

Vėjo jėgainių generuojamo akustinio triukšmo ir jo poveikio aplinkai tyrimai

Vladislovas Katinas,

Mantas Marčiukaitis,

Marijona Tamašauskienė

*Lietuvos energetikos institutas,
Atsinaujinančių energijos
šaltinių laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas.
El. paštas: res@mail.lei.lt*

Straipsnyje pateikti vėjo jėgainių (VJ) generuojamo triukšmo statistikos parametru kitimo dėsningumų tyrimai. Taikant greitosios Furje transformacijos algoritmą nustatyta, kad VJ generuojamo triukšmo garso slėgio pulsacijų spektre, palyginti su aplinkos foninio triukšmo spektru, didžiausi pokyčiai įvyksta 200–3 150 Hz dažnių diapazone, o infragarso, žemo dažnio (16–200 Hz) ir ultragarso dažnių diapazonuose šių spektrų stebimi tik neesminiai pokyčiai. Literatūros duomenų analizė rodo, kad VJ generuojamo akustinio triukšmo intensyvumo lygis priklauso nuo jos elementų aptekėjimo aerodinaminių procesų ir mechaninio triukšmo intensyvumo. Vertinant VJ generuojamo triukšmo lygį būtina atsižvelgti ir į vėjo sukiamą foninį triukšmą, kuriam didelės įtakos turi vėjo srauto greičio dydis. Tyrimai rodo, kad VJ generuojamo triukšmo lygis, pučiant 12 m/s greičio vėjui ir esant atstumui iki VJ bokšto didesniau negu 100 m, tampa lygus foninio triukšmo lygiui. Pateiktas teorinis modelis VJ generuojamo triukšmo intensyvumo lygiui, atsižvelgiant į atstumą iki VJ, apskaičiuoti.

Raktažodžiai: vėjo jėgainė, akustinis triukšmas, statistikos parametrai, spektras, intensyvumas, vertinimas

ĮVADAS

Vėjo jėgainių (VJ) akustinio triukšmo tyrimo duomenys rodo, kad jų generuojamą triukšmą galima suskirstyti į du pagrindinius triukšmo šaltinius: mechaninį ir aerodinaminį. Mechaninį triukšmą sukelia rotoriaus judančios dalys, greičio dėžė, gondolos pasukimo mechanizmas ir t. t. Aerodinaminis triukšmas kyla dėl oro srauto pokyčių, įvykstančių aptekant sparnus. Tai oro srauto atakos taške kylančios turbulencinės pulsacijos, taip pat ant sparno paviršiaus vykstantys oro srauto pasienio sluoksnio tekėjimo pokyčiai ir t. t. [1–5]. Be to, susidaro aerodinaminės pulsacijos dėl besisukančių sparnų sąveikos su VJ bokšto konstrukciniais elementais.

Atlikti Enercon E82, Enercon E70, Nordex N90 ir kitų jėgainių tyrimai [4, 5] kintant vėjo greičiui nuo 4 m/s iki 10 m/s rodo, kad VJ triukšmo intensyvumas priklauso nuo atmosferos ir žemės paviršiaus absorbcijos, garso atspindžio, topografinio žemės paviršiaus efekto, metrologinių sąlygų ir daugelio kitų veiksnių. Pateikti duomenys [1] rodo, kad tiek mažosios, tiek didžiosios VJ generuoja tam tikrą akustinį triukšmą. Didėjant atstumui nuo VJ, triukšmo intensyvumas mažėja [3, 4]. Triukšmas yra geriau sugeriamas puraus nei kieto žemės paviršiaus. Be to, paviršiaus sugertis labai priklauso ir nuo triukšmo dažnio [6]. Triukšmo dažnių diapazone nuo 100 Hz iki 1 000 Hz pastebima paprastai didžiausia triukšmo sugertis [1–3]. Triukšmo slopinimas atliekamas mažinant triukšmo lygį

jo kilimo šaltinyje, taip pat statant architektūrines užtvaras, sodinat įvairius želdinius.

Atlikti pirminiai jėginių E82 triukšmo Anužių kaime (Pagėgių sav.) ir Kiauleikių kaime (Kretingos r.) tyrimai [7] rodo, kad VJ pasirinktose aikštelėse aplinkos triukšmo lygis yra gana intensyvus, palyginti su VJ keliamu triukšmu. Nustatyta, kad VJ keliamas triukšmas esant atstumui didesniai nei 50 metrų iki VJ bokšto ir vėjo greičiui 6 m/s neviršija higienos normose numatytos maksimalios 45 dB(A) ribos [8]. Triukšmo tyrimo duomenys [9, 10] patvirtina, kad didėjant atstumui nuo VJ akustinis triukšmas mažėja ir yra mažesnis už Higienos normos HN 33:2011 nustatytą leistiną 45 dB(A) normatyvų dydį [8]. Atlikti žmonių sveikatos tyrimai [1, 11, 12] rodo, kad triukšmo lygis, didesnis nei 40 dB(A), kai kuriuos žmones pradeda erzinti. Dėl VJ keliamo triukšmo apribojama jų statyba arti gyvenamųjų pastatų ar visuomeninių objektų.

Straipsnyje pateikti VJ skleidžiamo triukšmo slopinimo procesų ir akustinio triukšmo statistikos parametrų kintimo dėsnų tyrimai. Išanalizuotas VJ generuojamo triukšmo pobūdis, intensyvumas, priklausomumas nuo aplinkai įtakos turinčių veiksnių.

TYRIMŲ METODIKA

VJ akustinis triukšmas apibūdinamas dažniu ir intensyvumo lygiu. Garso intensyvumas vertinamas decibelais, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_I = 10 \lg(I/I_0); \quad (1)$$

čia: I – matuojamas garso intensyvumas, W/m^2 ; I_0 – girdimumo garso ribinis intensyvumas, ($I_0 = 10^{12} W/m^2$).

Garso intensyvumas I išreiškiamas [3]:

$$I = \text{Energija} / (\text{Laikas} \times \text{plotas})$$

arba

$$I = \text{Galia} / \text{Plotas}. \quad (2)$$

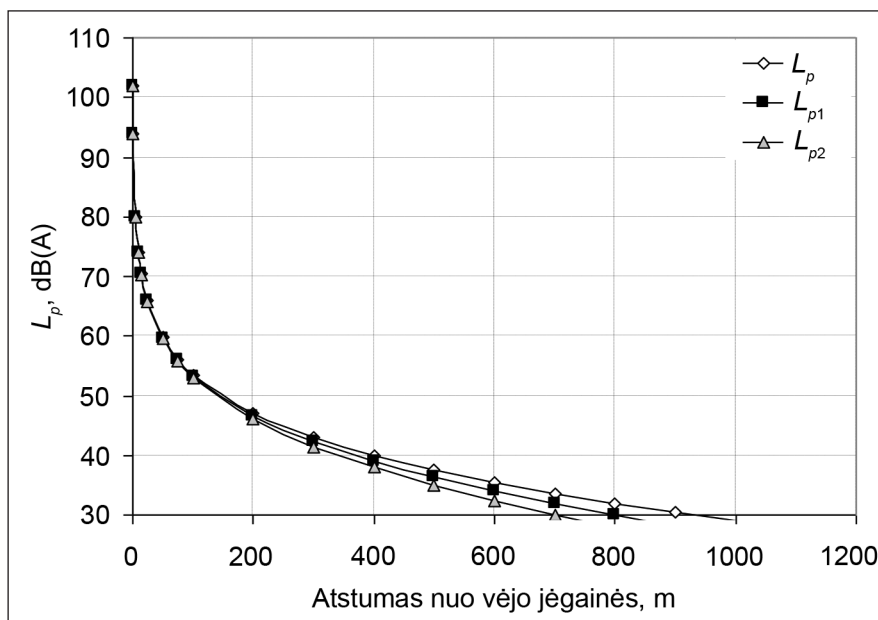
Teoriškai vertinant objekto skleidžiamo triukšmo dydį decibelais, atsižvelgiant į atstumą iki jėginės bokšto, galime aprašyti pasinaudodami formule [13, 14]:

$$L_p = L_w - 10 \log(2\pi R^2) - \alpha R + L_g; \quad (3)$$

čia: L_p – triukšmo lygis decibelais, dB(A); L_w – maksimalus VJ rotoriaus ašies aukštyje skleidžiamo triukšmo lygis; R – atstumas nuo VJ rotoriaus ašies iki matavimo prietaiso; α – atmosferos absorbcijos koeficientas; L_g – triukšmo lygio korekcija dėl žemės paviršiaus poveikio.

VJ triukšmo lygis ašies aukštyje priklauso nuo jėginės tipo. Enercon tipo VJ triukšmas kinta nuo 89 dB(A) iki 107 dB(A) [15–18]. Atmosferos absorbcijos koeficiento α reikšmė esant aplinkos temperatūrai $t = 20$ °C ir dažniui 1 000 Hz apytikriai yra lygi 0,005 [19, 20]. Tačiau šio koeficiento reikšmė α priklauso nuo aplinkos temperatūros ir akustinio triukšmo dažnio. Didėjant aplinkos temperatūrai ar triukšmo dažniui atmosferos akustinio triukšmo slopinimas didėja (pvz., prie $t = 30$ °C $\alpha = 0,0075$). Garso bangos sklaidimo greitis priklauso nuo terpės, kuria ji sklinda, savybių. Jis tuo didesnis, kuo didesnis terpės tankis. Pavyzdžiui, girdimųjų dažnių (16 Hz – 20 kHz) garso bangos greitis ore apytikriai yra lygus 340 m/s.

Teoriškai apskaičiuoto triukšmo lygio, atsižvelgiant į atstumą iki VJ, prie skirtingų atmosferos absorbcijos koeficientų reikšmių rodo, kad atmosferos absorbcijos koeficiento α įtaka VJ keliamam triukšmo lygiui intensyviau pasireiškia esant didesniai atstumui nuo jėginės (1 pav.). Triukšmo lygio korekcija dėl žemės paviršiaus



1 pav. Teoriškai apskaičiuoto 1,5 m aukštyje virš žemės paviršiaus triukšmo lygio priklausomumas nuo atstumo iki VJ esant skirtingoms atmosferos absorbcijos koeficientų reikšmėms: L_p , kai $\alpha = 0,005$; L_{p1} , kai $\alpha = 0,0075$; L_{p2} , kai $\alpha = 0,01$

Lentelė. Pataisos ΔL reikšmės

Dviejų triukšmo šaltinių lygių skirtumas, dB	0	1	2	4	6	8	10	15	20
Pataisos ΔL reikšmės, dB	3,01	2,54	2,12	1,45	0,97	0,64	0,41	0,14	0,04

poveikio L_g VJ, įrengtoms žemyne, priimama 1,5 dB(A), o jūroje – 3 dB(A). Be to, būtina įvertinti ir tai, kad bet kurioje tradicinėje aplinkoje egzistuoja ir kiti triukšmo šaltiniai, kurių poveikį nustatant VJ triukšmą irgi būtina įvertinti.

VJ keliamas triukšmas gali būti generuojamas kelių triukšmo šaltinių. Esant keliems triukšmo šaltiniams su skirtingais triukšmo lygiais, suminis triukšmo lygis nebus aritmetinė triukšmo lygių suma. Norint apskaičiuoti bendrą triukšmo lygį prie didesnio iš dviejų sumuojamų lygių pridedama pataisa ΔL . Bendras triukšmo lygis iš dviejų triukšmo šaltinių bus lygus [13]:

$$L = L_1 + \Delta L; \quad (4)$$

čia: L_1 – didesnis iš dviejų sumuojamų triukšmo lygių.

Triukšmo šaltinių skleidžiamo triukšmo sumavimas vyksta taip, kad pirmiausiai nustatomi du triukšmo šaltiniai, kurių skleidžiami triukšmo lygiai yra didžiausi, ir randamas suminis šių triukšmų dydis, o po to prie jo sumuojamas kitas didžiausias triukšmas ir t. t.

Pataisai ΔL nustatyti galime naudoti lentelėje pasiūlytus duomenis, apskaičiuotus pagal literatūros šaltiniuose [13, 23] pateiktas formules.

Paprastai nustatomas VJ maksimalus skleidžiamas triukšmas, o po to apskaičiuojamas jo intensyvumo kitimas atsižvelgiant į atstumą iki objekto. VJ triukšmo matavimai, atsižvelgiant į Lietuvos higienos normų (HN 33-1:2003) reikalavimus, atliekami 1,5 m aukštyje nuo žemės paviršiaus.

EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Eksperimentiniai tyrimai atlikti matuojant UAB „Intuva“ Prozariskių k. (Kaišiadorių r.) veikiančios 250 kW galios VJ triukšmą. 65 m aukščio Enercon E-40 tipo VJ įrengta toliau nuo apgyvendintų teritorijų, o aplinkui yra išsidėsčiusi žemės ūkio paskirties žemė. Netoliese VJ nėra nei didelių medžių, nei krūmų. Tyrimai atlikti esant skirtingiems vėjo greičiams. Triukšmui matuoti panaudotas nešiojamas triukšmo analizatorius 2250 Bruel ir Kjaer firmos (Danija). Matavimo duomenims analizuoti naudota dažnio analizavimo programa BZ-5503.

Akustinio triukšmo matavimai atlikti vėjo pūtimo kryptimi, prieš vėjo pūtimo kryptį ir statmenai vėjo kryptčiai esant skirtingiems atstumams iki VJ bokšto (2 pav.). Atstumas x nuo VJ bokšto buvo keičiamas kas 25 m, t. y. buvo parinktas 0, 25, 50 m ir t. t. Kiekvieno matavimo 1,5 m aukštyje virš žemės paviršiaus trukmė tęsėsi apie

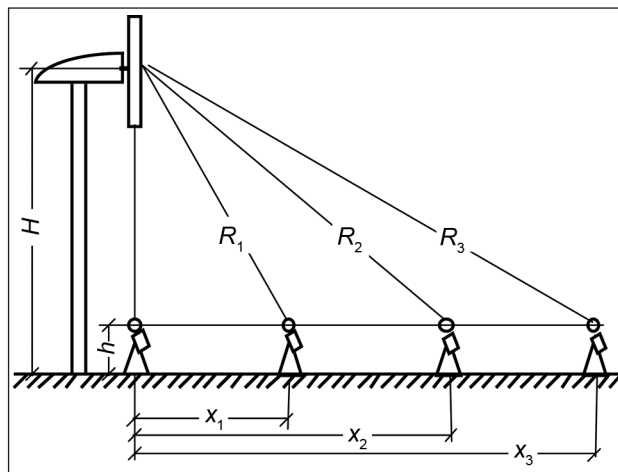
5 min. Duomenys sukaupti analizatoriaus atmintyje BZ-5503 programinės įrangos paketo pagalba buvo patiekiami į kompiuterį. Dažnio analizės programa leido naudoti 1/1 oktavos arba 1/3 oktavos ir plačiau suapvalytus garso matavimus vienu metu.

Dažnio analizatoriumi buvo nustatomi tokie spektro parametrai kartu su spektrine statistika: LX_{eq} , LXF_{max} , LXS_{max} , LXF_{min} , LXS_{min} . Čia: X – dažnio svoriniai įverčiai A , B , C ir Z . Spektrinė statistika buvo peržiūrėta kaip L_{XYN} procentinis spektras, kur Y laiko apgrova F ar S , o N vienas iš procentinių parametrų.

Vertinant akustinį triukšmą girdimųjų garsų dažnių diapazonas buvo skirstomas į vienos oktavos (1/1) arba vieno trečdaliao oktavos (1/3) pločio juostas. Juostos pažymėtos vidutiniais geometriniais (centriniais) dažniais. Panaudotas 1/3 oktavos triukšmo spektras. Priimti tokie jo juostų centriniai dažniai: 12,5; 20; 31,5; 50; 80; 125; 200; 315; 500; 800; 1 250; 2 000; 3 150; 5 000; 8 000; 12 500; 20 000 Hz.

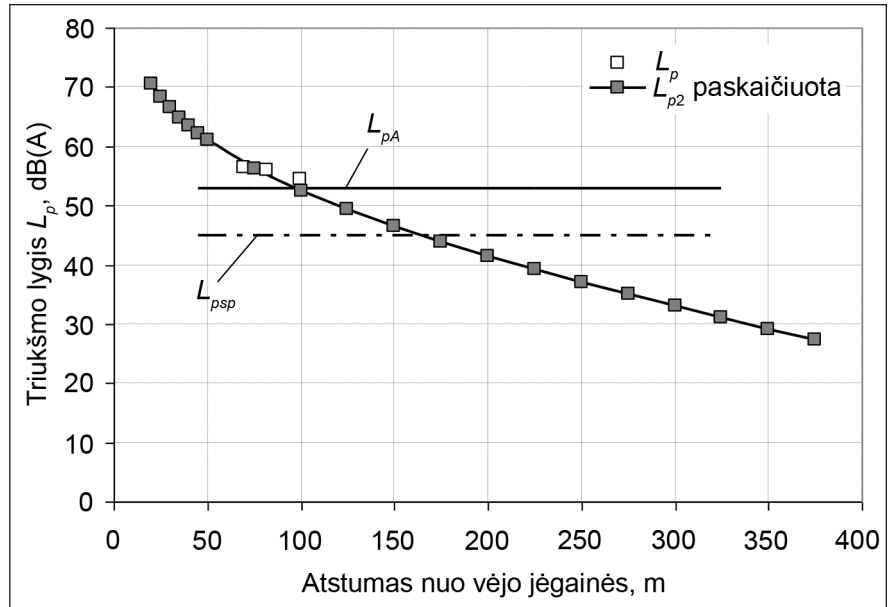
TYRIMŲ REZULTATAI IR ANALIZĖ

Iš gautų eksperimentinių tyrimo duomenų matome, kad VJ triukšmo lygiui didelės įtakos turi ir foninis aplinkos triukšmo lygis. Esant VJ sustabdytai ir vėjo greičiui $v \approx 12$ m/s, keičiantis atstumui nuo VJ bokšto, aplinkos foninis triukšmo lygis L_{Aeq} kito nuo 50,3 iki 56 dB(A). Apytiksliai galima priimti, kad jis buvo lygus $L_{Aeq} \approx 53$ dB(A). Iš pateiktų 3 pav. duomenų matome, kad suminis triukšmas yra pakankamai didelis. Be to, būtina įvertinti, kad suminis triukšmas susideda iš dviejų pagrindinių dedamųjų – tai aplinkos foninis triukšmas, kuris lygus apie 53 dB(A) ir

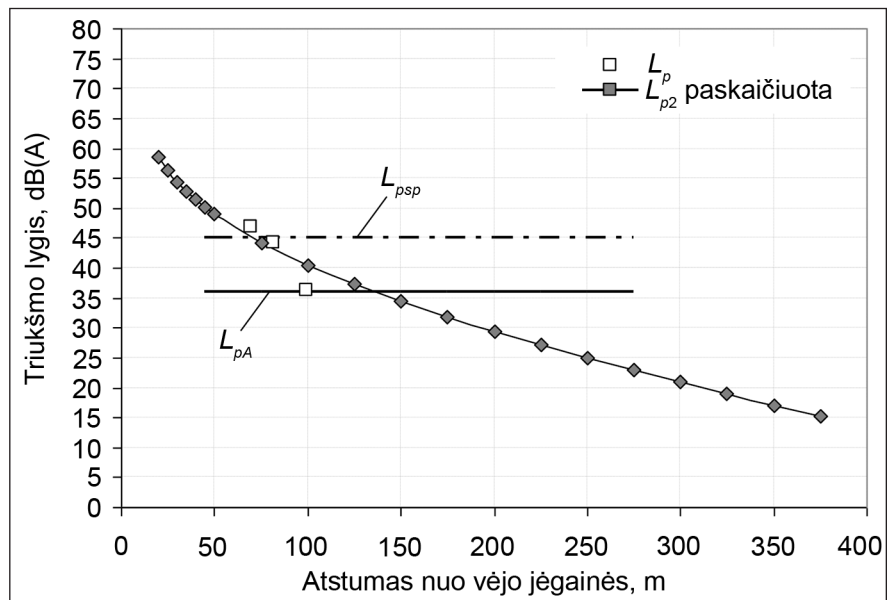


2 pav. VJ akustinio triukšmo matavimų prieš vėjo pūtimo kryptį schema

3 pav. Akustinio triukšmo statistikos rodiklių kitimas esant 12 m/s vėjo greičiui rotoriaus aukštyje. Eksperimentiniai ir teorinio skaičiavimo duomenys: L_p – triukšmo lygis kintant atstumui vėjo pūtimo kryptimi; L_{p2} – VJ triukšmo lygio teorinis skaičiavimas pagal (3) lygybę; L_{psp} – higienos normų leistinas maksimalus triukšmo lygis (45 dB(A)); L_{pA} – aplinkos foninis triukšmo lygis (53 dB(A)). VJ generuojamo triukšmo lygis rotoriaus ašies aukštyje $L_w \approx 107$ dB(A)



4 pav. Akustinio triukšmo statistikos rodiklių kitimas esant 6 m/s vėjo greičiui rotoriaus aukštyje. Eksperimentiniai ir teorinio skaičiavimo duomenys: L_p – triukšmo lygis kintant atstumui vėjo pūtimo kryptimi; L_{p2} – VJ generuojamo triukšmo lygio teorinis skaičiavimas pagal (3) lygybę; L_{psp} – higienos normų leistinas maksimalus lygis (45 dB(A)); L_{pA} – aplinkos foninis triukšmo lygis (36 dB(A)). VJ generuojamo triukšmo lygis rotoriaus ašies aukštyje $L_w \approx 95$ dB(A)



yra sukeliamas vėjo gūsių, bei VJ generuojamas triukšmas. Suminis triukšmas buvo apskaičiuotas pagal (4) formulę. Eksperimentiniai duomenys rodo, kad jau esant nedideliame atstumui nuo bokšto VJ generuojamas triukšmas turi mažai įtakos bendram triukšmo lygiui.

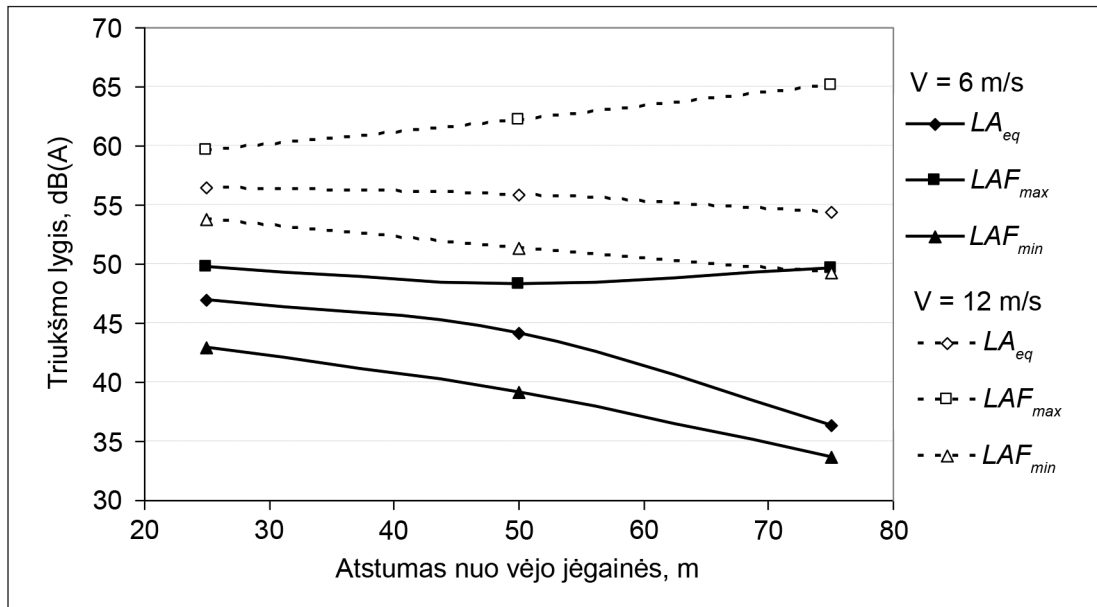
Mažėjant vėjo greičiui, mažėja VJ ir vėjo generuojamo aplinkos foninio triukšmo lygiai. VJ triukšmas ašies lygyje esant vėjo greičiui $v = 6$ m/s, palyginti su vėjo greičiu $v = 12$ m/s, sumažėjo nuo 107 dB(A) iki 96 dB(A) [16–18, 21], o vėjo generuojamas aplinkos foninis triukšmas – iki 36 dB(A). Pateikti 4 pav. eksperimentiniai ir teorinio skaičiavimo duomenys rodo, kad esant 6 m/s vėjo aplinkos foninio triukšmo lygis yra gerokai mažesnis negu VJ generuojamas triukšmas.

Tyrimai rodo, kad ilgainiui VJ generuojamo triukšmo intensyvumas kinta. Jis gali būti vos girdimas, o kartais

gana intensyvus. Matome (5 pav.), kad tam tikrais laiko tarpais triukšmo intensyvumas (LAF_{max}) yra gerokai didesnis nei ekvivalentinis lygis (LA_{eq}), tačiau taip pat jis gali būti ir gerokai mažesnis (LAF_{min}) nei ekvivalentinis lygis (LA_{eq}).

VJ triukšmą galima apibrėžti kaip skirtingo dažnio ir stiprumo garso bangų visumą, kuri gali sukelti nepalankių bei kenksmingų pasekmių sveikatai. Taikant greitosios Furje transformacijos algoritmą nustatyta, kad VJ generuojamas triukšmas yra plačiau juostis (6 pav.). VJ akustinis triukšmas yra generuojamas prie visų dažnių. Didėjant atstumui nuo VJ bokšto, akustinio triukšmo intensyvumas mažėja.

Vidutiniškai žmogaus ausis girdi garsus, kurių dažnis yra tarp 16 Hz ir 20 kHz. Žemesnio nei 16 Hz dažnio garsai vadinami infragarsu, o aukštesnio kaip 20 kHz – ultragar-

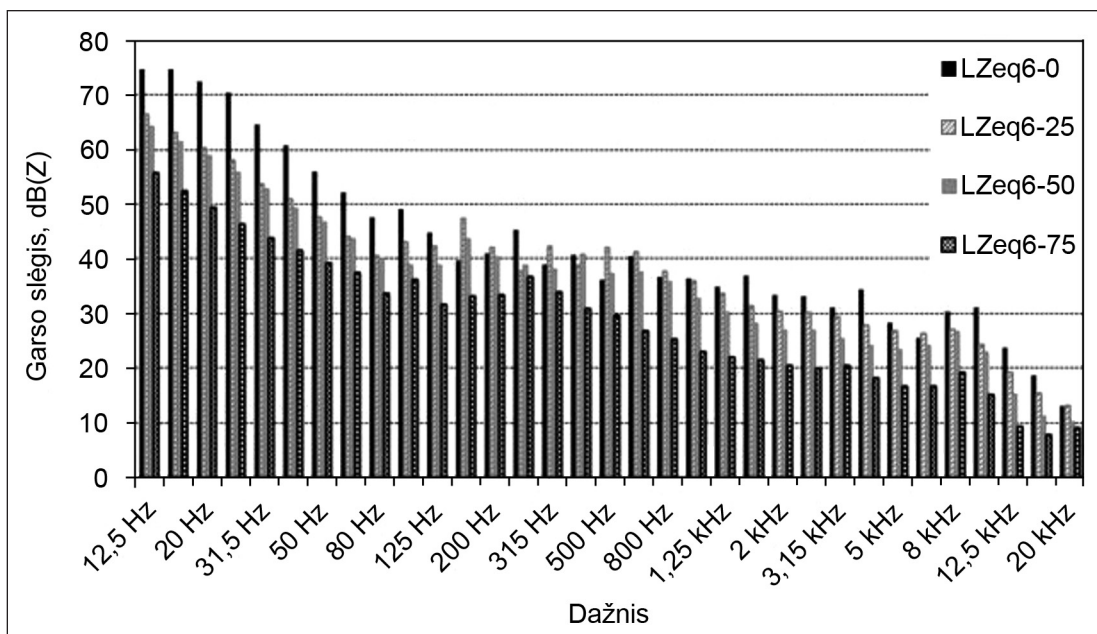


5 pav. Akustinio triukšmo LA_{eq} , LAF_{max} , LAF_{min} statistikos rodiklių kitimas esant vėjo greičiui 6 m/s ir 12 m/s ir skirtingiems atstumams iki VJ bokšto

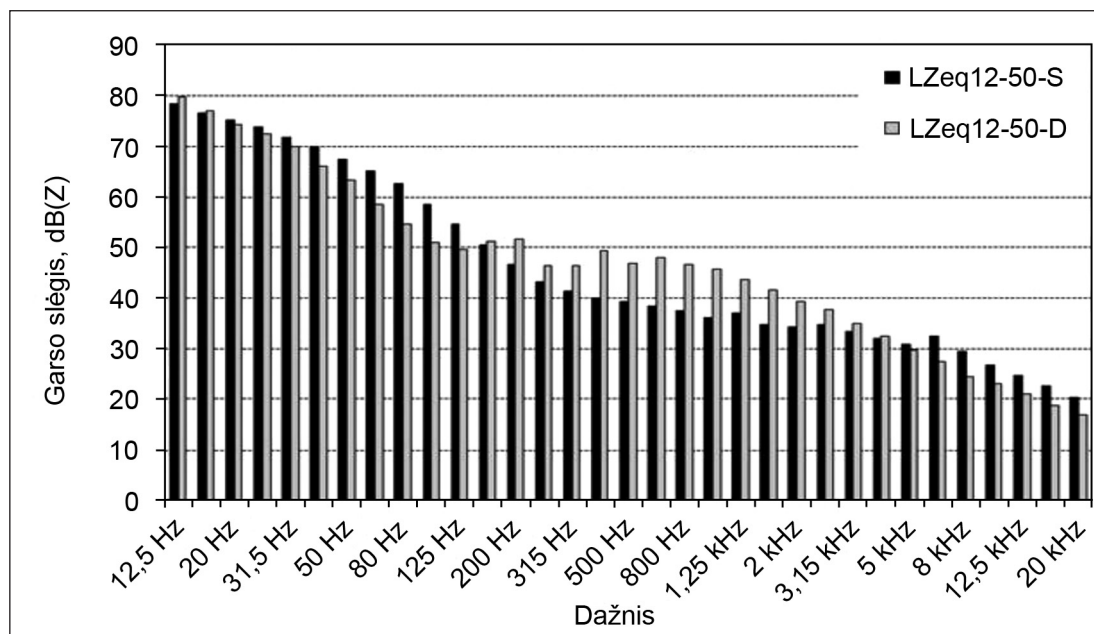
su [22]. Jų žmogaus klausa nesuvokia, tačiau didesni infragarso ar ultragarso lygiai sukelia diskomforto jausmą bei žaloja žmonių sveikatą [12, 24]. Žmogaus klausa labiau reaguoja į santykinį garso slėgio pasikeitimą negu į absoliutųjį, todėl garso slėgis išreiškiamas logaritminėje skalėje garso slėgio lygiu L_p decibelais (dB). Žmogaus klausos garso spaudimo pulsacijų kitimo intensyvumo ribos apytiksliai yra nuo 0 iki 140 dB. Triukšmas, kurio garso lygiai didesni nei 140 dB, sukelia skausmą ir gali sužaloti klausos organus [25].

Iš pateiktų duomenų (6 pav.) matome, kad didžiausias garso stiprumas yra žemų dažnių srityje (nuo 0 iki 200 Hz). Didėjant dažniams nuo 200 Hz garso stiprumas šiek tiek suintensyvėja, o po to didėjant dažniams tolygiai mažėja. Skirtingų dažnių triukšmas atsiranda dėl aerodinaminių efektų aptekant VJ rotoriaus sparnus ir kitus VJ elementus [6, 15], taip pat apsprendžiamas aplinkos foninio triukšmo sandara.

Tyrimai rodo, kad esant dideliems vėjo greičiams ($v = 12$ m/s) VJ generuojamas triukšmas turi mažai įtakos



6 pav. VJ generuojamo akustinio triukšmo spektro kitimas esant vėjo srauto greičiui 6 m/s ir atstumui nuo jos bokšto: $x = 0$ (LZeq6-0), $x = 25$ m (LZeq6-25), $x = 50$ m (LZeq6-50), $x = 75$ m (LZeq6-75)



7 pav. Akustinio triukšmo spektro kitimas esant vėjo srauto greičiui 12 m/s ir atstumui nuo VJ bokšto $x = 50$ m, kai VJ sustabdyta (LZeq12-50-S) ir VJ veikia (LZeq12-50-D)

bendram ekvivalentiniam triukšmo lygiui (7 pav.). Veikiant VJ, ekvivalentinis triukšmo lygis 50 m atstumu nuo VJ bokšto lygus 55,9 dB(A), o sustabdžius VJ jis sumažėjo iki 50,3 dB(A).

Veikiant VJ, generuojamo triukšmo 200–3 150 Hz dažnių diapazone pastebimas triukšmo spektro dedamųjų padidėjimas. Matome, kad VJ generuoja triukšmą dažnių diapazone, kuris turi daugiausia įtakos žmogaus klausos organams [15].

IŠVADOS

1. Tyrimai rodo, kad nustatant vietovės akustinių triukšmą būtina įvertinti VJ generuojamo ir aplinkos foninio triukšmo lygius, kurių intensyvumui didelės įtakos turi vėjo srauto greitis. Didėjant vėjo greičiams, triukšmo lygis tampa labiau intensyvus. Vėjo greičiui esant $v \approx 12$ m/s ir atstumui iki VJ bokšto didesniai nei 100 m, VJ generuojamo triukšmo lygis susilygina su aplinkos foninio triukšmo lygiu.

2. Pateiktas VJ generuojamo triukšmo lygio nustatymo teorinis modelis atitinka eksperimentinius matavimus natūraliomis sąlygomis, todėl gali būti taikomas triukšmo intensyvumui tolstant nuo VJ apskaičiuoti.

3. Taikant greitosios Furje transformacijos algoritmą nustatyta, kad VJ generuojamas triukšmas yra plačiajuostis, o atstumui nuo jėgainės didėjant garso slėgis tolygiai mažėja. Tik infragarso, žemų dažnių ir ultragarso artimų dažnių ribose pastebimas nedidelis triukšmo spektro intensyvumo nukrypimas nuo bendros tendencijos.

4. Literatūros šaltinių apžvalga ir analizė rodo, kad VJ generuojamo triukšmo intensyvumo lygis priklauso nuo

konstrukcinių elementų aerodinaminių aptekėjimo reiškinų ir mechaninių akustinio triukšmo generacijos procesų. VJ akustinis triukšmas didėja dėl akustinių atspindžių nuo žemės paviršiaus ir aplinkinių statinių, o triukšmo absorbcijai įtakos turi oro tankis, drėgmė, taip pat krašto vaizdžio elementų aerodinaminio aptekėjimo sąlygos.

5. Nustatyta, kad VJ generuojamo triukšmo garso slėgio pulsacijų spektre, palyginti su aplinkos foninio triukšmo spektru, didžiausi pokyčiai įvyksta 200–3 150 Hz dažnių diapazone. Infragarso, žemo dažnio (16–200 Hz) ir ultragarso dažnių diapazonuose šių spektrų stebimi tik nesminiai pokyčiai.

Gauta 2013 12 16
Priimta 2014 03 18

Literatūra

1. Taylor J., Eastwick C., Lawrence C., Wilson R. Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy*. 2013. Vol. 55. P. 120–127.
2. Hodgson E. V. F. *Contemporary Problems in Appropriate Technology. Residential Wind Turbines and Noise Emission*. <http://wind.appstate.edu/sites/wind.appstate.edu/files/ResidentialWindTurbinesandNoiseEmissions.pdf>
3. Sacora A. *Contemporary Problems in Appropriate Technology. Assessing the Noise Emitted by Small Wind Turbines*. 2004. <http://wind.appstate.edu/sites/wind.appstate.edu/files/Fall2004AdamSacora'sNoiseEmitted-bySmallWindTurbinesResearchPaper.pdf>

4. *Pigeon Top Wind Farm. Supplementary Information*. 2011. http://www.tcirenewables.com/downloads/pigeon_top_supplementary_information.pdf
5. *Big Thunder Wind Park. DRAFT Wind Turbine Specifications Report*. Horizon Wind Inc., 2011.
6. ISO 9613-1, Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere. International Organization for Standardization, Geneva, 1993.
7. Macijauskienė G. *Triukšmo šaltinių vėjo jėginių aplinkoje lyginamoji analizė*: magistro baigiamasis darbas. Kaunas: VDU, 2010.
8. *Lietuvos higienos norma HN 33:2011*. 2011. Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje.
9. Budreika T. *Skirtingų tipų vėjo jėginių triukšmo ir jo spektro tyrimai*: magistro baigiamasis darbas. Kaunas: VDU, 2008.
10. Užpelkienė N., Jasikevičius B. Vydmantų vėjo jėginių keliamo triukšmo tyrimas ir vertinimas. Vilnius: VGTU, 2006. www.spec.lt/get.php?f.26322
11. Knopper L. D., Ollson C. A. Health effects and wind turbines: a review of the literature. *Environmental Health*. 2011. No. 10. P. 78.
12. Persson Wayne K., Ohrstrom E. Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise. *Journal of Sound and Vibration*. 2002. Vol. 250(1). P. 65–73.
13. Intern. Standard IEC 61400-11, Second edition, 2002. Wind turbine systems. Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
14. Moller H., Pedersen C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *Acoustical Society of America*. 2011. Vol. 129(6). P. 3727–3744.
15. Alberts D. J. *Addressing Wind Turbine Noise*. Lawrence Technological University, 2006. 19 p. <http://www.maine.gov/doc/mfs/windpower/pubs/pdf/AddressingWindTurbineNoise.pdf>
16. *Sound Power Level E-82. ENERCON Energy for the World*. 2009. http://www.magasbakony.hu/Furged/Fellebbezes_2010-03-30_1.melleklet.pdf
17. *Sound Power Level of the ENERCON E-82 E2. Data Sheet*. 2010.
18. *Turbine Sound Power Level Certificates*. 2007. http://www.eon-uk.com/Kelmarsh_SEI_AppendixD_Post_Submission_Noise_Queries_pt_10.pdf
19. ISO 9613-2, 1996, Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation.
20. Clohessy C. M., Sharp G., Vorster F. *Evaluation of Noise Levels of Micro-wind Turbines Using a Randomised Experiment*. Center for Renewable and Sustainable Energy Studies. http://www.crses.sun.ac.za/files/services/conferences/annual-student-symposium-2011/2-17_nov_clohessy.pdf
21. *Sound Power Level of the ENERCON E-48. Operational Mode 500 kW. Data Sheet*. 2010.
22. *Lietuvos higienos norma HN 30:2009*. Infragarsas ir žemo dažnio garsai: ribiniai dydžiai gyvenamuose ir visuomeninės paskirties pastatuose.
23. *Environmental Noise Booklet*. <http://www.nonoise.org/library/envnoise/index.htm>
24. Van den Berg G. P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*. 2004. No. 277. P. 955–970.
25. Taylor J., Eastwick C., Lawrence C., Wilson R. Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy*. 2013. No. 55. P. 120–127.

Vladislovas Katinas, Mantas Marčiukaitis,
Marijona Tamašauskienė

INVESTIGATION OF THE NOISE OF WIND TURBINES AND ITS ENVIRONMENTAL IMPACT

Summary

The variation of the regularities of the statistical parameters of wind turbine noise emission is described in the article. The Fast Fourier Transform algorithm was used for establishment of the wind turbine noise emission spectrum. A considerable difference of the wind turbine noise emission spectrum was established in the range of frequencies from 200 to 3 150 Hz. In the spectrum of infrasound, low frequencies (from 16 to 200 Hz) and ultrasound there are found only small changes of the noise components. The wind turbine noise emission has a broadband range and its level increases as wind velocity increases. The level of the noise decreases when the distance from wind turbines increases. The analysis of the literature shows that the wind turbine noise emission depends on aerodynamic processes and the level of the mechanical noise emission. The background noise could be evaluated when the level of the wind turbine noise emission is calculated. The investigation shows that the level of background noise, when wind velocity achieves 12 m/s, becomes equal to wind turbine noise at the distance 100 meters from the wind turbine. The theoretical model for evaluation of wind turbine noise emission depending on the distance was proposed.

Key words: acoustic noise, statistical parameters, spectrum, intensity, evaluation

Владисловас Катинас, Мантас Марчюкайтис,
Мариона Тамашаускене

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА СОЗДАВАЕМОГО ВЕТРОВЫМИ АГРЕГАТАМИ И ВЛИЯНИЯ ЕГО НА ВНЕШНЮЮ СРЕДУ

Резюме

В данной статье исследуются законы изменения статистических параметров акустического шума генерированного ветровыми агрегатами (ВА). При помощи алгоритма быстрой Фурье трансформации установлено, что в спектре акустического шума, сгенерированного ВА, большие отличия замечаются в диапазоне частот от 200 до 3 150 Hz. В диапазоне низких частот звука (16–200 Hz), а также ультразвука при сравнении со спектром фонового шума окружающей среды наблюдаются только незначительные изменения компонентов спектров шума, сгенерированного ВА. Этот шум предоставляет широкополосный спектр, а интенсивность составляющих его увеличивается при увеличении скорости ветра. При увеличении расстояния от ВА давление звука равномерно уменьшается. Обзор и анализ литературных данных показывает, что интенсивность шума определяется аэродинамическими процессами обтекания элементов ВА и интенсивностью механического шума. Установлено, что при определении уровня шума ВА очень важно учесть влияние уровня фонового шума внешней среды, уровень которой значительно зависит от скорости ветра. Исследования показывают что шум, сгенерированный ВА, при скорости ветра 12 м/с и расстоянии 100 м сравнивается с фоновым шумом окружающей среды. Представлена теоретическая модель для определения уровня шума ВА.

Ключевые слова: ветровой агрегат, акустический шум, статистические параметры, спектр, интенсивность, оценка