International Conference of Renewable energies*. 1–4 June, 2004, Bonn, Germany. Prieiga per internetą:

<http://ren21.net/Portals/0/documents/irecs/renew2004/The%20Potentials%20of%20Renewable%20Energy.pdf>.

LARSEN Hans Hvidtfeldt, PETERSEN Leif Sonderberg et al. Energy Storage Options for Future Sustainable Energy Systems. In *DTU International Energy Report 2013*. Technical University of Denmark, 2013.

LU Xi, McELROY Michael B., and KIVILUOMA Juha. Global potential for wind-generated electricity. In *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2009. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0904101106>.

VALODKA Ignas, VALODKIENĖ Gitana. The Impact of Renewable Energy on the Economy of Lithuania. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences 213, 20th International Scientific Conference Economics and Management - 2015 (ICEM-2015)*, May 06–08, 2015. Elsevier Ltd, 2015, p. 123–128. Prieiga per internetą: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877042815057614>.

Elektroniniai leidiniai:

AUGULIS Liudvikas, JOTAUTIS, Alvydas, RUTKŪNIENĖ, Delij. Fizika: mechanika, termodinamika, elektromagnetizmas: mokomoji knyga [elektroninis išteklius]. Kaunas, Technologija, 2012. [žiūrėta 2014-12-15]. Prieiga per internetą:

https://www.ebooks.ktu.lt/eb/656/fizika_mechanika_termodinamika_elektromagnetizmas/.

BOERMANS Thomas, BETTGENHÄUSER Kjell, OFFERMANN Markus, SCHIMSCHAR Sven. Building Renovation in Europe: What are the choices? Brussels, Belgium, 2012. Prieiga per internetą:

http://www.eurima.org/uploads/ModuleXtender/Publications/90/Renovation_tracks_for_Europe_08_06_2012_FINAL.pdf.

GALVONAITĖ Audronė ir kt.. Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos prie Aplinkos ministerijos Klimatologijos skyrius: Vidutinės klimatinių rodiklių reikšmės Lietuvoje 1981–

2010 m. 2013. [žiūrėta 2014-10-25]. Prieiga per internetą: [http://www.meteo.lt/documents/20181/103901/Lietuvos klimatas_09_25.pdf](http://www.meteo.lt/documents/20181/103901/Lietuvos_klimatas_09_25.pdf).

HAU Erich. Wind Turbines. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-29284-5 [žiūrėta 2013-08-20]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29284-5>.

KLEBANOV Boris M., GROPER Morel. Power mechanisms of rotational and cyclic motions. Boca Raton, CRC Press, 2016.

MALDONADO Eduardo et al. Implementing the Energy Performance of Building Directive. Featuring Country Reports. Lisbon, Portugal, 2015. ISBN 978-972-8646-32-5. Prieiga per internetą: <http://www.epbd-ca.eu/outcomes/2011-2015/CA3-BOOK-2016-A-web.pdf>

PETRAUSKAS Gytis, ADOMAVIČIUS Vytautas. Vėjo energijos naudojimas elektrai gaminti: mokomoji knyga [elektroninis išteklius]. Kaunas: Technologija, 2012. [žiūrėta 2014-10-15].

Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1000/vejo-energijos-naudojimas-elektrai-gaminti/>

ŠVENČIANAS Petras, ADOMAVIČIUS Arvydas. Inžinerinė termodinamika [elektroninis išteklius]: vadovėlis. Kaunas, Technologija, 2013. [žiūrėta 2015-03-8]. Prieiga per internetą:

https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1141/inzinerine_termodinamika/.

Elektroniniai straipsniai duomenų bazėse:

BILIR Levent, IMIR Mehmet, DEVRIM Yılser, ALBOSTAN Ayhan. Seasonal and yearly wind speed distribution and wind power density analysis based on Weibull distribution function. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, 40, p. 15301–15310. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.140>.

Carlos de CASTRO, MEDIAVILLA Margarita, MIGUEL Luis Javier, FRECHOSO Fernando. Global wind power potential: Physical and technological limits. *Energy Policy*. 2011, 39, pp. 6677–6682. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.027>.

CARVALHO D., ROCHA A., GOMEZ-GESTEIRA M., SILVA SANTOS C. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renewable Energy*. 2017, 101, p. 29–40. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.036>.

CETINAY Hale, KUIPERS Fernando A., GUVEN A. Nezh. Optimal siting and sizing of wind farms. *Renewable Energy*. 2017, 101, p. 51–58. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.008>.

CHENG Wen-Long, HAN Bing-Chuan, NIAN Yong-Le et al. Theoretical analysis of a wind heating conversion and long distance transmission system. *Energy Conversion and Management*. 2017, 137, p. 21–33. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.021>.

DELUCCHI Mark A., JACOBSON Mark Z. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*. 2011, 39, p. 1170–1190. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045>.

HARRIS R. Ian, COOK Nicholas J. The parent wind speed distribution: Why Weibull? *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014, 131, p. 72–87. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.05.005>.

HABERL Helmut, BERINGER Tim, BHATTACHARYA Sribas C, ERB Karl-Heinz, HOOGWIJK Monique. The global technical potential of bio-energy in 2050 considering

sustainability constraints. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2010, 2, p. 394–403. [žiūrēta 2015-03-25]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2010.10.007>.

HEUBAUM Harald, BIERMANN Frank. Integrating global energy and climate governance: The changing role of the International Energy Agency. *Energy Policy*. 2015, 87, p. 229–239. [žiūrēta 2015-04-12]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.09.009>.

JACOBSON Mark Z., DELUCCHI Mark A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*. 2011, 39, p. 1154–1169. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040>.

GANG Li. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, 53, p. 897–923. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006>.

GIROD Bastien, van VUUREN Detlef Peter, HERTWICH Edgar G. Climate policy through changing consumption choices: Options and obstacles for reducing greenhouse gas emissions. *Global Environmental Change*. 2014, 25, p. 5–15. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.004>.

JIANG Haibo, LI Yanru, CHENG Zhongqing. Performances of ideal wind turbine. *Renewable Energy*. 2015, 83, pp. 658–662. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.013>.

JRADI M., VEJE C., JØRGENSEN B.N. Performance analysis of a soil-based thermal energy storage system using solar-driven air-source heat pump for Danish buildings sector. *Applied Thermal Engineering*. 2017, 114, p. 360–373. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.005>.

LUND Henrik, HVELPLUND Frede, ØSTERGAARD Poul Alberg et al. System and market integration of wind power in Denmark. *Energy Strategy Reviews*. 2013, 1, p. 143–156. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2012.12.003>.

OKAZAKI Toru, SHIRAI Yasuyuki, NAKAMURA Taketsune. Concept study of wind power utilizing direct thermal energy conversion and thermal energy storage. *Renewable Energy*. 2015, 83, p. 332–338. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.027>.

OZGENER Onder. Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings. *Energy*. 2010, 35, p. 262–268. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.09.018>.

PARAMESHWARAN R., KALAISELVAM S., HARIKRISHNAN S., ELAYAPERUMAL A. Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16, p. 2394–2433. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.058>.

POPP J., LAKNER Z., HARANGI-RÁKOS M., FÁRI M. The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 32, p. 559–578. [žiūrēta 2015-03-25]. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056>.

RATINEN Mari, LUND Peter. Policy inclusiveness and niche development: Examples from wind energy and photovoltaics in Denmark, Germany, Finland, and Spain. *Energy Research & Social Science*. 2015, 6, p. 136–145. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.erss.2015.02.004>.

SARKAR Asis, BEHERA Dhiren Kumar. Wind Turbine Blade Efficiency and Power Calculation with Electrical Analogy. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2012, 2. ISSN 2250-3153.

SALPAKARI Jyri, MIKKOLA Jani, LUND Peter D. Improved flexibility with large-scale variable renewable power in cities through optimal demand side management and power-

to-heat conversion. *Energy Conversion and Management*. 2016, 126, p. 649–661. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.041>.

VERSTRATEN T., MATHIJSEN G., FURNÉMONT R., VANDERBORGHT B., LEFEBER D. Modeling and design of geared DC motors for energy efficiency: Comparison between theory and experiments. *Mechatronics*. 2015, 30, p. 198–213. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.07.004>.

ŽDANKUS Tadas, ČERNECKIENĖ Jurgita, JURELIONIS Andrius, VAIČIŪNAS Juozas. Experimental study of a small scale hydraulic system for mechanical wind energy conversion into heat. *Sustainability*. 2016, 8, p. 1–18. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su8070637>.

XYDIS George. Wind energy to thermal and cold storage—A systems approach. *Energy and Buildings*. 2013, 56, p. 41–47. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.011>.

XYDIS George, PECHLIVANOGLU George, NAYERI Navid Christian. Wind Turbine Waste Heat Recovery - A Short-Term Heat Loss Forecasting Approach. *Challenges*, 2015, 6, p. 188–201. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.3390/challe6020188>.

WAITE Michael, MODI Vijay. Potential for increased wind-generated electricity utilization using heat pumps in urban areas. *Applied Energy*, 2014, 135, p. 634–642. Prieiga per doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.059>.

Patentiniai dokumentai:

ASHIKLAN B. (JAV). Wind Motor Operated Heating System. US patent US3752395 A. 1973-08-14. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2013-02-15]. Prieiga per internetą: <https://www.google.ch/patents/US3752395>

ASHIKLAN B. (JAV). Wind Operated Heating System. US patent US3783858 A. 1974-01-01. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2013-02-15]. Prieiga per internetą: <https://www.google.ch/patents/US3783858>

GRENIER W.J. (JAV). Fluid friction heater. US patent US4454861 A. 1979-04-30. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2013-02-17]. Prieiga per internetą: <https://www.google.com/patents/US4454861>

KNECHT J. E. (JAV). Wind driven heating system. US patent US4366779 A. 1978-01-16. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2013-02-17]. Prieiga per internetą: <https://www.google.ch/patents/US4366779>

RAYMOND Thomas E. (JAV). Fluid pressure energy translating device. US patent US2683423 A. 1950-08-30. United States Patent and Trademark Office [žiūrėta 2013-02-16]. Prieiga per internetą: <https://www.google.com/patents/US2683423>

Normatyviniai dokumentai ir standartai, kiti šaltiniai:

AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION. AWEA Small Wind Turbine Performance and Safety Standard (9.1 – 2009). Washington, USA, 2009. Prieiga per internetą: http://smallwindcertification.org/wp-content/uploads/2011/05/AWEA_2009-Small_Turbine_Standard1.pdf

EUROPOS KOMISIJA. Komisijos komunikatas: 2020 M. Europa. Pažangaus, tvaraus ir integracinio augimo strategija. Briuselis, Belgija, 2010. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/ALL/?uri=CELEX%3A52010DC2020>

EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2010/13/ES dėl pastatų energinio naudingumo. Briuselis, Belgija, 2010. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:LT:PDF>

EUROPOS BENDRIJŲ KOMISIJA. Komisijos komunikatas: Efektyvaus energijos vartojimo veiksmų planas: išnaudoti potencialą. Briuselis, Belgija, 2006. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A52006DC0545>

EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2002/91/EB 2002 m. gruodžio 16 d. dėl pastatų energinio naudingumo. Briuselis, Belgija, 2002. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32002L0091>

EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2010/31/ES 2010 m. gegužės 19 d. dėl pastatų energinio naudingumo (nauja redakcija). Briuselis, Belgija, 2010. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:LT:PDF>

EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 93/76/EEB 1993 m. rugsėjo 13 d. dėl išmetamųjų anglies dioksido dujų ribojimo gerinant energijos efektyvumą (SAVE). Briuselis, Belgija, 1993. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31993L0076>

EUROPOS PARLAMENTAS IR TARYBA. Direktyva 2003/87/EB 2003 m. spalio 13 d. nustatanti šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos leidimų sistemą Bendrijoje ir iš dalies keičianti Tarybos direktyvą 96/61/EB. Briuselis, Belgija, 2003. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2003L0087:20090625:LT:PDF>

EUROSTAT. Energy Statistics of the European Union: Concepts and Definitions on all Flows ("Aggregates") and Products Used in the Energy Statistics on Quantities. Luxembourg, 2015. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/38154/4956233/RAMON-CODED-ENERGY-20150212.pdf/4814055b-de02-404a-b8e0-909fb82cbd54>.

EUROSTAT. Energy Balances – 2014. Luxembourg, 2016. Prieiga per internetą: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances>

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global wind energy outlook: 2014. Brussels, Belgium, 2014. [žiūrėta 2015-12-03]. Prieiga per internetą: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation Summary for Policymakers and Technical Summary. 2011. ISBN 978-92-9169-131-9.

ISO 1219-1:2012 Fluid power systems and components. Graphical symbols and circuit diagrams - Part 1: Graphical symbols for conventional use and data-processing applications. International Organization for Standardization, 2012.

LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.09:2012 Pastatų energinis naudingumas. Energinio naudingumo sertifikavimas. Naujausia redakcija: 2015-12-12. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/7a098e80b3b411e598c4c7724bda031b>.

LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. Statybos techninis reglamentas STR 2.05.01:2013 Pastatų energinio naudingumo projektavimas. Naujausia redakcija: 2015-12-10. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.29F6A2858E2D>.

LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. Statybos techninis reglamentas STR 2.09.04:2008 Pastato šildymo galia. Energijos sąnaudos šildymui. Naujausia redakcija: 2008-05-23. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.9F5BA52877CB>.

LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas. Naujausia redakcija: 2016-11-11. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/2c182f10b6bf11e6aae49c0b9525cbbb>.

LIETUVOS RESPUBLIKOS Atsinaujinančių išteklių energetikos įstatymas. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.398874?jfwid=89x1tet4f>.

LIETUVOS RESPUBLIKOS STATYBOS IR URBANISTIKOS MINISTERIJA. Statybinė klimatologija RSN 156-94. Respublikinės statybos normos. Vilnius, 1995.

PACHAURI Rajendra K. and MEYER Allen L. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p. ISBN 978-92-9169-143-2.

PAULSEN Uwe Schmidt. Vindmølleafproving 5 kW CALORIUS. Denmark, Roskilde, 1996.

RATHMANN Ole. The UNDP/GEF Baltic Wind Atlas. Roskilde, Risø National Laboratory, Denmark, 2003. ISSN 0106-2840.

SCHINDLER J., WURSTER R., ZERTA M., BLANDOW V. and ZITTEL W. Where will the Energy for Hydrogen Production come from? Status and Alternatives. European Hydrogen Association (EHA). Ottobrunn, Germany, 2006. [žiūrėta 2014-06-10]. Prieiga per internetą:

http://www.lbst.de/ressources/docs2007/EHA_WhereWillH2ComeFrom_2007.pdf

STATYBOS PRODUKCIJOS SERTIFIKAVIMO CENTRAS. Pastatų energinio naudingumo sertifikatų registras. [žiūrėta 2016-06-10]. Prieiga per internetą: http://www.spsc.lt/cms/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=288&lang=lt

STOCKER, T.F., QIN D., PLATTNER G.-K. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 1535 pp. ISBN 978-1-107-05799-1. Prieiga per internetą: <http://www.climatechange2013.org/report/full-report/>

TROEN Ib, LUNDTANG PETERSEN, Erik. European Wind Atlas. Roskilde: Risø National Laboratory, Denmark, 1989. Prieiga per internetą: [http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas\(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be\).html](http://orbit.dtu.dk/en/publications/european-wind-atlas(335e86f2-6d21-4191-8304-0b0a105089be).html)

UNITED KINGDOM DEPARTMENT FOR BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY. The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings (SAP 2012).__Naujausia redakcija: 2014-12. Prieiga per internetą: <http://www.bre.co.uk/sap2012/page.jsp?id=2759>

UNITED NATIONS. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. New York, 1992. Prieiga per internetą: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.

UNITED NATIONS. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Prieiga per internetą: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf>

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Buildings energy data book. [žiūrėta 2016-05-07]. Prieiga per internetą: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro1.aspx?1#1>

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą

Ždankus, Tadas; Černeckienė, Jurgita; Jurelionis, Andrius; Vaičiūnas, Juozas. Experimental study of a small scale hydraulic system for mechanical wind energy conversion into heat // Sustainability. Basel: MDPI AG. ISSN 2071-1050. 2016, vol. 8, iss. 7, Article 637, p. [1–18]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Social Sciences Citation Index (Web of Science); Current Contents (Agriculture, Biology & Environmental Sciences); Current Contents (Social & Behavioral Sciences); Scopus]. [IF: 1,343, AIF: 3,107 (E, 2015)].

Kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose

Černeckienė, Jurgita; Ždankus, Tadas. Usage of the wind energy for heating of the energy-efficient buildings: analysis of possibilities // Journal of sustainable architecture and civil engineering = Darnioji architektūra ir statyba / Kaunas University of Technology. Kaunas: Technologija. ISSN 2029-9990. 2015, vol. 10, no. 1, p. 58–65.

Černeckienė, Jurgita; Ždankus, Tadas. Vėjo energijos panaudojimo šilumos gamybai, taikant hidraulinę sistemą, tyrimas // Energetika = Power engineering / Lietuvos mokslų akademija. Vilnius: Lietuvos mokslų akademijos leidykla. ISSN 0235-7208. 2015, t. 61, nr. 1, p. 32–43.

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai

Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai

Černeckienė, Jurgita; Ždankus, Tadas. Wind energy for building heating: converting mechanical energy in the hydraulic system // The 13th international conference of young scientists on energy issues, CYSENI: Kaunas, Lithuania, May 26-27, 2016 [elektroninis išteklius] / Lithuanian Energy Institute. Kaunas: LEI. ISSN 1822-7554. 2016, p. 55–63.

Černeckienė, Jurgita; Ždankus, Tadas. Usage of the wind energy for heating of the energy-efficient buildings: analysis of possibilities // Advanced construction 2014: proceedings of the 4th international conference, 9-10 October, 2014, Kaunas, Lithuania / Kaunas University of Technology. Kaunas: Technologija. ISSN 2029-1213. 2014, p. 236.

SL344. 2017-06-28, 11,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 12 egz. Užsakymas 213.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

PRIEDAI

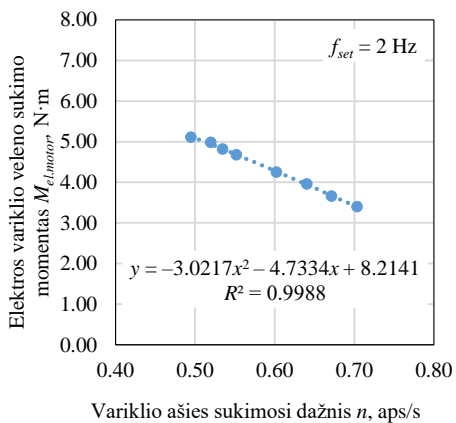
P 1 lentelė. Mėnesiniai vėjo greičiai skirtingose vietovėse skirtingais metų mėnesiais $v_{wind,m}$, m/s (STR 2.01.02:2016 Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas)

Eil. nr.	Pastato vietovės apibūdinimas	Metų mėnesio numeris											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Akmenės rajonas	3,7	3,4	3,4	3,1	2,9	2,9	2,8	2,6	3,0	3,4	3,6	3,5
2	Alytaus rajonas	3,6	3,3	3,3	3,2	2,8	2,7	2,7	2,5	2,8	3,2	3,7	3,5
3	Anykščių rajonas	3,8	3,6	3,5	3,3	3,0	2,9	2,7	2,6	3,0	3,4	3,9	3,7
4	Biržų rajonas	4,2	4,1	4,0	3,8	3,5	3,3	3,0	2,8	3,2	3,8	4,3	4,1
5	Ignalinos rajonas	3,7	3,3	3,2	3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	2,9	3,2	3,6	3,6
6	Jonavos rajonas	4,5	4,2	4,2	3,9	3,4	3,2	3,0	3,0	3,6	4,0	4,6	4,5
7	Joniškio rajonas	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	2,9	2,8	2,6	2,9	3,3	3,7	3,5
8	Jurbarko rajonas	4,1	4,1	4,1	3,9	3,6	3,3	3,1	2,9	3,3	3,7	4,1	4,0
9	Kaišiadorių rajonas	4,5	4,2	4,2	3,9	3,4	3,2	3,0	3,0	3,6	4,0	4,6	4,5
10	Kauno rajonas	4,9	4,3	4,4	3,9	3,4	3,2	3,1	3,1	3,7	4,3	4,6	4,8
11	Kėdainių rajonas	3,8	3,7	3,6	3,6	3,2	2,9	2,7	2,6	2,9	3,4	3,8	3,6
12	Kelmės rajonas	4,6	4,3	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	3,4	4,0	4,5	4,2
13	Klaipėdos rajonas	5,8	5,1	5,0	4,5	4,1	4,2	4,7	4,6	5,4	5,8	6,5	6,1
14	Kretingos rajonas	5,8	5,1	5,0	4,5	4,1	4,2	4,7	4,6	5,4	5,8	6,5	6,1
15	Kupiškio rajonas	3,8	3,6	3,5	3,3	3,0	2,9	2,7	2,6	3,0	3,4	3,9	3,7
16	Lazdijų rajonas	4,1	3,7	3,7	3,5	3,1	3,0	3,0	2,8	3,2	3,6	4,2	4,1
17	Marijampolės rajonas	4,6	4,1	4,2	3,7	3,2	3,0	2,9	2,9	3,4	4,0	4,4	4,4
18	Mažeikių rajonas	4,6	4,3	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	3,4	4,0	4,5	4,2
19	Molėtų rajonas	4,3	3,9	3,8	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7	3,3	3,8	4,2	4,3
20	Pakruojo rajonas	4,2	4,0	4,0	3,8	3,4	3,2	3,1	3,0	3,4	3,6	4,3	4,1
21	Panevėžio rajonas	4,2	4,0	4,0	3,8	3,4	3,2	3,1	3,0	3,4	3,6	4,3	4,1
22	Pasvalio rajonas	4,2	4,0	4,0	3,8	3,4	3,2	3,1	3,0	3,4	3,6	4,3	4,1
23	Plungės rajonas	4,6	4,3	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	3,4	4,0	4,5	4,2
24	Prienų rajonas	4,6	4,1	4,2	3,7	3,2	3,0	2,9	2,9	3,4	4,0	4,4	4,4
25	Radviliškio rajonas	4,2	4,0	4,0	3,8	3,4	3,2	3,1	3,0	3,4	3,6	4,3	4,1
26	Raseinių rajonas	4,1	4,1	4,1	3,9	3,6	3,3	3,1	2,9	3,3	3,7	4,1	4,0
27	Rokiškio rajonas	3,8	3,6	3,5	3,3	3,0	2,9	2,7	2,6	3,0	3,4	3,9	3,7

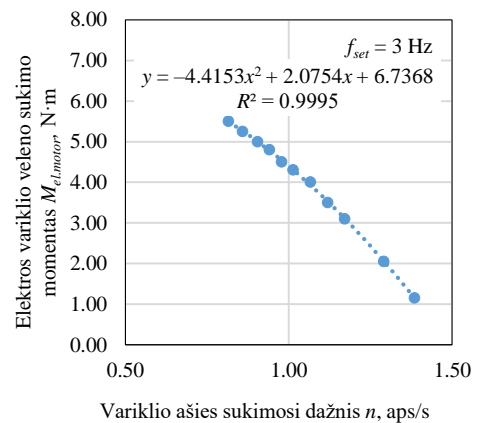
lentelės tęsinys kitame psl.

P 1 lentelės tęsinys

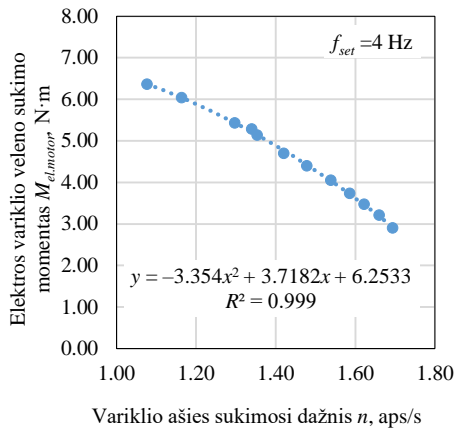
28	Šakių rajonas	4,9	4,3	4,4	3,9	3,4	3,2	3,1	3,1	3,7	4,3	4,6	4,8
29	Šalčininkų rajonas	3,0	2,9	2,9	2,8	2,5	2,4	2,3	2,1	2,3	2,7	3,2	2,9
30	Siaulių rajonas	3,6	3,5	3,4	3,3	3,1	2,9	2,8	2,6	2,9	3,3	3,7	3,5
31	Šilalės rajonas	4,6	4,3	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	3,4	4,0	4,5	4,2
32	Šilutės rajonas	4,5	4,2	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	3,5	4,0	4,5	4,3
33	Širvintų rajonas	4,5	4,2	4,2	3,9	3,4	3,2	3,0	3,0	3,6	4,0	4,6	4,5
34	Skuodo rajonas	4,6	4,3	4,2	3,8	3,5	3,3	3,1	2,9	3,4	4,0	4,5	4,2
35	Švenčionių rajonas	3,7	3,3	3,2	3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	2,9	3,2	3,6	3,6
36	Tauragės rajonas	4,5	4,2	4,3	3,9	3,6	3,5	3,4	3,1	3,5	4,0	4,5	4,3
37	Telšių rajonas	3,7	3,4	3,4	3,1	2,9	2,9	2,8	2,6	3,0	3,4	3,6	3,5
38	Trakų rajonas	4,3	3,9	3,8	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7	3,3	3,8	4,2	4,3
39	Ukmergės rajonas	4,5	4,2	4,2	3,9	3,4	3,2	3,0	3,0	3,6	4,0	4,6	4,5
40	Utenos rajonas	3,6	3,4	3,4	3,1	2,8	2,6	2,6	2,5	2,8	3,3	3,7	3,5
41	Varėnos rajonas	3,0	2,9	2,9	2,8	2,5	2,4	2,3	2,1	2,3	2,7	3,2	2,9
42	Vilkaviškio rajonas	4,2	3,8	3,9	3,4	2,9	2,7	2,7	2,6	3,1	3,6	4,2	3,9
43	Vilniaus rajonas	4,3	3,9	3,8	3,4	3,2	3,0	2,8	2,7	3,3	3,8	4,2	4,3
44	Zarasų rajonas	3,7	3,3	3,2	3,0	2,8	2,7	2,5	2,4	2,9	3,2	3,6	3,6
45	Neringos miestas	6,4	5,8	5,7	5,1	5,0	4,9	4,9	4,9	5,5	6,2	7,1	6,5



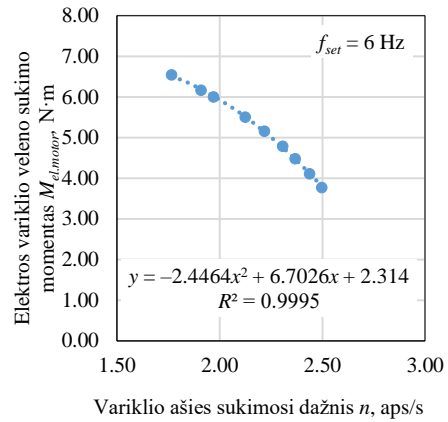
P 1.1 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=2 \text{ Hz}$



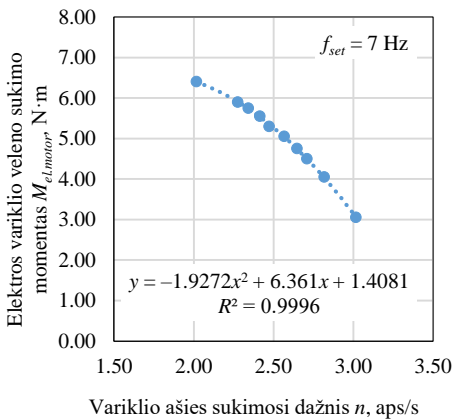
P 1.2 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el.motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=3 \text{ Hz}$



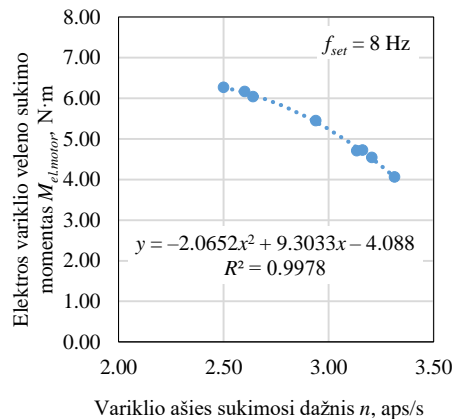
P 1.3 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=4$ Hz



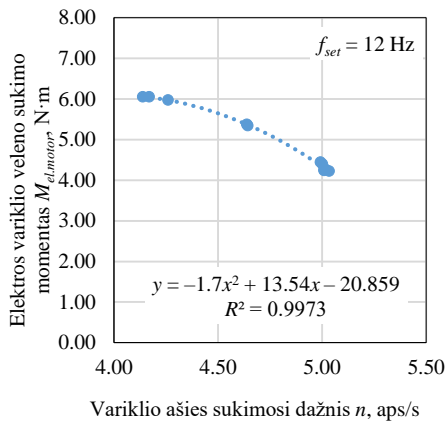
P 1.4 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=6$ Hz



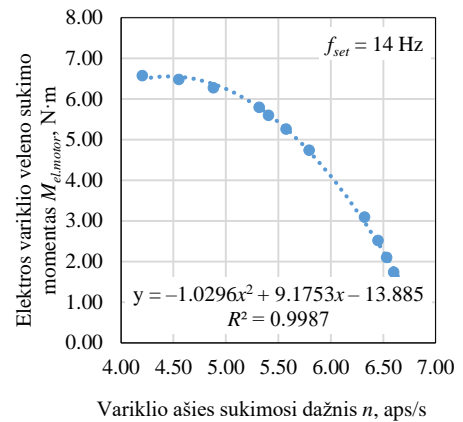
P 1.5 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=7$ Hz



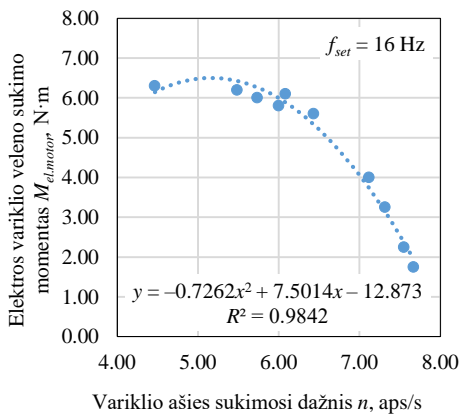
P 1.6 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=8$ Hz



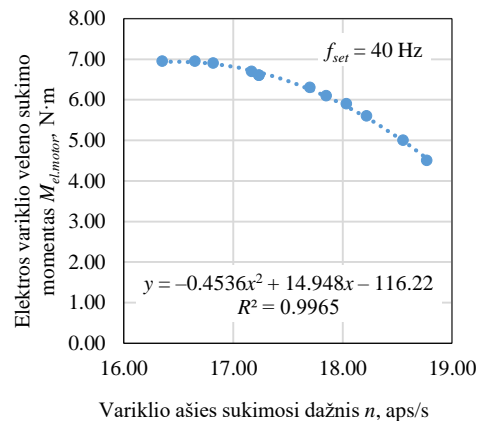
P 1.7 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=12 \text{ Hz}$



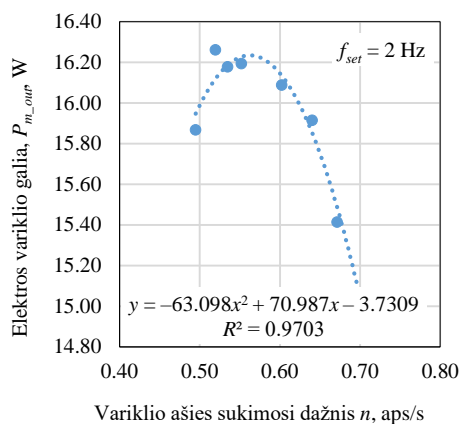
P 1.8 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=14 \text{ Hz}$



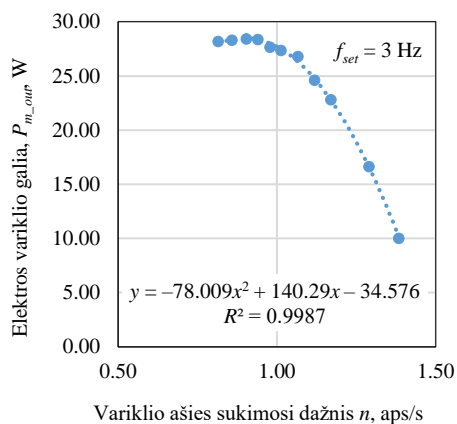
P 1.9 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=16 \text{ Hz}$



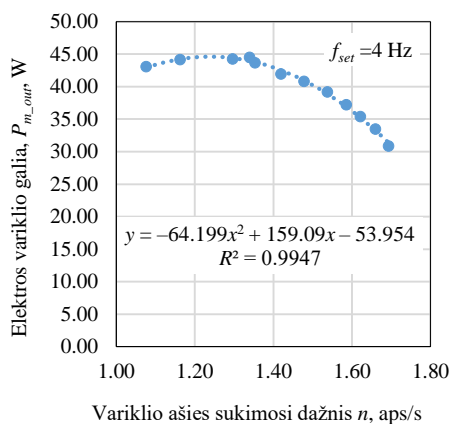
P 1.10 pav. Elektros variklio veleno sukimosi momento $M_{el,motor}$, N·m, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampas dažnis $f_{set}=40 \text{ Hz}$



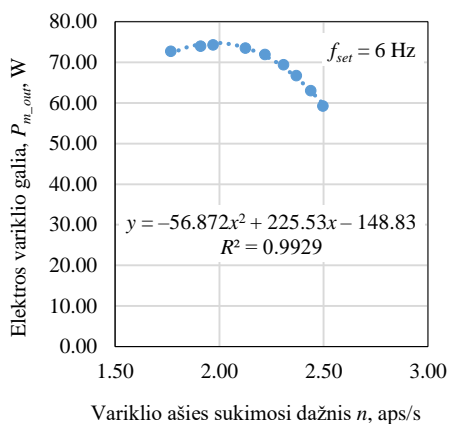
P 1.11 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=2$ Hz



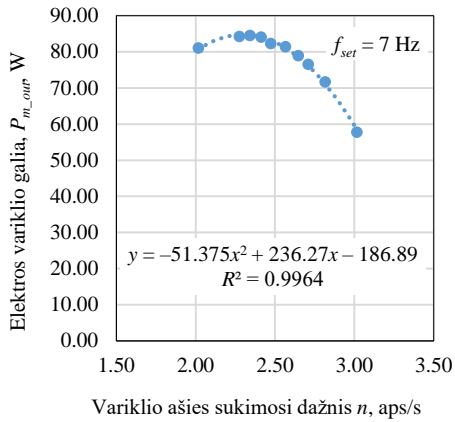
P 1.12 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=3$ Hz



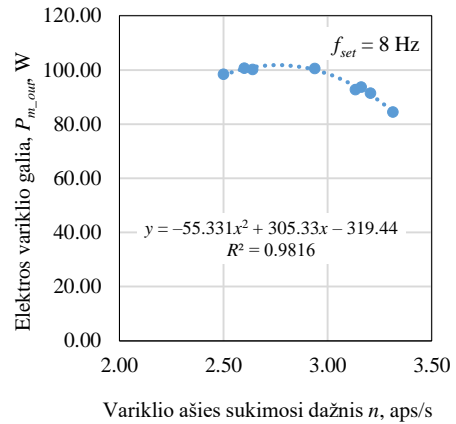
P 1.13 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=4$ Hz



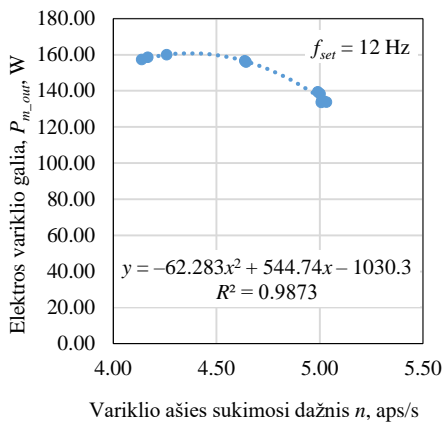
P 1.14 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=6$ Hz



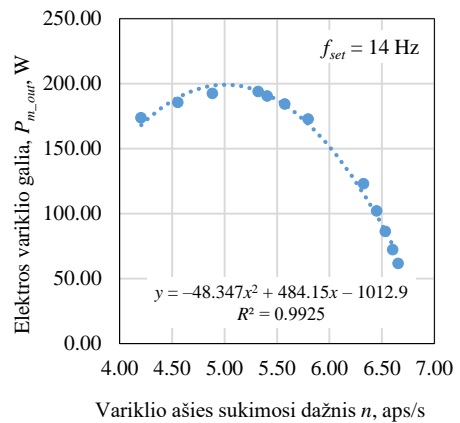
P 1.15 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=7 \text{ Hz}$



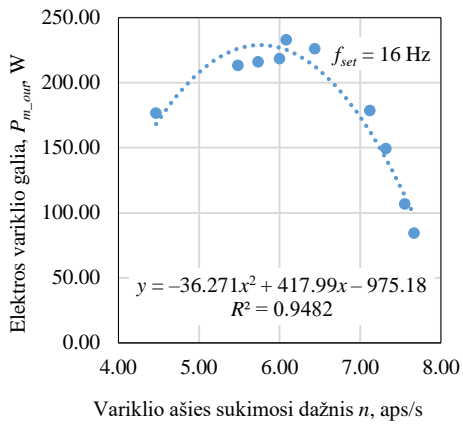
P 1.16 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=8 \text{ Hz}$



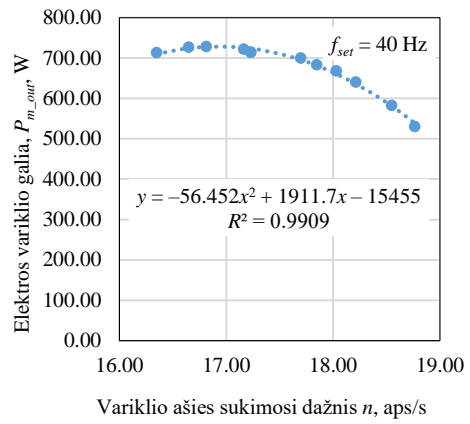
P 1.17 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=12 \text{ Hz}$



P 1.18 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=14 \text{ Hz}$



P 1.19 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n_{set} , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=16 \text{ Hz}$



P 1.20 pav. Elektros variklio galios P_{m_out} , W, priklausomybė nuo sukimosi dažnio n_{set} , aps/s, kai maitinimo įtampos dažnis $f_{set}=40 \text{ Hz}$