VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Jurgis MAŽUOLIS

VĖJO JĖGAINIŲ KELIAMO TRIUKŠMO BEI APSAUGOS PRIEMONIŲ TYRIMAS IR VERTINIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
APLINKOS INŽINERIJA (04T)

Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Donatas BUTKUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija – 04T).

VG TU leidyklos TECHNIKA 2220-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-606-5

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2013

© Jurgis Mažuolis, 2013

jurgis.mazuolis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Jurgis MAŽUOLIS

RESEARCH AND EVALUATION OF WIND TURBINES NOISE AND PROTECTION MEASURES

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ENVIRONMENTAL ENGINEERING (04T)

Vilnius LEIDYKLA TECHNICA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Donatas BUTKUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Environmental Engineering – 04T).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama triukšmo sklaidos nuo vėjo jėginių problema. Pagrindiniai tyrimo objektai yra vėjo jėginių parkų skleidžiamas triukšmas ir aplinkai nekenksmingos, cilindrinę struktūrą turinčios, žemo dažnio triukšmą slopinančios medžiagos.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: nustatomas ir įvertinamas žemo dažnio triukšmo ir infragarso susidarymas ir sklaida pramoninių vėjo jėginių parkuose ir jų išorėje, taip pat nustatomos efektyvios gyvenviečių apsaugos priemonės nuo vėjo jėginių keliamo žemo dažnio triukšmo.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei. Jame pateikta vėjo jėginių ir jų keliamo triukšmo apžvalga. Apžvelgtos vėjo energetikos būklė Lietuvoje, vėjo jėginių konstrukcijos, vėjo jėginių triukšmo formavimosi principas, triukšmo matavimo metodikos. Analizuojamos skleidžiamo aerodinaminio triukšmo mažinimo priemonės bei žemo dažnio triukšmo slopinimo būdai ir izoliuojančių medžiagų panaudojimas. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateiktos: vėjo jėginių skleidžiamos triukšmo ir foninio triukšmo nustatymo metodikos; garso izoliacijos rodiklio R_w nustatymo triukšmo slopinimo kameroje metodika ir triukšmo sklaidos modeliavimo metodikos.

Trečiajame skyriuje pateikiami: triukšmo sklaidos vėjo jėginių parkuose tyrimo rezultatai; aplinkai nekenksmingų medžiagų, turinčių cilindrinę struktūrą, garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai ir triukšmo sklaidos medžiagose ir pastatų aplinkoje modeliavimo rezultatai.

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, referuojamame ISI Web of Sciences duomenų bazėje ir turinčiame citavimo indeksą $IF = 1,958$, vienas – konferencijų medžiagoje, referuojamoje ISI Proceedings duomenų bazėje, vienas – mokslo žurnale įtrauktoje į tarptautines duomenų bazines, trys – recenzuojamose konferencijų darbų medžiagose, įtrauktuose į Index Copernicus duomenų bazę.

Abstract

The dissertation examines the issue of noise emission from the wind farms. The objects of investigation are wind farm noise and environmentally friendly low-frequency noise-deadening materials with cylindrical structure.

The paper addresses a number of key objectives: to determine and assess low frequency noise and infrasound emission and dispersion both inside and outside the industrial wind farms, as well as to establish effective measures for protection of settlements against low-frequency noise generated by wind turbines.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, recommendations, list of references and the author's publications on the topics.

The introductory chapter discusses the research problem, the relevance of the investigation, describes the object of the research, states the aims and objectives, presents the research methodology, scientific novelty, practical significance of the results, and the statements for defending. It also highlights practical significance of the dissertation presents the author's publications and presentations at conferences, and explains the structure of the thesis.

The first chapter is devoted to literature review. It provides an overview of general problems related to wind and noise produced by wind turbines, an overview of the outlook on wind energy in Lithuania, and a discussion of wind turbine constructions. The chapter presents the analysis of aerodynamic noise emitted by means of low-frequency noise attenuation techniques and the use of insulating materials. The chapter ends with conclusions and specified objectives of the dissertation.

The second chapter is concerned with the wind farm noise and background noise detection method, sound insulation R_w determination in noise attenuation chamber method and the noise dispersion modelling methodology.

The third section includes testing results of noise emissions at wind farms; results of sound insulation index analysis of environmentally friendly materials with cylindrical structure, and simulation results of noise emissions in materials and building environments.

There are six research papers published on the subject of the dissertation, one of them in a journal assessed in the ISI Web of Science database and provided with a citation index $IF = 1.958$, one in conference proceedings assessed in ISI Proceedings database, one in a scientific journal included in other databases and three in Lithuanian assessed conference papers entered in the Index Copernicus database.

Žymėjimai

Simboliai

c – garso sklidimo greitis ore, m/s;
 d – atstumas iki sienos, m;
 D – cilindrinis atitvaros standis, kg/m;
 E – atitvaros medžiagos tamprumo modulis, kg/m³;
 f – dažnis, Hz;
 f_c – kritinis dažnis, Hz;
 f_0 – rezonansinis dažnis, Hz;
 h – atitvaros storis, m;
 I – matuojamas garso intensyvumas, W·m⁻² ;
 I_0 – garso girdimumo ribinis intensyvumas, W·m⁻²;
 l – bandinio storis, m;
 L_{Aeq} – ekvivalentinis garso slėgio lygis, koreguotas pagal A dažninę charakteristiką, dBA;
 L_F – foninis vėjo jėgainių parko triukšmas, dBZ;
 L_{FJ} – foninio triukšmo ir vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo suma, dBZ;
 L_I – garso intensyvumo lygis, dB;
 L_i – vidutinių geometrinių dažnių garso slėgio lygio vertės, dBZ;
 L_J – vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmas, dBZ;
 $L_{n,eq}$ – ekvivalentinis garso slėgio lygis n -tųjų vidutinių geometrinių dažnių ribose, dB;
 L_{peak} – didžiausioji akimirkinė (pikinė) garso slėgio lygio vertė, nustatyta darbo ciklo metu, dB;

LZ_{eq} – ekvivalentinis garso slėgio lygis, koreguotas pagal Z dažninę charakteristiką, dBZ;
 LZF_{min} – minimalus garso slėgio lygis, koreguotas pagal Z dažninę charakteristiką, pritaikant F laikinę svertį, dBZ;
 LZS_{maks} – maksimalus garso slėgio lygis, koreguotas pagal Z dažninę charakteristiką, pritaikant S laikinę svertį, dBZ;
 L_1 – garso slėgio lygis siunčiamojo garso patalpoje, dB;
 L_2 – garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje, dB;
 m – atitvaros masė ploto vienetui, kg/m²;
 p – perforacijos santykis, %;
 r – nendrių skersmuo, mm;
 R_W – garso izoliacijos rodiklis, dB;
 S – konstrukcijos plotas, m²;
 T – reverberacijos laikas, s;
 V – priimamojo garso patalpos tūris, m³;
 v_s – garsą skleidžiančio objekto greitis, m/s;
 τ – perdavimo koeficientas;
 ΔL – garso slėgio lygio pokytis, dB;
 α – garso absorbcijos koeficientas;
 σ – laisvųjų bangų spinduliavimo faktorius;
 ρ – medžiagos tankis, kg/m³;
 μ – Puasono koeficientas.

Turinys

IVADAS.....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimo objektas.....	3
Darbo tikslai.....	3
Darbo uždaviniai.....	3
Tyrimų metodika.....	4
Darbo mokslinis naujumas.....	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
1. VĖJO JĖGAINĖS IR JŲ KELIAMAS TRIUKŠMAS	7
1.1. Vėjo energetika Lietuvoje.....	7
1.2. Vėjo jėgainių konstrukcijos.....	9
1.3. Foninis ir vėjo jėgainės keliamas triukšmas	10
1.4. Vėjo jėgainės keliamo triukšmo matavimas	19
1.5. Vėjo jėgainių skleidžiamo aerodinaminio triukšmo mažinimo priemonės	23
1.6. Triukšmo slopinimo būdai ir izoliuojančių medžiagų panaudojimas	26
1.7. Triukšmo sklaidos modeliavimas	29
1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas.....	31
2. VĖJO JĖGAINIŲ TRIUKŠMO SKLAIDOS IR MAŽINIMO PRIEMONIŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ BEI MODELIAVIMO METODIKOS	33
2.1. Foninio triukšmo vėjo jėgainių parkų aplinkoje tyrimų metodika.....	35
2.2. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų viduje tyrimų metodika.....	37

2.3. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų išorėje tyrimo metodika	47
2.4. Žemo dažnio triukšmą slopinančių medžiagų garso izoliacijos rodiklio tyrimo metodika	50
2.5. Žemo dažnio triukšmo sklaidos bei jo mažinimo modeliavimo metodika	52
2.6. Antrojo skyriaus išvados.....	58
 3. VĖJO JĖGAINIŲ TRIUKŠMO SKLAIDOS IR MAŽINIMO PRIEMONIŲ TYRIMŲ BEI MODELIAVIMO REZULTATAI.....	61
3.1. Foninio triukšmo vėjo jėgainių parko aplinkoje tyrimo rezultatai	62
3.2. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų viduje tyrimo rezultatai.....	66
3.3. Triukšmo sklaidos jėgainių parkų išorėje tyrimo rezultatai	93
3.4. Žemo dažnio triukšmą slopinančių medžiagų garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai	106
3.5. Žemo dažnio triukšmo sklaidos bei jo mažinimo modeliavimo rezultatai	116
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	130
 BENDROSIOS IŠVADOS.....	133
 REKOMENDACIJOS	135
 LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	137
 AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	149

Contents

INTRODUCTION	1
Problem of the work	1
Topicaly of the work.....	2
Object of the research.....	3
Aim of the work	3
Task of the work	3
Metodology of research	4
Scientific novelty of the work	4
Practical novelty of the work.....	4
Defended propositions.....	4
Approbation of the scientific work	5
Structure of the scientific work	5
1. WIND TURBINES AND THEIR NOISE	7
1.1. Wind energy of Lithuania	7
1.2. Wind turbine construction	9
1.3. Background noise and noise generated by wind turbine	10
1.4. Wind turbine noise measurement	19
1.5. Measures for reducing aerodynamic noise generated by wind turbines	23
1.6. Noise suppression and methods of using insulating materials.....	26
1.7. Simulation of noise emission.....	29
1.8. Conclusions of the first chapter and formulation of the dissertation tasks	31
2. METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES AND SIMULATION OF WIND POWER PLANT NOISE EMISSIONS AND THEIR REDUCTION	33
2.1. The methodology of research into background noise in the wind farm environment	35

2.2. The methodology of research into noise emissions inside of wind park	37
2.3. The methodology of research into noise emissions outside of wind park	47
2.4. The methodology of research into low frequency noise deadening material sound insulation index R_w	50
2.5. The methodology of research into low frequency noise reduction in circulation and its mathematical simulation and numerical methods	53
2.6. Conclusions of second chapter	58
 3. RESULTS OF RESEARACH IN WIND TURBINES NOISE DISSEMINATION AND REDUCTION MEASURES	61
3.1. The results of research into background noise in the wind farm environment	62
3.2. The results of research into noise emissions inside of wind park.....	66
3.3. The results of research into noise emissions outside of wind park.....	93
3.4. The results of research into low frequency noise deadening material sound insulation index R_w	106
3.5. The results of research into low frequency noise reduction in circulation and its mathematical simulation and numerical methods	116
3.6. Conclusions of third chapter.....	130
 GENERAL CONCLUSIONS	133
 RECOMMENDATIONS	135
 REFERENCES	137
 LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	151

Ivadas

Problemos formulavimas

Visame pasaulyje energijos poreikis vis didėja, o jos gavimo būdai yra kenksmingi aplinkai. Tradiciniai energijos ištekliai sparčiai senka. Išgaunant bei deginant iškastinį kurą, į aplinką patenka daug įvairių teršalų.

Siekiant įgyvendinti tarptautinius įsipareigojimus dėl atmosferos taršos sumažinimo ir klimato kaitos stabilizavimo, svarbus Europos Sąjungos uždavinys yra padidinti atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimą ir pasiekti, kad 2020 metais bendrame energetiniame balanse jis sudarytų 23 %.

Viena iš atsinaujinančių energijos formų yra vėjo energija. Vėjo energija daugiausia naudojama elektros energijos gamybai vėjo jėgainėse. Žingsnis nuo mechaninio iki elektrinio vėjo energijos naudojimo buvo padarytas JAV. 1888 m. sukonstruota nuolatinės srovės vėjo jėgainė, kurios nominali galia buvo 12 kW. Vėjaratį, kurio skersmuo 17 metrų, sudarė 144-ios kedro medienos mentės. Pirmą kintamosios srovės vėjo jėgainę buvo pastatyta 1930-aisiais JAV. Vėjo energetika Europoje aktyviai plėtojama daugiau nei 10 metų. Šiuolaikinių vėjo jėgainių raidai didelę įtaką darė Danija, Vokietija, Nyderlandai bei Ispanija.

Vėjo energetikos privalumai: vėjo ištekliai yra neišsenkantys; vėjo jėgainės gamina „švarią“ energiją, neišskirdamos į aplinką kenksmingų medžiagų.

Pagrindinis vėjo energetikos trūkumas yra tas, jog vėjo energija yra nepastovi, priklausanti nuo vėjo greičio ir krypties svyravimų. Taip pat arti jėgainių gyvenantiems žmonėms neigiamą poveikį gali turėti jėgainių menčių šešėlių mirgėjimas ir skleidžiamas triukšmas.

Vėjo turbinos triukšmas turi aerodinaminę ir mechaninę kilmę. Triukšmas daro reikšmingą poveikį gyventojams, gyvenantiems šalia vėjo jėgainių. Tai kenksmingas sveikatai aplinkos faktorius, sukeliantis specifinius ir nespecifinius patologinius pokyčius įvairiose organizmo sistemose. Triukšmas yra reikšmingas rizikos veiksnys klausos, nervų, širdies–kraujagyslių, virškinamojo trakto susirgimams išsivystyti. Mažinant žalingą triukšmo įtaką sveikatai, taikomos priemonės turi būti nukreiptos į triukšmo mažinimą.

Darbo aktualumas

Pasaulio sveikatos organizacija ir Europos Komisija (direktyva 2002\49\EB) triukšmą išskyrė kaip vieną iš didžiausių problemų Europoje. Vėjo jėgainės yra savitas triukšmo šaltinis, nes montuojamos dideliame aukštyje virš žemės paviršiaus, o skleidžiamas triukšmas yra fliktuojantis bei pasireiškia dideliame dažnių diapazone.

Palyginti nedidelio stiprumo garsas veikia žmones, nes vėjo jėgainių spektrinėje triukšmo sudėtyje vyrauja toli sklindantys žemo dažnio garsai ir infragarsas. Infragarsas – žmogui negirdimas garsas, kurio dažnis yra nuo 1 Hz iki 20 Hz. Vėjo jėgainių aplinkoje triukšmo tyrimus yra atlikę daug tyrėjų, tačiau žemo dažnio triukšmo ir infragarso sklaidos vėjo jėgainių parke tyrimų atlikta mažai. Mažai tirta ir vėjo jėgainių išdėstymo parke įtaka triukšmo formavimuisi. Tiriant vėjo jėgainių parkų triukšmo sklaidą, kai rezultatai koreguojami pagal A dažninę charakteristiką, naudojama foninio triukšmo nustatymo metodika remiasi procentiniu garso slėgio lygiu LAF_{90} . Tačiau nėra metodikos kuria vadovaujantis galima nustatyti infragarso bei žemo dažnio foninio triukšmo vertes. Vėjo jėgainių parke būtina nustatyti foninį triukšmą.

Nustatyta, kad jau 32 dBA vėjo jėgainių triukšmas kai kuriems žmonėms yra stiprus nervinės sistemos dirgiklis, o 40 dBA ir didesnis triukšmas sukelia stiprų diskomfortą daugeliui žmonių. Šiuo metu nėra išsamių duomenų apie vėjo jėgainių keliamo triukšmo sklaidą aplinkoje, todėl sunku numatyti apsaugojimo priemones nuo tokio pobūdžio triukšmo.

Literatūroje daugiausia sutinkami duomenys apie triukšmo sklaidą nuo šaltinių, esančių arti žemės paviršiaus. Triukšmo sklaida nuo šaltinių, esančių žymiai aukščiau žemės paviršiaus, nėra pakankamai ištirta, trūksta duomenų apie priemones, taikomas artimų vėjo jėgainėms gyvenviečių apsaugai nuo triukšmo.

Daugiausia vėjo jėginių triukšmo sklaidos mokslo darbų yra švedų mokslininkų: Karl Bolin, Lisa Johansson, Eja Pedersen, Olivier Fegeant. Fegeant didelį dėmesį skyrė triukšmo fliktuacijoms, Peter R. Wolton (JAV) ir Luís Filipe da Conceição Vargas (Portugalija) – triukšmo sklaidos skaitinio modelio kūrimui ir analizei bei triukšmo prognozavimui. Lietuvoje garsą sugeriančių medžiagų bei jų kompozicijų tyrimų yra daug atlikęs Vytautas Stauskis, patalpų akustikos ir garso izoliacijos srityje – Aleksandras Jagniatinskis, triukšmo sklaidos cilindrinėse konstrukcijose – Danielius Gužas.

Tyrimo objektas

Pramoninių vėjo jėginių parkų skleidžiamas triukšmas ir gyvenamosios aplinkos apsaugos priemonės.

Darbo tikslai

1. Nustatyti ir įvertinti žemo dažnio triukšmo ir infragarso susidarymą ir sklaidą pramoninių vėjo jėginių parkuose ir jų išorėje.
2. Nustatyti efektyvias gyvenamosios aplinkos apsaugos priemones nuo vėjo jėginių keliamo žemo dažnio triukšmo.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Triukšmo sklaidos matavimas ir vertinimas vėjo jėginių parkuose ir jų išorėje.
2. Foninio triukšmo nustatymas ir įvertinimas vėjo jėginių parkuose pučiant 6 m/s vėjo greičiui.
3. Aplinkai palankių medžiagų garso izoliacijos rodiklio žemų dažnių srityje nustatymas.
4. Apsaugos priemonių nuo vėjo jėginių keliamo žemo dažnio triukšmo gyvenamojoje aplinkoje kūrimas ir modeliavimas.

Tyrimų metodika

Darbe taikoma vėjo jėginių keliamo triukšmo koncentrinuose žieduose nustatymo metodika. Aplinkai nekenksmingų medžiagų bei jų kompozicijų akustinių savybių tyrimai atlikti pagal tarptautiniame ISO 717-1 standarte pateikiamą bandymų atlikimo metodiką. Siekiant įvertinti triukšmo sklaidą mažinančių priemonių efektyvumą naudotos empirinės formulės ir Strati-Artz programinė įranga. Triukšmo sklaidai aplinkoje modeliuoti naudota triukšmo sklaidos modeliavimo programa CadnaA ir baigtinių elementų metodu paremta programa Comsol Multiphysics.

Darbo mokslinis naujumas

Triukšmo dažninėje charakteristikoje išskiriamas, nagrinėjamas bei įvertinamas vėjo jėginių skleidžiamo infragarso ir žemo dažnio triukšmo šaltinis. Įvertinamas veikiančių vėjo jėginių infragarsas ir žemo dažnio foninis triukšmas. Infragarso ir žemo dažnio triukšmo sklaida vertinama vėjo jėginių parkuose, už jų ribų bei gyvenamojoje aplinkoje. Darbas pasižymi kompleksiskumu: atliekami natūriniai vėjo jėginių keliamo triukšmo susidarymo ir sklaidos tyrimai; eksperimentiniais tyrimais triukšmo slopinimo kameroje ir modeliuojant nustatomas aplinkai nekenksmingų medžiagų ir jų kompozicijų garso izoliacijos rodiklis; atsižvelgiant į gautus tyrimų duomenis modeliuojama triukšmo sklaida vėjo jėginių parko išorėje ir garso slopinimo priemonės gyvenamojoje aplinkoje.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Remiantis žemo dažnio foninio triukšmo matavimo metodika galima įvertinti foninio triukšmo įtaką bendram 6,3–200 Hz dažnių triukšmui vėjo jėginių parke pučiant 6 m/s vėjo greičiui. Atsižvelgiant į triukšmo slopinimo kameroje gautus tyrimų ir modeliavimo duomenis siūlomos gyvenviečių apsaugos priemonės nuo vėjo jėginių keliamo žemų dažnių triukšmo.

Ginamieji teiginiai

1. Siekiant eksperimentiškai nustatyti sklindančio triukšmo verčių pasiskirstymą vėjo jėginių parke, matavimo vietas tikslinga parinkti

koncentrinių apskritimų apie vėjo jėgaines metodu.

2. Foninį žemų dažnių triukšmą veikiančių vėjo jėgainių aplinkoje galima įvertinti jų nestabdant.

3. Žemų dažnių triukšmo sklaidą vėjo jėgainių akustinio poveikio zonoje esančiuose pastatuose galima sumažinti panaudojant konstrukcijas iš aplinkai nekenksmingų medžiagų (plaušamolio, nendrių ir presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku).

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 5 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, referuojamame ISI Web of Sciences duomenų bazėje ir turinčiame citavimo indeksą $IF = 1,958$ (Butkus *et al.* 2012), vienas – konferencijų medžiagoje, referuojamoje ISI Proceedings duomenų bazėje (Butkus *et al.* 2011), vienas – mokslo žurnale įtrauktame į tarptautines duomenų bazines (Deveikytė *et al.* 2012), du – recenzuojamoje Lietuvos konferencijos medžiagoje, įtrauktoje į Index Copernicus duomenų bazę (Mažuolis *et al.* 2010; Eivienė *et al.* 2012).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, rekomendacijos, literatūros sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas.

Darbo apimtis yra 163 puslapiai, 87 paveikslai ir dvi lentelės, tekste panaudotos 22 numeruotos formulės. Rašant disertaciją panaudota 150 literatūros šaltinių.

Vėjo jėgainės ir jų keliamas triukšmas

Vėjo energija naudojama jau daug šimtmečių (Emami and Noghreh 2010). Daugelyje šalių, vėjo malūnai buvo pastatyti tam, kad maltų grūdus ar tiektų vandenį (van Kooten and Wong 2010).

Malūnų būta įvairios paskirties, įvairiausių konstrukcijų, tipų, variantų. Naudodami vėjo energiją veikė ne tik grūdų malūnai, bet ir vėlyklos, lentpjūvės, kalvės, kruopinės, aliejaus spaudyklos, siurblinės, vėjinės žemsiurbės, laivuose ir pan. (Petrauskas 2001; Watts 2006). Danijoje vėjo jėgainės pagamina apie 20 % sunaudojamos elektros energijos, o iki 2030 m. tikimasi iš vėjo energijos gauti 50 % visos elektros energijos nepertvarkant elektros tinklo sistemos (Akhmatov *et al.* 2000). Vis dažniau senos vėjo jėgainės yra keičiamos naujomis, galingesnėmis bei efektyvesnėmis (Hau 2006).

1.1. Vėjo energetika Lietuvoje

Daugelis šalių, kurios turi gausius vėjo energijos išteklius, įrengia vis daugiau vėjo jėgainių, kuria naujas įdiegimo programas, skatina vėjo energetikos plėtrą (Fu and Su 2009). Žinoma, kad Lietuvos pajūrio regione vidutinis metinis vėjo

srauto greitis 50 m aukštyje virš žemės paviršiaus yra 6,4 m/s (1.1 pav.), t. y. pakankamas efektyviam vėjo jėgainių funkcionavimui, todėl šis šalies regionas yra vienas perspektyviausių vėjo energetikos plėtrai. Lietuvoje vėjo energija 2008 m. sudarė 1,4 proc. sunaudojamos energijos (Birgiolas ir Katinas 2006).

1.1 pav. Vidutinio vėjo greičio pasiskirstymas Lietuvoje (Deveikis ir Nevardauskas 2007)

Fig. 1.1. Distribution of average wind speed in Lithuania (Deveikis ir Nevardauskas 2007)

Daug vėjo jėgainių parkų yra Kretingos, Šilutės, Tauragės, rajonuose, nes šioje Lietuvos dalyje yra palankūs vėjai. Klaipėdos rajone irgi yra palankūs vėjai, tačiau dėl teisinių kliūčių, pramoninių vėjo jėgainių parkų statyba yra sustabdyta. 2005 m. Lietuvoje veikė keturios nedidelės galios vėjo jėgainės, kurių bendroji instaliuota galia sudarė beveik 1 MW. 2005 m. šios vėjo jėgainės pagamino 1,775 GWh elektros energijos, daugiausia (beveik 90 %) – Vydmantų VJ. 2006 m. pabaigoje bendroji veikiančių VJ galia buvo 7 MW (Marčiukaitis 2007). 2007 metais Kretingos raj. Kiauleikiuose, Kvecuose, Rūdaičiuose ir Benaičiuose instaliuoti VJ parkai, kurių galia 46 MW. 2008 m įdiegtas 2 MW VJ

parkas Pagėgių sav. Kretingos rajone 2009 m. įdiegta 23,2 MW VJ parkų, o tais pačiais metais Šilutės ir Tauragės raj. įdiegtų parkų galia siekė 41,6 MW. 2010 metais Kretingos Tauragės ir Šilutės rajonuose Benaičių, Kreivėnų ir Mockių kaimuose įdiegtų VJ parkų galia siekė 56 MW. 2011 m. pabaigoje vėjo energijos instaliuota galia Lietuvoje iš viso sudarė apie 200 MW. 2012 m. birželio 6 d. buvo oficialiai atidarytas toliausiai nuo jūros kranto nutolęs vėjo jėgainių parkas Šilalėje. 13,8 MWh galingumo parkas nuo Baltijos jūros kranto yra nutolęs 60 km. 2013 metų spalio mėn. duomenimis Lietuvoje veikiančių vėjo jėgainių bendra galia sudaro beveik 280 MW.

Iki 2010 m. buvo įrengtos ir pavienės iki 250 kW galios vėjo jėgainės: Pryšmančių, Sedos E-40, Skuodo, UAB „Formula-Verner“, UAB „Ritvida“ Graužinių, Antakalniškių, Bajoralių, Sedos E-48, Jonų, UAB „Dumesta ir ko“, Zovodos, Graužinių, Meldikviršių Nr.1 ir Nr.2 (Katinas 2010). Šiuo metu pavienės 250 kW vėjo jėgainės statomos rečiau.

1.2. Vėjo jėgainių konstrukcijos

Pagal vėjaračio ašies orientaciją vėjo jėgainės skirstomos į du tipus: vertikalios ir horizontalios ašies (1.2 pav.).

1.2 pav. Vėjo jėgainės: a) Savonijaus vėjaratis; b) Darijaus vėjaratis; c) H vėjaratis; d) horizontalios ašies vėjaratis (Alam and Iqbal 2009)

Fig 1.2. Wind turbines: a) Savonius rotor; b) Darrieus rotor; c) H rotor; d) horizontal axis rotor (Alam and Iqbal 2009)

Vertikalios ašies vėjo jėgainės turi trūkumų. Jos lėtaeigės, didelių gabaritų, vėjo energijos kiekis pratekantis per plotą užimamą erdvėje besisukančių menčių vėjaračio neefektyviai panaudojamas ir neviršija 18 %. Tačiau jos turi ir gerų savybių: nereikalinga orientacijos sistema pagal vėjo kryptį, o svarbūs jėgainės

elementai – greičių dėžė, generatorius – gali būti sumontuoti ant jėgainės pamato. Vertikalios ašies vėjo jėgainės dažniau būna mažų gabaritų bei pajėgumų, skleidžia mažesnę triukšmą, todėl dažniau statomos privačiuose ūkiuose, kur energijos poreikis nėra didelis (Bhutta *et al.* 2012; Tenguria *et al.* 2011; Chaar *et al.* 2011; Ferreira 2011).

Horizontalios ašies vėjo jėgainės skirstomos į jėgaines, kurių ašis statmena vėjo kryptčiai ir jėgaines, kurių ašis lygiagreti vėjo kryptčiai. Horizontalios ašies vėjo jėgainės greitaiegiškesnės, jų svorio ir galios santykis yra mažesnis. Plačiausiai paplitusios dviejų–trijų menčių horizontalios ašies vėjo jėgainės

Pagrindinės horizontalios ašies vėjo jėgainių dalys yra vėjaratis (rotorius), greičių dėžė, generatorius, gaubtas ir bokštas. Vėjaratis gali turėti įvairių menčių skaičių. Vėjo energijos kiekis, tenkantis erdvėje besisukančių menčių užimamam plotui, panaudojamas 25–48 % (Adomavičius ir Balčiūnas 2003).

Vėjo jėgainių vėjaratis gali sukurti kintamą arba pastoviu greičiu. Vėjo jėgainės, kurių vėjaratis sukasi kintamą greičiu, gali geriau panaudoti vėjo energiją. Tačiau tokios jėgainės pajungimo į elektros sistemą schema yra sudėtinga (Nelson 2009).

Kai vėjo jėgainės vėjaratis, pučiant skirtingo greičio vėjui, turi sukurti pastoviu greičiu, naudojamos įvairios reguliavimo sistemos: keičiamas vėjaračio sparnų pasisukimo kampas – jie pasukami taip, kad keistųsi vėjo poveikio kampas, o taip pat mechaniniai ir aerodinaminiai stabdymo įrenginiai (Marčiukaitis 2007, Marčiukaitis *et al.* 2009).

1.3. Foninis ir vėjo jėgainės keliamas triukšmas

Akustinė vėjo jėgainių tarša turi mechaninį ir oro akustinį komponentą, iš kurių, abu yra vėjo greičio funkcija. Triukšmo, atsirandančio iš mechaninių komponentų sumažinimas yra paprastas taikomas uždavinys. Tuo tarpu aerodinaminio triukšmo sumažinimas yra gana sudėtingas procesas. Šiuolaikinėse vėjo jėgainėse, mechaninis triukšmas retai sukelia problemas (Enercon... 2007). Akustinio šaltinio triukšmui nuo vėjo jėgainių reikia skirti dėmesį todėl, kad tai yra viena iš svarbiausių kliūčių vėjo jėgainių šalia apgyventų rajonų išdėstymui (Phipps *et al.* 2007).

Foninis triukšmas

Be mechaninio ar aerodinaminio triukšmo vėjo jėgainės aplinkoje yra ir foninis triukšmas. Triukšmas, skleidžiamas vėjo jėgainių, daro įtaką visuomenei, gyvenančiai šalia vėjo jėgainių, tačiau didžioji dalis vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo gali būti maskuojama vėjo sukeltam foninio triukšmo (Rogers *et al.*

2006). Foninis triukšmas skiriasi esant skirtingoms vietinėmis sąlygomis, todėl jis įvertinamas nustatant atstumą iki arčiausios gyvenamos vietos. Foninio triukšmo stiprumas yra susijęs su vėjo greičiu, jo poveikiu pastatams (srauto kryptimi), medžiais, gyvatvorėmis ir kitais veiksniais. Foninis triukšmas kinta paros bėgyje. Po saulėlydžio kai atmosfera yra stabili, vėjas didesniame aukštyje nesimaišo su pažemės vėju, todėl vėjo jėgainių skleidžiamas triukšmas sklinda toli ir yra nemaskuojamas foninio triukšmo (Van den Berg 2008).

Mechaninis triukšmas

Vėjo jėgainės greičių dėžė, generatorius ir guoliai kelia mechaninį triukšmą, kurio stiprumas priklauso nuo nominalios galios ir konstrukcijos. Kuo didesnė konversijos sistema, tuo didesnis ir triukšmas (Medina *et al.* 2011).

Mažinant vėjo jėgainės mechaninį triukšmą tobulinamos techninės konstrukcijos, panaudojamos garsą izoliuojančios ir sugeriančios medžiagos, gerai prižiūrimi ir laiku remontuojami įrengimai.

Statant vėjo jėgaines ir vykdant kitą statybinę veiklą, su vėjo energetikos objektų statyba ir stabdymu susijęs triukšmas nebūna labai didelis. Pagrindiniai tokio triukšmo šaltiniai – sunkvežimių eismas, sprogdinamasis pamatų prakasimas ir didelio galingumo technikos darbas. Automobilių transporto keliamas triukšmas statant vėjo jėgaines yra minimalus. Ryškiausi su statybos keliamu triukšmu susiję poveikiai jaučiami, jei jie ardo tų rūšių gyvūnų, kuriuos yra svarbu išsaugoti, gyvybinį ciklą (poravimąsi, lizdų sukimą ir pan.) arba jei jis keliamas nedarbo metu ir trukdo netoliese gyvenantiems žmonėms (Krohn and Damborg 1999, Eriksson *et al.* 2008).

Aerodinaminis triukšmas

Vėjaračio skleidžiamas aerodinaminis triukšmas yra mažai nagrinėtas. Šiuolaikinėse vėjo jėgainėse retai girdimas švilpimas ar gergždžiantys garsai, kurie buvo būdingi ankstyvesniems vėjo turbinų tipams. Aerodinaminis triukšmas, skleidžiamas gerai suprojektuotos vėjo jėgainės, turi plačiajuosčio garso charakterį, girdimi tipiškai „prašvilpiantys“ garsai. Tolstant nuo jėgainės triukšmas įgyja labiau stacionarų charakterį. Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad stabilioje atmosferoje, nakties metu, kai vėjas nėra labai stiprus, garso lygis yra didesnis nei dieną esant tam pačiam vėjo greičiui. Daugelio tyrėjų yra nustatyta, kad vėjaračio plokštumoje susidaro mažesnio lygio garsas, tai gerai iliustruoja 1.3 paveikslas. VGTU mokslininkai tyrimo metu nustatė, kad garso lygis teritorijoje iki 200 m spinduliu kito 40–60 dBA ribose, tačiau vėjaračio plokštumoje garso lygis buvo iki 10 dBA mažesnis negu matuojant prieš vėjo jėgainę ar už jos (Jaskelevičius and Užpelkienė 2008).

1.3 pav. Ekvivalentinis garso slėgio lygis 60–200 m atstumu nuo vėjo jėgainės (Jaskelevičius and Užpelkienė 2008)

Fig. 1.3. Equivalent sound pressure level at a distance of 60–200 m from the wind turbine (Jaskelevičius and Užpelkienė 2008)

Taip pat žinoma, kad vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo sudėtyje vyrauja žemų dažnių garsai bei infragarsas (Bolin *et al.* 2011).

Mentės aerodinamika ir aerodinaminio triukšmo susidarymas

Keliamąją jėgą sukelia mentės sukurta oro srautų forma, kuri ir lemia slėgio pokyčius dėl skirtingu greičiu judančių oro srautų – mažesnį slėgį į viršutinį paviršių ir didesnį slėgį į apatinį (Babinsky 2003). Dominuojantis triukšmas sklindantis nuo vėjo jėgainės yra aerodinaminio pobūdžio sukeliamas sūkurių ir turbulentinių oro srautų (1.4 pav.).

1.4 pav. Vėjo jėgainės mentę aptekantys oro srautai (Jianu *et al.* 2011)

Fig. 1.4. Airflow around the wind turbine blade (Jianu *et al.* 2011)

Aplink mentę yra šešios pagrindinės triukšmo formavimosi sritys. Yra laikoma, kad šios sritys nepriklausomai viena nuo kitos kuria specifinius triukšmus, nes kuriami garsai yra iš esmės skirtingi, be to, jie atsiranda skirtingose sparno srityse ir vienas su kitu neinterferuoja. Šios šešios sritys yra klasifikuojamos į turbulentinių kraštinių sluoksnių galinės briaunos triukšmą, laminarinių kraštinių sluoksnių atitrūkstančių sūkurių triukšmą, atskyrimo ribos triukšmą, galinio krašto bukosios briaunos atitrūkstančių sūkurių triukšmą, galūnės sukurtinį triukšmą ir triukšmą, sukeltą artėjančios turbulentinės oro tėkmės (Jianu *et al.* 2011).

Priklausomai nuo garso generavimo mechanizmo skiriasi ir vyraujantys dažniai. Periodiškai mentei kertant prieš bokštą susidariusį turbulentinį oro

srautą, sukuriamas triukšmas, kuriame vyrauja nuo 1 iki 30 Hz dažniai. Mentės galas, skrosdamas orą generuoja triukšmą kuriame vyrauja 500–1000 Hz dažnių triukšmas. Galinės briaunos sukurta oro srauto turbulencija yra 10–300 Hz dažnių triukšmo šaltinis (Van den Berg 2009).

Mentės formos įtaka triukšmui susidaryti

Plačiai paplitę trijų menčių vėjaračiai yra keliais aspektais pranašesni už mažiau menčių turinčius vėjaračius. Trijų menčių vėjaračiai lyginant su vienos mentės ar dviejų menčių vėjaračiais yra geriau subalansuoti, mažesnės vibracijos skleidžiamas mažesnis impulsinis triukšmas. Vienodų galių vėjo jėgainių dviejų menčių vėjaračio sukimosi greitis visada bus didesnis negu trijų menčių vėjaračio. Kuo didesnis vėjaračio sukimosi greitis, tuo nuo menčių antgalių sklindantis infragarsas yra stipresnis (Hubbard and Shepherd 1991; Van den Berg 2004; Szasz and Fuchs 2010).

Vėjo jėgainės valdyme naudojami aerodinaminiai stabdymo įrenginiai yra kelių tipų: antgalinis stabdys, pasukamas stabdys, eleronas, plokštuminis stabdys, parašiutinis stabdys. Dažniausiai vėjo jėgainių eiga stabdoma pasukant mentės antgalį arba visą mentę. Pasukamo antgalio stabdys – ant menčių viršūnių montuojami antgaliai, kuriuos pasukus padidėja stabdymo eiga. Nedidelė mentės dalis pasukama tokiu kampu, kad pasikeičia mentės aptekėjimo sąlygos ir sukimo jėga. Keičiant mentės pasukimo kampą mentė pasukama apie išilginę ašį taip, kad keičiasi vėjo poveikis į mentę.

Keičiantis mentės aptekėjimo sąlygoms, keičiasi iš aerodinaminio triukšmo emisijos. Todėl siekiant sumažinti besisukančios mentės antgalio skleidžiamą infragarsą didelis dėmesys skiriamas mentės antgalio formai (1.5 pav.).

1.5 pav. Menčių antgaliai: a) standartinė forma; b) kardo forma; c) gotikinė forma (Arakawa *et al.* 2004, Tangler 2000)

Fig. 1.5. Tips of blades: a) standard form; b) sword form; c) ogge form (Tangler 2000, Arakawa *et al.* 2004)

Ištyrus vėjo jėgainių mentes buvo nustatyta, kad girdimas triukšmas susidaro mentės antgalio viršūnėje. Buvo tiriami – standartinis (faktinis) mentės antgalis ir gotikinės formos antgalis. Nustatyta, kad 20 m atstumu nuo vėjo jėgainės naudojant gotikinės formos antgalius triukšmo lygis 4 kHz dažnyje sumažėjo 5 dB, o bendras triukšmo lygis sumažėjo 14 dB. Abiem atvejais, kai buvo keičiama mentės antgalio forma, infragarso lygis sumažėjo, tačiau buvo prarasta ir galia (Arakawa et al. 2005).

Vėjo jėgainėse dažniausiai naudojami šie mechaniniai turbinos galios ir sukimosi greičio valdymo būdai: valdymas keičiant kampą tarp oro srauto krypties ir horizontalios turbinos ašies; valdymas keičiant kampą tarp oro srauto krypties ir aerodinaminio profilio ašies (Petrauskas ir Adomavičius 2001). Valdymas kampu α pasižymi tikslumu. Be to, taikant šį metodą išlaikoma stabili vėjaračio mentės mechaninė apkrova. Tačiau reikalingas papildomas menčių valdymas. Valdymas kampu δ – vėjaračio galia reguliuojama keičiant jo padėtį oro sraute, t. y. jėgainės kabiną su vėjaračiu, pavarų dėže bei generatoriumi pakreipiant vertikaliajoje plokštumoje. Kintant vėjo greičiui sukama vėjo jėgainės gondola su mentėmis. Praktikoje plačiai taikomi abu valdymo metodai.

Prie aerodinaminių stabdymo sprendimų galima priskirti vėjaračio mentes, kurių ilgis kinta priklausomai nuo vėjo greičio (1.6 pav.). Tokios mentės yra pagamintos su antgaliais, kurie automatiškai išstumiami sumažėjus vėjo greičiui ir sutraukiami esant stipresniam vėjui. Šis veiksmas įgalina geresnį energijos įsisavinimą esant silpniems vėjams, o esant stipriam vėjui mažina menčių mechaninį nuovargį. Su šio tipo mentėmis gamybos efektyvumas padidėja 25 % (Pasupulati et al. 2005).

1.6 pav. Keičiamo ilgio mentė: a) variklis ir pavarų dėžė; b) sraigtas; c) mentė; d) kreipiančiosios; e) mentės antgalis; f) mentės pagrindas (Pasupulati et al. 2005)

Fig. 1.6. Variblade and its components: a) DC motor and gear box; b) drive screw; c) root blade; d) rails; e) blade tip; f) root (Pasupulati et al. 2005)

Aerodinaminiai stabdymo įrenginiai negali visiškai sustabdyti vėjaračio, todėl įrengiami ir mechaniniai stabdžiai, kurie įjungiami, kai reikia visiškai sustabdyti vėjo jėgainę. Mechaniniai stabdžiai, dažniausiai diskiniai, statomi tarp vėjaračio ir greičių dėžės arba tarp greičių dėžės ir generatoriaus.

Vėjo jėgainių skleidžiamas žemo dažnio garsas ir infragarsas

Vėjo jėgainių sukuriamas triukšmas yra keturių rūšių, tai toninis, plačiajuostis, žemo dažnio ir impulsinis triukšmas (Rogers and Omer 2012). Besisukantis vėjaratis skleidžia infragarsą dėl menčių nepastovių aerodinaminių apkrovų (Thorne 2010).

Daugelio ankstesnių vėjo jėgainių vėjaračiai orientuojami pavėjui – už bokšto, todėl buvo dažnai fiksuojamas žemo dažnio garsas. Atokiai gyvenantys kaimynai kaltino vėjo jėgainės sukeltu diskomfortu. Šiuolaikinės vėjo jėgainių turbinos beveik visada orientuotos prieš vėją – mentėmis prieš bokštą (Colby *et al.* 2009) (1.7 pav.).

1.7 pav. Oro srovių sukuriavimas: 1) vėjo jėgainės kabina; 2) mentė; 3) bokštas; 4) vėjaračio centre sukuriamas turbulentinis oro srautas; 5) menčių galų sukuriamas oro srautas; 6) už bokšto susidaręs turbulentinės srautas (Li *et al.* 2012)

Fig. 1.7. Air turbulence currents: 1) wind turbine cab; 2) blade; 3) tower; 4) air flow from the center of rotor; 5) airflow from the tip of blade; 6) turbulent flow behind the tower (Li *et al.* 2012)

Vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmas nėra pastovus, jis priklauso nuo vėjo greičio, menčių sukimosi greičio, menčių formos, aplinkos sąlygų, atstumo nuo jėgainės. Duomenų tikslumą taip pat lemia ir matavimo įranga, jos tikslumas. Judėdamos vėjaračio mentės kelia aerodinaminį triukšmą, kurio garsumas priklauso nuo sukimosi greičio bei vėjo jėgainės menčių formos ir savybių (Borum *et al.* 2006).

Atlikta daug vėjo jėgainių keliamo aerodinaminio triukšmo tyrimų. Nustatyta, kad didelio skersmens (~ 60 m) vėjaračiai, 50–400 m atstumu, esant 12–20 m/s vėjo greičiui skleidžia didesnę nei 65 dBA triukšmą (Rogers *et al.* 2002; Migliore *et al.* 2004; Jaskelevičius ir kt. 2006; Rabin *et al.* 2006; Swinbanks 2011). Vėjo jėgainių Enercon E-82 techninėje specifikacijoje nurodomas tik ekvivalentinis jėgainės skleidžiamo garso lygis, kuris esant skirtingiems vėjo greičiams kinta nuo 97 iki 104 dBA. Garso slėgio lygiai visame dažnių diapazone techninėje specifikacijoje nepateikiami.

JAV mokslininkas George W. Kamperman, tyręs vėjo jėgainių triukšmo sklaidą, geriausiai tai aprašė (Kamperman and James 2008) (1.8 pav.).

1.8 pav. Garso slėgio lygiai, koreguoti pagal skirtingas dažnines charakteristikas (Kamperman and James 2008)

Fig. 1.8. Sound pressure level adjustments for the different frequency characteristics (Kamperman and James 2008)

Iš pateiktų duomenų matyt, kad infragarso srityje, šiuo atveju 10–20 Hz, garso slėgio lygis 305 m atstumu nuo vėjo jėgainės vyrauja 58–62 dB ribose, nutolus už 2 km 20 Hz dažnio garso slėgio lygis sumažėja 10 dB. L_{Aeq} ir L_{Ceq} garso lygio vertės yra ženkliai mažesnės dėl pritaikomos dažninės korekcijos. Garso slėgio lygio skirtumas tarp L_{eq} ir L_{90} garso lygio verčių, žemų dažnių srityje siekia iki 40 dB, t.y. foninis triukšmas daro mažą įtaką bendram triukšmo lygiui. Kalbant apie vėjo jėgainės skleidžiamą infragarsą reiktų vengti A dažninės charakteristikos. Ši pataisa pritaikyta žmogaus klausai, todėl žemų dažnių garsas yra beveik neįvertinamas. Jeigu duomenys pateikiami pagal dažnius, tuomet galima atimti pataisos koeficientus ir nustatyti garso slėgio lygį be pataisų, tačiau jeigu žinomas tik ekvivalentinis garso lygis L_{AeqT} , tuomet galima tik apytikriai įvertinti vėjo jėgainės skleidžiamą žemų dažnių triukšmą.

Žinoma, kad vėjo jėgainių skleidžiamas garsas yra nepastovus, fliktuojantis, o kai kuriais atvejais gali būti impulsinis (Thorne 2010) (1.9 pav.). Tačiau nenurodoma kokių atstumu nuo vėjo jėgainės nustatomas impulsinis triukšmas.

1.9 pav. Triukšmo vertės nustatytos prie vėjo jėgainės, čia: $\square$ – L_{ZeQ} ,

$\square$ – L_{Zmaks} , $\blacksquare$ – L_{Zmin} (Thorne 2010)

Fig. 1.9. Wind turbine noise values, where: $\square$ – L_{ZeQ} , $\square$ – L_{Zmaks} , $\blacksquare$ – L_{Zmin} (Thorne 2010)

Kaip matyt iš 1.9 paveikslo, žemų dažnių srityje skirtumas tarp minimalių ir maksimalių garso slėgio lygio verčių siekia iki 40 dB. Tačiau nežinant kokio laiko intervale kito garso slėgio lygis ir koks fliktuacijų dažnis, negalima sakyti, kad tai impulsinis triukšmas.

Palyginus 1.8 ir 1.9 paveikslus matyti, kad maksimalaus garso slėgio lygio vertės infragarso srityje abiejų matavimų metu vyravo 56–68 dBZ ribose, o L90 (1.8 pav.) ir LZ_{min} (1.9 pav.) kito 20–27 dBZ ribose.

Yra padaryta nemažai išsamių tyrimų, kuriose analizuojama vėjo jėgainių įtaka žmonių sveikatai ir jų gyvenimo kokybei. Nustatyta, kad daugumai žmonių, gyvenančių nuo jėgainių iki 3 km, o kartais ir didesniu atstumu, dėl vėjo jėgainių sukeliama triukšmo vystosi chroniška nemiga ir nuovargis, pasireiškia galvos skausmai, depresija, klausos sutrikimai, koordinacijos praradimas bei kitos su nervine įtampa susijusios ligos (Shepherd *et al.* 2011). E. Pedersen ir K. P. Waye 2004 m. padarė išsamius vėjo jėgainių triukšmo poveikio žmonėms tyrimus (Pedersen and Waye 2004) ir nustatė, kad jau 32 dBA vėjo jėgainių triukšmas sukelia stiprų erzinimą kai kuriems žmonėms, o 40 dBA ir didesnis triukšmas sukelia stiprų erzinimą jau daugeliui žmonių.

Visų infragarso poveikio žmogaus organizmui tyrimų metu naudojamas didesnis nei 95 dB garso slėgio lygio intensyvumas (Maheke *et al.* 2001). Atlikti tyrimai yra trumpalaikiai veikiant infragarsu iki 2 val. Dažniausiai pastebimas kraujospūdžio pakitimas. Infragarso bangos veikia centrinę nervų ir virškinimo sistemą, sukelia galvos ir vidaus organų skausmus, trikdo kvėpavimo ritmą. Gali pasireikšti svaigulys, vėmimas, netenkama sąmonės, galima apakti. Infragarsas veikia ir žmogaus sąmonę (Salt and Lichtenhan 2011). Nors šie tyrimai apima infragarso poveikį žmogaus organizmui, tačiau jie tik iš dalies susiję su vėjo jėgainių keliamo triukšmo poveikiu. Vėjo jėgainių infragarso lygiai yra mažesni lyginant su tyrėjų pasirinktais, poveikio trukmė ilgesnė, taip pat triukšmas fluktuojantis.

1.4. Vėjo jėgainės keliamo triukšmo matavimas

Matuojant vėjo jėgainės keliamą triukšmą svarbi vėjo kryptis, orientuota vėjo jėgainės vėjaračio atžvilgiu: „prieš vėją“, „pavėjui“, „vienoje plokštumoje su vėjaračiu“ ir pan. Triukšmo lygis priklauso nuo stebėtojo padėties vėjaračio atžvilgiu, o pastarasis visada atsukęs į vėją.

Vėjo jėgainių matavimuose didelę reikšmę turi foninis triukšmas, kuris yra didesnis dieną. Siekiant sumažinti foninio triukšmo poveikį, matavimus galima atlikti naktį, kai nutyla aplinkinis triukšmas; išmatuoti vėjo jėgainių skleidžiamą ir atskirai foninį triukšmą; mikrofonus sumontuoti taip, kad jie kuo mažiau būtų veikiami foninio triukšmo. Matuojant vėjo jėgainės ir atskirai foninį triukšmą susiduriama su problema – norint išmatuoti tik foninį triukšmą reikia sustabdyti vėjo jėgainę. Søren Hjort 2006 m. atliko Siemens vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos tyrimus, kuomet vėjaračių greičiai buvo kontroliuojami, o po 11

valandų matavimų vėjo jėgainės buvo sustabdytos ir nustatytas foninis triukšmas (Hjort 2007).

Jeigu nėra galimybės sustabdyti vėjo jėgainę, tuomet foninį vėjo jėgainių parko triukšmą atspindi procentinis garso slėgio lygis LAF90. LAF90 – garso slėgio lygis koreguotas pagal A dažninę charakteristiką, pritaikant F laikinę svertį bei vyraujantis 90 % matavimo laiko.

Vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo matavimai yra sąlyginai greiti, o norint juos lyginti su kitais duomenimis reikia žinoti taškus kuriuose buvo atliekami matavimai. Taip pat reikia žinoti matavimų metu vyrausį vėjo greitį ir kitas aplinkos sąlygas. Van den Berg tyrimų rezultatus (Van den Berg 2003) sunku lyginti su kitų mokslininkų duomenimis, nes matuojant vėjo jėgainių parką buvo pasirinkti tik du matavimo taškai 400 ir 500 m atstumu. Tačiau per 4 mėn. matuota buvo 1435 valandų, iš kurių 417 valandų naktį; apdorojant duomenis gauti išsamūs rezultatai, buvo nustatyti vėjo greičio vidurkis, ekvivalentiniai garso slėgio lygiai, o taip pat viso matavimo garso slėgio lygis ir vėjo greitis kas 5 min (Van den Berg 2003; Van den Berg 2006).

Tiksliai vėjo jėgainės skleidžiamo žemo dažnio garsų matavimams dažnai trukdo vėjas, kuris pūsdamas į mikrofoną sukuria pašalinį triukšmą. Todėl Jørgen Jakobsen matuodamas vėjo jėgainę 200 m atstumu patalpino 2 mikrofonus į specialiai įrengtas duobes. Duobės skersmuo kaip ir aukštis – 0,5 m, mikrofonas montuojamas 0,4 m gylyje, uždengiamas pirmine apsauga nuo vėjo, o matavimo duobė uždengiama „akustiškai skaidria“ medžiaga (Jakobsen 2005; Turnbull et al. 2012). Ši procedūra nebūtų galiojanti aukštesniuose dažniuose, bet tiriant triukšmo sklaidą žemiausiuose dažniuose šis būdas tinka vėjo sukkelto triukšmo sumažinimui.

Dažnai triukšmo sklaida nuo vėjo jėgainių matuojama parenkant matavimo vietas į visas puses nuo vėjo jėgainės. Dažniausiai parenkamos 8 kryptys. Autoriai, tyrę vėjo jėgainių triukšmo sklaidą (Persson ir Ohrstrom 2002; Prospathopoulos and Voutsinas 2006; Užpelkienė ir Jaskelevičius 2006), pasirinko matavimo vietas skirtingai, įvairiu atstumu nuo vėjo jėgainės, todėl rezultatus reikia interpoliuoti. Priežastys nulemiančios skirtingo atstumo parinkimą nagrinėtoje literatūroje nenurodomos.

Tiriant triukšmo sklaidą triukšmo šaltinyje, šiuo atveju menčių skleidžiamą aerodinaminį triukšmą, davikliai išdėstomi ant menčių ir sujungiami į vieną sistemą. Duomenys gali būti stebimi realiuoju laiku (Dutton et al. 2000).

Nustačius garso slėgio lygį svarbu duomenis pateikti aiškiai. Matuojant triukšmo sklaidą sukaupytų duomenų gausa gali apsunkinti duomenų atvaizdavimą. Naujausių garso fotografavimo technologijų pagalba galima užfiksuoti garso sklaidą aplinkoje bei ją vizualizuoti. Analizuojant

„garsografijas“ galima geriau suprasti triukšmo formavimąsi ties mentėmis (1.10 pav.).

1.10 pav. Vėjo jėgainių „garsografija“ (Oerlemans 2007)
Fig. 1.10. „Soundgraphy“ of wind turbine (Oerlemans 2007)

1.10 paveiksle vizualiai matomas vėjo jėgainių menčių galų sukuriamas aerodinaminis triukšmas. Garso sklaida buvo nustatoma už 150 m nuo vėjo jėgainės, 300 Hz – 7 kHz dažnių ribose. Nustatyta, kad menčių galų sukuriamas aerodinaminis triukšmas yra 38 dBA, tačiau nepateikiamas vėjo greitis bei spalvas atitinkančių duomenų skalė.

Kito tyrimo metu, kuomet buvo naudojama analogiška metodika buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką triukšmo formavimuisi daro mentės galinės briaunos sukurta oro srauto turbulencija, kuomet mentė leidžiasi ir artėja prie bokšto (Jianu et al. 2011). Vėjo jėgainių skleidžiamo žemų dažnių vibracijos sklaidos tyrimui galima panaudoti ir seismografus (Peck et al. 2010). Autoriai nurodo, kad žemo dažnio vibracija matuojama 4–100 Hz diapazone. Vibracija, kaip ir struktūrinis garsas, sklinda toli. Tokie tyrimai ypač aktualūs seisminio aktyvumo rajonuose, nes vėjo jėgainių skleidžiama vibracija gali daryti įtaką duomenims, kaupiamiems seisminio monitoringo stotyse (Styles et al. 2011).

Dažniausiai vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo matavimai atliekami remiantis IEC 61400-11:2002 „Vėjo turbinų generatorių sistemos. 11 dalis. Akustinio triukšmo matavimo metodai“.

Tiriant žmogaus klausą veikiančią triukšmą yra taikomos A bei C dažninės korekcijos. A svertinis lygis – dažniausiai naudojamas triukšmo matavimams dėl to, kad panašiai kaip ir žmogaus ausis sumažina labai žemo ir labai aukšto dažnio garso slėgio lygio vertes. A svertinis lygis žymimas dBA.

C svertinis lygis – žmogaus ausies atsakas kinta priklausomai nuo garso stiprumo. Todėl garsui esant stipriam – 100 dB ir daugiau – žmogaus ausies

reagavimas tampa mažiau priklausomas nuo dažnio. C svertinis lygis žymimas dBC.

Labiausiai ausis yra jautri 1000 Hz dažnio virpesiams. Garso intensyvumo lygis decibelais nustatomas pagal formulę:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0}, \text{ dB} \quad (1.1)$$

čia: I – matuojamas garso intensyvumas, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; I_0 – garso girdimumo ribinis intensyvumas, $I_0 = 10^{-12} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, kai garso dažnis 1000 Hz.

Tai reiškia, jei garso intensyvumas tampa 10 kartų didesnis už jo girdos slenkstį, garsumo lygis padidėja vienu arba 10 decibelų. Decibelas yra toks garso intensyvumo lygis, kai garso intensyvumo ir ribinio girdimumo intensyvumo santykio dešimt dešimtainių logaritmų yra lygus vienetui (Абракитов 2004).

Triukšmas gali būti skaidomas į sudėtinės dalis pagal intensyvumą ir dažnį. Grafinis sudėtinių dalių vaizdas vadinamas spektru. Taikomos A ir C ir Z dažninės charakteristikos (1.11 pav.). Tiriant vėjo jėgainių skleidžiamą žemų dažnių triukšmą bei infragarsą A ir C dažninės charakteristikos netinka. Tuomet naudojama Z dažninė charakteristika, kuri žymi, kad triukšmas yra nekoreguotas (Earshen *et al.* 2003).

1.11 pav. A, C, Z – dažninės charakteristikų pataisos koeficientai (Noise news... 2012)

Fig. 1.11. Correction factors of A, C, Z frequency characteristics (Noise news... 2012)

Charakteristika A nedidelių dažnių juostoje yra žemėjanti. Ši charakteristika atitinka ausies jautrio kreivę. Žmogaus ausis ne vienodai reaguoja į skirtingo dažnio to paties stiprumo garsą (Alves-Pereira and Castelo Branco 2007). Klausos aparatas žemesniems ir aukštesniems dažniams nėra toks jautrus. Būtent dėl šios priežasties yra naudojamas realiai išmatuoto garso stiprumo perskaičiavimas į vertes, kurios atspindi žmogaus garso suvokimą. Yra labai svarbu pasirinkti teisingą svertinę skalę, nes, pavyzdžiui, matuodami 31 Hz garsą C skalėje vietoj reikalingos A skalės gautume vertes besiskiriančias apie 40 dB. Z dažninė svertis labiausiai tinka tiriant žemo dažnio garsą nes tokio pobūdžio triukšmas veikia ne tik klausą, bet ir visą žmogaus organizmą. Taip pat ir higienos normoje HN 30:2009 „Infragarsas ir žemo dažnio garsai: ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose“ infragarso ir žemo dažnio garso slėgio lygių ribiniai dydžiai nekoreguojami.

1.5. Vėjo jėgainių skleidžiamo aerodinaminio triukšmo mažinimo priemonės

Aplinkos akustiniam triukšmui mažinti taikomos įvairios priemonės: administracinės, technologinės, urbanistinės, konstrukcinės.

Geriausia triukšmą mažinti jo susidarymo vietoje. Triukšmą galima mažinti: trumpinant mentės ilgį, keičiant mentės formą, mažinant vėjaračio sukimosi greitį. Visais atvejais mažėja jėgainės galia, todėl pagrindinis uždavinys yra suprojektuoti tokias mentes, kurios būtų trumpesnės, o keliamoji galia – didesnė. Padidinus mentės keliamąją galią galima būtų riboti vėjaračio sukimosi greitį.

Jau prieš dešimtmečius aviacijos inžinieriai pastebėjo, kad veikiant sparną garso bangomis pagerėja oro aptekėjimas jo paviršiumi. JAV mokslininkas Ian Salmon panaudojo garso šaltinį – nuo kintamos srovės įsitempiančią ir atsileidžiančią plastikinę membraną – patalpintą į sparno vidų. Atlikus tyrimus aerodinaminiam vamzdyje ir palyginus su įprastiniais sparnais buvo nustatyta, kad sparnų kilimo kampą galima padidinti 5 laipsniais ir gauti net 22 % didesnę keliamąją jėgą, esant tam pačiam greičiui (Salleh 2005).

Vos girdimas sparno dūzgimas gerokai atitolino sąlygas, kuomet atsiranda pavojingasis greičio praradimas. Šį reiškinį galima panaudoti tiek didinant lėktuvų saugumą, tiek ir jų efektyvumą bei mažinant nepilotuojamų lėktuvų sparnų gabaritų.

Labai panaši situacija yra ir su vėjo jėgainėmis, kurioms reikalingas startinis vėjo greitis, kad jos pradėtų veikti, (skirtingoms vėjo jėgainės startinis vėjo

greitis yra 2–4 m/s). Jeigu vėjo jėgainė pradeda veikti prie mažesnių greičių, (išgaunama daugiau galios esant toms pačioms sąlygoms), tuomet galima mažinti vėjaračio sukimosi greitį, tuo pačiu mažinant ir skleidžiamą triukšmą.

Ieškant racionalių sprendimų dažnai veiksmingą veikimo principą pateikia pati gamta. Australijos mokslininkai biologai (Fish *et al.* 2008) pastebėjo, kad banginio plaukmenys nelygūs. Jie padarė prielaidą, kad toks didelis gyvūnas savo plaukmenų formos dėka gali efektyviau išnaudoti savo jėgą. Šiuo metu sukurtos naujo tipo vėjo jėgainių mentės (1.12 pav.), kurių antgaliai imituoja kuprotojo banginio plaukmenis. Gamintojai teigia, kad šio tipo mentės yra didesnė keliamoji galia (JAV patentas 6.431.498). Oras aptekėdamas mentę pradeda stipriai maišytis, tai ir yra keliamosios galios priežastis, tačiau ir šiuo atveju nėra išsamių duomenų apie susidarantį aerodinaminį triukšmą. Žinoma, kad esant didesniam Re skaičiui (stipresnei turbulencijai) aerodinaminis triukšmas būna didesnis (Fish *et al.* 2011).

1.12 pav. Kuprotojo banginio peleką imituojantys vėjo jėgainių menčių antgaliai: a) antgalio pavyzdys; b) aerodinaminio profilio bandymas (Fish *et al.* 2008)

Fig. 1.12. Models of wind turbine blade tips simulating humpback whale flipper: a) example of tip; b) airfoil testing (Fish *et al.* 2008)

Japonijos mokslininkai suprojektavo vėjo jėgainę, kurioje standartinės mentės pakeistos sraigtinėmis – cilindrinėmis. Šio tipo jėgainės pagrindiniai privalumai: mažas sukimosi greitis, tyliai veikia, ilgalaikis patvarumas, didelis našumas ir stabilumas. Cilindrinių menčių keliamoji jėga yra keturis kartus didesnė negu įprastinių menčių, todėl vėjaračio sukimosi greitį galima sumažinti 25 % (Gono *et al.* 2008; Bychkov *et al.* 2008). Autoriai teigia, kad šio tipo vėjo jėgainės skleidžiamo garso slėgio lygis yra žemas, tačiau išsamūs duomenys, o ypač apie infragarsą, nepateikiami.

Vėjo jėgainių skleidžiamas triukšmo, o taip pat ir infragarso lygis gali padidėti dėl vėjo jėgainių išdėstymo aplinkoje (1.13 pav.). Už vėjo jėgainės susiformavęs oro sūkurys gali padidinti vėjo jėgainių efektyvumą. Tačiau tuo pat metu pulsuojantis srautas neigiamai veikia pavėjui stovinčios vėjo jėgainės vėjaratį, ko pasekmėje padidėja triukšmo emisijos bei galimi mechaniniai gedimai (Seydel and Aliseda 2013, Hansen *et al.* 2006).

1.13 pav. Vėjo jėgainių išdėstymo parke schemos: a) linijinis išdėstymas; b) išdėstymas lankais; c) stačiakampis tinklelis; d) plunksninis tinklelis; e) pasviręs tinklelis; f) atsitiktinis tinklelis (Gipe 2004)

Fig. 1.13. Scheme of wind turbine deployment in the park: a) linear deployment; b) bend deployment; c) the main grid; d) feather grid; e) slanted grid; f) random grid (Gipe 2004)

Yra atlikta nemažai vėjaračio kuriamų sūkurių tyrimų, kurių bendras tikslas – nustatyti turbulencinių sūkurių intensyvumą bei energijos nuostolius (Frandsen *et al.* 2009; Sanderse *et al.* 2011; Porte-Agel *et al.* 2011; Li *et al.* 2012;

Churchfield *et al.* 2012; Seydel and Aliseda 2013). Literatūros duomenys rodo, kad atstumas tarp gretimų vėjo jėgainių turi būti ne mažesnis kaip 6 vėjaračio skersmenys ir turi būti išlaikomas vienodas visomis kryptimis. Rekomenduojamas atstumas – 12 vėjaračio skersmenų, atskirais atvejais atstumą tarp vėjo jėgainių galima sumažinti iki 5–6 vėjaračio skersmenų (Hubbard and Shepherd 1990). Tačiau nėra duomenų kaip vienos vėjo jėgainės sukuriama turbulentiniai srautai veikdami kitą vėjo jėgainę įtakoja aerodinaminį triukšmą.

Nors vėjo jėgainių triukšmo formavimuisi ir sklaidai skiriama daug dėmesio visgi susidarančio triukšmo nuslopinti iki leidžiamų dydžių nepavyksta, todėl vėjo jėgainėms yra taikomas apibrėžtas sanitarinės apsaugos zonos (SAZ) ribų dydis. SAZ nustatoma, atlikus poveikio visuomenės sveikatai vertinimą, pagal triukšmo lygio skaičiavimus. SAZ teritorijoje negali būti statomi gyvenamieji namai, viešbučiai ar kiti trumpalaikio apgyvendinimo pastatai, švietimo, sveikatos priežiūros ir slaugos įstaigos, neturi būti įrengiamos vandenvietės, kurioms turi būti nustatytos sanitarinės apsaugos juostos, taip pat rekreacijos teritorijos ir pramoginių renginių atviri ar uždari statiniai (Šostak and Kutut 2011).

Lietuvoje SAZ dydis nustatomas remiantis higienos normomis HN 33:2011 „Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje“, HN 30:2009 „Infragarsas ir žemo dažnio garsai: ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose“ ir jėgainės techninėje specifikacijoje nurodytus maksimalius jėgainės skleidžiamo garso slėgio lygius.

1.6. Triukšmo slopinimo būdai ir izoliuojančių medžiagų panaudojimas

Garso bangos, toldamos nuo šaltinio, slopsta, todėl paprasčiausia būtų vėjo jėgainės statyti atokiai nuo gyvenamųjų vietų. Tai pat galima triukšmo veikiamas teritorijas izoliuoti garsą slopinančiomis priemonėmis. Gyvenamieji namai greta triukšmingų objektų statomi atsižvelgiant į triukšmo plitimo sąlygas, panaudojamas esamas reljefas arba įrengiamos dirbtinės kliūtys, stabdančios bangų plitimą. Viena iš efektyvesnių triukšmo slopinimo priemonių yra apsauginiai ekranai (Baltrėnas ir kt. 2007).

Triukšmo slopinimo ekranų paskirtis – sumažinti triukšmo lygį garsui sklindant nuo triukšmo šaltinio iki reikiamo objekto (Asdrubali and Pispola 2007). Už ekrano susidaro akustinis šešėlis, kurio zonoje pastebimas didžiausias triukšmo lygio sumažėjimas. Triukšmo slopinimo ekranai yra viena paprasčiausių ir efektyviausių triukšmo mažinimo priemonių.

Ekrano veiksmingumas priklauso nuo garso bangos ilgių, kuriuos išspinduliuoja triukšmo šaltinis, taip pat nuo ekrano aukščio, ilgio ir atstumo iki triukšmo šaltinio. Norint padidinti efektyvumą, ekrano viršūnė turi būti virš linijos, jungiančios akustinį triukšmo šaltinio centrą su skaičiuojamuoju tašku. Norint sumažinti ekrano aukštį reikia sumažinti atstumą nuo triukšmo šaltinio (Venckus et al. 2012; Fang and Ling 2005; Joynt and Kang 2010).

Prieštriukšminiu ekranu gali būti ne tik plokščia sienutė, bet ir ilgi, negyvenami pastatai (garažai, sandėliai, gamybinės patalpos), žemių pylimai bei želdynai (Watts 1996, Ottelė et al. 2010), pastarieji geriausiai garsą slopina 400 Hz – 4 kHz dažnių ribose (Pathak et al. 2008).

Medžio juostų forma yra svarbus faktorius mažinant triukšmo sklaidą. Kuo mažesnis matomumas, tuo didesnis tankumas, ir kuo daugiau lapų ir šakų, tuo didesnė garso sugertis (1.14 pav.).

1.14 pav. Garso sugerties priklausomybė nuo žaliosios juostos pločio ir matomumo (Fang and Ling 2003)

Fig. 1.14. Dependence of sound absorption on visibility and width of the green line (Fang and Ling 2003)

1.14 paveiksle pavaizduota kaip garso sugertis priklauso nuo garsą sugeriančios žaliosios juostos matomumo bei pločio. Kuo didesnis juostos plotis tuo daugiau medžių garso kelyje, taip pat didesnė absorbcija ir garso išsisklaidymas. Be to, struktūra ir augmenijos lapija gali išsklaidyti besikoncentruojančią akustinę bangą ir sumažinti garso sklaidą (Fang and Ling 2003).

Vidutinių platumų klimato juostos šiaurinėje dalyje išsiskiria ryškūs metų laikai, todėl lapuočiai medžiai efektyviai triukšmą slopintų tik jų vegetacijos periodu. Visžalių augalų šioje klimato juostoje nėra daug, tai spygliuočiai medžiai, tačiau jų įtaka triukšmo sklaidai mažai nagrinėta. Taip pat nėra duomenų ar triukšmo slopinimo ekranai bei žaliosios juostos galėtų apsaugoti nuo vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo.

Japonijos mokslininkai (Fang and Ling 2003) tyrė, kaip lapuočiai medžiai bei krūmai slopina garsą. Iš 35-ių nagrinėtų medžių juostų geriausiai mažino triukšmą tos juostos, kuriose dominavo tankūs krūmai. Šios juostos turėjo tankią lapiją ir šakas, kurios sumažino triukšmą garso šaltinio lygyje. Tankūs krūmai, kurie yra aukštesni negu garso šaltinis, triukšmą mažino efektyviausiai. Tankumas, aukštis, ilgis ir medžio juostų plotis yra efektyviausi faktoriai mažinant triukšmą, o ne lapo dydis ir šakojimosi savybės. Garso išsisklaidymą nulėmė absorbcija, kuri sumažino akustinę energiją.

Didelę įtaką triukšmo sklaidai gali daryti pastatai. Didelis tūris, masyvios sienos, didelės ertmės – tai pagrindiniai užtvaros parametrai slopinant žemo dažnio garsą. Apie pastatų įtaką garso sklaidos mažinimui galima spręsti iš garso sklaidos modeliavimo darbų (Paožalytė *et al.* 2012).

Tais atvejais, kai negalima sumažinti triukšmo jo susidarymo vietoje, o triukšmo sklaidimo kelyje kliūtys neefektyvios, galima izoliuoti triukšmo veikiamą objektą. Vėjo jėgainių įtakos zonoje esančių pastato sienų garso izoliacija turi pasižymėti gera žemų dažnių garso sugertimi. Žemų dažnių garsas sklinda gana toli dėl mažo silpnėjimo koeficiento (Bračkus ir Gužas 2007). Žemų dažnių garso įprastos medžiagos nesugeria, todėl reikia parinkti specifinės formos medžiagas. Žinoma, kad žemo dažnio garsą bei infragarsą galima absorbuoti cilindriniais arba šešiabriauniais slopintuvais (Gužas *et al.* 2006; Ng and Hui 2008).

Šiuo metu yra nemažai duomenų apie triukšmą izoliuojančias medžiagas, tačiau jos yra brangios (Baltrėnas ir kt. 2007, Bračkus ir Gužas 2007; Grubliauskas and Butkus 2009; Grubliauskas 2006). Vienos iš pigesnių žaliavų yra molis, šiaudai bei nendrės. Nedegto molio namais susidomėjimas Lietuvoje, padidėjo tarpukario laikotarpiu, pabrangus medienai. Dažniausiai molis buvo naudojamas ūkiniams pastatams, o molinius namus statydavo nepasiturintys žmonės (Degutis ir kt. 1936). Šiuo metu vėl populiarėja šiaudiniai bei moliniai

namai. Medžiagos yra pigios, molio yra visur, o šiaudai – gamybinė atlieka (Nekrošius 2007; Gurskis ir Juodis 2007). Be to statyba iš presuotų šiaudų priskiriama ekologiškai, nes šiaudų apdorojimui, lyginant su tradicinių statybinių medžiagų gamyba, reikia labai mažų energijos sąnaudų.

Yra keletas statybos technologijų, kuomet naudojami šiaudai ir molis.

Karkasinė statyba. Statomas namo karkasas, kuris vėliau užpildomas presuotų šiaudų blokais, o vėliau sienos tinkuojamos molio tinku.

Bekarkasė statyba. Bekarkasė statyba naudojama mažiems, iki 36 m² pastatams.

Plaušamolio statyba. Plaušamolis yra šiaudų ir molio mišinys. Statant pastatą yra paruošiamas karkasas, o plaušamolis trombuojamas klojinuose. Plaušamolio masė, tinkamai apsaugota nuo drėgmės, gali būti eksploatuojama ilgus metus. Esant reikalui, pašalinus apsaugą nuo drėgmės, plaušamolio masę galima „palaidoti“, nedarant žalos aplinkai arba sudrėkinus pakartotinai vėl naudoti (Nekrošius 2007; Deverell *et al.* 2009).

Šiaudų, molio, nendrių bei jų mišinių garso izoliacinės savybės mažai nagrinėtos. Liverpulio universiteto mokslininkai (Oldham *et al.* 2011) tyrė biomasės mėginius interferometru. Buvo nustatytas džiuo pluošto, sizalio pluošto, lino, pluoštinės bėmerijos, vilnos, kanapės plaušo, šiaudų, bei nendrių bandinių garso absorbcijos koeficientai α . Tyrėjai nustatė, kad 14 cm storio nendrių bandinys yra tinkamas izoliuojant žemo dažnio garsus (Oldham *et al.* 2011).

Nendrės yra tuščiavidurės bei cilindro formos, todėl jų mėginio absorbcijos koeficientas žemų dažnių srityje yra didesnis negu kitų bandinių. Garso absorbcijos koeficientas nurodo medžiagos gebą sugerti garsą, tačiau kalbant apie pastato atitvarų garso izoliaciją, naudojamas ore sklindančio garso izoliavimo rodiklis R_w , dB. Medžiagos garso izoliacijos rodiklis nustatomas atlikus tyrimus triukšmo slopinimo kameroje (Tadeu *et al.* 2004; Tadeu *et al.* 2007; Grubliauskas and Butkus 2009). Šiaudų bei nendrių garso izoliacijos rodiklio R_w laboratorinių tyrimų atlikta nedaug, dažniausiai literatūroje nurodomas tariamasis garso izoliacijos rodiklis $R'w$. Pastarasis naudojamas matuojant pastato atitvaras ir įvertinant garsą sklindantį netiesioginiais keliais (Butkus and Januševičius 2011).

1.7. Triukšmo sklaidos modeliavimas

Vėjo jėginių ar jų parko modeliavimas gali būti naudojamas skirtingiems tikslams pasiekti: stebima vėjo jėgainės ar jos mentės aerodinamika, nustatomas atsparumas lenkiant, vibracijos intensyvumas; stebima vėjo jėgainės įtaka oro

srautui bei jo poveikis kitai, greta esančiai, vėjo jėgainei, nustatomi optimalūs atstumai, įvertinamos avarinės situacijos; nustatomas energijos transformavimo efektyvumas; nustatoma, triukšmo sklaida, įvertinamos apsaugos nuo triukšmo priemonės (Yin *et al.* 2009; Snel *et al.* 2003; Dumitrescu *et al.* 2010).

Pradinėje vėjo jėgainių gamybos stadijoje, tiriant menčių skleidžiamą aerodinaminį triukšmą yra neracionalu gaminti dideles mentes, jas montuoti vėjo jėgainėje ir tirti triukšmo sklaidą. Tyrimo metu gali tekti ne vieną kartą keisti menčių profilį, formą, ilgį ar medžiagas. Triukšmo lygį sunku prognozuoti, nes triukšmo sklaida priklauso nuo vėjo jėgainės techninių parametrų, jėgainių išdėstymo tinklelio, atstumo tarp jėgainių, bei nuo aplinkos sąlygų.

Ieškant technologinių sprendimų, apsaugos priemonių nuo triukšmo bei siekiant sumažinti laiko ir pinigų sąnaudas yra naudojamas modeliavimas. Modeliai gali būti natūriniai arba skaitmeniniai. Natūriniai modeliai išbandomi aerodinaminuose tuneliuose (Winkler *et al.* 2007).

Aerodinaminuose tuneliuose tiriama menčių bei mažų vėjo jėgainių triukšmo sklaida. Keičiama mentės forma ar ilgis, oro srautas, poveikio kampas, vėjaračio sukimosi greitis. Tiriama kaip oro srautas veikia mentę, stebimas sukuriavimas, triukšmo susidarymas ir sklaida.

Modeliuoti triukšmo sklaidą galima keliomis programomis CadnaA, IMMI, ATCO, SoundPLAN, CUSTIC, NoiseFree, MapNoise ir kt. Jose vėjo jėgainė žymima kaip taškinis triukšmo šaltinis dideliame aukštyje. Šiomis programomis galima įvertinti triukšmo sklaidą, apsaugos priemonių nuo triukšmo efektyvumą, tačiau reikia žinoti, koks yra vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmo lygis. T. y. vėjo jėgainė jau turėjo būti sumontuota ir natūrinių matavimų metu nustatytas arba pagal empirines formules apskaičiuotas jos skleidžiamo triukšmo lygis. Vienos iš patogiausių modeliavimo programų yra CadnaA (Paožalytė *et al.* 2012), Ansys ir Comsol Multiphysics (Pallapa *et al.* 2010), tačiau jos skiriasi paskirtimi.

Triukšmo sklaidai modeliuoti ir prognozuoti naudojama kompiuterinė programa „CadnaA“. „CadnaA“ (Computer Aided Noise Abatement) – tai kompiuterinė programa, skirta modeliuoti įvairiausius scenarijus, pasirenkant vieno ar kelių tipų triukšmo šaltinius (mobiliesi – keliai, geležinkeliai, oro transportas, taškiniai – pramonės įmonės ir kt.), įvertinant teritorijos reljefą, sudėtingas kelių bei tiltų konstrukcijas ir pan. Atskiruose taškuose įvertinami ir lokalinio triukšmo šaltiniai, taip pat išmetamųjų dujų koncentracijos atskiruose modeliavimo taškuose (CadnaA calculations 2006). Detaliai įvertinamas teritorijos reljefas, vietovės apstatymas, pastatų akustinės savybės, transporto srautai, maksimalūs greičiai, meteorologinės sąlygos ir kt. „CadnaA“ programa naudinga vertinant kelių transporto triukšmo poveikį aplinkai, analizuojant

planuojamą triukšmo poveikį bei planuojant triukšmo mažinimo užtvartas (CadnaA calculations 2006).

Taip pat triukšmo sklaidos modeliavimui plačiai naudojamas baigtinių elementų metodas BEM (Bazilevs *et al.* 2011a; 2011b). Pagrindiniai žingsniai modeliuojant programomis paremtomis baigtinių elementų metodu yra modelio sudarymas aprašant diferencialinėmis lygtimis bei apriboto vienareikšmiškumo sąlygomis; pradinių sąlygų aprašymas (įvedimas); srities, kurioje taikoma dalinė diferencialinė lygtis, suskaidymas į baigtinį skaičių dalių – elementus; išvesties duomenų skaičiavimas; grafinis duomenų pateikimas.

Plačiausiai naudojama Ansys programinė įranga. Kauno technologijos universiteto mokslininkų R. Mikalausko, V. Volkovo (2006, 2007, 2009) garso sklaidos modeliavimo rezultatai parodė, kad, naudojant teorinį modelį, sukurtą BEM pagrindu, galima modeliuoti akustinį žadinimą, kuris atsiranda realiomis sąlygomis bei įvertinti triukšmo lygį tam tikroje aplinkoje. Kitame darbe akustinis laukas modeliuojamas imituojant realias gamybinės patalpos eksploatavimo sąlygas, analizuojamos mobilios, triukšmą mažinančios sistemos efektyvumo ir taikymo galimybės, lyginami tiriamųjų bandymų rezultatai.

Užsienio mokslininkai Jones ir Kessissoglou atliko garso slopintuvų modeliavimą keturiomis skirtingomis BEM programomis: Ansys, Comsol Multiphysics, LMS Virtual Lab Acoustics ir VA-One (Salvi *et al.* 2010).

1.8. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Vėjo jėgainių parkų triukšmą sudaro foninis, jėgainių aerodinaminis bei mechaninis triukšmas. Triukšmo susidarymą 1–30 Hz dažnių diapazone nulemia mentės sąveika su oro srautu už bokšto; 10–400 Hz dažnių diapazone nulemia oro srauto turbulencija, o mentės galo briauna, skrosdama orą, generuoja 500–1000 Hz dažnio triukšmą.

2. Nėra vieningos matavimo vietų išdėstymo metodikos nustatant triukšmo sklaidą vėjo jėgainių parke ir jo išorėje.

3. Matuojant vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidą būtina įvertinti foninį triukšmą. Atliekant foninio triukšmo matavimą reikia stabdyti vėjo jėgaines. Nėra metodikos, kuria remiantis galima būtų nustatyti vėjo jėgainių parko foninį triukšmą nestabdant vėjo jėgainių.

4. Modeliuojant vėjo jėgainių parkų triukšmo sklaidą programomis CadnaA, IMMI, ATCO, Sound PLAN, CUSTIC, NoiseFree, MapNoise ir kt. reikia žinoti vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo lygį. Tuo tarpu modeliuojant baigtinių elementų metodu paremtomis programomis, triukšmo sklaidą galima

prognozuoti dar vėjo jėgainės ar jėgainių parko projektavimo stadijoje.

5. Cilindrinę struktūrą turinčios medžiagos gerai slopina žemo dažnio garsus. Konstrukcijos su šiaudais bei nendrėmis turėtų irgi slopinti triukšmą, tačiau akustinių tyrimų atlikta nedaug.

6. Pastatai slopina triukšmo sklaidą gyvenamojoje aplinkoje. Tačiau trūksta duomenų, kokią įtaką jie daro žemo dažnio garso sklaidai.

Atlikus literatūros analizę, numatomi tokie pagrindiniai tyrimai:

1. Sukurti ir pritaikyti metodą, pagal kurį galima nustatyti foninį triukšmą nestabdant veikiančios vėjo jėgainės.

2. Sudaryti triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parke ir jo išorėje vieningą matavimo vietų parinkimo metodiką.

3. Vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo dažninėje charakteristikoje išskirti infragarso ir žemo dažnio garso diapazonus ir juose įvertinti vėjo jėgainių triukšmo sklaidą.

4. Įvertinti vėjo jėgainių skleidžiamo žemo dažnio triukšmo ir infragarso sklaidą gyvenamuose pastatuose ir jų aplinkoje.

5. Nustatyti aplinkai nekenksmingų medžiagų šiaudų ir nendrių bei jų kompozicijų garso izoliacijos rodiklius bei įvertinti jų poveikį triukšmo slopimui pastatuose.

6. Išplėtoti skaitinį modelį ir, remiantis baigtinių elementų metodu paremta programa, apskaičiuoti garso slėgio lygio vertes vėjo jėgainių įtakos zonoje esančiuose pastatuose ir jų aplinkoje.

Vėjo jėginių triukšmo sklaidos ir mažinimo priemonių eksperimentinių tyrimų bei modeliavimo metodikos

Šiame skyriuje pateikiamos vėjo jėginių triukšmo sklaidos matavimo vietų parinkimo ir matavimo eigos metodikos; aplinkai nekenksmingų medžiagų, tokių kaip molis, šiaudai bei nendrės ir jų kompozicijų akustinių savybių tyrimo bei triukšmo sklaidos modeliavimo programų metodikos. Remiantis koncentrinų žiedų apie vėjo jėgines metodika, jėginių parkų triukšmo sklaida susiejama su vėjo jėginės vėjaračiu. Remiantis foninio triukšmo nustatymo metodika, galima įvertinti žemo dažnio foninio triukšmo įtaką bendram žemo dažnio triukšmui vėjo jėginių parke ir už jo ribų.

Vėjo jėginių triukšmo sklaidos tyrimai buvo atlikti siekiant nustatyti garso slėgio lygį vėjo jėginių parke bei jo išorėje. Žinoma, kad vėjo jėginių susukto oro srautas gali daryti įtaką kitos, pavėjui stovinčios, vėjo jėginės keliamam triukšmui. Dėl šios priežasties gali padidėti vėjo jėginių parko skleidžiamas garso slėgio lygis žemų dažnių srityje. Fliktuojantis vėjo jėginių skleidžiamas triukšmas gali būti ir impulsinis. Impulsinis triukšmas neribojama higienos normų, tačiau žmogaus ausis nespėja prisitaikyti prie impulsinio triukšmo, todėl jis suvokiamas kaip didesnis dirgiklis nei to paties intensyvumo pastovus

triukšmas. Siekiant nustatyti vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidą būtina išskirti foninį triukšmą bei vėjo jėgainių skleidžiamą triukšmą.

Vėjo jėgainių parku vadinamos vėjo jėgainės sujungtos į bendrą elektros tinklą. Parko kraštinės nutolusios vieno vėjaračio skersmens atstumu nuo kraštinės vėjo jėgainės vadinamos parko riba.

Triukšmo susidarymo ir sklaidos tyrimams buvo pasirinkti keturi vėjo jėgainių parkai su skirtingu vėjo jėgainių skaičiumi (2.1 pav.).

2.1 pav. Tyrimams pasirinkti vėjo jėgainių parkai

Fig. 2.1. Wind farms selected for the research

Vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo lygio matavimai buvo atlikti, Griežpelkių, Anužių, Rūdaičių bei Liepynės vėjo jėgainių parkuose. Siekta nustatyti kaip vėjo jėgainių išdėstymas parke gali daryti įtaką aerodinaminio triukšmo susidarymui vėjo jėgainių parke ir už jo ribų. Šių parkų pasirinkimą

sąlygojo daugelis veiksnių. Šalia visų pasirinktų parkų buvo gyvenamųjų pastatų. Anužių vėjo jėgainių parke gyvenamieji pastatai stovėjo už 400 m, Rūdaičių parke – už 300 m, Liepynės parke – už 220 m. Anužių vėjo jėgainių parke buvo tirta triukšmo sklaida tarp dviejų E-82 vėjo jėgainių, kurias skyrė 700 m. Rūdaičių vėjo jėgainių parke tirta triukšmo sklaida tiek parke tiek jo išorėje. Šiame parke viena paskui kitą stovi keturios E-70 vėjo jėgainės tarp kurių atstumai mažesni negu rekomenduojami. Liepynės vėjo jėgainių parke stovi šešios vėjo jėgainės. Keturios E-82 ir po vieną E-53 ir E-33 modelio, t.y. dviejų jėgainių vėjaračiai yra mažesnių matmenų – 53 m ir 33 m skersmens. Atstumai tarp jėgainių šiame parke yra mažesni negu rekomenduojami, todėl garso slėgio lygis parke gali būti didesnis, nei parkuose kuriuose suprojektuoti didesni atstumai tarp vėjo jėgainių. Mažesnio skersmens, 33 m ir 53 m, vėjo jėgainės buvo tik šiame parke. Griežpelkių vėjo jėgainių parke nustatytas foninis triukšmas.

Triukšmo sklaida vėjo jėgainių parkuose matuota žemų dažnių – 6,3–200 Hz, vidutinių dažnių – 200–1000 ir aukštų dažnių – 1000–3150 Hz ribose. Triukšmą slopinančių medžiagų garso izoliacijos rodiklis nustatytas tose pačiose dažnių ribose didesnę dėmesį skiriant infragarso ir žemų dažnių sritims.

Triukšmo slopinimo kameroje tirtos aplinkai nekenksmingos medžiagos su cilindrine struktūra. Matavimai kameroje atlikti remiantis tarptautiniu standartu ISO 12354. Vėjo jėgainių triukšmo sklaidos ir aplinkai nekenksmingų medžiagų garso slopinimo modelis sudarytas Comsol Multiphysics programa, kurioje skaičiavimai remiami baigtiniu elementų metodu.

Skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuojama 3 recenzuojamuose mokslo leidiniuose (Mažuolis ir Butkus 2010; Deveikytė ir kt. 2012; Eivienė ir kt. 2012) bei 1 referuojamame, esančiame „ISI Web of Sciences“ duomenų bazėje, mokslo žurnale (Butkus et al. 2012).

2.1. Foninio triukšmo vėjo jėgainių parkų aplinkoje tyrimų metodika

Tyrimų metu svarbu nustatyti vėjo jėgainių parkų foninį triukšmą siekiant įvertinti jo įtaką bendram triukšmui vėjo jėgainių parke. Tačiau išmatuoti foninio triukšmo pačiame parke veikiant jėgainėms negalima, reikia stabdyti vėjo jėgaines. Todėl yra svarbu rasti metodą, kuriuo remiantis galima būtų išskirti foninį vėjo jėgainių parko triukšmą išmatavus garso slėgio lygį nestabdant vėjo jėgainių. Iš literatūros šaltinių žinoma (Jianu *et al.* 2011), kad triukšmas formuojasi, kai vėjo jėgainės mentė leidžiasi.

Tyrimas atliktas siekiant nustatyti ar minimalios garso slėgio lygio vertės, išmatuotos vėjo jėgainei besisukant, atitinka vėjo jėgainės aplinkos foninį triukšmą. Jeigu vėjo jėgainės vėjaratis nesisuka, tai ji triukšmo neskleidžia, arba skleidžia, bet sąlyginai mažą. Mentėms besisukant, vėjo jėgainė skleidžia nepastovų, ritmingai besikeičiantį triukšmą. T. y. laiko eigoje kinta vėjo jėginių skleidžiamo garso slėgio lygis, kurį išmatavus galima nustatyti žemiausias ir aukščiausias garso slėgio lygio vertes $L_{ZF_{\min}}$ ir $L_{ZF_{\max}}$.

F laikinė svertis pasirinkta, nes didžiausios bei mažiausios garso slėgio lygio vertės įvertinamos tiksliau. Priklausomai nuo jėgainės skleidžiamo triukšmo pobūdžio, nustatant didžiausias garso slėgio lygio vertes galima rinktis $L_{ZI_{\max}}$. Nustačius mažiausias ir didžiausias vėjo jėginių parke sklindančio triukšmo vertes apskaičiuotas vėjo jėginių skleidžiamas triukšmo lygis.

Bendras dviejų triukšmo šaltinių (fono bei vėjo jėgainės) skleidžiamas triukšmo lygis apskaičiuotas pagal formulę:

$$L_{FJ} = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_F}{10}} + 10^{\frac{L_J}{10}} \right), \text{dBZ} \quad (2.1)$$

čia: $L_F - L_{ZF_{\min}}$ – foninis triukšmo lygis, dBZ; $L_{FJ} - L_{ZF_{\max}}$ – foninio triukšmo ir vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo lygių suma, dBZ; L_J – vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmo lygis, dBZ

Remiantis (2.1) formule apskaičiuotas vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo lygis:

$$L_J = 10 \cdot \lg \left(10^{\frac{L_{FJ}}{10}} - 10^{\frac{L_F}{10}} \right), \text{dBZ} \quad (2.2)$$

Jeigu $L_{FJ} > L_F + 20$ dBZ, tuomet L_F yra sąlyginai mažas ir reikšmingos įtakos skaičiavimams nedarė. Todėl, kai $L_{FJ} > L_F + 20$ dBZ priimama, kad $L_{ZF_{\max}}$ atitinka vėjo jėgainės skleidžiamą triukšmą.

Foninio triukšmo tyrimo tikslas: nustatyti ar garso slėgio lygis vėjo jėgainės aplinkoje esant išjungtai jėgainei yra lygus minimalių pikinių garso slėgio lygio verčių vidurkiui, kai vėjo jėgainė sukasi. Analizei pasirinktas 6,3–200 Hz dažnių diapazonas, nes šių dažnių triukšmas yra nepastoviai generuojamas. Matavimai atlikti keturiose matavimo vietose. Pirmoji matavimo vieta nuo vėjo jėgainės nutolusi 50 m atstumu pavėjui už vėjo jėgainės. Atstumas tarp gretimų matavimo vietų yra 50 m. Matavimo vietos parinktos vienoje tiesėje tolstant nuo vėjo jėgainės. Parinkus šias matavimo vietas buvo nustatytas foninis garso slėgio lygis esant 6 m/s vėjo greičiui.

Vertinant triukšmą, garsų dažnių diapazonas dažniausiai skirstomas į vienos oktavos arba vieno trečdaliao oktavos pločio juostas. Juostos pažymimos vidutiniais geometriniais (centriniais) dažniais. Darbe pasirinkta triukšmo sklaidą nagrinėti 1/3 oktavos dažnių juostose, t. y. dažnių intervalų viršutinė riba $\sqrt[3]{2}$ kartų didesnė už žemutinę.

2.2. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų viduje tyrimų metodika

Žinoma, kad už vėjo jėgainių susidaro oro sūkurys. Už pirmos vėjo jėgainės pakitęs oro srauto greitis ir kryptis gali daryti įtaką antrajai, pavėjui stovinčiai, vėjo jėgainei. Jeigu VJ2 vėjo jėgainė dirba skirtingomis sąlygomis ji gali skleisti didesnę arba mažesnę triukšmą, nei VJ1 vėjo jėgainė. Šio tyrimo metu siekta nustatyti: kaip triukšmas sklinda tarp dviejų vėjo jėgainių bei koks garso slėgio lygis gyvenamųjų pastatų aplinkoje.

Dviejų vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos tyrimui parko viduje pasirinktos Enercon E-82, 2,0 MW galios, vėjo jėgainės esančios Pagėgių sav.

Vėjo jėgainių išdėstymo schema, jėgainių ir matavimo vietos gyvenamųjų pastatų aplinkoje koordinatės bei kraštovaizdis pateikiami 2.2 paveiksle.

2.2 pav. Dviejų vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietos pastatų aplinkoje – koordinatės bei kraštovaizdis: GP – gyvenamasis pastatas,

VJ1 – pirmoji vėjo jėgainė, VJ2 – Antroji vėjo jėgainė

Fig. 2.2. Measurement location of noise dispersion of two wind power plants at built environment: position and landscape: GP – living house, VJ1 – first wind turbine, VJ2 – second wind turbine

Anužių k. Jėgainės išdėstytos vienoje tiesėje iš pietryčių į šiaurės vakarus. Vėjo jėgainių parkas ribojasi su lapuočių mišku. Atstumas tarp vėjo jėgainių – 700 m. Tiriant vėjo jėgainių triukšmo sklaidą matavimo vietos išdėstytos vienodu atstumu nuo vėjo jėgainės. Matavimo vietų plane pažymėtos vėjo jėgainės ir braižyti koncentriniai apskritimai. Pirmojo apskritimo spindulys atitinka mentės ilgį, antrojo – du mentės ilgius, trečiojo – tris mentės ilgius ir t.t. Matavimo vietos atidėtos koncentrinuose apskritimuose (žieduose) kas 45° laikrodžio rodyklės kryptimi pradedant nuo viršutinio taško (šiaurinės matavimo vietos). Matavimo vietos žieduose atidėtos atsižvelgiant į pasaulio kryptis. Matavimo vietos numeriję pirmasis skaičius žymi vėjo jėgainę, antrasis – matavimo žiedą, trečiasis – vietą apskritime (2.3 pav.).

Vėjo jėgainės keliamas triukšmas matuotas žieduose, kiekviename žiede 8 taškuose. Kiekviename taške matavimai atlikti po 3 min. Vėjo jėgainių parke, matavimo vietos parinktos taip pat kaip ir prie pavienių vėjo jėgainių. Pirmą kartą susikirtus žiedams, dviejų lankų ribojamo ploto geometriniame centre, pažymima matavimo vieta. Žiedų susikirtimo vietos žymimos nurodant vėjo jėgainių numerius. Jeigu žiedų susikirtimo plotas ribojasi su matavimo vietomis, geometriniame susikirtimo centre matavimai neatliekami.

2.3 pav. Vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo sklaidos matavimo vietų schema

Fig. 2.3. Scheme of measuring points of noise emissions generated by wind turbines

Matavimo žiedams susikirtus antrą kartą matavimai ta kryptimi bei susikirtusių lankų plote nebeatliekami, nes matavimai jau atlikti mažesniuose žieduose. Pasikeitus vėjo krypčiai matavimo taškų padėtis nebuvo keičiama.

Dviejų vėjo jėginių matavimo vietų išdėstymo schema pateikiama 2.4 paveiksle. Sudarant matavimo tinklą garso sklaidą vėjo jėginių parke galima nagrinėti daugiau nei 20-yje matavimo tiesių.

Fig. 2.4. Scheme of measuring grid of noise emissions generated by two wind turbines

Pasirinktos pagrindinės trys A, B, C matavimo tiesės. Tiesėje A išsidėstę 158, 148, 138, 128, 118, 1, 114, 124, 134, 144, 248, 238, 228, 218, 2, 214, 224,

234, 244, 254 matavimo vietos; B tiesėje – 156, 146, 136, 126, 116, 1, 112, 122, 132, 142, 152 matavimo vietos; C tiesėje – 256, 246, 236, 226, 216, 2, 212, 222, 232, 242, 252 matavimo vietos.

Atlikus matavimus tyrimų duomenys pateikti dviem būdais. Pirmu atveju – grafiškai, jungiant matavimo vietas matavimo atkarpomis ir braižant matavimo vietų tinklėlį. Pagrindinės matavimo vietos išdėstytos tiesėje statmenoje vėjaračiui ir tiesėje kertančioje jėgaines. Antru atveju tyrimų duomenys pateikti trijų dimensijų triukšmo žemėlapyje. Žemėlapio x, y plokštumoje atidėtos matavimo vietos, z ašyje – garso slėgio lygio vertės. Garso slėgio lygio vertės tarp taškų nustatytos interpoliacijos metodu. Triukšmo žemėlapis sudarytas Surfer kompiuterinės programos pagalba. Triukšmo sklaidos žemėlapiuose pateikiamos maksimalaus bei minimalaus garso slėgio lygio vertės 6,3–31,5 Hz ir 31,5–200 Hz dažnių ribose.

Matavimo vietų planas sudarytas topografiniame žemėlapyje ir nustatytos koordinatės. Dauguma matavimo vietų randamos pagal vietovės išskirtinius požymius – kelio vingius, pastatus ar augaliją. Jeigu išskirtinių požymių nėra, pvz. vėjo jėgainių parke tarp jėgainių, tuomet matavimo vietos nustatytos naudojant GPS imtuvą bei lazerinį tolmatį.

Nustačius triukšmo vertes vėjo jėgainių parke išskiriamos dvi charakteringos matavimo vietos, kuriose nustatyti didžiausi ir mažiausi garso slėgio lygiai. Šiose matavimo vietose nustatytas ekvivalentinis garso slėgio lygis analizuojamas 6,3–3150 Hz dažnių ribose.

Dviejų vėjo jėgainių sukimosi dažnis ir garso slėgio lygio kitimo periodas gali sutapti (2.5 pav.).

2.5 pav. Dviejų artimų vėjo jėgainių fliktuojančio triukšmo suma:

- a) sutampa gretimi garso slėgio lygio smailių susidarymo momentai laiko atžvilgiu; b) vienos vėjo jėgainės maksimalios skleidžiamo garso slėgio lygio vertės sutampa su kitos jėgainės minimaliomis skleidžiamo garso lygio vertėmis

Fig. 2.5. Amount of noise fluctuations of two close wind turbines:

- a) concurrent peak moments of the sound pressure level; b) wind maximum sound pressure level values overlap the minimal sound power level values

Jeigu laiko momentai kai garso slėgio lygis pasiekia didžiausias ir mažiausias vertes skiriasi, tuomet minimalus triukšmo lygis neatitinka foninio triukšmo lygio. 2.5 a paveiksle pavaizduota dviejų vėjo jėgainių skleidžiamo garso slėgio lygio kaita, kai garso fliktuacijos laiko atžvilgiu sutampa. Šiuo atveju vėjo jėgainių garso sklaidos smailės sutampa. Kai garso fliktuacija yra sinchroniška, galima nustatyti minimalų garso slėgio lygį $LZ_{\min}$ kuris yra artimas foniniam triukšmui. Jeigu dvi vėjo jėgainės skleidžia garsą skirtingu laiko momentu, kaip parodyta 2.5 b paveiksle ir vienos vėjo jėgainės maksimalios skleidžiamo garso slėgio lygio vertės sutampa su kitos jėgainės minimaliomis skleidžiamo garso slėgio lygio vertėmis, tuomet $LZ_{\min}$ neatspindės foninio triukšmo verčių vėjo jėgainių parke. Vėjo jėgainių parko centre garso slėgio lygio formavimuisi įtaką daro abi vėjo jėgainės, todėl foninį parko triukšmą reiktų skaičiuoti remiantis vienos vėjo jėgainės įtakos zonoje atlikto matavimo duomenimis.

Siekiant nustatyti foninį bei vėjo jėgainių skleidžiamą triukšmą, remiantis (2.2) formule apskaičiuotas vėjo jėgainių skleidžiamo garso slėgio lygis ir foninio garso slėgio lygis. Maksimalus ir minimalus garso slėgio lygis 6,3–31,5 Hz bei 31,5–200 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose apskaičiuotas remiantis formule:

$$L_{n,eq} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (2.3)$$

čia L_i – vidutinių geometrinių dažnių garso slėgio lygio maksimalios arba minimalios vertės, dBZ.

Siekiant nustatyti vėjo jėgainių keliamo triukšmo sklaidą, triukšmo matavimo metodika suponuoja su bendrąja bet kokio triukšmo šaltinio keliamo triukšmo matavimo metodika. Matavimai atlikti vadovaujantis tarptautiniu standartu IEC 61400-11:2002 „Vėjo turbinų generatorių sistemos. 11 dalis. Akustinio triukšmo matavimo metodai“.

Lietuvos higienos normoje HN 30-2009 „Infragarsas ir žemo dažnio garsai: ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose“ nurodoma, kad žemo dažnio garsas yra 16–200 Hz intervalo dažnio garsas, o infragarsas – mažesnis nei 16 Hz dažnio garsas. Taip pat šioje higienos normoje leidžiami infragarso ir žemo dažnio garsų ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose nurodomi trečdario oktavos dažnių juostos vidutiniuose dažniuose 8–200 Hz ribose. Kamperman, James ir Thorne (Kamperman and James 2008; Thorne 2010) garso sklaidą nuo vėjo jėgainių tiria pradedant nuo 6,3 Hz dažnio.

Matuojant nenaudoti dažninių charakteristikų filtrai. Viename matavimo taške nuosekliai atlikti du matavimai naudojant skirtingą garso slėgio lygio

matuoklio programinę įrangą. Toje pačioje matavimo vietoje vieno matavimo metu buvo nustatoma infragarso ir žemo dažnio triukšmo (6,3–200 Hz) sklaida vėjo jėgainių parke. Antro matavimo metu ekvivalentinis garso slėgio lygis fiksuojamas kas 100 ms, t. y. nustatytas fliktuacijų intensyvumas. Prieš matavimą nustatytas triukšmo pobūdis. Nustatant triukšmo impulsinį charakterį, žiūrėtas prietaiso maksimalus ir vidutinis rodmuo. Jeigu lygių skirtumas didesnis kaip 5 dB, triukšmas laikytas impulsiniu.

Vėjo jėgainės keliamas triukšmas matuotas kai vėjo greitis yra ne mažesnis nei 6 m/s. Matavimų metu mikrofonas apgaubtas specialiu apsauginiu ekranu bei montuotas vertikaliai 1,2–1,5 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmas matuotas „Bruel&Kjær“ 2270 garso slėgio lygio matuokliu su UA-1404 lauko mikrofonu, 1,5 m aukštyje. Dinaminis matavimo diapazonas 120 dB, matavimo intervalas – nuo 16,6 dB iki 140 dB; nominalus jautris 50mV/Pa; dažnių diapazonas – nuo 0,5 Hz iki 20 kHz.

Pastovaus triukšmo matavimo trukmė ne trumpesnė kaip 3 minutės. Pastovaus triukšmo parametrai matuoti kiekviename taške ne mažiau kaip 3 kartus.

Keturių vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidai nustatyti parko viduje buvo pasirinktas Rūdaičių vėjo jėgainių parkas kuriame yra keturios vėjo jėgainės, orientuotos vienoje atkarpoje. Keturių vėjo jėgainių išdėstymo schema, jėgainių ir matavimo vietos gyvenamųjų pastatų aplinkoje koordinatės bei kraštovaizdis pateikiami 2.6 paveiksle.

2.6 pav. Keturių vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietos pastatų aplinkoje – koordinatės bei kraštovaizdis: GP – gyvenamasis pastatas

Fig. 2.6. Measurement locations of noise dispersion of four wind power plants at the built environment: position and landscape: GP – living house

Tirta „Enercon E-70“ vėjo jėgainių triukšmo sklaida. Vienos vėjo jėgainės galia – 2,0 MW. Šio vėjo jėgainių parko tyrimai aktualūs, nes keturios vėjo jėgainės išdėstytos vienoje eilėje kas 260 m., o vienos jėgainės vėjaračio skersmuo yra 70 m. Atstumo tarp jėgainių ir vėjaračio santykis yra 3,7, tuo tarpu rekomenduojamas mažiausias santykis yra 5–6. Vėjo jėgainės pastatytos per arti viena kitos, dėl to vėjo jėgainių parko aplinkoje gali būti padidėjęs triukšmo lygis.

Matavimo taškai parinkti pagal vėjo jėgainių vėjaračių skersmenis tokia tvarka: pirmojo matavimo žiedo spindulys atitinka vėjaračio skersmenį, antrojo matavimo žiedo spindulys atitinka du vėjaračio skersmenis ir t.t. (2.7 pav.).

2.7 pav. Keturių vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo sklaidos matavimo tinkelio schema

Fig. 2.7. Scheme of measuring grid of noise emissions generated by four wind turbines

Tyrimų metu gauti rezultatai pateikti grafiškai, jungiant matavimo vietas matavimo atkarpomis ir braižant matavimo vietų tinklėlį. Garso sklaidą vėjo jėgainių parke galima nagrinėti 11-oje matavimo tiesių. Nubraižius tinklėlį pasirinktos pagrindinės matavimo tiesės: A, D, G, H, I, J, K.

Tiesėje A išsidėstę 132, 232, 332 ir 432 matavimo vietos; D tiesėje – 138, 128, 118, 1, 114, 1-2, 218, 2, 214, 2-3, 318, 3, 314, 3-4, 418, 4, 414, 424, 434 matavimo vietos; G tiesėje – 136, 236, 336 ir 436 matavimo vietos; H tiesėje – 136, 126, 116, 1, 112, 122, 132 matavimo vietos; I tiesėje – 236, 226, 216, 2, 212, 222, 232 matavimo vietos; J tiesėje – 336, 326, 316, 3, 312, 322, 332 matavimo vietos; K tiesėje – 436, 426, 416, 4, 412, 422, 432 matavimo vietos.

Matavimo taškai išdėstyti matavimo žiede statmenai vėjaračiams ir vėjaračių plokštumoje, žiedams susikirtus matavimo taškai nežymimi. Tyrimo metu siekta nustatyti kaip triukšmo sklaida bei intensyvumas kinta tolstant nuo vėjo jėgainių parko.

Taip pat rezultatai atvaizduoti jėgainių parko triukšmo sklaidos žemėlapyje. Remiantis garso slėgio lygio matavimo duomenimis 6,3–200 Hz dažnių ribose, apskaičiuoti maksimalaus ir minimalaus garso slėgio lygio dydžiai 6,3–31,5 Hz ir 31,5–200 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose. Dvi charakteringos matavimo vietos parinktos remiantis tuo pačiu principu kaip ir dviejų vėjo jėgainių parke.

Triukšmo sklaidos ir oro sąlygų matavimas atliktas taip pat kaip ir dviejų vėjo jėgainių parke.

Šešių vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos parko viduje tyrimui pasirinktas Liepynės 9,13 MW galios vėjo jėgainių parkas. Šiame parke keturios „Enercon“ E-82 vėjo jėgainės, kurių galia po 2,0 MW ir dvi mažesnės E-53 ir E-33, kurių bendra galia 1,13 MW.

Šešių vėjo jėgainių išdėstymo schema, jėgainių ir matavimo vietos gyvenamųjų pastatų aplinkoje koordinatės bei kraštovaizdis pateikiami 2.8 paveiksle. Didžiųjų vėjo jėgainių vėjaračių skersmenys yra po 82 m, mažųjų – 53 m ir 33 m. Vėjo elektrinių parkas išsidėstęs žemės ūkio paskirties žemėje. Parko teritoriją, šiaurėje riboja Pryšmančių miško masyvas, rytuose – ūkininkų sodybos, vakaruose Liepynės kaimas, o pietų pusėje vietinis kelias. Teritorijos reljefas yra sąlyginai lygus, su silpnai išreikštomis kalvomis.

Triukšmas nuo skirtingo skersmens vėjaračių sklinda nevienodai, todėl triukšmo matavimo vietos parinktos atsižvelgiant į vėjo jėgainės mentes.

Matavimai atlikti siekiant nustatyti garso slėgio lygį vėjo jėgainių parke ir jo išorėje, išskiriant triukšmo fluktuacijas. Remiantis vietovės ortofotografiniu žemėlapiu bei atsižvelgiant į vėjo jėgainių vėjaračių skersmenis sudarytas matavimo vietų planas.

2.8 pav. Šešių vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietos pastatų aplinkoje – koordinatės bei kraštovaizdis: GP – gyvenamasis pastatas

Fig. 2.8. Measurement location of noise dispersion of six wind power plants at the built environment – position and landscape: GP – living house

Šešių vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos matavimo vietos yra išdėstytos netolygiai, nes parke yra trijų skirtingų skersmenų vėjaračiai, todėl ir matavimo tiesių tinklėlį braižyti sudėtinga. Parinktas matavimo vietų tinklėlis yra nesimetriškas (2.9 pav.). A tiesėje arba gretimai jai yra 148, 138, 128, 118, 1, 114, 1-2, 218, 2, 214, 224, 234, 244 matavimo vietos; B matavimo tiesėje arba gretimai jai yra 348, 338, 328, 318, 3, 314, 3-4, 418, 4, 414, 424, 434, 444 matavimo vietos; C matavimo tiesėje arba gretimai jai yra 548, 538, 528, 518, 5, 514, 524, 638, 628, 618, 6, 614, 624, 634, 644 matavimo vietos. D matavimo atkarpose yra 546, 536, 526, 516, 5, 512, 522, 532. 326, 316, 3, 312, 117, 1, 112, 122, 132 ir 142 matavimo vietos. E matavimo atkarpose yra 646, 636, 626, 616, 6, 612, 622, 416, 4, 412, 216, 2, 212, 222, 232, 242 matavimo vietos.

2.9 pav. Liepynės šešių vėjo jėgainių parko matavimo vietų planas: A, B, C, D, E – matavimo atkarpos

Fig. 2.9. Scheme of measuring points of six wind turbines in Liepynė wind park: A, B, C, D, E – measuring sections

Lygiagrečiai vėjo kryptčiai parinktos trys matavimo tiesės – A, B ir C. Statmenai vėjo kryptčiai atkarpos D ir F išskaidytos taip, kad kirstų vėjo jėgaines.

Triukšmo sklaidos ir oro sąlygų matavimas bei trijų charakteringų matavimo vietų parinkimas atliktas taip pat kaip ir dviejų bei keturių vėjo jėgainių parke.

Metrologinių atmosferinių sąlygų matavimas

Prieš pradėdant matuoti vėjo jėgainių skleidžiamą triukšmą nustatyta vėjo kryptis, vėjo greitis, aplinkos oro temperatūra drėgmė ir slėgis. Minėti parametrai matuoti prietaisu Metrel-6401 Poly. Prietaiso matavimo ribos $(-20...+70)^\circ\text{C}$, $(0...100)\%$, $(0...10)\text{ m/s}$, matavimo paklaidos $\pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$,

$\pm 0,03$ m/s, $\pm 0,005$ kPa. Vėjo kryptis nustatyta vizualiai. Akustiniai matavimai nevykdyti kai lijo, snigo ar esant stipriam rūkui.

2.3. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų išorėje tyrimo metodika

Kiekvieno vėjo jėgainių parko išorėje buvo atlikti du tyrimai. Pirmą nustatyta vėjo kryptis ir matuotas garso slėgio lygis penkiose matavimo vietose, kas 100 m, tolstant nuo parko pavėjine kryptimi. Antras tyrimas atliktas gyvenamojoje aplinkoje nepriklausomai nuo vėjo krypties. Pirmu tyrimu siekta nustatyti maksimalias garso slėgio lygio vertes už parko ribų. Pavėjinė kryptis pasirinkta, nes triukšmas pavėjui sklinda toliau nei priešvėjine kryptimi. Triukšmo sklaidos matavimo vietų, tolstant nuo vėjo jėgainių parkų, schemos pateikta 2.10–2.12 paveiksluose.

2.10 pav. Dviejų vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietų parko išorėje išdėstymo schema

Fig. 2.10. Scheme of measuring points of noise emissions outside wind park generated by two wind turbines

Dviejų vėjo jėgainių parke gyvenamieji pastatai nutolę 400 m atstumu nuo artimiausios vėjo jėgainės. Dviejų vėjo jėgainių aplinkoje triukšmo sklaida matuota viename taške. Keturių vėjo jėgainių parko įtakos zonoje – 300 metrų atstumu nuo artimiausios vėjo jėgainės. Šešių vėjo jėgainių parko įtakos zonoje – 200 metrų atstumu nuo artimiausios vėjo jėgainės.

2.11 pav. Keturių vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietų parko išorėje išdėstymo schema

Fig. 2.11. Scheme of measuring points of noise emissions outside wind park generated by two four turbines

2.12 pav. Šešių vėjo jėgainių triukšmo sklaidos matavimo vietų parko išorėje išdėstymo schema

Fig. 2.12. Scheme of measuring points of noise emissions outside wind park generated by six wind turbines

Atliekant triukšmo sklaidos tyrimus mikrofonas buvo atsukamas į triukšmo šaltinį – vėjo jėgainių parką. Gyvenamųjų pastatų aplinkoje triukšmas matuotas mikrofoną montuojant 2 metrų atstumu nuo pastato. Gyvenamajame pastate triukšmo vertės nustatytos pagalbinėse ir gyvenamosiose patalpose. Matavimams pasirinktos 5 matavimo vietos (2.13 pav.).

2.13 pav. Pastato planas ir matavimo vietų išdėstymo schema: 1–5 – matavimo vietos; A – sandėlis; B – prieškambaris; C – miegamasis, D – kitos gyvenamosios patalpos

Fig. 2.13. Building plan and scheme of measurement locations: 1–5 – measurement points; A – storage; B – hall; C – bedroom, D – living room

Pirmoji ir antroji matavimo vietos parinktos prieš pastatą, trečioji už pastato. Šios trys matavimo vietos parinktos dviejų metrų atstumu nuo pastato. Ketvirtoji matavimo vieta yra prieškambaryje, penktoji – miegamajame kambaryje.

Šešių vėjo jėgainių parko įtakos zonoje gyvenamieji pastatai nutolę 220 metrų atstumu nuo artimiausios vėjo jėgainės. Atliekant matavimus pastatų aplinkoje mikrofonas montuotas 1,5 m aukštyje. Mikrofonas nukreipiamas į maksimalaus triukšmo pusę ne mažesniu kaip 0,5 m atstumu nuo asmens, atliekančio matavimus. Prieš pradedant matavimą nustatyta oro temperatūra, vidutinis vėjo greitis, vėjo kryptis, atmosferinis slėgis, oro drėgnis.

2.4. Žemo dažnio triukšmą slopinančių medžiagų garso izoliacijos rodiklio tyrimo metodika

Medžiagų akustiniu savybių tyrimai atlikti VGTU Aplinkos apsaugos katedros triukšmo slopinimo kameroje (2.14 pav.). Triukšmo slopinimo kamerą sudaro dvi kameros, perskirtos dviguba siena, ir greta esančios patalpos, skirtos matavimo įrangai. 1-oji patalpa vadinama siunčiamo garso „triukšmingąja“ kamera, 2-oji patalpa – priimamojo garso „tylioji“ kamera. Kameros tarpusavyje ir išorinio statinio atžvilgiu akustiškai izoliuotos akmens vatos plokštėmis. Tokia konstrukcija leidžia sumažinti netiesioginį garso pralaidumą tarp aidinčių kamerų, be to, šios kameros izoliuojamos nuo išorinio triukšmo ir tai minimizuoja foninį triukšmą jose.

2.14 pav. Triukšmo slopinimo kameros vaizdas iš viršaus: 1) durys; 2) kameros atitvaros dengtos porolonu; 3) anga tiriamiesiems bandiniams įtaisyti; 4) triukšmo šaltinių pozicijos (TŠ); 5) mikrofonų pozicijos (M); PP – duomenų apdorojimo patalpa

Fig. 2.14. View of the noise suppression chamber from above: 1) door; 2) chamber partitions covered with foam; 3) cage for mounting the researched samples; 4) positions of noise sources (TŠ); 5) microphone positions (M); PP – data recording and processing room

Kameras skiriančioje sienoje yra 1 m² anga, kurioje standžiai įtvirtinamas 1,0 × 1,0 m tiriamasis bandinys. Abiejose kameros patalpose (siunčiamojo ir priimamojo garso) įrengtos kelios mikrofonų pozicijos. Siunčiamojo garso patalpoje įjungiamas garso šaltinis, tokiu būdu susidaro keli garso slėgio lygio matavimo taškai kiekvienoje patalpoje, o tai sukuria reikiamas difuzinio garso lauko sąlygas. Difuzinio lauko sąlygos gali būti pagerintos pasitelkus difuzinius elementus.

Matavimai atlikti remiantis tarptautiniu standartu ISO 12354. Garso šaltinis, montuotas ne arčiau kaip 0,7 m atstumu nuo sienos. Vienas mikrofonas pastatytas „triukšmingoje“ kameroje, kurioje yra ir garso šaltinis, o kitas – „tylioje“ patalpoje. Mikrofonai pastatyti 1,5 m aukštyje virš kameros grindų paviršiaus, 1,2 m atstumu nuo bandinio. Matavimai kartoti tris kartus. Tiriamųjų medžiagų garso izoliavimo lygį lemia garso slėgio lygio skirtumai gauti, „triukšmingoje“ ir „tylioje“ kameroje, tarp kurių standžiai įtaisytas bandinys (Januševičius ir kt. 2008).

Akustiniams matavimams naudota įranga: realaus laiko garso spektro analizatorius „Bruel&Kjaer mediator 2260“; du mikrofonai Bruel&Kjaer 4189; mikrofonų kalibratorius; galios stiprintuvas Bruel&Kjaer; visakryptis dvylikasienis garsiakalbis Bruel&Kjaer Omni Power Type 4292.

Orinio garso tariamas garso izoliavimo rodiklis R_w , apskaičiuojamas krintančios ant bandomosios atitvaros garso galios L_1 santykio su praleista per bandinį garso galia L_2 dešimteriopas dešimtainis logaritmas. Šis dydis žymimas R_w ir išreiškiamas decibelais pagal 2.4 ir 2.5 formules:

$$R'_w = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \quad (2.4)$$

$$A = \left(\frac{0,163 \cdot V}{T} \right) \quad (2.5)$$

čia: L_1 – vidutinis garso slėgio lygis siunčiamojo garso patalpoje, dB; L_2 – vidutinis garso slėgio lygis priimamojo garso patalpoje, dB; S – tiriamosios sienos plotas, m²; A – lygiavertis garso sugerties plotas priimamojo garso patalpoje, m²; V – priimamojo garso patalpos tūris, m³; T – priimamojo garso patalpos aidėjimo trukmė, s.

Plaušamolio mėginio paruošimas. Siekiant nustatyti garso izoliacijos indeksą ir žemų dažnių garso sugerties savybes, pagamintas 1m² plaušamolio blokas, kuris vėliau tirtas triukšmo slopinimo kameroje. Blokelių gamybai naudoti molio miltai (AB „Dvarčionių keramika“), ruginiai šiaudai, smėlis (vyraujantis dalelių dydis – 3 mm), vanduo. Blokeliai presuoti mobiliu hidrauliniu presu. Plaušamolio bandinio storis 250 mm, tankis 200 kg/m³. Hidraulinio preso pagrindas yra 50 cm ilgio ir 50 cm pločio. Preso sienos pagamintos iš 10 mm polipropileno plokščių sutvirtintų standumo briaunomis. Preso dugnas perforuotas, kad presuojant perteklinė molio masė galėtų

pasišalinti. Visos preso sienelės sujungtos standumo briaunose esančiomis jungtimis, todėl supresavus bandinį visos sienelės išardomos ir nuimamos. Prie polipropileno molio masė neprilimpa ir išardžius presą lengvai nuimama nesuardant dar neišdžiūvusio bandinio.

Pagaminti 3 skirtingo tankio plaušamolio blokeliai džiovinami džiovinimo kameroje, kurioje palaikoma 20 °C temperatūra. Pagaminus keturis blokelių jie guldyti į rėmą, tarpai užpildyti plaušamolio mase. Pagaminus vientisą 1 m² plaušamolio bloką jis toliau džiovinamas džiovinimo kameroje. Džiovinimo kameros ilgis – 2,0 m, plotis – 2,0 m, aukštis – 2,4 m. Šilumos šaltinis – 2 kW elektrinis šildytuvas, kuris į elektros tinklą jungtas per elektromechaninį paros laikmatį su jungikliu. Džiovinimo kamera pagreitino mėginių džiovinimo procesą nuo 2 mėnesių iki vienos savaitės, taip pat bandinius galima buvo ruošti ir šaltuoju metų laiku.

Šiaudų bandinių paruošimas. Siekiant nustatyti garso izoliacijos indeksą ir žemų dažnių garso sugertį paruošti 50 mm, 100 mm, 150 mm ir 200 mm storio, 1m² ploto presuotų šiaudų bandiniai. 1–2 mm skersmens ruginiai šiaudai dėti į medinį rėmą, kurio didžiosios sienos yra tinklinės. Šiaudai presuoti rankiniu būdu. Paruošus bandinį jis buvo pasvertas, atimta rėmo masė ir nustatytas šiaudų tankis. Nustatytas šiaudų tankis mėginyje 90 kg/m³. Presuojant šiaudus, iki 30 % šiaudų cilindrinė struktūra suardoma.

Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinys. UAB „Ecococon“ pagamintas bandinys yra 1 m² ploto ir 400 mm storio. Presuoti šiaudai patalpinti mediniame rėme statmenai tinko sluoksniui. Didžiosios sienos tinkuotos molio tinku, po 25 mm iš abiejų šonų. Šiaudų tankis 100 kg/m³, molio tankis 2500 kg/m³.

Nendrių bandinio paruošimas. Siekiant nustatyti nendrių bandinių garso izoliacijos indeksą paruošti 50 mm, 100 mm, 150 mm ir 200 mm storio, 1 m² ploto nendrių bandiniai. 3–5 mm skersmens nendrės dėtos į medinį rėmą dviem būdais – klojant šiaudus išilgai ir statmenai triukšmo šaltiniui bei mikrofonams. Nendrių tankis mėginyje 190 kg/m³.

2.5. Žemo dažnio triukšmo sklaidos bei jo mažinimo modeliavimo metodika

Darbe naudotos trys garso sklaidos modeliavimo programos. Sprendžiant specifinius uždavinius geriausia naudotis tik tiems uždaviniams spręsti sukurtomis specializuotomis programomis.

Strati-Artz programa taikoma garso absorbcijos koeficientui α nustatyti. Šiame darbe programa Strati-Artz pritaikyta iki šiol 12,5–40 Hz dažnių ribose neįvertintam garso izoliacijos rodikliui R nustatyti.

CadnaA programa taikoma triukšmo sklaidos aplinkoje modeliavimui. Programoje nėra galimybės įvertinti šlaitinių stogų ir jų pastogių įtakos triukšmo sklaidai pastatų aplinkoje. Darbe ši programa išspręsta suformavus skaitinį modelį nestandartinėse plokštumose pakeičiant XYZ modelio erdvę į XZY.

Comsol Multiphysics programa panaudota iki šiol netaikytam atvejui modeliuojant triukšmo sklaidą iš aplinkos į pastato vidų įvertinant aplinkai nekenksmingų medžiagų įtaką triukšmo mažinimui patalpose.

CadnaA skaičiavimai remiasi normatyviniuose dokumentuose pateiktomis formulėmis, tuo tarpu Comsol Multiphysics skaičiavimai pagrįsti baigtinių elementų metodu.

Medžiagos garso sugerties koeficientas α ir garso izoliacijos rodiklis R_w tiesiogiai priklauso nuo garso pokyčio ΔL . Modeliavimo programa Strati-Artz prognozuojamas medžiagos garso sugerties koeficientas bei garso pokytis ΔL . Siekiant nustatyti akustiniams medžiagos parametrams reikia žinoti keletą parametrų: tamprumo modulį, poringumą, tankį, Puasono koeficientą. Programos duomenų bazėje galima pasirinkti modelio sudarymui naudojamų medžiagų parametrus arba įvesti juo savarankiškai. Taip pat modelio vizualizacijos erdvėje formuojami bandinio sluoksniai. Skaičiavimo rezultatai gali būti pateikiami grafiškai nurodant du arba tris parametrus, pvz. bandinio poringumo ir garso absorbcijos koeficiento priklausomybę nuo garso bangos dažnio.

Siekiant nustatyti medžiagų garso izoliacijos rodiklį R žemesniuose negu 50 Hz dažniuose buvo pasirinkta teorinio garso izoliacijos rodiklio R_w nustatymo metodika. Remiantis tarptautiniame ISO 12354 standarte pateikta metodika buvo skaičiuojami garso izoliacijos rodikliai papildomai 1/3 oktavos vidutiniams geometriniais dažniais nuo 6,3 Hz iki 40 Hz.

Atliekant garso izoliacijos rodiklio R skaičiavimus, kai dažniai yra mažesni už 40 Hz ir didesni už 12,5 Hz ir skaičiuojant laisvųjų bangų spinduliavimo faktorių turi būti taikoma formulė:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_0}{f}}} \quad (2.6)$$

čia: f_0 – rezonansinis dažnis, f – skaičiuojamasis dažnis

Iš formulės matyt, kad esant rezonansiniam dažniui didesniame negu skaičiuojamam, vardiklio pošaknyje gaunamas neigiamas skaičius. Todėl garso izoliacijos rodiklis didesniems nei 12,5 Hz dažniams ir mažesniems negu 40 Hz dažniams neskaičiuotas. Trūkstamas vertes galima apskaičiuoti interpoliacijos būdu, tačiau tuomet gali būti neįvertintas staigus garso izoliacijos rodiklio

pokytis skaičiuojamame dažnių intervale. Taip pat galima pritaikyti skaitinį modeliavimą, tačiau programos, tokios kaip Bastian, paremtos tuo pačiu tarptautiniu ISO 12354 standartu, todėl skaičiavimas mažesniuose dažniuose negu 50 Hz neatlikti. Garso izoliacijos rodiklis R_w yra tiesiogiai susijęs su garso pokyčiu ΔL . Apskaičiavus bandinio garso pokytį ΔL 12,5–40 Hz dažnių ribose, galima nustatyti ar šiame dažnių intervale nėra staigaus garso izoliacijos rodiklio pokyčio. Garso pokyčio ΔL modeliavimas atliktas Strati-Artz programine įranga. Strati-Artz gali įvertinti sudėtingos sluoksniuotos struktūros akustines ypatybes, apimdamas nelaidžias elastingas medžiagas, porėtas medžiagas ir oro tarpus. Jeigu garso pokytis ΔL 12,5–40 Hz dažnių ribose kinta tolygiai, tuomet galima interpoliuoti tris kreives, kaip parodyta 2.15 paveiksle.

2.15 pav. Garso izoliacijos rodiklio R nustatymas 12,5–40 Hz dažnių ribose: 1 ir 4 – duomenų kreivė; 3 – menama 4 kreivė; 2 – menama 1 kreivė; 5 – tiesinė garso izoliacijos rodiklio R priklausomybė 12,5 Hz – 40 Hz dažnių ribose; 6 – interpoliacijos būdu nustatytos garso izoliacijos rodiklio R vertės 12,5 Hz – 40 Hz dažnių ribose

Fig. 2.15. Reduction of sound insulation index R in the frequency range from 12.5 to 40 Hz: 1 and 4 – data curve; 3 – imaginary curve; 2 – imaginary curve; 5 – linear dependence of sound insulation index R in frequency range of 12.5–40 Hz; 6 – interpolated sound insulation index R values in the frequency range of 12.5–40 Hz

2.15 paveiksle pavaizduotas grafinis garso izoliacijos rodiklio R 12,5–40 Hz dažnių ribose nustatymo būdas. 1 ir 4 yra dvi vienos kreivės atkarpos. 2 tiesė apskaičiuojama interpoliacijos būdu remiantis 1 kreivės duomenimis; 3 tiesė –

remiantis 4 kreivės duomenimis; 5 – tiesiogiai sujungus 12,5 Hz ir 40 Hz vertes. Apskaičiuojamas 25 Hz ir 31,5 dažnių garso izoliacijos rodiklio R aritmetinis vidurkis remiantis 5 ir 3 kreivių duomenimis ir 16–20 Hz dažnių garso izoliacijos rodiklio R aritmetinis vidurkis remiantis 5 ir 2 kreivių duomenimis.

Garso sklaidos modeliavimas aplinkoje atliktas programa CadnaA (Computer Aided Noise Abatement). Tai kompiuterinė programa, kuri yra skirta apskaičiuoti ir pavaizduoti, įvertinti ir prognozuoti keliamo triukšmo sklaidą. Šioje programoje nėra galimybės analizuoti konstrukcinių elementų įtakos garso sklaidai, nes nenumatytos tokios funkcijos. Jeigu analizuojama triukšmo sklaida pastato atžvilgiu, tuomet programos darbo lauke braižomi stačiakampiai gretasieniai, kuriems priskiriami pastato akustinių savybių duomenys. Taip atvaizduojamo pastato stogas yra lygus. Tuo tarpu šlaitiniai stogai gali turėti reikšmingos įtakos garso sklaidai aplinkoje, o ypač, kai triukšmo šaltinis yra ne ant žemės, o virš pastato stogo lygio.

Nors programoje nėra funkcijos kuri leistų suformuoti modeliuojamam pastatui dvišlaitį stogą su išsikišusiu karnizu, šį uždavinį vis dėlto galima išspręsti. Veiksmų seka naudota darbe pavaizduota 2.16 paveiksle.

2.16 pav. Dvišlaitio namo stogo su karnizu modelio sudarymas: a) norimo spręsti uždavinio modelis; b) pakeičiama pagrindo plokštuma; c) suformuojamas pagrindas; d) uždavinio modelis pasuktoje projekcijoje

Fig. 2.16. Model of the two-pitched roof with cornice: a) model of the task to be addressed; b) ground plane replaced; c) the basis formed; d) model of the tilted projection

Darbo lauke, XY plokštumoje braižytas pastatas ir suformuoti du triukšmo slopinimo ekranai, o triukšmo šaltinis pasuktas – 90° kampu apie X ašį. Prie pastato sienos modeliuotas begalinio ilgio ir aukščio akustinis ekranas, kuris atstoja pagrindą. Pasukus šį modelį 90° kampu apie X ašį gauta analogiška situacija atvaizduota a paveiksle, tačiau šiuo atveju suformuotas dvišlaitis stogas su karnizu. Sprendžiant šį uždavinį garso bangų atspindžiai nuo modeliujamų objektų neįvertinami.

Cosmol Multiphysics leidžia spręsti baigtinių elementų metodu pačius sudėtingiausius mokslinius ir inžinerinius uždavinius, analizuoti baigtinių elementų elgseną, skaičiavimo procedūras elektronikos, optikos, mechatronikos, energetikos, alternatyviosios energetikos bei chemijos srityse; nuo skysčių tekėjimo ir šilumos perdavimo mechanikos iki elektromagnetinės analizės. Cosmol Multiphysics modeliavimo programinė įranga palengvina visus modeliavimo proceso etapus – apibrėžiant pasirinktą geometriją, suliejant ją su formulėmis, sprendžiant, ir vizualizuojant rezultatus. Modelio formavimas yra greitas, dėka daugelio iš anksto nustatytų fizikinių dydžių sąsajų. Medžiagų savybės, procesai ir kraštinės sąlygos gali būti aprašomi kaip priklausomų kintamųjų funkcijos.

Cosmol Multiphysics programoje pasirinktas „Akustinio slėgio“ uždavinys. Sudarytas dvimatis pastato ir vėjo jėgainių parko modelis atitinkantis vertikalią projekciją. Pastato sienų ir stogo medžiagų parametrai parinkti atsižvelgiant į tirtas medžiagas. Triukšmo šaltinio parametrai parinkti pagal vėjo jėgainių tyrimo duomenis. Uždavinio sprendime naudotos lygtys apibūdinančios garso sklaidą fluiduose yra kilę iš tekėjimo lygčių. Šios lygtys dažnai vadinamos Navier-Stokso energijos tvermės lygtimi ir ryšį tarp termodinaminių kintamųjų apibūdinančia lygtimi. Akustinis laukas aprašytas vieno kintamojo – slėgio, ir grindžiamas bangų lygtimi:

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} + \nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) = Q \quad (2.7)$$

čia: t – laikas, s ; ρ_0 – fluído tankis, kg/m^3 ; q ir Q – galimų dvipolio ir vienpolio šaltinių išraiška, N/m^3 ir l/s^2 .

Bet koks signalas gali būti išplėstas į Furjė eilutės harmoninius komponentus. Bangos lygtis vienu metu gali būti išspręsta vienam dažniui. Harmonikos sprendinys išreiškiamas taip:

$$p(x) \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

čia erdvės ir laiko komponentai yra atskirti. Slėgis gali būti užrašytas bendrai naudojant kompleksinių kintamųjų būdą:

$$p = p(x)e^{i\omega t} \quad (2.9)$$

čia reali fizinė slėgio vertė yra realioji (2.8) lygties dalis. Remiantis šia prielaida slėgio laukui, laiko bangų lygtis tampa Helmholco lygtimi.

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} p = Q \quad (2.10)$$

čia ω – kampinis dažnis, rad/s.

Ši lygtis naudojama, kai skaičiavimams naudojamas trimatis modelis. Dviejų dimensijų modelyje slėgis aprašomas tokia formule:

$$p(r) = p(x, y)e^{-ik_z z} \quad (2.11)$$

Todėl (2.10) formulė užrašoma taip:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p - q) \right) - \frac{1}{\rho_c} \left(\frac{\omega^2}{c_c^2} - k_z^2 \right) p = Q \quad (2.12)$$

Atlikus skaičiavimus nustatyta žemų dažnių garso sklaida pastate įvertinant patalpų aukštį bei plotį, stogo karnizo ilgį ir aplinkai nekenksmingų medžiagų įtaką.

Tyrimų rezultatų statistinis įvertinimas

Vienkartinių matavimų paklaidos vertintos pagal matavimo prietaiso ar metodo tikslumą nurodytus techninėje specifikacijoje arba standartizuotoje metodikoje.

Triukšmo slopinimo kameroje, nustatant garso izoliacijos rodiklį, matavimai atlikti tris kartus. Gavus matavimo duomenų rezultatus apskaičiuotas aritmetinis vidurkis:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.13)$$

čia: x_i – i-tojo matavimo rezultatas; n – matavimų skaičius.

Matavimo duomenų aritmetinio vidurkio vidutinė kvadratinė paklaida $\sigma_{\bar{x}}$ apskaičiuota pagal formulę:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (2.14)$$

Tuomet atskiro matavimo vidutinė kvadratinė paklaida skaičiuota pagal formulę:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.15)$$

Tyrimų rezultatams pavaizduoti naudojamos MS Office paketo Excel programa ir Golden Software programa Surfer (Hill and Lewicki 2006).

2.6. Antrojo skyriaus išvados

1. Vėjo jėgainių keliamo triukšmo matavimo metodika sudaryta vadovaujantis IEC 61400-11:2002 standartu bei Lietuvos higienos norma HN 33-2011 „Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje“. Matavimo vietos parenkamos remiantis žiedine matavimo vietų nustatymo metodika. Matavimo vietų koordinatės susiejamos su vėjo jėgainės vėjaračio skersmeniu. Parkų viduje išskiriamos matavimo vietos kuriose nustatomi didžiausias ir mažiausias garso slėgio lygiai, bei fluktuacijų periodai.

2. Triukšmo sklaida vėjo jėgainių parke matuota 6,3–3150 Hz dažnių ribose išskiriant žemų dažnių bei infragarso 6,3–200 Hz dažnių diapazoną. Matavimų metu netaikomos dažninės pataisos, naudojama Z dažninė charakteristika. Žemo dažnio garsas ir infragaras nagrinėjamas naudojant minimalius, ekvivalentinius ir maksimalius dydžius 6,3–31,5 Hz ir 31,5–200 Hz dažnių ribose.

3. Vėjo jėgainių triukšmo matavimo rezultatai apdoroti duomenų tinklelyje. Plane braižytas matavimo tinklelis jungiantis matavimo vietas. Matavimo tinklelio atkarpos išdėstytos išilgai ir statmenai vėjo kryptčiai.

4. Vėjo jėgainių parkų išorėje triukšmo matavimo vietos atidedamos pavėjui už parkų penkiose matavimo vietose kas 100 m. Nustatomos triukšmo fluktuacijos ir maksimalaus garso slėgio lygio vertės.

5. Aplinkai nekenksmingų medžiagų turinčių cilindrinę struktūrą garso izoliacijos rodiklis triukšmo slopinimo kameroje nustatyti remiantis tarptautiniu standartu ISO 12354. Žemų dažnių 6,3–50 Hz ribose garso izoliacijos rodiklis apskaičiuotas.

6. Triukšmo sklaida medžiagose ir aplinkoje modeliuota trimis modeliavimo programomis. Strati-Artz programa modeliuotas garso pokytis cilindrinę

struktūrą turinčiose medžiagose žemų dažnių srityje. CadnaA programa pritaikyta atskiro pastato elemento įtakos garso sklaidai pastato aplinkoje tyrimui. Comsol Multiphysics programa pritaikyta žemo dažnio triukšmo sklaidai vėjo jėgainių parke ir pastatuose modeliuoti.

Vėjo jėgainių triukšmo sklaidos ir mažinimo priemonių tyrimų bei modeliavimo rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami vėjo jėgainių triukšmo sklaidos ir jos mažinimo priemonių tyrimo bei modeliavimo rezultatai. Tyrimai atlikti vėjo jėgainių parkuose ir jų akustinio poveikio zonoje esančiuose pastatuose bei jų aplinkoje. Nustatyta triukšmo sklaida dviejų, keturių ir šešių vėjo jėgainių parkuose, įvertinant foninį triukšmą. Visų tyrimams pasirinktų parkų aplinkoje buvo gyvenamųjų pastatų, kurie nutolę 200–400 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių. Triukšmo slopinimo kameroje nustatyti aplinkai nekenksmingų medžiagų su cilindrine struktūra ir jų kompozicijų garso izoliacijos rodikliai. Atliktas tirtų medžiagų skaitinis žemų dažnių garso izoliacijos rodiklio modeliavimas. Vėjo jėgainių triukšmo sklaidos ir aplinkai nekenksmingų medžiagų akustinių savybių tyrimo rezultatai panaudoti sudarant triukšmo sklaidos skaitmeninį modelį. Įvertinta stogo karnizo įtaką triukšmo sklaidai pastato pastogėje bei pagalbinių patalpų įtaka triukšmo sklaidai pastate.

Skyriuje pateikta medžiaga buvo publikuojama 3 recenzuojamuose mokslo leidiniuose (Mažuolis ir Butkus 2010; Deveikytė ir kt. 2012; Eivienė ir kt. 2012)

bei 1 referuojamame, esančiame „ISI Web of Sciences“ duomenų bazėje, mokslo žurnale (Butkus et al. 2012).

3.1. Foninio triukšmo vėjo jėgainių parko aplinkoje tyrimo rezultatai

Griežpelkių vėjo jėgainių parke išmatuotas foninis triukšmas, kai vėjo jėgainių parkas buvo sustabdytas. Vyravo pietryčių vėjas, kurio vidutinis greitis buvo 6 m/s. Oro temperatūra kito nuo 10 iki 12 °C. Atskiruose taškuose matuoti garso slėgio lygiai ir vidutiniai vėjo greičiai.

Palyginus visų taškų ekvivalentinio garso slėgio lygius nustatyta, kad garso slėgio lygis yra didesnis tuose matavimo taškuose, kur vėjo greitis yra didesnis. Palyginus matavimo rezultatus matyt, kad žolės šlamėjimas turi įtakos, nes rezultatai skirtingose matavimo vietose skiriasi iki 5–11 dBZ (3.1 pav.).

3.1 pav. Ekvivalentinio garso slėgio lygiai matavimo taškuose neveikiant Griežpelkių vėjo jėgainių parkui

Fig. 3.1. Equivalent sound pressure levels in measurement points at inoperative Griežpelkiai wind park

1-oji matavimo vieta parinkta ant kalvos, kur nėra užuovėjos, todėl vėjo greitis atitiko dienos vidutinį greitį – 6 m/s. Didžiausias 6,3 Hz dažnio garso slėgio lygis 1-oje matavimo vietoje yra 62 dBZ. Didėjant dažniui garso slėgio lygis mažėja nuosekliai ir esant 200 Hz dažniui yra 26 dBZ.

2-oje, 3-oje ir 4-oje matavimo vietose pasirinktos tolstant nuo vėjo jėgainės, leidžiantis nuo šlaito. Už vėjo jėgainės nuokalnėje vėjo greičiai tolygiai mažėjo: 2-oje matavimo vietoje vėjo greitis – 6 m/s, 3-oje matavimo vietoje – 5 m/s, o 4-oje matavimo vietoje vėjo greitis sumažėjo iki 4 m/s. 2-oje, 3-oje, 4-oje matavimo vietose didžiausias garso slėgio lygis yra atitinkamai 58 dBZ, 55 dBZ ir 50 dBZ esant 6,3 Hz dažniui. Didėjant dažniui garso slėgio lygis mažėja nuosekliai ir esant 200 Hz dažniui 2-oje, 3-oje ir 4-oje matavimo vietose atitinkamai siekė 19 dBZ, 13 dBZ ir 11 dBZ. Didžiausias garso slėgio lygio skirtumas tarp 2-os, 3-os, 4-os matavimo vietų yra 80–125 Hz dažnių diapazone.

Veikiant vėjo jėgainių parkui, buvo atlikti pakartoti matavimai tose pačiose matavimo vietose. Vyravo pietryčių, 6 m/s vėjas. Oro temperatūra kito nuo 1416 °C iki 16 °C. Matavimų rezultatai pateikiami 3.2 ir 3.3 paveiksluose.

3.2 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės matavimo vietose veikiant Griežpelkių vėjo jėgainių parkui

Fig. 3.2. Maximum values of sound pressure levels at measurement points when Griežpelkiai wind farm is running

3.3 pav. Minimalaus garso slėgio lygio vertės matavimo vietose veikiant Griežpelkių vėjo jėgainių parkui

Fig. 3.3. Minimum values of sound pressure levels at measurement points when Griežpelkiai wind farm is running

Analizuojant minimalaus garso slėgio lygio vertės matavimo vietose veikiant Griežpelkių vėjo jėgainių parkui tyrimų rezultatus (3.3 pav.) matyt, kad vėjo greitis daro įtaką triukšmo formavimuisi. Matavimo metu aplinkoje esanti augaliija kelia triukšmą, kurio lygis kinta priklausomai nuo vėjo greičio. Atviroje vietovėje ant kalvos, kur vyraavo 6 m/s vėjo greitis, minimalus garso slėgio lygis buvo didesnis iki 14 dBZ. Tiek maksimalaus, tiek minimalaus garso slėgio lygio vertės 1-oje, 2-oje, 3-oje, bei 4-oje matavimo vietose mažėjo didėjant dažniui, tačiau 100–200 Hz dažnių ribose šis dėsniumas kinta. 3-oje matavimo vietoje šių dažnių ribose garso slėgio lygis padidėja 3 dB. Nagrinėjant maksimalaus garso slėgio lygio vertes infragarso srityje, t. y. iki 20 Hz dažnio, matyt, kad

atskiroje dažnių juostoje garso slėgio lygis skirtingose matavimo vietose skyrėsi iki 5 dB.

Matuojant triukšmo lygį abu kartus, kai vėjaračiai sukosi ar buvo sustabdytos, vėjo greitis nesiskyrė, o vidutinės temperatūros skirtumas sudarė iki 6 °C. 1-oje, -oje, 3-oje bei 4-oje matavimo vietose yra pavėjui už kalvos, jose vėjo greitis mažėja nuosekliai. Mažiausias vėjo greitis nuo vidutinio skyrėsi iki 2 m/s, todėl galima teigti, kad šiose vietose vėjas buvo negūsingas. 1-oje, 2-oje, 3-oje bei 4-oje matavimo vietose veikiant vėjo jėgainėms triukšmo lygis buvo didesnis 5–15 dBZ priklausomai nuo dažnio. Palyginus ekvivalentinio garso slėgio lygio vertes kai jėgainė buvo sustabdyta ir minimalaus garso slėgio lygio vertes kai jėgainė veikė nustatyta, kad garso slėgio lygio skirtumas 6,3–200 Hz dažnių ribose siekė iki 20 dBZ priklausomai nuo matavimo vietos (3.4 pav.).

3.4 pav. 6,3–200 Hz dažnio ir vidutinio garso slėgio lygio verčių skirtumas, matuojant sustabdytame ir veikiančiame vėjo jėgainių parke

Fig. 3.4. Difference of sound pressure level values in frequency range from 6.3 Hz to 200 Hz, measured in suspended and operating wind turbines in the wind park

Garso slėgio lygių skirtumas iki 100 Hz ribos neviršija 5 dB, o skirtumo vidurkis yra 3 dB. Ties 200 Hz riba garso slėgio lygio skirtumas padidėja iki 20 dB. Iš čia seka išvada, kad 6,3–100 Hz dažnių ribose, mažiausios garso slėgio lygio vertės nustatytos prie veikiančios vėjo jėgainės atitinka vėjo jėgainių parko foninį triukšmą su vidutine 3 dB paklaida. 100–200 Hz dažnių minimalų garso slėgio lygį galima apibūdinti kaip foninį, jeigu minimalios garso slėgio vertės buvo nustatomos matavimo vietose, nutolusiose iki 50 m atstu nuo vėjo jėgainės. 200 Hz dažnio maksimalaus garso slėgio lygio verčių skirtumas, matuojant sustabdytam ir veikiančiam vėjo jėgainių parkui 1 matavimo vietoje siekė 7 dB. Šiuo atveju 50 m atstumu nuo jėgainės buvo matuota akustinio šešėlio zonoje. Nustatant foninį triukšmą minimalų garso slėgio lygį virš 100 Hz dažnio reiktų matuoti akustinio šešėlio zonoje.

Dauguma mokslininkų tiriančių vėjo jėgainių triukšmo sklaidą, foninį triukšmą nustato remdamiesi procentilėmis L₉₀ (Kamperman and James 2008). Šio tyrimo metu nustatyta, kad L_{min} taip pat yra tinkamas dydis nustatant foninį triukšmą vėjo jėgainių parkuose, ypač žemų dažnių srityje. Jeigu $L_{maks} > L_{min} + 20 \text{ dBZ}$, tuomet foninis triukšmas daro mažą įtaką bendram triukšmui vėjo jėgainių parke.

3.2. Triukšmo sklaidos vėjo jėgainių parkų viduje tyrimo rezultatai

Dviejų vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos tyrimo metu pūtė pietryčių vėjas, kurio greitis 6 m/s, gūsiai siekė iki 11 m/s. Oro temperatūra kito 7–11°C ribose.

Tyrimo metu didžiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės vėjo jėgainių parke nustatytos 112 matavimo vietoje, mažiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės – 248 matavimo vietoje. Ekvivalentinis garso slėgio lygis parko viduje 248 matavimo vietoje kito tolygiai, kuo mažesnis tiriamasis garso dažnis, tuo nustatomos didesnės garso slėgio lygio vertės. Šioje matavimo vietoje ekvivalentinio garso slėgio lygis infragarso srityje (6,3–20 Hz) kito nuo 71 dBZ iki 79 dBZ, žemų dažnių srityje (25–200 Hz) kito nuo 57 dBZ iki 71 dBZ, vidutinių dažnių srityje (250–1000 Hz) kito nuo 45 dBZ iki 55 dBZ, aukštų dažnių srityje (1250–3150 Hz) kito nuo 36 dBZ iki 41 dBZ. 112 matavimo vietoje didžiausias garso slėgio lygis 95 dBZ nustatytas esant 6.3 Hz dažniui, mažiausios vertės 46–7 dBZ nustatytos 1000–3150 Hz dažnių ribose. 500 Hz dažnio triukšmas abiejose matavimo vietose sutampa paklaidų ribose ir siekia 50 dBZ. 112 ir 248 matavimo vietose nustatyto ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės ir triukšmo fliktuacijų kaita 30 s intervale pateikta 3.5 ir 3.6 paveiksluose.

3.5 pav. Ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės 112 ir 248 matavimo vietose
Fig. 3.5. Equivalent ground pressure values in 112 and 248 measurement points

112 matavimo vietoje nustatyto ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės, sveikos oktavos dažniuose, žemų dažnių srityje (6,3, 12,5, 25 ir 50 Hz) yra 1–6 dBZ didesnės nei ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės nustatytos gretimuose 1/3 oktavos dažniuose. 248 matavimo vietoje tokia garso slėgio lygio verčių kaita yra 6,3–25 Hz dažnių ribose, tačiau skirtumas yra mažesnis, 1–3 dBZ. 40–63 Hz dažnių ribose ekvivalentinis garso slėgio lygis padidėjęs, šį pokytį gali lemti galinės mentės briaunos sukurta oro srauto turbulencija.

Išmatavus ekvivalentinio garso slėgio lygio kaitą 112 ir 248 matavimo vietose buvo nustatyti vidutiniai intervalai tarp triukšmo smailių. Iš 3.5 paveikslą matyti, kad vėjo jėgainės generuoja netolygų, fliktuojantį triukšmą. Matuojant garso slėgio lygį aplinkoje svarbu nustatyti vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo pobūdį ir kaip aplinkos triukšmas daro įtaką matavimų rezultatams. Triukšmas, kurio lygio pokytis didesnis kaip 5 dB ir nuolat kinta, pertrūksta arba

pulsuoja vadinamas nepastoviu triukšmu. Arti vėjo jėgainės triukšmas ne tik didesnis bet ir jo fliuktuacijos intensyvesnės.

112 matavimo vietoje laiko tarpas tarp garso smailių – 1,4 s, o 248 matavimo vietoje 1,0 s. 248 matavimo vietoje išskirti galima 7–14 s intervalą, kuomet garso slėgio lygio verčių skirtumas buvo 2 kartus mažesnis nei 112 matavimo vietoje, o fliuktuacijos dažnos iki 0,7 s. Galima daryti išvada, kad šiuo matavimo momentu triukšmo vertės lėmė abi vėjo jėgainės kurių sukimosi dažnis nesutapo; ekvivalentinis garso slėgio lygis šio laiko tarpu yra didesnis, tačiau fliuktuacijos ne tokios intensyvios.

3.6 pav. Triukšmo fliuktuacijų kaita 30 s intervale 112 ir 248 matavimo vietose

Fig. 3.6. Noise fluctuations change in time range of 30 s in 112 and 248 measuring points

6,3–31,5 Hz 1/3 oktavos vidutinių geometrinių dažnių maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ A, B ir C matavimo tiesėse (2.4 pav.) pateikiami 3.7 paveiksle.

3.7 pav. Maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ribose, A, B ir C matavimo tiesėse

Fig. 3.7. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in A, B and C measurement lines

Iš 3.7 paveiklslo matyt, kad matavimo tiesēje A (2.4 pav.) minimalaus garso slēgio lygio vērtēs 6,3–31,5 Hz dažņiū ribose mažāusios buvo priēš vējo jēgainiū parkā ir uū jo 5-iū vējaraēiū atstumu, didāzāusios $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{min(6,3-31,5)}$ vērtēs 85–87 dBZ nustatyto vējo jēgainiū parke vieno – divējū vējaraēiū atstumu nuo vējo jēgainiū. Maksimālūs garso slēgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažņiū ribose mažāusi buvo 248 matavimo vietojē – vējo jēgainiū parko geometriniame centrē, āia $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ sēkē 85 dBZ. 248 matavimo vietojē $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{min(6,3-31,5)}$ buvo iki 10 dB mažēsni nei gretimose matavimo vietosē. Ši matavimo vieta nutolusi nuo antrosios vējo jēgainēs uū 4 vējaraēio skersmēnū, o nuo pirmosios vējo jēgainēs uū 6 vējaraēio skersmēnū. Ekvivalentinis garso slēgio lygis 6,3–31,5 Hz dažņiū ribosē šiojē vietojē sumāžēja dēl garso sugērties atmosfērojē.

B ir C matavimo tiesēs yra statmēnos vējo kryptāiai. $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{min(6,3-31,5)}$ garso slēgio lygio vērtēs šiosē matavimo tiesēsē mažējo tolstant nuo vējo jēgainiū. Mažāusios $LZF_{min(6,3-31,5)}$ vērtēs nustatyto 5 vējaraēiū atstumu nuo vējo jēgainiū ir sēkē 68–71 dBZ. 68 dBZ $LZF_{min(6,3-31,5)}$ vērtē nustatyta 252 matavimo vietojē. Ši matavimo vieta yra priē lapuoēiū miško. Matavimo metu medāiai buvo numetē lapus, todēl foniniam triukšmū ītakos nedarē, o 2–3 dB slopino triukšmā sklidantī nuo vējo jēgainēs. Didāzāusios $LZF_{min(6,3-31,5)}$ vērtēs nustatyto priē vējo jēgainiū ir sēkē 80–82 dBZ.

1 ir 2 matavimo viētos yra priē vējo jēgainiū, taēiau $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ skiriasi iki 10 dB. 116 ir 216 $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ garso slēgio lygio vērtēs sutampa bei sēkia 93 dBZ, 112 ir 212 matavimo vietosē nustatyto 100–95 dBZ vērtēs. Uū 2-osios vējo jēgainēs oro srautas yra susukamas ir 1-osios vējo jēgainēs mēntēs veikia sūkuringas vējas. Vējo kryptis jēgainiū parke nuolat kinta, o vējo jēgainēs gondola su vējaraēiū yra atītinkamai pasukami.

Akustinio šēšēlio zona yra aplink bokštā, o ryškāusia po mēntēmīs. Net pasirinkus pas paēias matavimo viētas, vienodu atstumu nutolusias nuo jēgainiū, galima nustatyti skirtingus garso slēgio lygius, nes jēgainiū padētis gali būti jau pakitusi.

6,3–31,5 Hz dažņiū ribosē skirtumas tarp maksimālāus ir minimalāus garso slēgio lygiū vērēiū nevīrāija 19 dB. Galima daryti īšvadā, kad foninis vējo jēgainiū parko triukšmas darē mažā poveikī tik 112 ir 118 matavimo vietosē, kur šīs skirtumas buvo didāzāusias ir sēkē 15–19 dB.

Maksimālūs ir minimālūs 31,5–200 Hz vidutiniū geometriniū dažņiū garso slēgio lygiai $LZF_{maks(31,5-200)}$ ir $LZF_{min(31,5-200)}$ A, B, ir C matavimo tiesēsē (2.9 pav.) pateikiami 3.8 paveikslē.

3.8 pav. Maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai 31,5–200 Hz dažnių ribose, A, B ir C matavimo tiesėse

Fig. 3.8. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in A, B and C measurement lines

Žemų, 31,5–200 Hz, dažnių ribose vėjo jėgainių parko foninio triukšmo lygis kinta chaotiškai ir tendencija neatitinka 6,3–31,5 dažnių garso slėgio lygio kaitos. $LZF_{\min(31,5-200)}$ kinta nuo 60 iki 81 dBZ. Minimalaus 31,5–200 Hz dažnių garso slėgio lygio vertės nustatytos prie vėjo jėgainių ir geometriniame vėjo jėgainių parko centre yra mažiausios. 1, 2 ir 248 $LZF_{\max(31,5-200)}$ nustatytos 70–82 dBZ garso slėgio lygio vertės. Didžiausios $LZF_{\max(31,5-200)}$ vertės nustatytos pirmuose vėjo jėgainių matavimo žieduose, t. y. 116, 216, 212, 118, 114, ir 214 matavimo vietose. Pirmuose matavimo žieduose $LZF_{\max(31,5-200)}$ kito 82–95 dBZ ribose.

Iš 3.7 ir 3.8 paveikslų matyti, kad A matavimo tiesėje garsas sklinda netolygiai. Prie vėjo jėgainių fiksuojamas mažesnis garso slėgio lygis, nes čia susidaro akustinio šešėlio zonos, 2–3 vėjaračių skersmenų atstumu nustatytos didžiausios garso slėgio lygio vertės, o tolstant toliau nuo vėjo jėgainių garso slėgio lygio vertės mažėja.

Dviejų vėjo jėgainių parko 6,3–200 Hz dažnių triukšmo sklaidos tyrimo rezultatai pateikiami 3.9 paveiksle.

3.9 pav. Ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės 6,3–200 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose

Fig. 3.9. Equivalent sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 200 Hz

Ekvivalentinis garso slėgio lygis 6,3–200 Hz dažnių ribose $LZF_{eq(6,3-31,5)}$ kito nuo 74 dB iki 89 dB. Po vėjo jėgainių mentėmis susidaro akustinis šešėlis, todėl 112, 116, 212 ir 216 matavimo vietose garso slėgio lygis yra iki 5 dB mažesnis negu 114, 118, 218 ir 214 matavimo vietose. Nuo antros vėjo jėgainės sklindančio garso slėgio lygis 218 bei 228 matavimo vietose yra iki 10 dB didesnis negu 214 ir 224 matavimo vietose (3.8 pav.). T. y. prie antros vėjo jėgainės pavėjui garso slėgio lygis yra didesnis negu prieš vėją, tuo tarpu prie pirmos vėjo jėgainės matavimo vietose prieš vėją ir pavėjui garso slėgio lygis kinta nedaug, iki 1 dB. Tokią skirtingą garso slėgio lygio kaitą vienodų vėjo jėgainių aplinkoje galėjo nulemti gretimai antrajai vėjo jėgainei esantis miškas, kuris darė įtaką vėjo greičiui. 144 bei 248 matavimo vietose nustatytam triukšmui įtaką darė abi vėjo jėgainės. Vėjo jėgainių parke trys matavimo vietos, 211, 221, 231 yra lapuočių miške. Matavimo metu lapuočiai medžiai buvo numetę lapus. Šiose matavimo vietose žemo dažnio, 6,3–200 Hz, triukšmas kito nedaug, iki 3 dBZ, lyginant su kitose matavimo vietose (atitolusiose tokiu pačiu atstumu nuo vėjo jėgainių) nustatytu ekvivalentiniu garso slėgio lygiu 6,3–200 Hz dažnių ribose. 31,5–200 Hz dažnio ekvivalentinis garso slėgio lygis šiose vietose buvo mažesnis iki 7 dBZ.

Ekvivalentinis garso slėgio lygis 6,3–200 Hz dažnių ribose prie pirmosios vėjo jėgainės vieno vėjaračio skersmens atstumu yra iki 5 dB didesnis negu prie pirmosios vėjo jėgainės. T. y. VJ2 vėjo jėgainės triukšmas daro įtaką VJ1 vėjo jėgainės akustinio šešėlio garso slėgio lygio vertėms. Atstumas tarp vėjo jėgainių yra sąlyginai didelis – 700 metrų, todėl parke garso slėgio lygis žemų dažnių ribose nėra didesnis negu išorėje tuo pačiu atstumu. Tyrimo metu vyravo pietryčių vėjas, todėl mentės kilo pietvakarių pusėje, o leidosi šiaurės rytų pusėje. Iš triukšmo žemėlapių matyt, kad prie vėjo jėgainių pietvakarinėje pusėje garso slėgio lygis yra iki 5 dB mažesnis negu šiaurės rytų pusėje.

Akustinio šešėlio zonoje garso slėgio lygio verčių po mentėmis skirtumui įtaką gali daryti Doplerio efektas. Jeigu atstumas tarp klausytojo ir garso šaltinio mažėja, tai bangos frontai sutankėja – girdimas garsas yra aukštesnio dažnio negu šaltinio iš tikrųjų skleidžiamas garsas. Jei šis atstumas didėja, tai bangos frontai reti ir girdimas žemesnio dažnio garsas. Oru sklindančių garso bangų stebėjimo dažnio f' sąryšis su šaltinio dažniu f nusakomas taip:

$$f' = \left(\frac{c}{c \pm v_s} \right) f, \quad (3.1)$$

čia: c – garso bangų sklaidimo greitis ore, m/s, v_s – garsą skleidžiančio objekto greitis, m/s. Šaltinio greitis aplinkos atžvilgiu neigiamas šaltiniui artėjant prie stebėtojo, teigiamas jam tolstant.

Vėjo jėgainių menčių greičio gamintojas nenurodo, tačiau pateikia apsisukimų skaičių per minutę. Enercon E-82 vėjo jėgainėms nurodomas 6–18 aps./min sūkių dažnis. Skirtingose mentės vietose tuo pačiu metu yra fiksuojamas skirtingas greitis. Iš literatūros šaltinių žinoma, kad žemo dažnio triukšmą iki 400 Hz skleidžia kraštinė mentės dalis, šiuo atveju 30 m nuo gondolos. Mentei apsisukant 6 kartus per minutę gaunamas 19 m/s 30 m nuo gondolos nutolusios mentės dalies greitis. Įsistačius duomenis į (3.1) formulę, 8 Hz dažnio garsas mentei artėjant prie bokšto bus fiksuojamas kaip 8,5 Hz, o tolstant kaip 7,5 Hz dažnio garsas. Iš atliktų tyrimų žinoma, kad vėjo jėgainės skleidžiamo garso slėgio lygio vertės didesnis esant mažesniems dažniams. 6,3 Hz ir 10 Hz dažnių garso slėgio lygio vertės skiriasi 7 dB (3.5 pav.), tuomet interpoliavus gaunama, kad 8,5 Hz ir 7,5 Hz dažnių garso slėgio lygio verčių skirtumas siekia 2 dB. Doplerio efektas gali būti stebimas tik arti vėjo jėgainės, kai mentės stebėtojo atžvilgiu leidžiasi bei kyla, tačiau tolstant nuo vėjo jėgainės ji fiksuojama kaip taškinis triukšmo šaltinis.

Dviejų vėjo jėgainių parko triukšmo sklaida buvo tirama ir esant negūsingam 6 m/s šiaurės vakarų vėjo greičiui, kai gūsiai siekė 8 m/s. Oro temperatūra kito 10–15 °C ribose.

6,3–31,5 Hz vidutinių geometrinių dažnių maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ A, B ir C matavimo tiesėse (2.9 pav.) pateikiami 3.10 paveiksle. Matavimo tiesėje A minimalaus garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ribose mažiausi buvo 5-ųjų vėjaračių atstumu nuo vėjo jėgainių ir siekė 43 dBZ. Didžiausios $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ vertės, 73 dBZ, nustatytos prie vėjo jėgainių. Maksimalaus ir minimalaus garso slėgio lygio vertės 6,3–31,5 Hz dažnių ribose mažiausios buvo 248 matavimo vietoje – vėjo jėgainių parko geometriniame centre, čia $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ siekė 48 dBZ. $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ garso slėgio lygio vertės B ir C matavimo tiesėse mažėjo tolstant nuo vėjo jėgainių. Mažiausios $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ vertės nustatytos 5 vėjaračių atstumu nuo vėjo jėgainių ir siekė 48 dBZ. Mažiausios $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ vertės nustatytos taip pat 5 vėjaračių atstumu nuo vėjo jėgainių ir siekė 58 dBZ. Matavimo metu medžiai buvo numetę lapus, todėl foniniam triukšmui įtakos nedarė. Palyginus tyrimų rezultatus, kai pūtė gūsingas, iki 11 m/s ir negūsingas, iki 8 m/s vėjas matyt, kad triukšmas abiem atvejais didesnis prie vėjo jėgainių, o tolstant nuo jų triukšmo vertės mažėja. Pučiant negūsingam vėjui triukšmo vertės yra iki 25 dB mažesnės, tačiau akustinio šešėlio zonos vieno vėjaračio atstumu nuo vėjo jėgainių išlieka. Kaip ir pirmojo tyrimo metu, po kylančiomis mentėmis fiksuojamas iki 4 dB mažesnis garso slėgio lygis nei po besileidžiančiomis.

3.10 pav. Maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ribose, A, B ir C matavimo tiesėse

Fig. 3.10. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in A, B and C measurement lines

31,5–200 Hz vidutinių geometrinių dažnių maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai $LZF_{maks(31,5-200)}$ ir $LZF_{min(31,5-200)}$ A, B, ir C matavimo tiesėse (2.4 pav.) pateikiami 3.11 paveiksle.

3.11 pav. Maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai 31,5–200 Hz dažnių ribose, A, B ir C matavimo tiesėse

Fig. 3.11. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in A, B and C measurement lines

Žemų, 31,5–200 Hz, dažnių ribose vėjo jėgainių parko foninio triukšmo lygio kaita atitinka 6,3–31,5 dažnių garso slėgio lygio kaitą. $LZF_{\min(31,5-200)}$ kinta nuo 44 iki 58 dBZ. 1/3 oktavos vidutinių geometrinių dažnių minimalaus garso slėgio lygio vertės 31,5–200 Hz dažnių ribose nustatytos prie vėjo jėgainių ir geometriniame vėjo jėgainių parko centre yra mažiausios. 1 ir 2 matavimo vietose $LZF_{\max(31,5-200)}$ nustatytos 65–67 dBZ garso slėgio lygio vertės.

Ekvivalentinio garso slėgio lygio fluktuacijos kito analogiškai kaip ir pirmo matavimo metu. Prie pirmosios vėjo jėgainės laiko tarpas tarp garso smailių – 1,2 s, o 144 matavimo vietoje 0,5 s. 144 matavimo vietoje triukšmo vertėms įtaką darė abi vėjo jėgainės.

Keturių vėjo jėgainių parko triukšmo tyrimai buvo atlikti šiltuoju metu laiku, kai oro temperatūra +17°C, vyravo pietvakarių vėjas, kurio greitis – 6 m/s.

Tyrimo metu didžiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės vėjo jėgainių parke nustatytos 2, 3 ir 4 matavimo vietose, prie vėjo jėgainių, mažiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės – 412 matavimo vietoje. 3 ir 412 matavimo vietose nustatytos ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės ir triukšmo fluktuacijų kaita 30 s intervale pateikta 3.12 ir 3.13 paveiksluose.

3.12 pav. Ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės 412 ir 3 matavimo vietose

Fig. 3.12. Equivalent sound pressure values in 412 and 3 measurement points

Kaip matyt iš 3.12 paveikslo kuo mažesnis tiriamasis garso dažnis, tuo nustatomos didesnės ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės. 412 matavimo

vietoje ekvivalentinis garso slėgio lygis infragarso srityje vyravo 80 dBZ, žemų dažnių srityje kito nuo 70 dBZ iki 80 dBZ, vidutinių dažnių srityje kito nuo 55 dBZ iki 70 dBZ, aukštų dažnių srityje kito nuo 45 dBZ iki 52 dBZ. 3 matavimo vietoje didžiausias ekvivalentinis garso slėgio lygis 98 dBZ nustatytas infragarso srityje, mažiausios vertės 48–50 dBZ nustatytos 1000–3150 Hz dažnių ribose. 500 Hz dažnio triukšmas abiejose matavimo vietose sutampa paklaidų ribose ir siekia 60 dBZ. 412 matavimo vietoje ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės 63–1600 Hz dažnių ribose yra iki 4 dB didesnės nei 3 matavimo vietoje. 3-oje matavimo vietoje 10–25 Hz dažnių ribose garso slėgio lygis sukuriama mentei kertant prieš bokštą susidariusį turbulentinį oro srautą.

Išmatavus ekvivalentinio garso slėgio lygio fluktuacijas 412 ir 3 matavimo vietose buvo nustatyti vidutiniai intervalai tarp triukšmo smailių (3.13 pav.).

3.13 pav. Triukšmo fluktuacijų kaita 30 s intervale 3 ir 412 matavimo vietose
Fig. 3.13. Noise fluctuations change in time range of 30 s in 3 and 412 measuring points

3 matavimo vieta yra prie vėjo jėgainės, todėl triukšmo kaitai didžiausią įtaką darė ši jėgainė, tačiau gretimų jėgainių triukšmas taip pat buvo fiksuojamas. 12–19 s intervale laiko tarpas tarp fluktuacijų smailių buvo 1,25 s, o 1–10 s intervale fluktuacijos dažnesnės ir garso pokytis mažesnis. Tikėtina, kad šiuo metu gretimų vėjo jėgainių mečių sukimosi dažnis nesutapo ir taip buvo slopinamos triukšmo fluktuacijos. 412 matavimo vietoje fluktuacijų dažnis

buvo 0,6 s. Šioje matavimo vietoje triukšmo sklaidai didžiausią įtaką darė 3-čia ir 4-ta vėjo jėgainės. Jėgainių sukimosi dažnis nesutapo todėl ir fliktuacijos yra 2 kartus dažnesnės nei prie vienos vėjo jėgainės.

Minimalaus ir maksimalaus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygio vertės A, D ir G matavimo atkarpose pateikiamos 3.14 ir 3.15 paveiksluose. Šiose matavimo atkarpose nustatyto garso slėgio lygio vertės geriausiai atspindi triukšmo sklaidą parko viduje ir išorėje prieš parką ir už jo vėjo krypties atžvilgiu. Matavimo vietos pateiktos 2.7 paveiksle.

3.14 pav. Maksimalus ir minimalus garso slėgio lygis 6,3–31,5 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose A, D, G matavimo atkarpose

Fig. 3.14. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in A, D and G measurement sections

Apskaičiavus minimalų garso slėgio lygį 6,3–31,5 Hz dažnių ribose, matyt, kad vėjo jėgainių parko A matavimo atkarpoje garso slėgio lygis kito nuo 82 dBZ iki 87 dBZ, D matavimo atkarpoje kito nuo 78 dBZ iki 84 dBZ ir G matavimo atkarpoje kito nuo 80 dBZ iki 84 dBZ. Maksimalus garso slėgio lygis 6,3–31,5 Hz dažnių ribose, A matavimo atkarpoje kito nuo 96 dBZ iki 102 dBZ, D matavimo atkarpoje kito nuo 90 dBZ iki 106 dBZ ir G matavimo atkarpoje kito nuo 90 dBZ iki 100 dBZ. Palyginus rezultatus A ir G matavimo atkarpose matyt, kad $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ už vėjo jėgainių parko yra iki 2 dB didesnis negu prieš vėjo jėgainių parką, tuo tarpu $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ iki 11 dB didesnis. Didžiausios

$LZF_{\min(6,3-31,5)}$ vertės D matavimo atkarpoje nustatytos 138, 1, 3 ir tarpinėje 3–4 matavimo vietose, t. y. vėjo jėgainių parko pakraštyje, prie vėjo jėgainės ir per vidurį, tarp trečios ir ketvirtos vėjo jėgainės. Nustatomam foniniam garso slėgio lygiui vėjo jėgainės nedarė įtakos. Didžiausios $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ vertės D matavimo atkarpoje nustatytos prie vėjo jėgainių 1, 2, 3 ir 4 matavimo vietose ir siekė 105 dBZ.

Triukšmo sklaidą 6,3–31,5 Hz dažnių ribose prieš vėjo jėgainių parką ir už jo lygiagrečiai vėjo kryptčiai atspindi H, I, J, K matavimo atkarpose nustatytos maksimalaus ir minimalaus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygio vertės (3.15 pav.).

3.15 pav. Maksimalus ir minimalus garso slėgio lygis 6,3–31,5 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose H, I, J, K matavimo atkarpose

Fig 3.15. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in H, I, J and K measurement sections

H, I, J, K matavimo atkarpose (2.7 pav.) minimalaus 6,3–31,5 Hz vidutinių geometrinių dažnių garso slėgio lygiai kito 75–89 dBZ ribose. I ir J matavimo atkarpose $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ už vėjo jėgainių yra iki 10 dBZ didesnis negu prieš vėjo jėgaines, galima būtų daryti išvadą, kad vėjo jėgainės daro įtaką foniniam triukšmui, tačiau už H ir K vėjo jėgainių $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ garso slėgio lygis nedidesnis nei prieš vėjo jėgaines. Didesnis foninis garso slėgio lygis galėjo būti užfiksuotas dėl nepastovaus vėjo greičio. $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ vertės, skirtingai negu

$LZF_{\min(6,3-31,5)}$, už vėjo jėgainių parko buvo didesnės visų keturių vėjo jėgainių atžvilgiu. Prie vėjo jėgainių ir už jų maksimalus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygis buvo didesnis iki 15 dBZ, negu prieš vėjo jėgaines. Garsas prieš vėją sklinda lėčiau negu pavėjui ne tik dėl garso ir vėjo greičių vektorių sumos, bet ir dėl garso bangų užlinkimo. Vėjo jėgainių parko skleidžiamo maksimalaus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygio žemėlapis pateikiamas 3.16 paveiksle.

3.16 pav. 6,3–31,5 Hz dažnių maksimalaus garso slėgio lygio Rūdaičių vėjo jėgainių parke žemėlapis

Fig. 3.16. Map of the maximum sound pressure level in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz at Rūdaičiai wind park

Vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos žemėlapyje (3.16 pav.) matyt, kad tarp vėjo jėgainių maksimalaus garso slėgio lygio vertės yra mažesnės negu už vėjo jėgainių. $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ skirtumas gali siekti iki 10 dB. Pučiant pietvakarių vėjui jėgainių vėjaračiai pasukami ir yra lygiagretūs centrinei vėjo jėgainių parko ašiai, kuri sutampa su G matavimo atkarpa. Po vėjo jėgainių mentėmis susidaręs akustinis šešėlis nulemia mažesnę garso slėgio lygį parko centre, o vėjo kryptis – didesnę triukšmo lygį už vėjo jėgainių parko pavėjui. Jeigu vėjo jėgainių vėjaračiai būtų pasisukę statmenai G matavimo atkarpai, tai akustinis

šešėlis didžiausią įtaką darytų C ir E matavimo atkarpose, o tarp vėjo jėgainių būtų fiksuojamas didesnis garso slėgio lygis negu pastarajame tyrime.

Maksimalaus ir minimalaus garso slėgio lygio 31,5–200 Hz dažnių ribose, vertės kinta analogiškai kaip ir 6,3–31,5 Hz dažnių ribose. Išskiriamos turėtų būti 1, 2, 3 ir 4 matavimo vietos (3.17 pav.).

3.17 pav. Maksimalus ir minimalus garso slėgio lygis 31,5–200 Hz vidutinių geometrinėlių dažnių ribose A, D, G matavimo atkarpose

Fig. 3.17. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in A, D and G measurement sections

Iš 3.17 paveikslo matyt, kad didžiausios $LZF_{\min(31,5-200)}$ vertės užfiksuotos prie vėjo jėgainių. Galima daryti išvadą, kad 31,5–200 Hz dažnių diapazone vėjo jėgainės daro įtaką minimaliems garso slėgio lygiams. Tačiau atsižvelgiant į paklaidų ribas matyt, kad 2-3 matavimo vietoje viršutinė paklaidų riba sutampa su 2 matavimo vietos apatine paklaidos riba. Atsižvelgiant į vienos vėjo jėgainės foninio triukšmo tyrimus (3.4 pav.) žinoma, kad 100–200 Hz dažnių ribose galimos didesnės paklaidos nei 6,3–100 Hz ribose.

$LZF_{\max(31,5-200)}$ ir $LZF_{\min(31,5-200)}$ skirtumas yra ≥ 20 dB, todėl foninis garso slėgio lygis daro labai mažą įtaką vėjo jėgainių parke susidarančiam triukšmui. 31,5–200 Hz dažnių maksimalaus garso slėgio lygio vertės atitinka foninio ir vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo sumą, kinta 85–95 dBZ ribose. Apžvelgus A, D ir G matavimo atkarpas matyt, kad $LZF_{\min(31,5-200)}$ Hz dažnių ribose 1, 2, 3 ir 4 matavimo vietose yra iki 5 dB didesnis negu gretimose matavimo vietose. Žiūrint į H, I, J, ir K matavimo atkarpas matyt (3.18 pav.), kad prie vėjo jėgainių nustatytas $LZF_{\min(31,5-200)}$ garso slėgio lygis dažniausiai yra 1–2 dB didesnis, negu gretimose matavimo vietose.

3.18 pav. Maksimalus ir minimalus garso slėgio lygis 31,5–200 Hz vidutinių geometrinųjų dažnių ribose H, I, J, K matavimo atkarpose

Fig. 3.18. Maximum and minimum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in H, I, J and K measurement sections

Lyginant su $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertėmis, $LZF_{maks(31,5-200)}$ garso slėgio lygis už vėjo jėgainių parko nėra didesnis negu prieš vėjo jėgainių parką. Lyginant pirmųjų matavimo žiedų triukšmo sklaidos duomenis matyt, kad akustinio šešėlio zonose garso slėgio lygis yra 5 dB mažesnis negu matavimo vietos prieš vėjo jėgainę ar už jos.

Iš atliktų triukšmo sklaidos tyrimų Rūdaičių vėjo jėgainių parke matyt, kad garso slėgio lygio vertės parke prieš vėjo jėgaines yra iki 15 dB mažesnės negu už vėjo jėgainių. Tyrimų metu pūtė pietvakarių vėjas, o sukdamosi mentės kilo šiaurės vakaruose, bei leidosi pietryčiuose. Prie antros ir trečios vėjo jėgainių po kylančiom mentėm žemų dažnių garso slėgio lygis iki 10 dB buvo mažesni negu po mentėmis kurios leidosi. Prie išorinių vėjo jėgainių garso slėgio lygio verčių kaitą nulėmė reljefo nelygumai bei augalija.

Palyginus dviejų vėjo jėgainių ir keturių vėjo jėgainių parkų triukšmo sklaidos žemėlapius matyt, kad dviejų vėjo jėgainių parke didesnės garso slėgio lygio vertės nustatytos išilgai parko centrinėje matavimo vietų tiesėje, o keturių vėjo jėgainių parke didesnės garso slėgio lygio vertės nustatytos statmenai pagrindinei ašiai pavėjui už vėjo jėgainių išsidėsčiusiose matavimo vietose. Ši skirtumą nulemia vėjo kryptis vyraavusi tyrimų metu.

Siekiant nustatyti foninį triukšmo lygį triukšmomačio mikrofonas turėtų būti statomas po vėjaračiu, 0,5–1 mentės atstumu nuo vėjo jėgainės bokšto. Šioje

vietoje susidaro akustinio šešėlio zona, kurioje vėjo jėgainė garo mažiausią įtaką minimalaus garso slėgio lygiui. Vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo lygis turi būti matuojamas statant mikrofoną statmenai vėjaračiui, atstumas nuo vėjo jėgainės turėtų atitikti mentės ilgį. Šiose matavimo vietose nustatytas triukšmo lygis atitinka dviejų vėjo jėgainių triukšmo lygių sumą. Atliekant tyrimą geriausia nustatyti vienos vėjo jėgainės skleidžiamo triukšmo lygį. Remiantis vienos jėgainės duomenimis, panaudojant juos skaitmeninio modelio sudarymui, galima prognozuoti viso parko triukšmo sklaidą. Žemo dažnio garso akustinio šešėlio zoną, remiantis keliais matavimais, nustatyti sunku, todėl geriausia atlikti išsamų tyrimą ir remiantis triukšmo žemėlapiu atrinkti matavimo vietas kuriose garso slėgio lygis buvo mažiausias bei didžiausias.

Šešių vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos tyrimai atlikti du kartus. Pirmojo matavimo metu vyravo Š – ŠR vėjas, kurio vidutinis greitis buvo 6 m/s, o gūsiai siekė 9 m/s, matavimo temperatūra + 15 °C. Antrojo matavimo metu vyravo P–PV vėjas, kurio vidutinis greitis buvo 6 m/s, o gūsiai siekė 8 m/s, matavimo temperatūra +18 °C.

Tyrimo metu didžiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės vėjo jėgainių parke nustatytos 1-2 matavimo vietoje, tarp pirmos ir antros vėjo jėgainių, mažiausios ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės – 118 matavimo vietoje. 3 ir 412 matavimo vietose nustatyto ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės ir triukšmo fliktuacijų kaita 30 s intervale pateikta 3.19 ir 3.20 paveiksluose.

3.19 pav. Ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės 1-2 ir 118 matavimo vietose

Fig. 3.19. Equivalent sound pressure level values in 1-2 ir 118 measuring points

Kaip dviejų bei keturių vėjo jėgainių parkuose, taip ir šešių vėjo jėgainių parke kuo mažesnis tiriamasis garso dažnis, tuo nustatomos didesnės garso slėgio lygio vertės. Vėjo jėgainių parko viduje mažiausios ir didžiausios triukšmo vertės vidutiniškai skiriasi 3 dB. 200–400 Hz dažnių ribose 118 matavimo vietoje triukšmo vertės iki 4 dB didesnės nei 1-2 matavimo vietoje. Abi matavimo vietos yra tarp jėgainių todėl garso lygio kaita sutampa. 1-2 ir 118 matavimo vietose garso slėgio lygis infragarso srityje vyravo 56–61 dBZ ribose, žemų dažnių srityje kito nuo 34 dBZ iki 59 dBZ, vidutinių dažnių srityje kito nuo 18 dBZ iki 33 dBZ, aukštų dažnių srityje kito nuo 15 dBZ iki 18 dBZ.

Išmatavus garso slėgio lygio fliktuacijas 1-2 ir 118 matavimo vietose buvo nustatyti vidutiniai intervalai tarp triukšmo smailių (3.20 pav.).

3.20 pav. Triukšmo pokytis 1-2 ir 118 matavimo vietoje
Fig. 3.20. Change of noise at 1-2nd and 118th measuring point

Šios matavimo vietos analogiškos dėl vėjo jėgainių įtakos triukšmo susidarymui. Siekiant nustatyti, koks yra vėjo jėgainių skleidžiamas triukšmas negalima remtis tik L_{peak} verte, nes ji nurodo tik momentinį didžiausią triukšmo lygį, t. y. vieno didžiausio piko. Todėl nustatant jėgainių skleidžiamą triukšmą apskaičiuotas garso pikų verčių vidurkis, kuris 1-2 matavimo vietoje siekia 65 dBZ. Nustatyta, kad fliktuacijų intervalas (laiko pokytis tarp gretimų maksimalių arba gretimų minimalių verčių) kinta nuo 1,0 iki 1,2 s, vidurkis 1,1 s. 118 matavimo vietoje skirtumas tarp pikų vidurkių yra 4,43 dB, o atskirais atvejais tarp gretimų pikų, garso slėgio lygio skirtumas yra didesnis nei 5 dB.

Todėl galima teigti, kad vėjo jėgainių skleidžiamas fliuktuojantis triukšmas yra nepastovus. Nepastovus triukšmas, susidedantis iš vieno arba kelių garsinių signalų, kurių trukmė mažesnė kaip 1 sekundė vadinamas impulsiniu triukšmu. Nustatyta, kad 118 matavimo vietoje fliuktuacijų intervalas kinta nuo 0,3 s iki 0,5 s. Todėl 118 matavimo vietoje fliuktuojantis triukšmas yra impulsinis.

1-2-oji matavimo vieta yra nutolusi vienodu atstumu (4 vėjaračio skersmenys) nuo dviejų vėjo jėgainių. Apskaičiuotas garso pikų verčių vidurkis, siekė 60 dBZ. Apskaičiuotas „foninio“ triukšmo garso slėgio lygis yra 53 dBZ.

Žemiausių smailių vidurkis neatspindėjo foninio triukšmo, nes triukšmo formavimuisi įtaką darė dvi vėjo jėgainės, kurių garso kaitos kreivės galėjo kirstis. Nustatyta, kad fliuktuacijų intervalas 1,0 s, tačiau triukšmo pokytis neviršija 5 dB ribos. Todėl išmatuotas triukšmas nėra impulsinis išskyrus atskirus atvejus, kai dviejų vėjo jėgainių sukimosi dažnis ir menčių eiga (padėtis bokšto atžvilgiu) sutampa.

JAV mokslininkai tyrė vėjo jėgainių triukšmo sklaidą nustatė 10 dB kaitą sekundės bėgyje. Didžiausi garso slėgio lygio kitimai nustatyti naudojant Z dažninę charakteristiką (Ambrose *et al.* 2012).

A, B, C matavimo tiesėse nustatyti maksimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose pateikti 3.21–3.23 paveiksluose.

3.21 pav. Maksimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose A matavimo tiesėje

Fig. 3.21. Maximum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz and from 31.5 to 200 in A measurement section

3.22 pav. Maksimālūs garso slēgio lygiei 6,3–31,5 Hz dažņi ir 31,5–200 Hz dažņi ribose B matavimo tiesēje

Fig. 3.22. Maximum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz and from 31.5 to 200 in B measurement section

3.23 pav. Maksimālūs garso slēgio lygiei 6,3–31,5 Hz dažņi ir 31,5–200 Hz dažņi ribose C matavimo tiesēje

Fig. 3.23. Maximum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz and from 31.5 to 200 in C measurement section

Iš 3.21–3.23 paveikslų matyt, kad šešių vėjo jėgainių parke maksimalus garso slėgio lygis 6,3–31,5 Hz dažnių ribose $LZ_{\text{maks}(6,3-31,5)}$ vyraavo tarp 61 dBZ ir 71 dBZ, o maksimalus garso slėgio lygis 31,5–200 Hz dažnių ribose $LZ_{\text{maks}(31,5-200)}$ kito nuo 49 dBZ iki 61 dBZ. Didžiausia $LZ_{\text{maks}(6,3-31,5)}$ vertė nustatyta 3-4 ir 518 matavimo vietose. 3-4 matavimo vieta yra vienodai nutolusi nuo 3 ir 4 vėjo jėgainių, todėl čia triukšmo formavimuisi darė įtaką abi jėgainės. 518 matavimo vieta yra nutolusi tik per 33 metrus nuo 5 vėjo jėgainės, taip pat ši jėgainė sumontuota mažesniame aukštyje.

D ir E matavimo tiesėse (2.9 pav.) nustatyti maksimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose pateikti 3.24 paveiksle.

3.24 pav. Maksimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose D, E matavimo tiesėse

Fig. 3.24. Maximum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz and from 31.5 to 200 in D and E measurement sections

Iš 3.24 paveikslo matyt, kad D matavimo tiesėje (2.9 pav.) $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės kito 62–70 dBZ ribose, o $LZF_{maks(31,5-200)}$ kito 44–55 dBZ ribose. E matavimo tiesėje $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės kito 63–70 dBZ ribose, o $LZF_{maks(31,5-200)}$ kito 47–57 dBZ ribose. E matavimo tiesėje esantys matavimo vietos yra prie 2, 4 ir 6 vėjo jėgainių. Šios vėjo jėgainės yra veikiamos pakitusio oro srauto, kurį susuka 1, 3 ir 5 vėjo jėgainės, todėl 31,5–200 Hz dažnių maksimalus garso slėgio lygis yra 2–3 dB didesnis. D matavimo tiesėje didžiausia $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertė nustatyta 122 matavimo vietoje. Ši vieta nutolusi dviejų vėjaračių atstumu nuo pirmos vėjo jėgainės. Prie 1, 3 ir 5 vėjo jėgainių nustatytos $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės kito 67–69 dBZ ribose. Mažiausios $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės – 63 dBZ nustatytos 512 ir 117 matavimo vietose, kurios yra nutolusios vieno vėjaračio atstumu atitinkamai nuo 5-os ir 1-os vėjo jėgainių. E matavimo tiesėje didžiausia $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertė – 70 dBZ nustatyta 626 bei 222 matavimo vietose. Prie 2, 4 ir 6 vėjo jėgainių nustatytos $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės kito 66–69 dBZ ribose. Mažiausios $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ vertės – 63 dBZ nustatytos 612 ir 412 matavimo vietose, kurios yra nutolusios vieno vėjaračio atstumu atitinkamai nuo 6-os ir 4-os vėjo jėgainių. Mažiausia $LZF_{maks(31,5-200)}$ vertė – 48 dBZ nustatyta 416 matavimo vietoje.

A ir B matavimo atkarpos jungia matavimo vietas kuriose nustatytoms $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ ir $LZF_{maks(31,5-200)}$ vertėms didžiausią įtaką darė vėjo jėgainės kurių vėjaračių skersmenys yra 82 m. C matavimo atkarpa jungia matavimo vietas kuriose nustatytam garso slėgio lygiui didžiausią įtaką darė 33 m skersmens vėjaračio ir 53 m skersmens vėjaračio vėjo jėgainės. C matavimo atkarpoje skirtingai negu A ir B $LZF_{maks(31,5-200)}$ garso slėgio lygis prie vėjo jėgainių yra iki 5 dB didesnis, tačiau tarpinėje matavimo vietoje 628 $LZF_{maks(31,5-200)}$ vertės yra mažiausios ir siekia 49 dBZ. E matavimo tiesėje matyt, kad didžiausi garso slėgio lygiai nustatyti prie 6-os vėjo jėgainės. Pavėjui prieš šeštąją vėjo jėgainę stovi 5-oji, kurios vėjaratis mažesnis, o taip pat mažesnis ir bokšto aukštis. Šių vėjo jėgainių vėjaračiai sukasi skirtingu greičiu, fliktuacijų dažniai nesutampa, todėl bendras triukšmo lygis yra 2–3 dB didesnis negu kitų vėjo jėgainių aplinkoje. Taip pat nuo jėgainės menčių iki matavimo vietų yra mažesnis atstumas, nes bokšto aukščiai mažesni. Garso slopimas atmosferoje mažesnis kuo mažesnis atstumas nuo garso šaltinio iki matavimo vietos.

Didžiausia $LZF_{maks(31,5-200)}$ vertė nustatyta taip pat 3–4 matavimo vietoje. Didesnio garso slėgio lygio formavimuisi šiame taške galėjo daryti gretimų vėjo jėgainių garso fliktuacijų dažnio sutapimas. T. y. 3 ir 4 vėjo jėgainės sukosi vienodu greičiu, bei sutapo menčių pozicija bokštų atžvilgiu.

Triukšmo sklaidos tyrimas buvo pakartotas esant tam pačiam 6 m/s vėjo greičiui. Tačiau skirtingai nei pirmu atveju buvo matuota vakare, o vėjo kryptis – pietryčių. Vakaro metu vėjo greitis yra tolygus, mažai gūsingas. Gūsiai siekė

iki 8 m/s. Matavimo tiesės neapėmė visų matavimo vietų, todėl sudaromi vėjo jėgainių parko triukšmo sklaidos žemėlapiai. Žemėlapiuose (3.25–3.26 pav.) pateikti maksimalūs ir minimalūs garso slėgio lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose.

3.25 pav. Liepynės vėjo jėgainių parko maksimalaus, 6,3–31,5 Hz dažnių, garso slėgio lygio sklaida

Fig. 3.25. Dispersion of maximum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in Liepynė wind park

6,3–31,5 Hz dažnių, maksimalaus garso slėgio lygis vėjo jėgainių parke kito nuo 61 dBZ iki 73 dBZ. Didžiausios ir mažiausios 6,3–31,5 Hz dažnių, maksimalaus garso slėgio lygio vertės nustatytos vėjo jėgainių parke. Galima išskirti $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ 61–67 dBZ ir 68–73 dBZ garso slėgio lygio sritis. Didesnio garso slėgio lygio sritys išsidėstę prieš E-82 vėjo jėgaines ir už jų lygiagrečiai vėjo kryptį. Prie mažesnių vėjo jėgainių didesnio ir mažesnio triukšmo zonos išsidėstę netolygiai. Prie E-33 vėjo jėgainės, 30 m atstumu nuo jėgainės bokšto, nustatytas 72 dBZ $LZF_{maks(6,3-31,5)}$ garso slėgio lygis, tačiau jau 60 m atstumu nuo bokšto triukšmo vertės mažėja iki 64 dBZ (3.26 pav.).

3.26 pav. Liepynės vėjo jėgainių parko maksimalaus, 31,5–200 Hz dažnių, garso slėgio lygio sklaida

Fig. 3.26. Dispersion of maximum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in Liepynė wind park

31,5–200 Hz dažnių maksimalaus garso slėgio lygis $LZF_{\max(31,5-200)}$ vėjo jėgainių parke kito nuo 47 dBZ iki 61 dBZ. Mažesnio garso slėgio lygio 47–53 dBZ ir didesnio garso slėgio lygio 54–61 dBZ zonos išsidėstę taip pat kaip ir 6,3–31,5 Hz dažnių maksimalaus garso slėgio lygio zonos. 31,5–200 Hz dažnių minimalaus garso slėgio lygis $LZF_{\min(31,5-200)}$ vėjo jėgainių parke kito nuo 30 dBZ iki 50 dBZ.

Padidėjęs ekvivalentinis garso slėgio lygis parke skiriasi tik 5–10 dBZ. Foninis triukšmas daro didelę įtaką vėjo jėgainių skleidžiamam triukšmui, todėl apskaičiuotas vėjo jėgainės ekvivalentinis garso slėgio lygis, 31,5–200 Hz dažnių ribose, yra mažesnis 2 dBZ ir siekia 58 dBZ.

Tyrimo metu nustatyto minimalaus garso slėgio lygio vertės, 6,3–31,5 Hz dažnių ir 31,5–200 Hz dažnių ribose, pateiktos 3.27 ir 3.28 paveiksluose.

3.27 pav. Liepynės vėjo jėginių parko minimalaus, 6,3–31,5 Hz dažnių, garso slėgio lygio sklaida

Fig. 3.27. Dispersion of minimum sound pressure levels in frequency range from 6.3 to 31.5 Hz in Liepynė wind park

3.28 pav. Liepynės vėjo jėginių parko minimalaus, 31,5–200 Hz dažnių, garso slėgio lygio sklaida

Fig. 3.28. Dispersion of minimum sound pressure levels in frequency range from 31.5 to 200 Hz in Liepynė wind park

Kaip matyti iš 3.27 paveikslo, galima išskirti didesnio 52–60 dBZ ir mažesnio 42–51 dBZ garso slėgio lygio zonas. Tačiau šiuo atveju jos nėra išsidėstę simetriškai. Minimalus 31,53–200 Hz dažnių garso slėgio lygis atitinka foninį triukšmo lygį. Garso slėgio lygio formavimasi vėjo jėgainių parke galima grįsti vėjo jėgainės bokšto įtaka. Didesnės, 6,3–200 Hz dažnių, triukšmo vertės nustatytos už vėjo jėgainių pavėjui.

Foninį triukšmą reiktų matuoti po kylančiomis mentėmis. Vienos vėjo jėgainės skleidžiamas triukšmo lygis turėtų būti nustatomas parko išorėje pavėjui už vėjo jėgainės. Atstumas nuo vėjo jėgainės turėtų atitikti vėjo jėgainės mentės ilgį.

Tyrimų metu nustatyta kad vėjo jėgainių aplinkoje vyrauja žemo dažnio garsai. Todėl vėjo jėgainių triukšmo sklaidos tyrimų metu garso slėgio lygis matuotas 6,3–200 Hz dažnių ribose. Nustatyta, kad šių dažnių foninį triukšmą esant 6 m/s vėjo greičiui galima nustatyti nestabdant vėjo jėgainių parko veiklos. Dviejų vėjo jėgainių parke atstumas tarp jėgainių atitinka 10 vėjaračių skersmenų ilgį, todėl viena vėjo jėgainė kitai daro mažą įtaką. Jėgainės skleidžiamas garsas slopinamas atmosferos oro, todėl parko centre foninis triukšmas darė didelę įtaką maksimaliam garso slėgio lygiui. Keturių ir šešių vėjo jėgainių parke skirtumas tarp maksimalaus ir minimalaus garso slėgio lygių 6,3–200 Hz dažnių ribose siekė 20 dB, todėl foninis triukšmas darė mažą įtaką vėjo jėgainių skleidžiamam triukšmui.

Atlikus skirtingos konfigūracijos vėjo jėgainių parkų triukšmo sklaidos tyrimus nustatyta, kad didesnis nei foninis triukšmo lygis dviejų ir keturių vėjo jėgainių parkuose vyravo apytiksliai 0,8 km² plotuose, o šešių vėjo jėgainių parke – 1 km² plote. Remiantis šiais duomenimis galima nustatyti instaliuotos galios ir akustinės taršos ploto santykį: dviejų vėjo jėgainių parke minėtas santykis yra 5 MW/km², keturių vėjo jėgainių parke – 10 MW/km², šešių vėjo jėgainių parke – 9,13 MW/km².

3.3. Triukšmo sklaidos jėgainių parkų išorėje tyrimo rezultatai

Tolstant nuo dviejų vėjo jėgainių parko pavėjine kryptimi, pučiant 6 m/s gūsingam, iki 11 m/s vėjui, buvo nustatytos triukšmo vertės. 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės buvo nustatytas 92 dBZ maksimalus garso slėgio lygis, 200 m atstumu – 86 dBZ, 300 m – 87 dBZ, 400 m – 84 dBZ, 500 m – 88 dBZ. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės 6,3–3150 Hz dažnių diapazone 100, 300 ir 500 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių parko pateiktos 3.29 paveiksle.

3.29 pav. Maksimalus garso slėgio lygio vertės pavėjine kryptimi 100, 300 ir 500 metrų atstumu už dviejų vėjo jėgainių parko, pučiant gūsingam vėjui
Fig. 3.29. Maximum sound pressure level values in distance of 100, 300 and 500 metres outside two wind turbines park during catchy wind

Iš 3.29 paveikslo matyti, kad iki 500 m atstume nuo vėjo jėgainių triukšmas žemų dažnių srityje nedaug kito – 1–3 dB paklaidų ribose. 125–3150 Hz dažnių ribose toliausiai nuo vėjo jėgainių parko nutolusioje matavimo vietoje garso slėgio lygis buvo didesnis iki 6 dB nei matavimo vietoje nutolusioje 100 m atstumu nuo vėjo jėgainių. Matavimo metu vyravo gūsingas vėjas, todėl foninis triukšmas visose matavimo vietose darė įtaką triukšmo sklaidai, ypač toliausiai nutolusioje matavimo vietoje kuri yra pamiškėje. Dviejų vėjo jėgainių parke gyvenamųjų pastatų aplinkoje vyravo 50 dBA garso lygis. Ekvivalentinis 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygis siekė 87 dBZ, o ekvivalentinis 31,5–200 Hz dažnių garso slėgio lygis – 50 dBZ. Foninis triukšmas darė didelę įtaką bendram triukšmui vėjo jėgainių aplinkoje, ekvivalentinių garso slėgio lygių, koreguotų pagal A ir C dažnines charakteristikas, skirtumas buvo mažesnis nei 20 dB.

Tyrimas kartotas kai vėjas buvo negūsingas. 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės buvo nustatytas 77 dBZ maksimalus garso slėgio lygis, 200 m atstumu – 72 dBZ, 300 m – 69 dBZ, 400 m – 65 dBZ, 500 m – 60 dBZ. Garso slėgio lygio vertės 6,3–3150 Hz dažnių diapazone 100, 300 ir 500 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių parko pateiktos 3.30 paveiksle.

3.30 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės pavėjinė kryptimi 100, 300 ir 500 metrų atstumu už dviejų vėjo jėgainių parko pučiant negūsingam vėjui

Fig. 3.30. Maximum sound pressure level values in distance of 100, 300 and 500 metres outside two wind turbines park during still wind

Maksimalios garso slėgio lygio vertės 6,3–200 Hz dažnių ribose matavimo vietoje prieš pastatą, 300 m atstumu nuo kraštinės vėjo jėgainių parko jėgainės, pateikiamos 3.31 paveiksle.

3.31 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės pastato aplinkoje, už 300 metrų nuo keturių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.31. Maximum sound pressure level values in the environment of the dwellings area in a distance of 300 meters from the four wind turbines farm

Iš pateikto 3.31 paveikslo matyt, kad didžiausia maksimalaus garso slėgio lygio vertė nustatyta esant 6,3 Hz dažniui ir siekia 74 dBZ. Mažiausia vertė – 38 dBZ nustatyta esant 200 Hz dažniui.

Tolstant nuo keturių vėjo jėgainių parko pavėjine kryptimi 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės buvo nustatytas 104 dBZ garso slėgio lygis, 200 m atstumu – 101 dBZ, 300 m – 97 dBZ, 400 m – 93 dBZ, 500 m – 91 dBZ. Garso slėgio lygio vertės 6,3–3150 Hz dažnių diapazone 100, 300 ir 500 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių parko pateiktos 3.32 paveiksle.

3.32 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės pavėjine kryptimi 100, 300 ir 500 metrų atstumu už keturių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.32. Maximum sound pressure level values in distance of 100, 300 and 500 metres outside four wind turbines park

Tolstant nuo keturių vėjo jėgainių parko 6,3–50 Hz dažnių ribose triukšmas silpo didėjant atstumui. 200–400 Hz dažnių ribose toliausiai nutolusioje vietoje garso slėgio lygis iki 5 dB buvo didesnis nei matavimo vietoje nutolusioje 100 m atstumu nuo vėjo jėgainių. Paskutinėje matavimo vietoje triukšmo sklaidai, kaip ir dviejų vėjo jėgainių parke, įtaką darė medžių šlamėjimas. Kadangi foninis triukšmas buvo nežymus, tolstant nuo jėgainių infragarso srityje triukšmas per 500 m slopo 12–17 dB.

Keturių vėjo jėgainių parko įtakos zonoje esančių gyvenamųjų pastatų aplinkoje nustatytas maksimalus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygis siekė 99 dBZ, o minimalus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygis siekė 83 dBZ.

Maksimalus 31,5–200 Hz dažnių garso slėgio lygis siekė 91 dBZ, o minimalus 31,5–200 Hz dažnių garso slėgio lygis siekė 66 dBZ. Remiantis foninio triukšmo įvertinimo metodika galima teigti, kad 6,3–31,5 Hz dažnių triukšmo vertei darė įtaką foninis triukšmas. 31,5–200 Hz dažnių foninio triukšmo vertės yra daugiau nei 20 dB mažesnės už vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo vertes, todėl foninis triukšmas nedaro įtakos bendroms triukšmo vertėms.

Vėjo jėgainių parko triukšmo sklaida pastatuose ir jų aplinkoje buvo tiriama detaliau – nustatant ir pagalbinių patalpų įtaką žemo dažnio triukšmo sklaidai pastate. Pastatas stovėjo pavėjui, todėl vėjo jėgainių skleidžiamas triukšmas buvo didžiausias šia kryptimi stovinčiuose statiniuose. Pastato sienos iš silikatinių plytų, stogas skardinis. Tyrimų metu vyravo 6 m/s vėjas.

Atlikus tyrimą buvo apskaičiuoti maksimalūs garso slėgio lygiai 6,3–200 Hz dažnių ribose. Tyrimo rezultatai pateikti 3.33 ir 3.34 paveiksluose.

3.33 pav. Maksimalus, 6,3–200 Hz dažnių, garso slėgio lygis gyvenamojo pastato aplinkoje

Fig. 3.33. Maximum sound pressure level in frequency range from 6.3 to 200 Hz in the environment of residential building

3.33 paveiksle matyt, kad maksimalus garso slėgio lygis $LZF_{maks(6,3-200)}$ pastato aplinkoje vyravo 76–90 dBZ ribose, o pastate – 63–65 dBZ. Mažiausios

$LZF_{maks(6,3-200)}$ vertės nustatytos pastato gyvenamajame kambaryje ir siekė 63 dBZ. Iš 3.33 paveikslo matyt, kad pagalbinė patalpa gali daryti įtaką garso sklaidai pastate. Garso slopinimas didesnis kuo didesnis tiriamasis dažnis.

3.34 pav. Maksimalus, 6,3–200 Hz dažnių, garso slėgio lygis gyvenamajame pastate ir ribiniai dydžiai

Fig. 3.34. Maximum sound pressure level in frequency range from 6.3 to 200 Hz and limit values in the environment of residential building

Iš tyrimo rezultatų matyt, kad higienos normoje HN 30:2009 „Infragarsas ir žemo dažnio garsai: ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose“ nurodyti ribiniai dydžiai gyvenamajame pastate, esančiame 220 metrų atstumu už keturių vėjo jėgainių parko, buvo viršijami 63–200 Hz dažnių ribose. Didžiausi viršijimai pagalbinėje patalpoje nustatyti 160–200 Hz dažnių ribose ir siekė 23 dB, o gyvenamojoje patalpoje – esant 160 Hz dažnių viršijimai siekė 20 dB.

Tolstant nuo šešių vėjo jėgainių parko pavėjine kryptimi 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės buvo nustatytas 82 dBZ garso slėgio lygis, 200 m atstumu – 78 dBZ, 300 m – 70 dBZ, 400 m – 66 dBZ, 500 m – 64 dBZ. Matavimų paklaida – 2 %. Garso slėgio lygio vertės 6,3–3150 Hz dažnių diapazone 100, 300 ir 500 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių parko pateiktos 3.35 paveiksle.

3.35 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės pavėjine kryptimi 100, 300 ir 500 metrų atstumu už šešių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.35. Maximum sound pressure level values in distance of 100, 300 and 500 metres outside six wind turbines park during catchy wind

Tolstant nuo šešių vėjo jėgainių parko garso slėgio lygis visuose dažniuose mažėjo didėjant atstumui. Mažiausi garso slėgio lygiai tirtuose dažniuose buvo paskutinėje matavimo vietoje nutolusioje 500 m atstumu nuo vėjo jėgainių.

Šešių vėjo jėgainių parko foninis triukšmas gyvenamųjų pastatų aplinkoje $LZF_{\min(6,3-31,5)}$ vyraavo 50–54 dBZ ribose, o $LZF_{\max(31,5-200)}$ – 40–44 dBZ ribose. Didesnes foninio triukšmo vertes nulėmė gyvenamųjų pastatų aplinkoje esanti augalija. Gyvenamųjų pastatų teritorijoje $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ vertės siekė 70 dBZ, o $LZF_{\max(31,5-200)}$ – 55 dBZ. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės prilygsta garso slėgio lygio vertėms nustatytoms prie vėjo jėgainių didesnio garso slėgio lygio zonose. Už pirmųjų pastatų $LZF_{\max(6,3-31,5)}$ vertės sumažėja iki 67 dBZ, o $LZF_{\max(31,5-200)}$ – iki 51 dBZ.

Matavimų metu vyraavo šiaurės vakarų vėjas, todėl pastatai stovėjo pavėjui už vėjo jėgainių parko. Maksimalios garso slėgio lygio vertės 6,3–200 Hz dažnių ribose pateikiamos 3.36 paveiksle.

3.36 pav. Maksimalaus garso slėgio lygio vertės pastato aplinkoje, už 200 metrų nuo šešių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.36. Maximum sound pressure level values in the environment of the dwellings area in a distance of 200 meters from the six turbines wind farm

Tyrimų metu nustatyta, kad skirtumas tarp LZF_{maks} ir LZF_{min} yra 28 dB, todėl dėl foninio triukšmo įtakos bendras triukšmo lygis padidėjo ne daugiau kaip 1 dB. Iš pateikto 3.37 paveikslo matyt, kad mažėjant tiriamam dažniui, maksimalaus garso slėgio lygio vertės didėja. Didžiausia maksimalaus garso slėgio lygio vertė nustatyta esant 6,3 Hz dažniui ir siekia 82 dBZ. Mažiausia vertė – 32 dBZ nustatyta esant 200 Hz dažniui. Matuojant triukšmo sklaidą šešių ir keturių vėjo jėgainių parkų aplinkoje vyraavo negūsingas vėjas, o pirmo tyrimo metu dviejų jėgainių parke maksimalus vėjo greitis kito iki 12 m/s. Gūsingas vėjas darė įtaką bendro triukšmo sklaidai.

Kuo garso bangų dažnis yra mažesnis tuo lengviau ji užlinksta už kliūčių, o praeidama kliūtį, ją virpina. Pastatuose esančiuose 200–300 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės garso slėgio lygis 25–200 Hz dažnių ribose buvo viršijamas 8–22 dB. Vėjo jėgainių skaičius ir jėgainių galia nėra pagrindinis faktorius

lemiantis garso slėgio lygio verčių dydį. Nors vėjo greitis ir buvo vienodas visų matavimų metu vėjo gūsingumas buvo skirtingas. Keturių vėjo jėgainių parko didesnes triukšmo vertes nulėmė vėjo jėgainių vėjaračių skersmuo. Šiame parke vėjaračio skersmuo yra 12 m mažesnis nei kituose parkuose, todėl bokštas žemesnis. Kuo vėjo jėgainės arčiau žemės tuo didesnis garso slėgio lygis fiksuojamas.

Išmatavus triukšmo fliktuacijų intensyvumą nustatyta, kad prie vėjo jėgainių fiksuojamas impulsinis triukšmas. Triukšmo fliktuacijos silpo tolstant nuo vėjo jėgainių parkų, o 500 m atstumu už parko fliktuacijos prilygsta foninio triukšmo kaitai. Matavimo vietose nutolusiose 500 m atstumu nuo parkų fliktuacijos išnyksta, triukšmas tampa neritmingu. Ši fliktuacijų slopimą nulemia atstumas iki vėjo jėgainių, o taip pat ir vėjo jėgainių įtaka. Garso slėgio lygio kaita matavimo vietose nutolusiose 100 ir 500 m atstumu nuo vėjo jėgainių parkų pateikiama 3.37–3.39 paveiksluose.

3.37 pav. Triukšmo fliktuacijos 100 ir 500 m atstumu nuo dviejų vėjo jėgainių parko

Fig. 3.37. Noise fluctuations change in distance of 100 and 500 metres outside two wind turbines

3.38 pav. Triukšmo fliuktuacijos 100 ir 500 m atstumu nuo šešių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.38. Noise fluctuations change in distance of 100 and 500 metres outside six wind turbines

Iš pateiktų 3.37–3.38 paveikslų matyti, kad 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainių fiksuojamos intensyvios triukšmo fliuktuacijos. Dviejų vėjo jėgainių parke 100 metrų atstumu nuo vėjo jėgainės ekvivalentinio garso slėgio lygio skirtumas tarp mažiausių ir didžiausių smailių sudaro 8 dB, o šešių vėjo jėgainių parke – 6 dB. 100 m atstumu didesnę įtaką triukšmo formavimuisi daro artimiausia jėgainė, o už 500 m visas vėjo jėgainių parkas. Matavimo vietose už 500 m vėjo jėgainių parkas veikia kaip vientisas triukšmo šaltinis kurio atskirų vėjo jėgainių triukšmo fliuktuacijos persidengę. Už keturių vėjo jėgainių parko, kuriame nustatytos didžiausios garso slėgio lygio vertės, triukšmo sklaidos fliuktuacijos kito kaip ir už dviejų bei šešių vėjo jėgainių parkų – slopo tostant už parko. Fliuktuacijų intervalai už keturių vėjo jėgainių parko skyrėsi nuo dviejų vėjo ir šešių jėgainių parkų skleidžiamų triukšmo fliuktuacijų intervalų. Pirmoje matavimo vietoje prie keturių vėjo jėgainių didžiausią įtaką darė dvi vėjo jėgainės, o dviejų vėjo jėgainių parke – viena. Garso slėgio lygio kaita matavimo vietose nutolusiose 100, 200, 300, 400 ir 500 m atstumu už keturių vėjo jėgainių parko pateikiama 3.39 paveiksle.

3.39 pav. Triukšmo fluktuacijos 100–500 metrų atstumu už keturių vėjo jėgainių parko

Fig. 3.39. Noise fluctuations change in distance of 100 and 500 metres outside four wind turbines

Tolstant nuo vėjo jėgainių parkų triukšmo fliktuacijų dažnis ir intensyvumas mažėja. 100–300 metrų atstumu už vėjo jėgainių parkų fiksuojamas impulsinis triukšmas, o už 400 metrų nusilpus fliktuacijų intensyvumui jis lieka tik netolygiai kintančiu. Už 500 m jėgainių triukšmas prilygsta foniniam triukšmui. Triukšmo fliktuacijų intensyvumas ir dažnis matavimo vietose už vėjo jėgainių parkų pateikta 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Vėjo jėgainių parkų triukšmo vertės ir fliktuacijos parkų išorėje

Table 3.1. Noise values and fluctuations of wind farms outside wind farms

Atstumas už vėjo jėgainės, m	Vėjo jėgainių skaičius parke, vnt.	Foninio triukšmo vertės, dBZ	Maksimalus garso slėgio lygis, dBZ	Fliktuacijų intensyvumas, dB	Fliktuacijų periodas, s
100	2	55	77	10	0,81
200			72	9	0,77
300			69	7	0,59
400			65	5	0,48
500			60	3	0,41
100	4	83	104	11	0,55
200			101	8	0,47
300			97	7	0,41
400			93	4	0,36
500			91	3	0,32
100	6	60	82	10	0,68
200			78	8	0,55
300			70	6	0,40
400			66	4	0,37
500			64	3	0,33

Iš 3.1 lentelės matyt, kad foninis triukšmas vėjo jėgainių parkuose darė įtaką foniniam triukšmui, ypač 4-ių vėjo jėgainių parke. Keturių vėjo jėgainių parke didelę įtaką darė augmenija. Parko aplinkoje sėjamos grūdinės kultūros, kurios šiltuoju metų laiku gali padidinti 20 dB foninį triukšmą. Šiame parke foninis triukšmas siekė 83 dBZ, skirtumas tarp maksimalaus garso slėgio lygio ir foninio triukšmo verčių siekia 21 dB. Dviejų ir šešių vėjo jėgainių parkuose šis skirtumas siekia 22 dB. Foninio triukšmo įtaka suminiam vėjo jėgainių parko triukšmui įvertinama pagal minimalių ir maksimalių garso slėgio lygio verčių skirtumą: jeigu minėtų verčių skirtumas yra didesnis nei 20 dB, tuomet suminiam vėjo jėgainių parko triukšmui foninis triukšmas įtaką turi ne didesnę nei 1 dB. Visuose parkuose nepriklausomai nuo maksimalaus garso slėgio lygio ir foninio triukšmo verčių fliktuacijų intensyvumas kito 3–11 dB ribose.

Fliktuacijų periodas 4 vėjo jėgainių parke yra mažesnis, nes jėgainių vėjaračių skersmenys yra 12 m mažesni. Palyginus garso slėgio lygio vertes tolygiai nuo vėjo jėgainių parkų nustatyta, kad pučiant negūsingam vėjui matavimo vietose esančiose pavėjui už vėjo jėgainių parkų ekvivalentinio garso slėgio lygio vertės yra 6 dB didesnės nei matavimo vietose statmenose vėjo kryptims. Prie keturių vėjo jėgainių parko esančių pastatų aplinkoje vyrauja impulsinis triukšmas. Fliktuacijų dažnis šešių vėjo jėgainių įtakos zonoje esančių pastatų aplinkoje gali kisti priklausomai nuo vėjo krypties.

Kaip ir keturių vėjo jėgainių parke, taip ir šešių vėjo jėgainių parke garso slėgio lygio vertės už vėjo jėgainių parko pavėjui buvo didesnės nei prieš parkus. Jeigu vyraujanti vėjo kryptis sutampa su centrine parko ašimi, tuomet didesnio garso slėgio lygio vertės išsidėsto siaurame, iki 800 m, ruože. Jeigu vėjo kryptis yra statmena centrinei parko ašiai, tuomet didesnio garso slėgio lygio vertės išsidėsto platesniame ruože 800 m didesniame nei vėjo jėgainių parko ilgis. Tiriant vėjo jėgainių parkų triukšmo sklaidą vyraujant 6 m/s vėjo greičiui, nustatyta, kad reikšmingos įtakos vėjo jėgainių išdėstymas parke triukšmo sklaidai nedarė. Nors atstumai parke tarp vėjo jėgainių ir yra mažesni nei rekomenduojami, vyraujant 6 m/s vėjo greičiui yra pakankami, nes antrą pavėjui stovinčių vėjo jėgainių skleidžiamas triukšmas nėra didesnis nei pirmųjų vėjo jėgainių. Vėjo jėgainių parką reiktų projektuoti išilgai vyraujančių vėjo kryptų, taip mažinant akustinio poveikio plotą.

Infragarso vertes gyvenamajame pastate reiktų vertinti atsižvelgiant į garso slėgio lygio fliktuacijas pastate. Žemo dažnio foninio triukšmo įtaką suminiam triukšmui pastate įvertinama pagal 2.2 formulę. Jeigu nustatytų minimalaus ir maksimalaus garso slėgio lygių skirtumas didesnis nei 20 dBZ, tuomet foninis triukšmas daro įtaką iki 1 dBZ.

Iš literatūros apžvalgos žinoma, kad žemo dažnio triukšmas yra blogai girdimas tačiau vis tiek kenkia žmogui ir aplinkai. Neigiamą vėjo jėgainių skleidžiamo fliktuojančio triukšmo poveikį galima mažinti tiksliai suderinus vėjo jėgainių darbą. Jeigu jėgainių vėjaračių sukimosi dažniai vienodi yra didelė galimybė, kad jų fliktuacijos sutaps. Fliktuacijų sutapimo galima išvengti reguliuojant menčių eigą taip kad jos nesisuktų sinchroniškai. Taip pat fliktuacijas gyvenamojoje zonoje galima mažinti statant vėjo jėgaines su skirtingo skersmens vėjaračiais. Gyventojams veikiamiems žemo dažnio triukšmo galima apsisaugoti įrengiant papildomą pastatų garso izoliaciją. Šiuo metu nėra daug medžiagų kurios galėtų slopinti žemų dažnių triukšmą, todėl reikia kurti žemų dažnių triukšmą slopinančias medžiagas bei konstrukcijas. Taip pat svarbu, kad 25–200 Hz dažnių triukšmą slopinančios medžiagos ir jų kompozicijos bei jų apdorojimas darytų kuo mažesnę žalą aplinkai.

3.4. Žemo dažnio triukšmą slopinančių medžiagų garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai

Triukšmo sklaidos tyrimai pastatų aplinkoje buvo atliekami už 200–300 metrų nuo vėjo jėgainių. Lietuvoje yra pastatų, kurie stovi ir mažesniu atstumu nuo vėjo jėgainių. Tirtų pastatų sienos žemo dažnio triukšmą slopino 14–30 dB ribose. Atsižvelgiant į higienos normoje HN 30:2009 nurodytų ribinių dydžių viršijimus, iki 22 dB, matyt, kad sienų garso izoliacija nepakankama, todėl pastatus reikia papildomai izoliuoti nuo žemo dažnio triukšmo.

Tyrimams pasirinktos aplinkai nekenksmingos medžiagos turinčios cilindrinę struktūrą. Tyrimų metu buvo nustatyti 250 mm storio plaušamolio, 400 mm storio presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, 50–200 mm storio presuotų šiaudų, 50–200 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui ir 150–200 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui bandinių garso izoliacijos rodikliai R_w . Atlikus tyrimą remiantis empirinėmis formulėmis apskaičiuotas nendrių kritinis bei rezonansiniai dažniai.

Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinio tyrimo rezultatai

Bandinio storis – 400 mm. Šiaudų sluoksnio storis 350 mm, molio tinko sluoksnio storis 25 mm iš abiejų mėginio pusių. Nustatytas garso izoliacijos rodiklis $R_w = 47$ dB (3.40 pav.).

3.40 pav. Presuotų šiaudų tinkuotų molio tinku bandinio garso izoliacinių savybių priklausomybė nuo izoliuojamo garso dažnio

Fig. 3.40. Sound insulating properties of clay plastered straw bale sample and their dependence on insulated sound frequency

Ištyrus presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinį nustatyta, kad geriausiai garsas slopinamas esant didesniai nei 1000 Hz dažniui – iki 69 dB, o mažiausiai garsas slopinamas 160–315 Hz dažnių ribose (24 dB). Žemų dažnių srityje garso izoliacijos rodiklis R kinta 36–41 dB ribose, o vidutinių dažnių srityje kinta 24–49 dB ribose.

Plaušamolio bandinio tyrimo rezultatai

Bandinio storis 250 mm. Nustatytas garso izoliacijos rodiklis R_w – 43 dB (3.41 pav.).

3.41 pav. Plaušamolio bandinio garso izoliacinių savybių priklausomybė nuo izoliuojamo garso dažnio

Fig. 3.41. Sound insulating properties of adobe sample and their dependence on insulated sound frequency

Ištyrus plaušamolio mėginį nustatyta, kad garso izoliacijos rodiklio R mažiausios vertės – 35–44 dB yra 315–1000 Hz dažnių ribose. Geriausiai garsas slopinamas žemų dažnių srityje, 50–160 Hz dažnių ribose garso izoliacijos rodiklis vyrauja nuo 49 dB iki 60 dB.

Presuotų šiaudų bandinių tyrimo rezultatai

Atlikus presuotų šiaudų garso izoliacinių savybių tyrimą nustatyta, kad visuose bandiniuose geriausiai garsas buvo slopinamas esant 125 Hz dažniui, o mažiausias garso izoliacijos rodiklis R yra 1000–1600 Hz dažnių juostoje. 50 mm storio bandinio garso izoliacijos rodiklis R_w – 13 dB, 100 mm storio

bandinio R_w – 17 dB , 100 mm storio bandinio R_w – 21 dB , 100 mm storio bandinio R_w – 26 dB. 50 ir 100 mm storio presuotų šiaudų bandinių garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai pateikiami 3.42 paveiksle.

3.42 pav. 50 ir 100 mm storio presuotų šiaudų bandinių garso izoliacijos rodikliai: a) 50 mm storio bandinys; b) 100 mm storio bandinys

Fig. 3.42. Acoustic characteristics of 50 and 100 mm thick straw bale samples: a) 50 mm thick sample, b) 100 mm thick sample

Didžiausi 50 mm storio presuotų šiaudų bandinio garso izoliacijos rodikliai R nustatyti žemų dažnių srityje kito 30–42 dB ribose, geriausiai garsas yra slopinamas 100–160 Hz dažnių ribose. Mažiausiai garsas slopinamas 800–1600 Hz dažnių ribose, nustatytas garso izoliacijos rodiklis kito 7–12 dB ribose. 100 mm storio presuotų šiaudų bandinio, kaip ir 50 mm bandinio, garso

izoliacijos rodiklis R aukštų dažnių srityje yra mažesnis lyginant su duomenimis žemų dažnių srityje. Žemų dažnių srityje R kito nuo 35 iki 44 dB, aukščiausia vertė 44 dB pasiekta 125–200 Hz dažnių ribose. Vidutinių dažnių srityje garso izoliacijos rodiklis R kito nuo 11 iki 37 dB. Aukštų dažnių srityje mažiausias garso izoliacijos rodiklis R – 14 dB 1000–1600 Hz dažnių juostoje, aukščiausia vertė – 28 dB. 150 ir 200 mm storio presuotų šiaudų bandinių garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai pateikiami 3.43 paveiksle.

a)

b)

3.43 pav. 150 ir 200 mm storio presuotų šiaudų bandinių garso izoliacijos rodikliai: a) 150 mm storio bandinys; b) 200 mm storio bandinys

Fig. 3.43. Acoustic characteristics of 150 and 200 mm thick straw bale samples: a) 150 mm thick sample, b) 200 mm thick sample

150 mm storio presuotų šiaudų bandinyje geriausiai garsas yra slopinamas irgi žemų dažnių srityje, garso izoliacijos rodiklis R 100–200 Hz ribose kinta nuo 37 dB iki 46 dB. Mažiausiai garsas slopinamas 1000–1600 Hz dažnių ribose (nuo 14 iki 20 dB). Vidutinių dažnių juostoje garso izoliacijos rodiklis R kito nuo 15 iki 41 dB. 200 mm storio presuotų šiaudų bandinyje mažiausiai garsas slopinamas esant 1000–1600 Hz dažnių ribose, R – 18 dB. Geriausiai garsas slopinamas žemų dažnių srityje 1600–200 Hz dažnių ribose.

Palyginus plaušamolio ir presuotų šiaudų garso izoliacines savybes matyt, kad 125–160 Hz dažnių ribose garsas slopinamas geriausiai, tačiau kritiniai dažniai nesutampa. Plaušamolio ir presuotų šiaudų bandiniai triukšmą slopina geriau esant žemiems dažniams, iki 400 Hz. Priklausomai nuo bandinio storio ir dažnio, 100–400 Hz dažnių ribose, garsas slopinamas nuo 35 dB iki 48 dB. Plaušamolio R_w yra 17 dB didesnis už presuotų šiaudų R_w . Tačiau garso slopinimas žemų dažnių srityje presuotų šiaudų yra didesnis. Tai sąlygoja tai, kad plaušamolis gerai slopina garsą visuose dažniuose ir skirtumas tarp didžiausio ir garso izoliacijos rodiklio R yra 24 dB.

Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinys, skirtingai negu presuoti šiaudai ar plaušamolis, geriau izoliuoja garsą 400–3150 Hz ribose. Blogiausiai garsas izoliuojamas (24 dB) esant kritiniam dažniui t. y. 250 Hz, tačiau esant mažesniems dažniams, 100–200 Hz, garsas izoliuojamas nuo 36 iki 40 dB. Presuotų šiaudų tinkuotų molio tinku bandinys geriausiai izoliuoja garsą esant 1600 Hz dažniui, tuo tarpu netinkuotų presuotų šiaudų triukšmo sugertis esant šiam dažniui yra maža ir artima sugerčiai esant kritiniam dažniui. Šį nesutapimą gali nulemti, tai kad presuoti šiaudai (tinkuoti molio tinku) mėginyje buvo suguldyti kryptingai, t. y. garsas sklido išilgai šiaudų. Taip pat molio tinko tankis yra 2500 kg/m³, tinku padengiamos mėginio abi pusės, todėl dėl garso atspindžių mėginyje, esant 1600 Hz dažniu garsas buvo slopinamas geriausiai.

Nendrių bandinių tyrimo rezultatai

Skirtingo storio nendrių bandinių garso izoliacijos rodiklis R_w kito nuo 8 dB iki 12 dB. Geriausias rezultatas pasiektas tiriant 150 mm storio bandinį. Keičiant bandinių storį, kito ir mažiausios garso sugerties dažnių ribos, 50 mm storio bandinio – 200–500 Hz, 100 mm storio bandinio – 200–1000 Hz, 150 mm storio bandinio – 200–500 Hz, 200 mm storio bandinio – 200–100 Hz. 50 mm, 100 mm, 150 mm ir 200 mm storio nendrių bandinių garso izoliacijos rodiklio R rezultatai pateikiami 3.44 ir 3.45 paveiksluose. Didžiausias garso izoliacijos rodiklis R skirtingo storio mėginiuose nustatytas tame pačiame 125 Hz vidutinių geometrinių dažnių juostoje. Garso izoliacijos rodiklis šioje dažnių juostoje skirtingo storio mėginiuose kito 20–23 dB ribose. 150 mm bandinio garso

izoliacijos rodiklio R žemų dažnių srityje vertės lyginant su kitų storių bandinių garso izoliacijos rodikliais yra didžiausios.

a)

b)

3.44 pav. 50 ir 100 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, bandinių garso izoliacijos rodikliai R : a) 50 mm storio bandinys; b) 100 mm storio bandinys

Fig. 3.44. Acoustic characteristics of 50 and 100 mm thick reed samples oriented perpendicular to the noise source: a) 50 mm thick sample, b) 100 mm thick sample

3.45 pav. 150–200 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, bandinių garso izoliacijos rodikliai R: a) 150 mm storio bandinys; b) 200 mm storio bandinys

Fig. 3.45. Acoustic characteristics of 150 and 200 mm thick reed samples oriented perpendicular to the noise source: a) 150 mm thick sample, b) 200 mm thick sample

50 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, pertvaros bandinyje skirtinguose dažniuose garso izoliacijos rodiklis kito nuo 1 dB iki 22 dB, 100 mm storio bandinyje – nuo 0 iki 27 dB, 150 mm storio bandinyje – nuo 2 iki 35 dB ir 200 mm storio bandinyje – nuo 2 iki 43 dB. Žemų dažnių ribose, nuo 50 Hz iki 200 Hz, 50 mm storio nendrių pertvaros bandinyje garso izoliacijos rodiklis R kito 1–22 dB ribose, 100 mm storio bandinyje nuo 2 iki 20 dB, 150 mm storio bandinyje nuo 9 iki 23 dB ir 200 mm storio bandinyje kito nuo 9 iki 22 dB.

Vidutinių dažnių ribose, nuo 250 Hz iki 1000 Hz, 50 mm storio nendrių pertvaros bandinyje garso izoliacijos rodiklis R kito 1–22 dB ribose, 100 mm storio bandinyje – nuo 2 iki 20 dB, 150 mm storio bandinyje – nuo 9 iki 23 dB ir 200 mm storio bandinyje – nuo 9 iki 22 dB.

Aukštų dažnių ribose, nuo 1250 Hz iki 3150 Hz, garso izoliacijos rodiklis R visuose bandiniuose kito 4–43 dB ribose.

Tai pat buvo tirti du 150 mm ir 200 mm storio nendrių bandiniai, kai nendrės orientuojamos lygiagrečiai triukšmo šaltiniui. Geriausias rezultatas pasiektas tiriant 200 mm storio bandinį. 150 mm ir 200 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, pertvaros garso izoliacijos rodiklio R rezultatai pavaizduoti 3.46 ir 3.47 paveiksluose.

3.46 pav. 150 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, bandinio garso izoliacijos rodikliai R

Fig. 3.46. Sound insulation index of 150 mm thick reed samples oriented parallel to the noise source

3.47 pav. 200 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, bandinio garso izoliacijos rodikliai R

Fig. 3.47. Sound insulation index of 200 mm thick reed samples oriented parallel to the noise source

200 mm storio nendrių bandinio, kai nendrės orientuotos lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, R_w mažas palyginus su kitais bandiniais, tačiau 63–100 Hz dažnių ribose R siekia 30 dB. Lyginant su vidutinių dažnių juostomis šio mėginio garso slopinimo savybės žemų dažnių ribose yra 10 kartų didesnės. Šio mėginio R_w koeficientas yra mažas, dar ir dėl to, kad nendrės nebuvo papildomai uždengtos. Iš tyrimo matyt, kad šiaudus papildomai tinkuojant molio tinku kinta garso sugerties charakteristikos, pagerėja garso izoliacija aukštų dažnių srityje. Nendres galima būtų irgi dengti papildomomis medžiagomis taip didinant kompozito garso sugertį vidutinių ir aukštų dažnių srityse.

Atlikus tyrimus matyt, kad keičiant nendrių orientavimą triukšmo šaltinio atžvilgiu galima pasiekti skirtingus garso izoliacijos rodiklio R rezultatus. Nendrės orientuotos statmenai triukšmo šaltiniui geriausiai izoliuoja 100–160 Hz dažnių garsą, tuo tarpu pakeitus nendrių padėtį geriau izoliuojamas 63–100 Hz triukšmas.

Atitvaros izoliacija sumažėja padidėjus jos svyravimams. Kai lankstymosi bangos ilgis sutampa su garso bangos ore ilgiu, slėgio pasiskirstymas išilgai krantinčioje bandinio (plokštės) bangoje sutampa su to paties dažnio savųjų svyravimų dažnių pasiskirstymu bandinyje. Mažiausias dažnis, kuriam esant garso bangos sutampa vadinamas kritiniu dažniu ir randamas pagal šią formulę:

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}}, \text{ Hz}, \quad (3.2)$$

čia: c_0 – garso bangos greitis ore, m/s; m – atitvaros masė ploto vienetui, kg/m²; D – cilindrinis atitvaros standis, kg/m.

Cilindrinis atitvaros standis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D = \frac{Eh^2}{12(1-\mu^2)}, \text{ kg/m}, \quad (3.3)$$

čia: E – atitvaros medžiagos tamprumo modulis, kg/m³; h – atitvaros storis, m; μ – Puasono koeficientas.

Puasono koeficientas įvertina skersinių ir išilginių deformacijų (ϵ , Δl) santykį. Šis santykis skaičiuojamas tempiamoms ir gniuždomoms medžiagoms bei parodo, kiek išilginiai matmenys kinta sparčiau nei skersiniai. Puasono koeficientas skirtingoms medžiagoms yra skirtingas. Konstrukcinėms medžiagoms, apkrautoms iki takumo ribos, jis būna apie $\nu_y = 0,25\text{--}0,3$, virš takumo ribos $\nu_u = 0,4\text{--}0,5$. Žinoma, kad šiaudų Puasono koeficientas yra 0,35, o tamprumo modulis – 210 GPa (Hu *et al.* 2010). Nendrių Puasono koeficientas

yra 0,25 (Wang *et al.* 2013). Nustatę nendrių tamprumo modulį tyrėjai pateikė šias reikšmes: 154,1 MPa, 383,2 MPa, 85,6 MPa, 97,3 MPa, 96,8 MPa, 97,6 MPa (Cao *et al.* 2011). Remiantis šiais duomenimis buvo nustatyta vidutinė tamprumo modulio reikšmė 152,4 MPa. Matyt, kad 383,2 MPa reikšmė skiriasi nuo vidutinės tamprumo modulio reikšmės 2,5 karto, todėl atmetus nepatikimą duomenį apskaičiuotas tamprumo modulio vidurkis yra 106,3 MPa.

Apjungus 3.2 ir 3.3 formules kritinis dažnis apskaičiuojamas taip:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)m}{Eh^2}}, \text{ Hz}, \quad (3.4)$$

Atitvaros masę tenkančią ploto vienetui m padalinus ir atitvaros storio h gaunamas atitvaros medžiagos tankis, todėl kritinio dažnio skaičiavimo formulę galima pakeisti šia formule:

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)\rho}{Eh}}, \text{ Hz}, \quad (3.5)$$

čia ρ – medžiagos tankis, kg/m^3 .

Remiantis 3.5 formule 50 mm storio nendrių bandinio kritinis dažnis yra 369 Hz, 100 mm bandinio – 261 Hz, 150 mm bandinio – 213 Hz, 200 mm bandinio – 184 Hz. Tyrimų duomenimis mažiausia garso sugertis nendrių bandiniuose kito 200–1000 Hz ribose, t. y. šiame dažnių diapazone nustatytas kritinis bandinio dažnis. Apskaičiuotas presuotų šiaudų kritinis dažnis kinta 80–160 Hz ribose. Šiuose dažniuose garso izoliacija mažėja ir dėl masės dėsnio. Presuotų šiaudų bandiniuose, žemų dažnių ribose iki 160 Hz dažnio, garso izoliacijos rodiklis mažėja tolygiai mažėjant dažniui.

Nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, triukšmo sugertis 80 Hz dažnyje gali būti grindžiama rezonansinio dažnio įtaka. Tuščiavidurės nendrės šiaudas veikia kaip rezonatorius. Remiantis Helmholtz rezonatoriaus skaičiavimais perforuotai plokštei galima nustatyti ir rezonansinį nendrių bandinio dažnį. Perforuotos plokštės rezonansinis dažnis nustatomas taikant šią formulę:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{p}{100 \cdot d \cdot (l + 1,57 \cdot r)}}, \quad (3.6)$$

čia: c – garso sklaidimo greitis ore, m/s ; p – perforacijos santykis, %; d – atstumas iki sienos, m ; l – bandinio storis, m ; r – nendrių skersmuo, m .

Nendrių skersmuo kinta nuo 2 iki 5 mm, atstumas iki sienos parenkamas pagal triukšmo slopinimo kameros parametrus, perforacijos santykis 70–80 %,

nendrių ilgis 15–20 cm. Rezonansinio dažnio poziciją nulemia perforacijos santykis bei bandinio storis. Apskaičiuotas nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, bandinio rezonansinis dažnis kinta nuo 63 Hz, kai nendrių skersmuo 5 mm, bandinio storis 20 cm ir perforacijos santykis 70 %, iki 78 Hz, kai nendrių skersmuo 2 mm, bandinio storis 15 cm ir perforacijos santykis 80 %. Rezonansinio dažnio poziciją nulemia perforacijos santykis bei bandinio storis.

Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bei plaušamolio bandinių garso izoliacijos rodiklis R visuose dažniuose mažai kinta lyginant su lengvų konstrukcijų bandinių duomenimis. Molis suteikia kompozicijoms masės, o šiaudai akytumą, todėl tiek žemų dažnių, tiek vidutinių ar aukštų dažnių srityse garso izoliacijos rodiklis R kinta tolygiai.

3.5. Žemo dažnio triukšmo sklaidos bei jo mažinimo modeliavimo rezultatai

Atlikus žemo dažnio triukšmo ir infragarso sklaidos tyrimus vėjo jėgainių parkuose buvo nustatyta, kad vėjo jėgainių parke susidaręs triukšmas sklinda į gyvenamąsias teritorijas. Pastatų apsaugai nuo žemo dažnio triukšmo buvo suformuotos ir tirtos kompozitinės aplinkai nekenksmingos medžiagos. Garso izoliacijos rodiklis triukšmo slopinimo kameroje buvo nustatytas 50–3150 Hz dažnių ribose. Mažesnio nei 50 Hz dažnio garso izoliacijos rodiklio R vertės nustatytos remiantis ISO 12354 standarte pateiktomis formulėmis bei Strati-Artz modeliavimo programa. Medžiagų, pastato konstrukcinių elementų bei patalpų išdėstymo pastate įraka triukšmo sklaidai nustatyta pritaikant CadnaA ir Comsol Multiphysics modeliavimo programas.

Žemo dažnio garso izoliacijos rodiklio tyrimo rezultatai

Reglamentas STR 2.01.07:2003 nustato pastatų vidinių ir išorinių atitvarinių konstrukcijų pagrindinių akustinių charakteristikų vertes gyvenamojo pastato vidaus aplinkoje. Nustatant garso (akustinio komforto) klasę didelę įtaką daro ore sklindančio garso izoliavimo rodiklis. Garso izoliavimo rodiklio mažiausias reglamentuojamas dažnis yra 50 Hz. T. y. garso izoliacijos koeficientas lemia akustinį komfortą, eliminuojant komfortą sąlygojamą žemus garso dažnius. Atlikus triukšmą slopinančių medžiagų tyrimus nustatomas garso izoliacijos rodiklis R_w . Tačiau šis rodiklis nustatomas apibrėžtame dažnių diapazone nuo 50 Hz iki 8000 Hz, o skaičiuojamas tik 100–3150 dB ribose.

Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, ir plaušamolio bandinių garso izoliacijos rodiklio R matematinio modeliavimo ir garso pokyčio ΔL skaitinio modeliavimo rezultatai pateikiami 3.48 ir 3.49 paveiksluose.

3.48 pav. 400 mm storio presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku ir 250 mm storio plaušamolio garso slopinimo matematinio ir skaitinio modeliavimo rezultatai: a) 400 mm storio presuoti šiaudai, tinkuoti molio tinku; b) 250 mm storio plaušamolis; —○— — garso izoliacijos rodiklis R_w apskaičiuotas remiantis ISO 12354 standartu; —□— — Strati-Artz programine įranga sumodeliuotas garso pokytis ΔL ; — tikėtinos garso izoliacijos rodiklio R_w vertės

Fig. 3.48. Results of mathematical and numerical modeling of 400 mm thick straw bale and 250 mm thick adobe samples of sound insulation: a) 400 mm thick pressed straw, plastered clay plaster b) 250 mm thick adobe; —○— — sound insulation index R_w calculated on the basis of ISO 12354 standard; —□— — sound change ΔL simulate on Strati-Artz software; — expected sound insulation index R_w values

Iš 3.49 paveikslo matyt, kad 12,5–40 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose, garso pokytis ΔL kinta tolygiai, todėl tikėtina, kad 12,5–40 Hz dažnių diapazone presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, garso izoliacijos rodiklis kinta 23–34 dB ribose. Plaušamolio garso izoliacijos rodiklis 12,5–40 Hz dažnių ribose kinta nuo 28 dB iki 45 dB.

Atlikus garso izoliacijos rodiklio skaičiavimus nustatytas nesutapimas tarp skaičiuojamojo ir matavimų metu nustatytų garso izoliacijos rodiklių R . Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinio garso izoliacijos rodiklio R žemų dažnių, 50–200 Hz, ribose nesutapimas kinta nuo 6 iki 15 dB, vidutinių dažnių 250–1000 Hz, ribose nesutapimas kinta nuo 3 dB iki 12 dB. Plaušamolio bandinio garso izoliacijos rodiklio R žemų dažnių srityje nesutapimas kito nuo 7 iki 24 dB, vidutinių dažnių srityje nesutapimas kinta nuo 1 dB iki 16 dB. Žemų dažnių ribose didžiausią įtaką nesutapimui darė garso izoliacijos rodiklio R sumažėjimas. Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinio matavimų metu šis rodiklio sumažėjimas nustatytas 250 Hz dažnyje, o skaičiavimų metu 125 Hz dažnyje. Plaušamolio bandinio matavimų metu šis rodiklio sumažėjimas nustatytas 400 Hz dažnyje, o skaičiavimų metu 63 Hz dažnyje. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.49, 3.50 ir 3.51 paveiksluose.

3.49 pav. 200 mm storio presuotų šiaudų garso slopinimo matematinio ir skaitinio modeliavimo rezultatai: —○— garso izoliacijos rodiklis R_w apskaičiuotas remiantis ISO 12354 standartu; —□— Strati-Artz programine įranga sumodeliuotas garso pokytis ΔL ; – tikėtinos garso izoliacijos rodiklio R_w vertės

Fig. 3.49. Results of mathematical and numerical modeling of 200 mm thick straw bale sound insulation: —○— sound insulation index R_w calculated on the basis of ISO 12354 standard; —□— sound change ΔL simulate on Strati-Artz software; – expected sound insulation index R_w values

3.50 pav. 150 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui garso slopinimo matematinio ir skaitinio modeliavimo rezultatai: —○— $-R_w$; —□— garso pokytis ΔL ; – tikėtinos R_w vertės

Fig. 3.50. Results of mathematical and numerical modeling of 150 mm thick reed samples oriented perpendicular to the noise source: —○— $-R_w$; —□— sound change ΔL ; – expected R_w values

3.51 pav. 200 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui garso slopinimo matematinio ir skaitinio modeliavimo rezultatai: —○— $-R_w$; —□— garso pokytis ΔL ; – tikėtinos R_w vertės

Fig. 3.51. Results of mathematical and numerical modeling of 200 mm thick reed samples oriented parallel to the noise source: —○— $-R_w$; —□— sound change ΔL ; – expected R_w values

Iš 3.51 paveikslo matyt, kad 12,5–40 Hz vidutinių geometrinių dažnių ribose, garso pokytis ΔL kinta tolygiai, todėl tikėtina, kad 12,5–40 Hz dažnių diapazone presuotų šiaudų 200 mm storio bandinio garso izoliacijos rodiklis R kinta 34–43 dB ribose. Nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, 150 mm storio bandinio garso izoliacijos rodiklis kinta 8–18 dB ribose, o nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, 200 mm storio bandinio garso izoliacijos rodiklis R kinta 19–28 dB ribose.

Atlikus garso izoliacijos rodiklio R_w tyrimus, bei skaitinį žemų dažnių garso sugerties modeliavimą nustatyta, kad presuoti šiaudai, presuoti šiaudai, tinkuoti molio tinku bei plaušamolis slopina garsą žemų dažnių srityje. 6,3 Hz dažnio garsą visos medžiagos mažai slopintų. Išskiriami tik plaušamolio 250 mm storio bandinys ir presuotų šiaudų 200 mm storio bandinys, kurie slopintų 6,3 Hz dažnio garsą atitinkamai iki 10 dB ir 18 dB. 50–200 Hz dažnių garsą gerai slopintų presuoti šiaudai, plaušamolis ir presuoti šiaudai tinkuoti molio tinku. Garso slopinimas šiuose dažniuose siektų 30–60 dB. Nendrių garso izoliacijos koeficientas yra mažas, tačiau jas panaudojus galima būtų slopinti 80 Hz arba 125 Hz dažnio garso bangas.

Garso izoliacijos rodiklio vertes nustatytas eksperimentų metu, bei modeliavimo rezultatai infragarso ir žemų dažnių srityje pateikiami 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Aplinkai nekenksmingų medžiagų ir jų kompozicijų garso izoliacijos rodiklis R 8–200 Hz dažnių ribose

Table 3.2. Sound insulation index R of environmentally friendly materials and their composites in frequency range from 8 to 200 Hz

Medžiaga	Storis, mm	Garso izoliacijos rodiklis R , dB		
		8–20 Hz	25–63 Hz	80–200 Hz
Plaušamolis	200	9–28	40–56	49–60
Tinkuoti šiaudai	400	8–25	30–39	36–41
Šiaudai	200	16–39	39–40	42–47
Nendrės statmenos triukšmo šaltiniui	150	Iki 17	17–19	9–23
Nendrės lygiagrečios triukšmo šaltiniui	200	5–18	19–25	4–30

Iš tirtų aplinkai nekenksmingų medžiagų 8–20 Hz dažnių ribose triukšmą geriausiai slopina šiaudai; 25–63 Hz dažnių ribose – plaušamolis, molio tinku tinkuoti šiaudai ir presuoti šiaudai; 80–200 Hz dažnių ribose geriausiai triukšmą slopina plaušamolis. Iš atliktų tyrimų žinoma, kad ribiniai dydžiai, nurodyti higienos normoje HN 30:2009, viršijami iki 35 dB 25–200 Hz dažnių ribose. Atsižvelgiant į tyrimų rezultatus geriausiai triukšmo slopinimui tinka medžiagos, kurių sudėtyje yra šiaudų. Presuoti šiaudai tinka kaip papildomas garso

izoliacinis sluoksnis, o plaušamolis ir tinkuoti šiaudai gali būti naudojami atitvarų konstrukcijose.

Presuotų šiaudų bei nendrių bandinių matavimų metu ir skaičiavimais nustatyto garso izoliacijos rodiklio R nesutapimui didelę įtaką daro medžiagos struktūra. Atliekant garso izoliacijos rodiklio R skaičiavimus pagrindiniai įvesties parametrai yra: medžiagos tankis bei storis, garso greitis ore bei medžiagoje ir oro tankis. Neįvertinamas medžiagos poringumas bei vingiuotumas. Presuotų šiaudų, bandinio garso izoliacijos rodiklio R žemų dažnių srityje nesutapimas kito nuo 17 iki 37 dB, vidutinių dažnių srityje nesutapimas kito nuo 3 dB iki 12 dB. 150 mm storio nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, bandinio garso izoliacijos rodiklio R žemų dažnių srityje nesutapimas kito nuo 1 iki 12 dB, vidutinių dažnių srityje nesutapimas kito nuo 5 dB iki 12 dB. 200 mm storio nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, bandinio garso izoliacijos rodiklio R žemų dažnių srityje nesutapimas kito iki 18 dB, vidutinių dažnių srityje nesutapimas kito nuo 10 dB iki 28 dB.

Tirtas aplinkai nekenksmingas medžiagas galima būtų naudoti renovuojant ar statant pastatus esančius vėjo jėgainių aplinkoje. Naudojant papildomai šiaudus juos reikia presuoti taip didinant izoliacinio sluoksnio tankį. Pirmasis nendrių sluoksnis būtų efektyvus iki 100 Hz dažnio, o antrasis 100–200 Hz dažnių ribose. Bandiniuose nendrės buvo nepresuotos, todėl jų garso izoliacijos rodiklis nėra didelis. Garso sugerties savybes galima būtų pagerinti rišant nendres į ryšulius ar panaudojant papildomą užpildą tarp nendrių šiaudelių. Plaušamolio bandinio storis lyginant su tinkuotų šiaudų bandiniu buvo du kartus mažesnis. Didinant plaušamolio sienos storį garso izoliacija žemų dažnių srityje pagerėtų. Taip pat nedegtas molis, turėtų būti apsaugotas nuo drėgmės. Apsaugoti nuo drėgmės aplinkai nekenksmingas medžiagas galima jas papildomai dengiant vandeniui atspariomis medžiagomis. Tarp plaušamolio ar tinkuotų šiaudų ir vandeniui atsparaus sluoksnio turėtų būti paliktas oro tarpas, nes nedegtas molis absorbuoja ir garina drėgmę. Suformavus ventiliacinį sluoksnį, konstrukcijos garso izoliacija būtų dar geresnė. Oro tarpas yra sąlyginai mažas lyginant su slopinamų bangų ilgiu, todėl jis būtų tik papildoma priemonė slopinant aukštų dažnių, didesnių nei 6000 Hz, garsą.

Apsaugoti presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku bei plaušamolio sieną galima didinant pastato karnizą, kuris tuo pačiu darytų įtaką triukšmo sklaidai pastate ir jo aplinkoje.

Vėjo jėgainių triukšmo sklaidos modeliavimas gyvenamuose pastatuose ir jų aplinkoje

Triukšmo sklaida vėjo jėgainių įtakos zonoje esančių pastatų aplinkoje bei pačiuose pastatuose buvo pasirinktos CadnaA ir Comsol Multiphysics modeliavimo programos. Programos skiriasi, nes naudojami skirtingi skaičiavimo metodai. CadnaA formulių rinkinys remiasi ISO standartuose pateiktomis formulėmis, tuo tarpu Comsol Multiphysics skaičiuoja remiantis baigtinių elementų metodu. Triukšmo sklaidos tyrimais pastate buvo siekta nustatyti ar pagalbinės patalpos, gali daryti įtaką žemo dažnio sklaidai visame pastate. Keičiant patalpų turį įvertinta žemo dažnio garso sklaida patalpose. Taip pat buvo nustatyta ar pastato stogo karnizas gali sumažinti triukšmo sklaidą pastato aplinkoje.

Siekiant nustatyti pastogės ir stogo karnizo įtaką vėjo jėgainių skleidžiamo triukšmo sklaidai buvo atlikti triukšmo sklaidos tyrimai prieš ūkinį pastatą ir ūkiniame pastate su atviromis durimis. Prie pastato nustatyti ekvivalentiniai garso lygiai pagal Z ir A dažnines charakteristikas siekė 108 dBZ ir 42 dBA. Pastato viduje vartų ekvivalentiniai garso lygiai siekė 78 dBZ ir 31 dBA. Nustatyta, kad pastato viduje garso lygis priklausomai nuo tiriamo dažnio yra 5–30 dB mažesnis negu pastato išorėje. Kuo mažesnis dažnis tuo garso lygis didesnis, tačiau 30 dBZ skirtumas išlieka visuose dažniuose išskyrus 110–120 Hz ir 165–175 Hz ribose. Matavimai atlikti prie atvirų durų, todėl sienos nedarė įtakos triukšmo sumažėjimui.

Žemo dažnio triukšmo sumažėjimui pastato viduje didelę įtaką darė stogas. Daroma prielaida, kad stogo dalis pastato išorėje irgi gali daryti įtaką slopinant vėjo jėgainių skleidžiamą triukšmą ir kuo ši dalis yra didesnė, tuo garso lygis už stogo karnizo bus mažesnis. Didesnis triukšmo lygis atskiruose dažniuose gali susidaryti dėl bangų difrakcijos.

Modeliavimo tikslas. Nustatyti pastogės plotį, kuris užtikrintų akustinį komfortą pastate. Skaitiniam modeliavimui pasirenkamas Liepynės vėjo jėgainių parko ir artimiausios sodybos išdėstymo planas pateiktas 2.8 paveiksle.

Artimiausia vėjo jėgainė stovi už 220 m nuo gyvenamojo pastato, bokšto aukštis – 85 m. Modeliuojamas pastatas, kurio sienų aukštis 2,7 m, pastato plotis – 5 m, ilgis – 10 m, stogo kraigas 4,5 m aukštyje nuo žemės paviršiaus. Atlikus skaitinį modeliavimą nustatyta, kad 25–50 cm ilgio karnizas gali sumažinti 1 Hz dažnyje garso lygį pastogėje iki 4 dB, 10 Hz – 8 dB, 20 Hz – 10 dB; 50 Hz – 13 dB ir 100 Hz – 12 dB. Padidinus stogo karnizą iki 1 m garso lygis pastogėje sumažėtų atitinkamai 1 Hz – 10 dB, 10 Hz – 14 dB, 20 Hz – 15 dB, 50 Hz – 18 dB ir 100 Hz – 13 dB. 50 Hz ir 100 Hz dažnio triukšmo sklaidos modeliavimo rezultatas pateikiamas 3.52 paveiksle.

3.52 pav. Stogo karnizo įtaka triukšmo sklaidai: a) 50 Hz dažnio; b) 100 Hz dažnio

Fig. 3.52. Roof eaves influence on noise dispersion: a) 50 Hz frequency; b) 100 Hz frequency

Šiaudinių namų sienos būna tinkuotos molio tinku, todėl jos nėra atsparios dideliame drėgmės kiekiui. Siekiant apsaugoti sienas nuo lietaus, tokiems namams projektuojamos didesnės pastogės. Iš 3.52 paveikslą matyti, kad 50 Hz dažnio garsas prieš stogo karnizą siekia 51 dBZ, o pastogėje kinta nuo 32 dBZ iki 37 dBZ. 100 Hz dažnio garsas prieš stogo karnizą siekia 37 dBZ, o pastogėje kinta nuo 24 dBZ iki 26 dBZ. Stogo karnizas, kurio ilgis – 1 m, žemo dažnio triukšmą gali sumažinti 10–18 dB. Stogo karnizo įtaka triukšmo slopinimui mažėtų didėjant atstumui nuo pastato iki vėjo jėgainės ir mažėjant jėgainės bokšto aukščiui. Garso slėgio lygis nepriklausomai nuo dažnio sumažėja tik pastogėje, tuo tarpu sienos dalis esanti arčiau pamato nėra apsaugota. Siekiant apsaugoti apatinę sienos dalį nuo žemo dažnio triukšmo reiktų įrengti papildomas priemones, pvz. storinant pastato sieną arba papildomai ją apsaugant ir dengiant žemą dažnį izoliuojančiomis akustinėmis medžiagomis.

Garso sklaidos pastate skaitinis modeliavimas

Tyrimų metu buvo nustatyta kaip aplinkai nekenksmingos medžiagos izoliuoja žemo dažnio triukšmą. Taip pat nustatyta kad stogo karnizas daro įtaką triukšmo

sklaidai ir pastogėje triukšmas gali sumažėti 18 dB. Tačiau nežinoma kaip sumažėtų garso lygis pastato viduje panaudojus kartu minėtas triukšmo slopinimo priemones. Skaitiniame modelyje 250 mm storio pastato sienos ir 400 mm šiaudinis stogas sumodeliuotos pagal plaušamolio ir presuotų šiaudų bandinių parametrus.

Siekiant nustatyti aplinkai nekenksmingų medžiagų ir stogo karnizo geometrijos įtaką garso sklaidai pastato viduje buvo atliktas skaitinis modeliavimas Cmsol Multiphysics programine įranga. Skaitiniam modeliavimui pasirenkamas Liepynės vėjo jėgainių parko ir artimiausios sodybos išdėstymo planas (2.8 pav.). Iš visų tirtų parkų šiame pastatai stovėjo arčiausiai vėjo jėgainių. Sprendžiant uždavinį buvo sudarytas vieno aukšto pastato skaitinis modelis (3.53 pav.).

Pastato sienos aukštis – 2,7 m, ilgis – 10 m, stogo karnizo ilgis – 1,0 m, stogo nuolydis – 45°. Triukšmo šaltinis – šešios vėjo jėgainės, bokštų aukštis – 100 m, atstumas iki pastato – 300 m. Sudarytame modelyje viena vėjo jėgainė skleidžia 120 dBZ ekvivalentinį garso lygį. 2 metrų atstumu nuo pastato ekvivalentinis garso slėgio lygis atitinka tyrimo metu nustatytą garso slėgio lygį (3.33 pav).

3.53 pav. Modelio suskaidymas į elementariusius elementus
Fig. 3.53. Fragmentation of the model to elemental components

Sumodeliuotas žemų dažnių garso slėgio lygis pastato viduje nėra vienodas. Žinoma, kad garso bangos yra išilginės bangos. Jas sukuria oro praretėjimas ir sutankėjimas sudarantis didelio bei mažo slėgio sritis. Susidaro tylos zonos,

kuriose garso slėgio lygis gali siekti tik 10 dBZ. Modeliavimo rezultatai darbe nagrinėti atskiruose dažniuose, kuriose išryškėja interferencijos efektai. Pastogėje garso slėgio lygis kinta nežymiai, susidaro mažesnio garso slėgio lygio zonos, kuriose vertės sumažėja iki 20 dBZ. Atlikus modeliavimą nustatyta, kad triukšmo sklaidai pastate įtaką daro pastato forma ir garso dažnis. 100 Hz dažnio sklaida pastate ir jo aplinkoje pateikiama 3.54 paveiksle.

3.54 pav. 100 Hz dažnio garso slėgio lygio sklaida pastate ir jo aplinkoje

Fig. 3.54. Dissemination of 100 Hz frequency sound pressure level in the building and its environment

Kaip matyt 3.54 paveiksle, pagal spalvinės skalės vertes, 100 Hz dažnio garsas pastate ir jo aplinkoje pasiskirsto netolygiai. Pastato aplinkoje jis kinta nuo 80 dBZ iki 30 dBZ. Pastogė daro įtaką, todėl garsas po karnizu siekia 60–30 dBZ. Palėpėje garsas sumažėja iki 50–30 dBZ. Iš atliktų tyrimų žinoma, kad šiaudai 100 Hz dažnį palėpėje slopina 42–47 dB (3.2 lentelė). Pastato, kurio

sienos suformuotos iš plaušamolio, gyvenamojoje patalpoje garso slėgio lygis sumažėja iki vidutinio 30 dBZ garso slėgio lygio. Iš 3.2 lentelėje pateiktų duomenų matyt, kad plaušamolio sienos 100 Hz dažnio garsą slopina 49–60 dB, o iš 3.55 pav matyt, kad garso slėgio lygis patalpoje sumažėjo vidutiniškai 50 dBZ. 100 Hz dažnio sklaida aplinkoje ir pastate suformavus pagalbinę patalpą pateikiama 3.55 paveiksle.

3.55 pav. 100 Hz dažnio garso slėgio lygio sklaida aplinkoje ir pastate suformavus pagalbinę patalpą

Fig. 3.55. Dissemination of 100 Hz frequency sound pressure level in the building with auxiliary room and its environment

Suformavus pagalbines patalpas garso slėgio lygį pastate galima būtų sumažinti, nes oro tarpas esantis pagalbinėje patalpoje papildomai slopintų garsą. Patalpų orientavimas 100 Hz dažnio garso sklaidai palėpėje nedaro įtakos,

tačiau jei patalpos vienodo tūrio palėpėje 100 Hz dažnio garsas gali padidėti nuo 60 dB iki 80 dB. Iš 3.55 paveikslo matyt, kad 100 Hz garso slėgio lygis kinta suformavus pastatą pagalbinę patalpą. Pagalbinėse patalpose 100 Hz dažnio garso slėgio lygis sumažėja ir siekia 30 dB, kaip ir vientisame pastate. Suformuotoje pagalbinėje patalpoje išlieka stovinčiosios garso bangos, tačiau į gretimą patalpą patenkantis garsas yra slopinamas pertvaros ir gyvenamojoje patalpoje vyrauja, nedaug kintantis visame patalpos tūryje, 30 dBZ garso slėgio lygis. Padalinus patalpą į dvi dalis sumažėja interferencijos reiškiniai antrojoje patalpoje. Palėpėje garso slėgio lygis kinta nežymiai nuo 50 dBZ iki 40 dBZ garso slėgio lygio, tuo tarpu nekeičiant patalpų palėpėje vyravo 45 dBZ garso slėgio lygis. 50 Hz dažnio sklaida aplinkoje ir pastate suformavus pagalbinę patalpą pateikiama 3.56 paveiksle.

3.56 pav. 50 Hz dažnio garso slėgio lygio sklaida aplinkoje ir pastate suformavus pagalbinę patalpą

Fig. 3.56. Dissemination of 50 Hz frequency sound pressure level in the building with auxiliary room and its environment

Iš 3.56 paveiksle pateiktų spalvinės skalės verčių matyt, kad esant mažesniai tiriamam garso dažniui, retesnio ir tankesnio garso slėgio zonos yra didesnės. Garso slėgio lygis pastogėje sumažėja nuo vyraujančio 75 dBZ iki 60 dBZ. 50 Hz garso slėgio lygis pastato suformuotose patalpose skiriasi – pagalbinėse patalpose 50 Hz dažnio garso slėgio lygis sumažėja ir siekia 40 dB, o gyvenamosiose patalpose garso slėgio lygis vyrauja 30–40 dBZ ribose. Iš 3.56 paveikslo matyti, kad šiaudinis stogas 50 Hz dažnio garsą sumažina ne daugiau kaip 30 dB, o iš atliktų tyrimų (3.43 pav.) žinoma, kad presuoti šiaudai 50 Hz dažnio garsą slopina iki 34 dB. Sumodeliuota plaušamolio siena triukšmo sklaidą slopina nuo vyraujančio 70 dBZ garso slėgio lygio iki 20–30 dBZ garso slėgio lygio pastate, tyrimų rezultatai (3.41 pav.) rodo, kad 50 Hz dažnio garso izoliacijos rodiklis ne didesnis nei 55 dB. Suformuotoje pagalbinėje patalpoje išlieka stovinčiosios garso bangos, tačiau į gretimą patalpą patenkantis garsas yra slopinamas pertvaros. Antroje patalpoje sumažėja interferencijos reiškiniai o palėpėje jie beveik nepastebimi. Palėpėje garso slėgio lygis kinta nuo 80 dBZ iki vyraujančio 50 dBZ garso slėgio lygio, tuo tarpu nekeičiant patalpų palėpėje vyravo 70 dBZ garso slėgio lygis.

Pastato patalpoje taip pat susidaro skirtingo garso slėgio sritys, tačiau jos yra tankesnės nei modeliuojamo pastato išorėje. Šį garso slėgio lygio sričių sutankėjimą nulėmė patalpos forma, todėl dėl atspindžių nuo sienų pasireiškia interferencijos reiškiniai. Patalpų matmenys gali daryti įtaką garso sklaidai, keičiant patalpų dydį kinta ir garso sklaida jose, todėl modeliavimas atliktas pakeitus modelyje patalpų plotį. Kuo dažnis aukštesnis, tuo garsas pastato viduje pasiskirsto tolygiau, sutankėja aukšto ir žemo garso slėgio sritys.

200 Hz dažnio garsas abiejose patalpose sklinda vienodai (3.57 pav.). Atlikus garso sklaidos modeliavimą pastatuose ir jų aplinkoje nustatyta, kad esant didesniems tiriamiesiems dažniams pagalbinė patalpa daro mažą įtaką triukšmo sklaidai gyvenamojoje patalpoje. 200 Hz dažnio garso didelio ir mažo slėgio sritys yra tankesnės nei 100 Hz dažnio garso. Garso slėgio lygis 200 Hz dažnių ribose pastato viduje iki 60 dBZ mažesnis nei pastato išorėje. Garso slėgio lygio sumažėjimas sutampa su tyrimų metu nustatytu 200 Hz dažnio garso izoliacijos rodikliu R , kuris šiame dažnyje siekia 49 dB. Palėpėje garso slėgio lygis yra didesnis nei patalpoje, nes šiaudų 200 Hz dažnio garso izoliacija yra mažesnė nei plaušamolio. Suformavus vienodas patalpas pastate 200 Hz dažnio garsas antroje patalpoje kinta nežymiai ir yra iki 5 dBZ mažesnis nei pirmojoje.

Atlikus modeliavimą nustatyta, kad 16 Hz dažnio garsas gyvenamojoje patalpoje sumažėja nuo 100 dB iki 60 dB, o suformuotoje pagalbinėje patalpoje 10 dB mažesnis negu vientisoje patalpoje.

3.57 pav. 200 Hz dažnio garso slėgio lygio sklaida aplinkoje ir pastate suformavus pagalbinę patalpą

Fig. 3.57. Dissemination of 200 Hz frequency sound pressure level in the building with auxiliary room and its environment

25 Hz dažnio garso slėgio lygio pagalbinė patalpa nei padidina, nei sumažina. 63 Hz dažnio garso slėgio lygis gyvenamojoje patalpoje nekinta, tačiau padidėja pagalbinėje nuo 60 iki 80 dB. 100 Hz dažnio garso slėgio lygis, padalinus patalpą į dvi – pagalbinę ir gyvenamąją, nekinta. Suformavus pagalbinę patalpą 160 Hz dažnio garsas gyvenamojoje patalpoje išsidėsto ruožais. Kai patalpos forma yra paprastos geometrinės formos, tuomet dėl atspindžio garso stiprumas pasiskirsto nevienodai. 6,3 Hz dažnio garso slėgio lygis suformavus vienodus patalpų tūrius pagalbinėje patalpoje padidėja nuo 50

dB iki 90 dB, o padidinus pagalbinės patalpos tūrį ir sumažinus gyvenamosios patalpos tūrį garso slėgio lygis pagalbinėje patalpoje padidėjo iki 110 dB. Garso lygis gyvenamojoje patalpoje nekinta ir išlieka 110 dB.

Garso pokyčio, kuriam įtaką darė plaušamolio siena, modeliavimo ir plaušamolio bandinio garso izoliacijos rodiklio R nustatyto triukšmo slopinimo kameroje rezultatų skirtumas, 50–200 Hz dažnių ribose esant skirtingiems vidutiniams geometriniais dažniams kito nevienodai. Esant 50 Hz dažniui minėtas skirtumas sudarė 10 dB, 63 Hz – 6 dB, 80 Hz – 4 dB, 100 Hz – 1 dB, 125 Hz – 9 dB, 160 Hz – 6 dB ir 200 Hz – 11 dB. Mažiausi nesutapimai nustatyti 63–100 Hz dažnių ribose, kito nuo 1 dB iki 6 dB. Šiems nesutapimams didelę įtaką galėjo daryti tai, kad triukšmo slopinimo kameroje nėra galimybės nustatyti pavienių dažnių triukšmo sklaidos, tiriami visos dažnių spektras vienu metu, o modelyje tiriant vieno dažnio triukšmo sklaidą kiti dažniai įtakos nedaro. Modeliuojant triukšmo sklaidą pastato aplinkoje buvo suformuota didesnė erdvė nei tiriant bandinį triukšmo slopinimo kameroje, todėl sąlygos susidaryti garso bangų atspindžiams buvo skirtingos.

Vėjo jėgainių parko skleidžiami garsai nėra toniniai, o skirtingų dažnių garsas interferuoja. Patalpos galėtų sumažinti garso lygį pastate, tačiau ne visuose dažniuose. Garso sklaida pastate taip pat priklauso ir nuo atstumo iki triukšmo šaltinio. Priklausomai nuo patalpų rezonansinio dažnio reiktų suformuoti patalpų tūrius ir suderinti pastato sienų medžiagas bei konstrukcijas. Iš atliktų tyrimų galima daryti išvadą kad pagalbinės patalpos, kurios yra 3 metrų pločio ir 2,7 metrų aukščio bei yra du kartus mažesnės už gyvenamąsias patalpas gali sumažinti 16 Hz dažnio triukšmą gyvenamojoje patalpoje 50 dB.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Nustatyta, kad visuose vėjo jėgainių parkuose mažiausios garso slėgio lygio vertės 6,3–200 Hz dažnių ribose prie veikiančių vėjo jėgainių atitinka vėjo jėgainių parkų foninį triukšmą su vidutine 3 dB paklaida.

2. Vėjo jėgainių parkuose, pučiant 6 m/s vėjo greičiui, maksimalūs garso lygiai 6,3–31,5 Hz dažnių ribose siekia iki 105 dBZ, už parkų (pavėjui) garso slėgio lygis nuo 10 dB iki 15 dB didesnis nei prieš parkus.

3. Prie vėjo jėgainių vyrauja impulsinis triukšmas, kuris nuslopsta tik už 400 m už vėjo jėgainių parkų, o tolstant toliau nustatomas fliuktuojantis triukšmas.

4. Nustatyta, kad vėjo jėgainės skleidžia žemo dažnio fliuktuojantį triukšmą, po besileidžiančiomis mentėmis fiksuojamos iki 5 dB didesnės garso slėgio lygio vertės nei po kylančiomis mentėmis.

5. Keturių ir šešių vėjo jėgainių parkų garso slėgio lygio vertės iki 15 dBZ didesnės nei akustinio šešėlio zonose po kylančiomis vėjo jėgainių mentėmis.

6. Dviejų vėjo jėgainių parko geometriniame centre maksimalaus ir minimalaus garso slėgio lygio vertės prilygsta tuo pačiu atstumu už vėjo jėgainių parko nustatytoms vertėms. Atstumą tarp jėgainių galima būtų sumažinti siekiant riboti akustinės taršos plotą.

7. Šešių vėjo jėgainių parke prie jėgainių kurių vėjaračių skersmenys yra 33 m ir 53 m, o bokštų aukščiai 50 m ir 73 m, fiksuojamas iki 5 dB didesnis maksimalus 6,3–31,5 Hz dažnių garso slėgio lygis nei prie vėjo jėgainių kurių vėjaračiai yra 82 m skersmens, o bokštų aukščiai 108 m.

8. Dviejų ir keturių vėjo jėgainių akustinės taršos plotai yra vienodi – 0,8 km². Šešių vėjo jėgainių akustinės taršos plotas – 1,0 km². Atsižvelgiant į instaliuotos galios ir akustinės taršos ploto santykį keturių vėjo jėgainių parkas yra pranašesnis už šešių bei dviejų vėjo jėgainių parkus.

9. Nustatyta, kad žemo dažnio triukšmą galima slopinti aplinkai nekenksmingomis medžiagomis. Presuoti šiaudai, nepriklausomai nuo bandinio storio, geriausiai garsą izoliuoja 80–125 Hz dažnių ribose. 200 mm storio plaušamolio bandinys žemo dažnio triukšmą geriausiai slopina 50–125 Hz dažnių ribose nuo 49 dB iki 60 dB. Presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, bandinys žemo dažnio triukšmą 50–200 Hz ribose slopina nuo 30 dB iki 41 dB.

10. Nendrių, orientuotų statmenai triukšmo šaltiniui, 50–200 mm storio bandinių garso izoliacijos rodiklis R didžiausias yra 100–160 Hz dažnių ribose ir kinta nuo 20 iki 23 dB. Nendrių, orientuotų lygiagrečiai triukšmo šaltiniui, 200 mm storio bandinių garso izoliacijos rodiklis R didžiausias yra 50–100 Hz dažnių diapazone ir siekia 30 dB.

11. Stogo karnizas, kurio ilgis – 1 m, žemo dažnio triukšmą pastate gali sumažinti 10–18 dB. Kuo vėjo jėgainės bokštas yra didesnis ir vėjo jėgainė yra arčiau pastato, tuo pastato stogo karnizas efektyviau slopina vėjo jėgainių triukšmo sklaidą.

12. Žemo dažnio triukšmo sklaidai pastate turi įtakos ne tik konstrukcinės medžiagos, bet ir patalpų išdėstymas. Pagalbines patalpas reikia orientuoti į vėjo jėgainių parko pusę, o jų turį keisti priklausomai nuo modeliuojant nustatyto vyraujančio pastate triukšmo dažnio.

Bendrosios išvados

1. Foninį žemų dažnių triukšmą veikiančiame vėjo jėgainių parke galima apskaičiuoti pagal didžiausias ir mažiausias garso slėgio lygio vertes kurios turi būti nustatomos akustinio šešėlio zonose.

2. Vėjo jėgainių parkų viduje garso slėgio lygis priklauso nuo vėjo jėgainių skaičiaus, jų išdėstymo, aukščio nuo žemės paviršiaus, galios, vėjaračio skersmens ir vėjo greičio. Esant 6 m/s vėjo greičiui, 2 MW vidutinei jėgainės galiai ir esant 50 dB foniniam triukšmui dviejų vėjo jėgainių parke garso slėgio lygis kinta nuo 55 dBZ iki 72 dBZ, keturių vėjo jėgainių parke – nuo 58 dBZ iki 81 dBZ, šešių vėjo jėgainių parke – nuo 54 dBZ iki 77 dBZ.

3. Pastebėta, kad iki vieno vėjaračio atstumu nuo vėjo jėgainės, esant po jos mentėmis, susidaro garso slėgio lygio sumažėjimas – akustinis šešėlis. Prognozuojama, kad jį sukelia po kylančiomis ir besileidžiančiomis mentėmis garso slėgio lygio skirtumas, susidarantis dėl Doplerio efekto. Apskaičiuota, kad toks garso slėgio lygio skirtumas esant 6 m/s vėjo greičiui gali sudaryti 2 dB. Akustinis šešėlis prie vėjo jėgainių gali būti slopinamas greta esančių vėjo jėgainių keliamo triukšmo.

4. Nustatyta, kad vėjo jėgainių parkų viduje susidaro impulsinis triukšmas, kuris susidaro jėgainės mentei judant link bokšto, tačiau už parko ribų jis virsta fliuktuojančiu triukšmu.

5. Nustatyta, kad triukšmo sklaidai vėjo jėgainių parkuose priklauso nuo vyraujančios vėjo krypties ir vėjo jėgainių išdėstymo parke. Už dviejų vėjo jėgainių parko, priklausomai nuo stebėtojo esamos padėties, triukšmo sklaidai didžiausią įtaką daro vienos arba dviejų vėjo jėgainių keliamas triukšmas. Išdėstant daugiau nei dvi jėgaines vienoje linijoje, prie kraštinių vėjo jėgainių triukšmo sklaidai įtaką darys vienos vėjo jėgainės keliamas triukšmas. Jeigu kelios vėjo jėgainės išdėstomos ne vienoje tiesėje, stebėtojo atžvilgiu, triukšmo sklaidai įtaką turi ne mažiau kaip dviejų vėjo jėgainių keliamas triukšmas. Kuo daugiau vėjo jėgainių lems triukšmo sklaidą stebėtojo atžvilgiu, tuo didesnė tikimybė kad sumažės fliktuacijų intensyvumas ir jų periodas.

6. Triukšmo fliktuacijos mažesnės tose matavimo vietose kur įtaką triukšmo susidarymui daro daugiau jėgainių ir jų vėjaračių skersmenys skiriasi. Fliktuacijų periodas už parkų kinta nuo 0,8 s 100 metrų atstumu nuo 2-jų vėjo jėgainių parko iki 0,3 s 500 m atstumu nuo 6-ųjų vėjo jėgainių parko. Parkų viduje vyrauja 1,0–1,5 s fliktuacijų periodas.

7. Vėjo jėgainių parko efektyvumą galima didinti keičiant jėgainių kiekį bei išdėstymą parke, tuo siekiant optimizuoti instaliuotos galios ir akustinės taršos ploto santykį. Pavyzdžiui, nagrinėtame dviejų vėjo jėgainių parke minėtas santykis yra 5 MW/km², keturių vėjo jėgainių parke – 10 MW/km², šešių vėjo jėgainių parke – 9,13 MW/km². Kuo vėjo jėgainių parkas yra platesnis vyraujančios vėjo krypties atžvilgiu, tuo didesnė teritorija pavėjui už parko yra veikiamas triukšmo.

8. Žemo dažnio triukšmo sklaidai nuo vėjo jėgainių slopinti pasirinktos cilindrinę struktūrą turinčios aplinkai nekenksmingos medžiagos. Nustatyta, kad geriausiai žemų dažnių garsą slopina presuoti šiaudai, plaušmolis ir presuoti šiaudai tinkuoti molio tinku, kurių garso izoliacijos rodiklis žemų dažnių srityje kinta nuo 49 dB iki 60 dB.

9. Pastato stogo karnizas gali sumažinti triukšmo sklaidą pastogėje ir pastate nuo 10 dB iki 18 dB. Patalpos turį reiktų keisti atsižvelgiant į pastato sienų ir stogo mažiausias garso izoliacijos rodiklio vertes. Atsižvelgiant į garso izoliacijos rodiklį 400 mm storio presuotų šiaudų, tinkuotų molio tinku, siena triukšmo sklaidą pastate gali sumažinti apie 47 dB, 200 mm plaušmolio siena – 43 dB, o papildomas 200 mm presuotų šiaudų sluoksnis – 26 dB.

Rekomendacijos

1. Žemo dažnio foninį triukšmą vėjo jėgainių parke rekomenduojama nustatyti pagal minimalaus garso slėgio lygio vertes prie išorinių vėjo jėgainių. Išorinės vėjo jėgainės parenkamos statmenai tolstant nuo centrinės vėjo jėgainių parko ašies kuri sutampa su vėjo kryptimi. Matuojant vėjo jėgainių parkų foninį triukšmą rekomenduojama vadovautis žiedine matavimo vietų parinkimo metodika atrenkant mažiausio garso slėgio lygio vertes akustinio šešėlio zonose. Pagal pirmame žiede, 8-iose matavimo vietose, nustatytas minimalaus garso slėgio lygio vertes išskiriamos akustinio šešėlio zonos ir jose nustatomas foninis vėjo jėgainių parko triukšmas. Foninio triukšmo įtaka suminiam vėjo jėgainių parko triukšmui įvertinama pagal minimalių ir maksimalių garso slėgio lygio verčių skirtumą: jeigu minėtų verčių skirtumas yra didesnis nei 20 dB, tuomet suminiam vėjo jėgainių parko triukšmui foninis triukšmas įtaką turi ne didesnę nei 1 dB.

2. Ekvivalentinio garso slėgio lygio fliktuacijos iki 4–5 dB intensyvumo sumažėja už 400 m tolstant nuo vėjo jėgainių parko. Siekiant išvengti impulsinio triukšmo gyvenamieji pastatai turėtų būti statomi ne arčiau kaip už 500 m už vėjo jėgainių. Siekiant apsisaugoti nuo žemo dažnio triukšmo, sklindančio nuo vėjo jėgainių, rekomenduojama pastatų sienų konstrukcijose naudoti plaušamolį, stogo karnizą įrengti nemažesni, nei 1 metro ilgio ir namo dalyje, orientuotoje į vėjo jėgainių parką, išdėstyti pagalbines patalpas. Visų patalpų dydį planuoti atsižvelgiant į pastato atitvarų mažiausias garso izoliacijos rodiklio vertes.

Literatūros sąrašas

Adomavičius, V.; Balčiūnas, P. 2003. Kai kurios galimybės mažųjų vėjo elektrinių efektyvumui padidinti. *Energetika* 1: 38–45.

Akhmatov, V.; Knudsen, H.; Nielsen, A. H. 2000 Advanced simulation of windmills in the electric power supply. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 22(6): 421–434.

Alam, M. J.; Iqbal, M. T. 2009. Design and development of hybrid vertical axis turbine. *Canadian Conference CCECE '09. Electrical and Computer Engineering*: 1178–1183.

Alternative energy news [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2012 m. birželio 26 d. Prieiga per internetą: <<http://www.alternative-energy-news.info/images/technical/wind-turbine.jpg>>

Alves-Pereira, M.; Castelo Branco, N.A.A. 2007. Public Health and Noise Exposure: The Importance of Low Frequency Noise. *Proceedings of the Inter-Noise 2007 Conference. Istanbul: Sponsored by the International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE) and Organized by the Turkish Acoustical Society. August 28–31.*

Anderson, D. T. 1982 09 28. *Magnus air turbine system*. United States Patent. No. 4366386.

Arakawa, C.; Fleig1, O.; Iida1, M.; Shimooka1, M. 2005. Numerical Approach for Noise Reduction of Wind Turbine Blade Tip with Earth Simulator. *Journal of the Earth* 2: 11–33.

Arakawa, C.; Fleig1, O.; Iida1, M.; Ishihara, T.; Kaneda, Y. 2004. Direct numerical

simulations of fundamental turbulent flows with the largest grid numbers in the world and its application of modeling for engineering turbulent flows. *Annual Report of the Earth Simulator Center* 4: 195–198.

Asdrubali, F.; Pispola, G. 2007. Properties of transparent sound-absorbing panels for use in noise barriers. *The Journal of the Acoustical Society of America* 121: 214.

Babinsky, H. 2003. How do wings work. *Physics Education* 38(6): 497–503.

Baltrėnas, P.; Butkus, D.; Nainys, V.; Grubliauskas, R.; Gudaitytė, J. 2007. Triukšmo slopinimo sienelės efektyvumo įvertinimas. *Journal of environmental Engineering and Landscape Management* 15(3): 125–134.

Barthelmie, R. J.; Folkerts, L.; Ormel, F. T.; Sanderhoff, P.; Eecen, P. J.; Stobbe, O.; Nielsen, N. M. 2002. Offshore Wind Turbine Wakes Measured by Sodar. *Journal of Atmospherecan Doceanic Technology* 20: 466–477.

Bazilevs, Y.; Hsu, M.-C.; Akkerman, I.; Wright, S.; Takizawa, K.; Henicke, B.; Spielman, T.; Tezduyar, T. E. 2011a. 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 65: 207–235.

Bazilevs, Y.; Hsu, M.-C.; . Kiendl, J.; Wüchner, R.; Bletzinger, K.-U. 2011b. 3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part II: Fluid–structure interaction modeling with composite blades. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 65: 236–253.

Bhutta, M. M. A.; Hayat, N.; Farooq, A. U.; Ali, Z.; Jamil, S. R.; Hussain, Z. 2012. Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 1926–1939.

Birgiolas, E.; Katinas, V. 2006. Vėjo srauto parametrų kitimo dėsningumų tyrimas Lietuvos pajūryje. *Energetika* 2: 29–33.

Bychkov, N. M.; Dovgal, A. V.; Sorokin, A. M. 2008. Parametric optimization of the magnus wind turbine. [interaktyvus]. 2008. Žiūrėta 2013 m. lapkričio 17 d. Prieiga per internetą: <<http://ftp.itam.nsc.ru/tmp/Test/5/Bychkov.pdf>>.

Bolin, K.; Bluhm, G.; Eriksson, G.; Nilsson, M. E. 2011. Infrasound and low frequency noise from wind turbines: exposure and health effects. *Environmental Research Letters* 6: 1–6.

Borum, K. K.; McGugan, M.; Brondsted, P. Condition monitoring of wind turbine blades. *27th Riso International Symposium on Materials Science: Polymer Composite Materials for Wind Power Turbines*: 139–149 [interaktyvus]. 2006. Žiūrėta 2009 m. lapkričio 3d. Prieiga per internetą: <http://www.risoe.dtu.dk/rispubl/art/2006_44_paper.pdf>.

Bracciali, A.; Cascini, C. 1997. Detection of corrugation and wheel flats of railway wheels using energy and spectrum analysis of rail acceleration, in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 211(2): 109–16.

Bračkus, A.; Gužas, D. 2007. Infragarsas, jo sklidimas nuo šaltinio iki gyvenamosios zonos. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija. 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2007 03 29, medžiaga. Vilnius: Technika, 263–269.

Butkus, D.; Januševičius, T. 2011. Acoustic investigations of the exterior and interior wall of a log house. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 19(2): 140–147.

CadnaA Software for Noise Abatement Brief Instruction for the Demo Program, *Technische Dokumentation und Ausbildung für den Immissionsschutz*, München. 2001.

Cao, Z.; Jin, X.; Liao, Q. 2011. Experimental research on physical and mechanical parameters of matured bottom stalk of the reed for harvester design. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 4(2): 36–42.

Chaar, L.E.; Lamont, L.A.; Elzein, N. 2011. Wind Energy Technology – Industrial Update. *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, 24–29 July 2011: 1–5.

Churchfield, M.J.; Lee, S.; Moriarty, P.J.; Martinez, L.A.; Leonardi, S.; Vijayakumar, G.; Brasseur J.G. 2012. A Large-Eddy Simulation of Wind-Plant Aerodynamics. *50th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, January 9–12, Nashville, Tennessee: 1–19.

Colby, D.W.; Dobie, R.; Leventhall, G.; Lipscomb, D.M.; McCunney, R.J.; Seilo, M.T.; Søndergaard, B. Wind Turbine Sound and Health Effects, An Expert Panel Review 2009. *Prepared for American Wind Energy Association and Canadian Wind Energy Association 2009* [interaktyvus]. 2009. Žiūrėta 2010 m. vasario 2 d. Prieiga per internetą: <http://www.awea.org/newsroom/releases/AWEA_CanWEA_SoundWhitePaper_12-11-09.pdf>

Degutis, S.; Drąsutis, P.; Gaižutis, P.; Gudzinškas, L.; Juška, J.; Kalita, P.; Kersnauskas, E.; Kregždė, J.; Kuprys, A.; Markauskas, J.; Martynaitis, P.; Rimkevičius, A.; Škudzinškas, A.; Švipas, V.; Tamulevičius J.; Valentukonis J. 1936. Kaimo statyba. Kaunas: Spindulio spaustuvė, 270 p.

Deveikis, T.; Nevardauskas, E. 2007. Vidutinių metinių vėjo greičių matavimų tikslumo analizė. Iš *Elektros ir valdymo technologijos. 2-oji tarptautinė konferencija. 2-osios tarptautinės konferencijos „ECT-2007“*, įvykusios Kaune 2007 05 3–4 d. medžiaga. Kaunas: Technologija, 46–51.

Deverell, R.; Goodhew, S.; Griffiths, R.; Wilde, P. 2009. The noise insulation properties of non-food-crop walling for schools and colleges: A case study. *Journal of Building Appraisal* 5: 29–40.

Drewitt, A.; Langston, R. H. W. 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds. *International Journal of Avian Science* 148(1): 29–42.

Dumitrescu, H.; Cardos, V.; Dumitrache, A.; Frunzulica, F. 2010. Low-frequency noise prediction of vertical axis wind turbines. *Proceedings of the Romanian Academy*, 11(1): 47–54.

Dutton, A. G.; Blanch, M. J.; Vionis, P.; Lekou, D.; Delft, D. R.; Joosse, P. A.; Anastassopoulos, A.; Kouroussis, D.; Kossivas, T.; Philippidis, T. P.; Assimakopoulou, T. T.; Fernando, G.; Doyle, C.; Proust, A. 2000. Acoustic emission condition monitoring of wind turbine rotor blades laboratory certification testing to large scale in-service deployment. *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Roma, 42(12): 805–808.

Emami, A.; Nogreh, P. 2010. New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms. *Renewable Energy*, 35: 1559–1564.

Earshen, J.; Berger, E.; Royster, L.; Royster, J.; Driscoll, D.; Layne, M. 2003. Sound measurement: Instrument and noise descriptors. *The Noise Manual*. Indiana: American Industrial Hygiene Association, 560 p.

Enercon WindBlatt Magazine, June 2007 [interaktyvus]. 2007. Žiūrėta 2011 m. kovo 7 d. Prieiga per internetą: <<http://www.enercon.de/p/downloads/WB-0207-en.pdf>>.

Environmental noise parameters and terminology [interaktyvus]. 2001. Žiūrėta 2013 m. sausio 3 d. Prieiga per internetą: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd53/noise/cap8.pdf>

Eriksson, S.; Bernhoff, H.; Leijon, M. 2008. Evaluation of different turbine concepts for wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(5): 1419–1434.

Fang, C. F.; Ling, D. L. 2003. Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning* 63(4): 187–195.

Fang, C. F.; Ling, D. L. 2005. Guidance for noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning* 71(1): 29–34.

Ferreira A.A.A. 2011. Sistema de produção de energia eólica. Dissertação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Português. 165 p.

Fish, F. E.; Howle, L. E.; Murray, M. M. 2008. Hydrodynamic flow control in marine mammals. *Integrative and Comparative Biology* 211: 1859–1867.

Fish, F. E.; Weber, P. W.; Murray, M. M.; Howle, L. E. 2011. The tubercles on humpback whales' flippers: application of bio-inspired technology. *Integrative and Comparative Biology* 51(1): 203–213.

Fish, F. E.; Howle, L. E.; Murray, M. M. 2008. Hydrodynamic flow control in marine mammals. *Integrative and Comparative Biology* 48(6): 788–800.

Frandsen, S. T.; Jørgensen, H. E.; Barthelmie, R.; Rathmann, O.; Badger, J.; Hansen, K.; Jensen, L. E. 2009. The making of a second-generation wind farm efficiency model complex. *Wind Energy*, 12(5): 445–458.

Fu, H. L.; Su J. C. 2009. Optimization real time parametric simulation of Light Wind Turbine. *Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress* 7: 331–335.

Fujiwara, K.; Hothersall, D. C.; Kim, C. H. 1998. Noise barriers with reactive surfaces. *Applied Acoustics* 53(4): 255–272.

Gipe, P. Wind power. 2004. London: James & James. 496 p. ISBN 1-902916-54-9

Goňo, R.; Rusek, S.; Hrabčík, M. Wind Turbine Cylinders with Spiral Fins. *Czech Science Foundation* [interaktyvus]. 2008. Žiūrėta 2010 m. sausio 14 d. Prieiga per internetą: <<http://eeic.eu/proc/papers/21.pdf>>.

Grubliauskas, R. 2006. Triukšmo mažinimo sienelės efektyvumo įvertinimas. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija. 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2006 03 30, *medžiaga*. Vilnius: Technika, 142–148.

Grubliauskas, R.; Butkus, D. 2009. Chamber investigation and evaluation of acoustic properties of materials. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 17(2): 97–105.

Gužas, D.; Klimas, R.; Tricys, V. 2006. Construction of Acoustic Shields and Their Properties for Noise and Vibration Reduction, [CD] in *2nd Int. Conf. Mechatronic Systems and Materials*. Krakow, Poland.

Gulbinas, A. 2007. Vėjo jėgainių galios reguliavimas. *LŽŪU ŽŪI Instituto ir LŽŪ Universiteto mokslo darbai* 39(3): 81–94.

Gurskis, V.; Juodis, J. Presuotų šiaudų ryšulių tinkamumas pastatų statybai. Iš *Lietuvos mokslas ir pramonė konferencijos „Pažangioji statyba“*, įvykusios Kaune 2007 m. lapkričio 15–16 d., *medžiaga*. [interaktyvus]. 2007. Žiūrėta 2010 m. kovo 3 d. Prieiga per internetą: <<http://www.siaudunamai.lt/downloads/siaudutinkamumas%20pastatu%20statybai.pdf>>.

Haneke, K. E.; Carson, B. L.; Gregorio, C. A.; Maull, E. A. 2001. Infrasound: brief review of toxicological literature. Integrated Laboratory Systems Inc. National Institute of Environmental Health Sciences: 51 p.

Hau, E. 2006. Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Hardcover. 2006, 783 p. ISBN: 978-3-540-24240-6

Hill, T.; Lewicki, P. 2006. Statistics: methods and applications. *Tulsa, OK. Statsoft*: 828 p.

Hirai, S.; Honda, A.; Karikomi, K. Wind loads investigations of HAWT with wind tunnel tests and site measurements. *Wind Power Asia, Benjin*. [interaktyvus]. 2008. Žiūrėta 2010 m. kovo 3 d. Prieiga per internetą: <http://202.228.55.2/products/pdf/wind_sonota_0806_01.pdf>.

Hjort, S. Noise Optimization of a Siemens Multi-MegaWatt Turbine *Conference paper EWEC 2007 Milan, 7–10 May 2007* [interaktyvus]. 2007. Žiūrėta 2010 m. kovo 3 d. Prieiga per internetą: <http://www.ewec2007proceedings.info/allfiles2/138_Ewec2007fullpaper.pdf>.

Hu, J.; Xu, G.; Liu, J.; Lei, T.; Shen, S. 2010. Finite element modeling simulation in the straw pellet cold compressing molding process. *Bio Resources* 5(4): 2447–2456.

Hubbard, H. H.; Shepherd, K. P. 1990. Wind turbine acoustics (Vol. 3057). National Aeronautics and Space Administration, Office of Management, Scientific and Technical Information Division: 54 p.

Hubbard, H. H.; Shepherd, K. P. 1991. Aeroacoustics of large wind turbines. *The Journal of the Acoustical Society of America* 89: 2495.

Yin, J.; Xie, Y.; Chen, P. 2009. Modal Analysis Comparison of Beam and Shell Models for Composite Blades. *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific III*: 1–4.

Jakobsen, J. 2005. Infrasound emission from wind turbines. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 24(3): 145–155.

Januševicius, T.; Grubliauskas, R.; Butkus, D. 2006. Konstrukcijos iš perforuotos skardos akustinių savybių tyrimas. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija. 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2008 04 03, medžiaga. Vilnius: Technika, 394–401.

Jaskelevičius, B., Užpelkienė, N. 2008. Research and assessment of wind turbines noise in Vydmantai. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 16(2): 76–82.

Jianu, O.; Rosen, A. M.; Naterer, G. 2011. Noise pollution prevention in wind turbines: status and recent advances. *The 1st World Sustainability Forum. G section Sustainability Assessment and Policies, 1–30 November 2011*: 1–14.

Jiménez Espada, M.; Díaz Sanchidrián, C.; Navacerrada Saturio, M. 2009. Noise absorbers properties of reed for using in fitting acoustic enclosures, in *Proceedings of the 1st International Conference on Construction and Building Research*, 24–26 June 2009, Madrid (Spain), 8. [interaktyvus]. 2009. Žiūrėta 2010 m. lapkričio 3 d. Prieiga per internetą: www.holiwood.org/fileadmin/publications/2009/UPM_090624_Proceedings_Acoustic_properties_of_reed_NPBS.pdf.

Joynt, J. L.; Kang, J. 2010. The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers. *Science of the Total Environment* 408(20): 4368–4375.

Jones, P.; Kessissoglou, N. 2009. An evaluation of current commercial acoustic FEA software for modelling small complex muffler geometries: prediction vs experiment. *Proceedings of Acoustics*: 23–25.

Jorgensen, E. R.; Borum, K. K.; McGugan, M.; Thomsen, C. L.; Jensen, F. M.; Debel, C. P.; Sorensen, B. F. Full scale testing of wind turbine blade to failure – flap wise loading. *Riso National Laboratory* [interaktyvus]. 2004. Žiūrėta 2009 m. lapkričio 3 d. Prieiga per internetą: <http://www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1392.pdf>.

Kamperman, G. W.; James, R. R. 2008. The “How to” guide to siting wind turbines to prevent health risks from sound. *Windaction. org*. Retrieved July, 7: 2011.

Katinas, V. Markevičius, A.; Burlakovas, A. 2006. Vėjo energetika ir jos artimiausia perspektyva Lietuvoje. *Energetika* 3: 67–76.

Katinas, V.; Tumosa, A. 1995. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. Vilnius: Voruta. 38 p.

Katinas, V. 2010. Vėjo energijos panaudojimo galimybės Lietuvoje. *Mokslas ir technika* [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2011 m. sausio 28 d. Prieiga per internetą: <<http://www.mokslasirtechnika.lt/mokslo-naujienos/v-jo-energetika-ir-jos-pl-tros-perspektyva-lietuvoje.html>>.

Kazragis, A.; Nickus, I.; Gailius, A. 1995. Statybinių medžiagų gamybos technologija, panaudojant organinius užpildus. Vilnius: Technika, 234–238.

Klug, H. Noise from Wind Turbines Standards and Noise Reduction Procedures. *Forum Acusticum* [interaktyvus]. 2002. Žiūrėta 2009 m. lapkričio 3 d. Prieiga per internetą: <<http://www.sea-acustica.es/Sevilla02/envgen013.pdf>>.

Krohn, S.; Damborg, S. 1999. On public attitudes towards wind power. *Renewable Energy* 16(1): 954–960.

Li, Y.; Paik, K.J.; Xing, T.; Carrica, P.M. 2012. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics. *Renewable Energy* 37: 285–298.

Magwood, C.; Mack, P.; Therrien, T. *More Straw Bale Building*. Canada, New Society Publishers 2005, 277 p.

Marčiukaitis, M. 2007. *Vėjo elektrinių galios prognozavimo galimybės Lietuvoje*. Energetika 53(3): 72–76.

Marčiukaitis, M.; Erlickytė-Marčiukaitienė, R.; Tumosa, A. 2009. Vėjo greičio kitimo dėsningumų Lietuvos pajūrio regione tyrimas. *Energetika*: 27–34.

Medina, P.; Singh, M.; Johansen, J.; Jove, A. R.; Machefaux, E.; Fingersh, L. J.; Schreck, S. 2011. Aerodynamic and Performance Measurements on a SWT-2.3-101 Wind Turbine. National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy: 13 p.

Merkevičius, S. 2004. Inžineriniai ir techniniai saugos metodai ir priemonės fizinei ir technologinei aplinkos taršai mažinti. Vibroakustinė tarša. Kaunas: 60 p.

Meseguer, J.; Franchini, S.; Pe' rez-Grande, I.; Sanz, J. L. 2004. On the aerodynamics of leading-edge high-lift devices of avian wings *Aerospace Engineering* 219: 63–68.

Migliore, P.; Van Dam, J.; Huskey, A. 2004. Acoustic tests of small wind turbines. *AIAA Paper*: 1185.

Mikalauskas, R.; Volkovas V. 2006. Investigation of the acoustic pressure model of the acoustic field generated by belt-drive. *Ultragarsas* 3(60): 40–43.

Mikalauskas, R.; Volkovas V. 2007. Development of the theoretical model of acoustic field on the basis of FEM and analysis of effectiveness 62(4): 32–35

Mikalauskas, R.; Volkovas V. 2009. Modeling of sound propagation in the closed space and its interaction with obstacles. *Mechanika* 6(80): 42–47.

Muljadi, E.; Butterfield, C. 2001. Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation. *Transactions on Industry Applications* 37(1): 240–246.

Naujokaitis, L.; Jasauskas, E. 2009. Laminarinio – turbulentinio virsmo vietos tyrimas

FX 66-S-196 V1 sparno profilio paviršiuje. Iš *Transporto inžinerija. 12-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2009 06 25, medžiaga. Vilnius: Technika, 120–124.

Nekrošius, L. Architektūros ir aplinkos darna: šiaudinis namas. *APS. Architektūra. Projektavimas. Statyba*. Vilnius: Oklikema. ISSN 1822-0355. 2007: 32–36.

Nelson, V. 2009. Wind energy: renewable energy and the environment. New York: CRC Press. 304 p. ISBN 978-1-4200-7568-7.

Ng, C. F.; Hui, C. K. 2008. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels. *Applied Acoustics* 69(4): 293–301.

Noise news [interaktyvus]. 2012. Žiūrėta 2012 m. vasario 22 d. Prieiga per internetą: <<http://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2011/08/what-are-a-c-z-frequency-weightings/>>.

Oerlemans, S. 2007. Prediction of wind turbine noise and comparison with experiment. *The Second International Meeting on Wind Turbine Noise*. September 20–21 2007: 18 p.

Oldham, D. J.; Egan, C. A.; Cookson, R. D. 2011. Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics* 72: 350–363.

Ottelė, M.; van Bohemen, H. D.; Fraaij, A. L. 2010. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering* 36(2): 154–162.

Pallapa, M.; Mohamed, A.; Chen, A. 2010. Modeling and Simulation of a Piezoelectric Micro-Power Generator. In *Proceedings of the COMSOL Conference, Boston*: 7 p.

Pathak, V.; Tripathi, B. D.; Mishra, V. K. 2008. Dynamics of traffic noise in a tropical city Varanasi and its abatement through vegetation. *Environmental Monitoring and Assessment* 146(1–3): 67–75.

Pao, L. Y.; Johnson, K. E. 2009. Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms. *2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10–12*: 2076–2089.

Paožalytė, I.; Grubliauskas, R.; Vaitiekūnas, P. 2012. Modelling the noise generated by railway transport: statistical analysis of modelling results applying CADNAA and IMMI programs. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(3): 206–212.

Pasupulati, S.; Wallace, J.; Dawson, M. 2005. Variable length blades wind turbine. *Power Engineering Society General Meeting* 3: 2097–2100.

Peck, L.; Styles, P.; Toon, S. Characterization of Seismic Noise at Selected Non-Urban Sites (No. ERDC/CRREL-TR-10-4). *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH*. [interaktyvus]. 2010. Žiūrėta 2013 m. vasario 22 d. Prieiga per internetą: <<http://www.dtic.mil/cgi-bin/gettrdoc?location=u2&doc=gettrdoc.pdf&ad=ada535990>>

Pedersen, E.; Wayne, K. P. 2004. Perception and annoyance due to wind turbine noise a dose response relationship. *The Journal of the Acoustical Society of America* 116: 34–60.

Persson, W. K.; Ohrstrom, E. 2002. Psycho – acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration* 250(1): 65–73.

Petrauskas, G. 2001. Modernių vėjo jėgainių savybės ir plėtojimo perspektyvos. *Energetika* 1: 74–78.

Petrauskas, G.; Adomavičius, V. 2001. Vėjo energijos išteklių ir jėgainių techninių ekonominių rodiklių įvertinimas projektavimo stadijoje. *Energetika* 2: 51–55.

Phipps, R.; Amati, M.; McCoard, S.; Fisher, R. Visual and noise effects reported by residents living close to manawatu wind farms: preliminary survey results. The politics of planing. New Zealand planning institute & earoph conference. March 27th–30th 2007. [interaktyvus]. 2007. Žiūrėta 2010 m. vasario 24d. Prieiga per internetą: <<http://www.earoph.info/pdf/2007papers/013.pdf>>.

Porte-Agel, F.; Wu, Y.T.; Lu, H.; Conzemius R.J. 2011. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99: 154–168.

Pothou, K. P.; Voutsinas, S. G.; Huberson, S. G.; Knio, O. M. 1996. Application of 3D Particle Method to the Prediction of Aerodynamic Sound. *ESAIM: Proceedings* 1: 349–362.

Prospathopoulos, J.; Voutsinas, S. Application of a ray theory model to the prediction of noise emission from isolated wind turbines and wind parks. *Conference paper EWEC 2006* 27 February–2 March 2006 [interaktyvus]. 2006. Žiūrėta 2010 m. kovo 3 d. Prieiga per internetą: <http://ewec2006.proceedings.info/allfiles2/156_Ewec2006fullpaper.pdf>.

Rimovskis, S.; Ramonas, Z. *Apsauga nuo triukšmo*. 2005. Šiauliai: Šiaulių universiteto leidykla. 76 p.

Rogers, A. L. ; Manwell, J. F. Wright, S. Winkler Wind Turbine Acoustic Noise. *Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts at Amherst, January 2006* [interaktyvus]. 2006. Žiūrėta 2009 m. gruodžio 30 d. Prieiga per internetą: http://www.ceere.org/rerl/publications/whitepapers/Wind_Turbine_Acoustic_Noise_Rev2006.pdf

Rogers, T.; Omer, S. 2012. The effect of turbulence on noise emissions from a micro-scale horizontal axis wind turbine. *Renewable Energy* 41: 180–184.

Salleh, A. Vibrating plane wings may delay stalling. *ABC Science Online*, 18 August 2005 [interaktyvus]. 2005. Žiūrėta 2009 m. gruodžio 30 d. Prieiga per internetą: <http://www.abc.net.au/science/news/stories/s1439827.htm>

Salt, A. N.; Lichtenhan, J. T. 2011. Responses of the inner ear to infrasound. *Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise. Rome 12–14 April 2011* [interaktyvus]. 2011. Žiūrėta 2012 m. gruodžio 30 d. Prieiga per internet: <http://oto2.wustl.edu/cochlea/saltlichtenhan.pdf>

Salvi, D.; Boldor, D.; Ortego, J.; Aita, G. M.; Sabliov, C. M. 2010. Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating: A Critical Comparison of COMSOL and ANSYS. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 44(4): 187–197.

Seydel, J.; Aliseda, A. 2013. Wind turbine performance in shear flow and in the wake of another turbine through high fidelity numerical simulations with moving mesh technique. *Wind Energy* 16(1): 123–138.

Shepherd, D.; McBride, D.; Welch, D.; Dirks, K. N.; Hill, E. M. Wind turbine noise and health – related quality of life of nearby residents: a cross – sectional study in New Zealand. Responses of the inner ear to infrasound. *Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise. Rome 12–14 April 2011*. [interaktyvus] 2011. Žiūrėta 2012 m. gegužės 27 d. prieiga per internetą: <http://co.wasco.or.us/planning/energy/bocc/new_comments/after_2-15/swaim7_shepherd_et_al_wind_turbine_noise.pdf>.

Snyder, B.; Kaiser, M. J. 2009. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. *Renewable Energy* 34: 1567–1578.

Stauskis, V. J. *Statybinė akustika*. 2008. Vilnius: „Technika“, 268 p.

Stauskis, V. J.; Kunigėlis, V. 1998. Įvairių garso šaltinių akustinės charakteristikos. *Journal of Civil Engineering and Management* 4(4): 311–315.

Styles P.; Westwood R.F.; Toon S. M.; Buckingham M. P.; Marmo B.; Carruthers B. 2011 Monitoring and mitigation of low frequency noise from wind turbines to protect comprehensive test ban seismic monitoring stations. *Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise, Rome Italy 12–14 April 2011*: 13.

Szasz, R. Z.; Fuchs, L. 2010. Wind turbine acoustics. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*: 153 p.

Swinbanks, M. A. The audibility of low frequency wind turbine noise. *Responses of the inner ear to infrasound. Fourth International Meeting on Wind Turbine Noise. Rome 12–14 April 2011* [interaktyvus] 2011. Žiūrėta 2012 m. gegužės 27d. Prieiga per internetą: <<http://www.macvspc.info/the%20audibility%20of%20low%20frequency%20wind%20turbine%20noise.pdf>>.

Šostak, O. R.; Kutut, V. 2011. Investigation into Expansion of Illegal Construction in the National Park of Curonian Spit. *Business: Theory and Practice/Verslas: Teorija ir Praktika*, 10(3): 223–232.

Tadeu, T.; Antonio, J.; Mateus, D. 2004. Sound insulation provided by single and double panel walls—a comparison of analytical solutions versus experimental results. *Applied Acoustics* 65(1): 15–29.

Tadeu A.; Pereira, A.; Godinho, L.; Antonio, J. 2007. Prediction of airborne sound and impact sound insulation provided by single and multilayer systems using analytical expressions. *Applied Acoustics* 68(1): 17–42.

Tangler, J. L. The Evolution of Rotor and Blade Design *Conference Paper WindPower 2000, Palm Springs, April 30–May 4 2000* [interaktyvus]. 2000. Žiūrėta 2009 m. lapkričio 3 d. Prieiga per internetą: <http://vawt.no-ip.info/wind_turbine/download/vawt/airfoil2.pdf>.

Tenguria, N.; Mittal, N.D.; Ahmed, S. 2011. Review on horizontal axis wind turbine rotor design and optimization. *Trends in Applied Sciences Research* 6(4): 309–344.

Thorne, B. 2010. The problems with „noise numbers“ for wind farm noise assessment

.First International Symposium on Adverse Health Effects From Wind Turbines 2010 October 29–31:1–45.

Turnbull, C.; Turner, J.; Walsh, D. 2012. Measurement and level of infrasound from wind farms and other sources. *Acoustics Australia*, 40(1): 45–52.

Užpelkienė, N.; Jaskelvičius, B. 2006. Vydmantų vėjo jėgainės keliamo triukšmo tyrimas ir vertinimas. Iš *Aplinkos apsaugos inžinerija. 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2006 03 30, medžiaga. Vilnius: Technika, 292–298.

Van den Berg, G.P. 2003. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration Science* 277: 955–970.

Van den Berg, G. P. 2004. 11th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control Maastricht The Netherlands 30 August to 1 September: 8 p.

Van den Berg, G.P. 2006. The sounds of high winds: the effect of atmospheric stability on wind turbine sound and microphone noise. Dissertation, University of Groningen, Groningen: 210 p.

Van den Berg, F. 2008. Criteria for wind farm noise: Lmax and Lden. *Acoustics 08, Paris, June 29 – July 4 2008*: 4043–4048.

Van Kooten, G.C.; Wong, L. 2010. Economics of wind power when national grids are unreliable. *Energy Policy* 38: 1991–1998.

Vargas, L. F. C.; Oliveira, J. M. G. S.; Lau, F. J. 2009. Development of a wind turbine noise prediction model. *7th EUROMECH Solid Mechanics Conference*. Lisbon, Portugal, 7–11 September: 1–10.

Venckus, Ž.; Grubliauskas, R.; Venslovas, A. 2012. The Research on the Effectiveness of the Inclined Top Type of a Noise Barrier. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(2): 155–162.

Vėjelienė, J. 2012. Processed straw as effective thermal insulation for building envelope constructions. *Engineering Structures and Technologies* 4(3): 96–103.

Watts, M. Windmills. 2006. *Buckinghamshire: Shire Publications*: 64 p. ISBN 978-0-74780-653-0

Wang, X.; Deng, Y.; Wang, S.; Liao, C.; Meng, Y.; Pham, T. 2013. Nanoscale Characterization of Reed Stalk Fiber Cell Walls. *BioResources* 8(2): 1986–1996.

Winkler, J.; Temel, F. Z.; Carolus, T. Concept, design and characterization of a small aeroacoustic wind tunnel facility with application to fan blade measurements. *Fan Noise 2007, Lyon, September 17–19 2007* [interaktyvus]. 2007. Žiūrėta 2009 m. lapkričio 3 d. Prieiga per internetą: <http://www.uni-siegen.de/fb11/iftsm/forschung/c2007_winkler_etal_fn07.pdf>.

Абракітов, В.Э. 2004. Взаимосвязь сходственных параметров модели и натуры при аналоговом моделировании процессов распространения шума. Тези доповідей науково-методичної конференції *Безпека життєдіяльності*. Харків: 82 с.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Butkus, D.; Grubliauskas, R.; Mažuolis, J. 2012. Research of equivalent and maximum value of noise generated by wind power plants. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management* 20(1): 27–34. ISSN 1648-6897. IF = 1.958 (Thomson ISI Web of Science).

Deveikytė, S.; Mažuolis, J.; Vaitiekūnas, P. 2012. Experimental investigation into noise insulation of straw and reeds. „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ *Aplinkos apsaugos inžinerija* 4(5): 415–422. ISSN 2029-2341.

Straipsniai kituose mokslo leidiniuose

Eivienė, R.; Mažuolis, J.; Butkus, D. 2012. Triukšmo sklaidos tarp dviejų vėjo jėgainių tyrimas. *Aplinkos apsaugos inžinerija : 15-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ straipsnių rinkinys* (2012 m. balandžio 12 d.). Vilnius : Technika. ISSN 2029-5456. 243-249.

Butkus, D.; Januševičius, T.; Mažuolis, J. 2011. *Building partitions acoustic properties [Pastato dalių akustinės savybės], The 8th International Conference*

„*Environmental Engineering*“ May 19–20, 2011, Vilnius: Technika, 43–49.

Mažuolis, J.; Butkus, D. 2010. Plaušamolio sienos tyrimai vėjo jėginių triukšmui mažinti gyvenvietėje, iš *Aplinkos apsaugos inžinerija: 13-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, įvykusios Vilniuje 2009 m. kovo 25 d., pranešimų medžiagos, Vilnius: Technika.

Jurgis MAŽUOLIS

VĖJO JĖGAINIŲ KELIAMO TRIUKŠMO BEI APSAUGOS PRIEMONIŲ TYRIMAS IR
VERTINIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Aplinkos inžinerija (04T)

RESEARCH AND EVALUATION OF WIND TURBINES NOISE AND PROTECTION
MEASURES

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Environmental Engineering (04T)

2013 12 20. 13,75 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius