

prof. Ing. Stanislav Žiaran, CSc.

Ústav výrobného inžinierstva a kvality produkcie,

Strojnícka fakulta STU v Bratislave

Nám. slobody 17, 812 31 Bratislava

---

## **Veterné turbíny generujú nízkofrekvenčný hluk ovplyvňujúci zdravie človeka v ich nízkofrekvenčného dosahu**

Nízkofrekvenčné akustické vlnenie (infrazvuk, zvuk), ktorý sa šíri do vzdialenosti niekoľkých kilometrov, vo frekvenčnom pásme približne od 0,3 Hz do 80 Hz prenáša relatívne veľmi silnú akustickú energiu v porovnaní s energiou akustického vlnenia stredných a vysokých frekvencií. Dosah nízkofrekvenčného zvuku (NFZ) je závislý na frekvencii, teda čím nižšia frekvencia tým dlhší dosah od zdroja, od výšky zdroja, teda čím vyšší je zdroj, tým je väčší dosah a samozrejme aj od smeru vetra [1, 2]. **Pre plánovanú výšku veterných turbín, a to 250 m až 270 m dosah infrazvukových a zvukových vln bude niekoľko kilometrov. Pri väčšom počte ako jedna turbína dochádza k interferencii infrazvukových a zvukových vln, čím sa ich energia zvyšuje viacej alebo menej, čo závisí od ich priestorového rozloženia.** Nízkofrekvenčný zvuk (hluk) je typický aj pre veľké dieselové motory lodí a rušňov, spaľovacie a parné turbíny, elektrárne, kogeneračné jednotky, priemyselnú vzduchotechniku, výkonný spaľovací proces v priemysle (napr. v Slovnafte), vzduchotechnické a klimatizačné zariadenia budov, vykurovacie sústavy (kotelne) a potrubné sústavy, tepelné čerpadlá a iné strojné sústavy využívané pri pracovných aktivitách človeka [3-15, 20-38]. Z doteraz vykonaných analýz nízkofrekvenčného akustického vlnenia sa potvrdilo, že je viac obťažujúce ako sa očakáva od váženej hladiny A akustického tlaku. Rozdiel medzi vážením A a vážením C hladiny zvuku indikuje, či tento zvuk obsahuje nízkofrekvenčné zložky, ktoré zvyšujú obťažovanie človeka a majú negatívny vplyv na zdravie človeka.

Infrazvuk obsahuje spektrum s výraznými frekvenčnými zložkami pod 16 Hz. Toto vlnenie vnímame nie ako zvuk, ale skôr ako striedavý tlak na ušný bubienok [13]. Posudzovanie nízkofrekvenčného akustického vlnenia na hranici počuteľnosti je v štádiu skúmania a v súčasnosti je len z časti pokryté medzinárodnými a európskymi normami na rozdiel od nízkofrekvenčného mechanického kmitania, ktoré sa sleduje a posudzuje v rozsahu už od desiatín Hertza po 80 Hz. Zdrojom akustického kmitania (zvuku, infrazvuku) je aj mechanické kmitanie komponentov veterných turbín, ktoré sa v závislosti od podložia prenáša do relatívne veľkých vzdialeností a v nezanedbateľnej miere je to aj aerodynamické generovanie nízkofrekvenčného hluku. Prenášané nízkofrekvenčné

kmitanie podloží ovplyvňuje okolité obytné prostredie, napríklad môže vybudiť aj kmitanie hlavičky ležiaceho dieťaťa v postieľke [23].

### **Vplyvy nízkofrekvenčného zvuku a infrazvuku na zdravie človeka**

Do oblasti nízkofrekvenčného vlnenia sa zaraďuje aj infrazvuk (pod 16 Hz), generovaný prírodnými a umelými zdrojmi, ktorý síce nepočujeme, ale jeho relatívne silná energia ovplyvňuje naše zdravie, pohodu a aktivitu. Veľmi nízke frekvencie infrazvuku možno vnímať, ak majú dostatočnú intenzitu. Zistilo sa, že ak je človek exponovaný infrazvukom, môže mať problémy pri vykonávaní duševnej práce a pociťuje aj určité nepohodlie [1-12, 14, 15, 19]. **Ak hladina Z (skutočná hladina bez filtrovania) akustického tlaku infrazvuku prevyšuje 100 dB, človek trpí závratmi, duševnou únavou, podráždenosťou, napínaním na zvracanie, bolesťami hlavy a stratou rovnováhy. Existuje však malá citlivá časť populácie, ktorá môže pociťovať neprijemnosť infrazvuku už od hladiny Z 65 dB,** ak ide o príslušnú kombináciu frekvencie a dĺžky pôsobenia. Vplyvy sa opisujú ako všeobecná rozladenosť, nevoľnosť, dezorientácia, zvýšená únava, poruchy spánku alebo spavosť a iné kombinácie nešpecifikovaných príznakov. Mozgová kôra je zvlášť citlivá na infrazvuk s frekvenciou 7 Hz, ktorá sa zhoduje s frekvenciou alfa vln mozgovej kôry. Expozícia týmto druhom infrazvuku môže zabrániť jasnému mysleniu alebo koncentrácii na vykonávanie zverenej úlohy. Štúdie ukazujú, že infrazvuk nie je závažnejším problémom ako nízkofrekvenčné akustické vlnenie od 16 Hz do 80 Hz [1, 2]. Účinky môžu byť sprostredkované aj pôsobením infrazvuku a nízkofrekvenčného zvuku na telo človeka priamym vybudením kmitania orgánov, tkaniva, prípadne častí tela, kde pri zhode budiacej a vlastnej frekvencie nastáva ich rezonancia.

Energia nízkofrekvenčného akustického vlnenia má aj negatívny nesluchový systémový vplyv, a to predovšetkým na neuropsychický a kardiovaskulárny aparát a na zmyslovo-motorické funkcie. Nesluchové systémové vplyvy hluku možno charakterizovať ako zmeny srdcovej frekvencie odrážajúce nielen fyzické vplyvy, ale aj psychickú záťaž človeka [1, 2, 9, 10]. Podobne je to aj pri frekvencii dýchania. Registrovali sa funkčné zmeny nervového, pulmonálneho a kardiovaskulárneho systému [19]. U exponovaných osôb nízkofrekvenčnému akustickému vlneniu sa zaznamenala subjektívna zvýšená podráždenosť, bolesti hlavy, závrate, šum v ušiach, zhoršenie sluchovej ostrosti, zvýšené potenie, poruchy spánku, bolesti v srdcovej oblasti, sťažené dýchanie, nevoľnosť a nausea, teda pocit nevoľnosti a nepohodlia v žalúdku a v hlave s nutkaním na zvracanie. Pri expozícii vysokým hladinám a nízkym frekvenciám nastával nystagmus, dochádzalo k tremoru svalov, zvyšovalo sa nepohodlie a došlo k predĺženiu reakčného času. Energia nízkofrekvenčného akustického vlnenia pôsobiaca na bunkové membrány spôsobuje poruchy oxidačných procesov a transformuje sa aj na energiu biochemických a bioelektrických procesov. Môže byť príčinou priameho toxického pôsobenia na centrálnu nervovú sústavu, spôsobiť poruchy vyššej nervovej činnosti a ovplyvniť

priebeh a reguláciu dejov v organizme. Pozorovali sa aj morfológické zmeny buniek charakterizované deformáciami bunečných jadier a zvýšenie obsahu ribonukleovej kyseliny. Zaznamenali sa aj zmeny biologicky aktívnych mikroelementov. Dochádzalo k zvýšeniu obsahu medi v tkanivách pečene, sleziny a mozgu a k poklesu ich vylučovaniu močom a stolicou. Na druhej strane sa zistil pokles molybdénu v tkanivách, čo sa vysvetľuje antagonizmom medi a molybdénu pri metabolických procesoch vznikajúcich pod vplyvom pôsobiacej energie nízkofrekvenčného akustického vlnenia. U železa sa spozorovalo jeho zvýšenie v tkanivách mozgu a pečene a zníženie v svaloch a kostiach. Tieto zmeny sa dávajú do súvislosti s narušením dýchania vplyvom pôsobenia energie infrazvuku a nízkofrekvenčného zvuku a zvýšením prekrvenia. K najvýraznejšiemu odrazu adrenálnej sekrécie katecholamínu došlo u noradrenalínu, kde sa jeho plazmatická hladina zvyšovala v závislosti od podmienok zaťaženia energiou nízkofrekvenčného vlnenia (odkazová literatúra sa uvádza v [1 a 2]). Energeticky silný infrazvuk a nízkofrekvenčný zvuk pôsobí na organizmus aj v spojení s rezonanciou orgánov a mäkkých tkanív. V psychickej oblasti je jej základná zmena charakteristická presunom od aktivačného stavu (pocity sily, pohody, energie, aktivity) do dezintegračného stavu (psychická rozladenosť, psychická depresia, úzkosť, pocity vyčerpania, emocionálna napätosť, sklúčenosť). Svetové štúdie ďalej konštatujú, že dochádza k narastaniu depresie a nervozity, čo je sprevádzané celým radom subjektívnych problémov ako sú bolesti hlavy, bolesti v oku, pocity nevoľnosti, zvýšená únava, mravčanie po skončení expozície, hučanie v hlave, nutkanie prehltajúceho reflexu, zvýšená potivosť, pocit neznesiteľnosti, rezonancia, depresívne pocity, výbušnosť a neschopnosť sústrediť sa. Zistili sa zmeny a posuny poukazujúce na sedatívny účinok energie nízkofrekvenčného vlnenia pre vybrané parametre nervovo-svalovej koordinácie a nárast početnosti pohybov exponovaných osôb. Zvyšujúca sa početnosť pohybov a predĺženie koordinačných pohybov je aj podľa niektorých autorov prejavom únavy centrálného pôvodu [1, 2]. Nízkofrekvenčné akustické vlnenie môže v blízkosti jeho zdroja vyvolať rezonanciu tkanivových častí ľudského tela, napríklad u človeka, ktorý sa nachádza v blízkosti reproduktora na diskotéke, koncerte a pod. Veľmi nízke frekvencie infrazvuku môžu napríklad aktivovať črevnú sústavu, ak sa budiaca frekvencia zhoduje s frekvenciou peristaltického pohybu črevnej sústavy.

Pri dlhodobom sledovaní vplyvu nízkofrekvenčného zvuku (hluku) na zdravie človeka sa tieto vplyvy na ľudí, ktorých obytný dom sa nachádzal vo vzdialenosti 321 m – 642 m od veterných turbín (v Portugalsku) potvrdili a vyvrcholilo to súdnym konaním. Najvyšší súd Portugalska v máji 2013 rozhodol, že zostávajúce 3 veterné turbíny musia byť odstránené z blízkosti pozemku sťažovateľa [16]. Bola histologicky potvrdená patológia vyvolaná nízkofrekvenčným hlukom aj u plnokrvných koní z tejto rodiny. Teda nízkofrekvenčný zvuk má negatívny vplyv aj na zvieratá a vtáctvo.

V podobnom článku odborníkov z oblasti medicíny [17] sa hovorí, že typ toxikologického vplyvu a vývoj a nástup ochorenia spôsobeného expozíciou nízkofrekvenčným vlnením

(infrazvuk, zvuk) sú čiastočne analogické s účinkami spôsobenými žiarením. Rovnako ako pri expozícii žiareniu:

- a) nástup ochorenia vyvolaného nízkofrekvenčným zvukom (hlukom) do značnej miery závisí od času expozície;
- b) rôzne vlnové dĺžky fyzikálneho faktora ovplyvňujú rôzne orgány a tkanivá;
- c) jednotlivец nemusí vnímať pôvodcu ochorenia, aby sa v tele vyskytol patologický účinok; a
- d) predchádzajúca expozícia je určujúcim faktorom kľúčového významu.

Výroba veternej energie sa stáva čoraz dôležitejšou na celom svete, čoho výsledkom je, že hluku veterných turbín je vystavený čoraz väčší počet obyvateľov. Existujú dôkazy o tom, že hluk veterných turbín má vysoký potenciál rušenia, ktorý môže byť spôsobený špecifickými zvukovými charakteristikami, ako je amplitúdová modulácia. Aj z tohto dôvodu je snaha zodpovedných orgánov inštalovať veterné turbíny ďaleko od rezidencií.

V laboratórnej štúdií [18] sa zistilo, že hluk veterných turbín je podstatne rušivejší ako hluk cestnej dopravy, najmä v situáciách s „dunivou“ amplitúdovou moduláciou, ale aj v iných situáciách. Vysoký potenciál rušenia infrazvukom a zvukom generovaný veternými turbínami sa má zohľadniť pri posudzovaní vplyvov na životné prostredie, aby sa zaručila primeraná ochrana pred nežiadúcimi vplyvmi nízkofrekvenčného zvuku (hlukom) veterných turbín na zdravie a pohodlie človeka.

Dlhodobé účinky infrazvuku a nízkofrekvenčného zvuku na ľudský organizmus, na pracovný výkon a pocit pohody sú stále otvoreným problémom a v epidemiologických i laboratórnych štúdiách je im treba venovať nepretržitú pozornosť. Tiež je nevyhnutné prispôbiť sa európskym štátom v hodnotení nízkofrekvenčného zvuku a infrazvuku, keďže v súčasnosti platná vyhláška MZ SR 549/2007 Z.z. túto oblasť pokrýva nedostatočne.

## **Literatúra**

1. Žiaran S. Nízkofrekvenčný hluk a kmitanie. Vedecká monografia. Vyd. STU Bratislava, 2016: 316.
2. Žiaran S. Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom. Vedecká monografia. Vyd. STU Bratislava, 2008: 264.
3. Darula R., Žiaran S. Traffic induced standing waves in rooms. Noise and vibration in practice Proceedings of the 15<sup>th</sup> international acoustic conference, Bratislava 2010: 27-30.
4. Leventhall H.G. Low frequency noise and annoyance. Noise and Health 2004; 6:59-72.

5. Žiaran S., Chlebo, O., Čačková, I. Nízkofrekvenčný hluk obťažujúci rezidentov v okolí priemyselných závodov a výhrevní. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2025.
6. Žiaran S., Chlebo O. Človek exponovaný nízkofrekvenčným hlukom a jeho zdravotné prejavy. Proceedings of the 23th international acoustic conference. Kočovce 2018: 119-124.
7. Žiaran S. Potential health effects of standing waves generated by low frequency noise. Noise & Health 2013; 15:237-45.
8. [Žiaran S.](#) Effects of low frequency noise in closed space on the human. InterNoise11, Osaka/Japan 2011.
9. Žiaran S., Chlebo O. Nízkofrekvenčný hluk a jeho vplyv na psychiku človeka. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2019: 46-52.
10. Žiaran S., Chlebo O. Vplyv hluku na psychiku človeka. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2018: 31-38.
11. Žiaran S., Chlebo, O. Nízkofrekvenčný hluk a jeho hodnotenie. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2017: 69-80.
12. Žiaran S., Chlebo O. Expozícia človeka nízkofrekvenčnému hluku. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2016: 52-58.
13. Žiaran S. Nízkofrekvenčný hluk generovaný otvoreným oknom auta a jeho vplyv na osádku. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2013: 30-39.
14. Žiaran S. Hluk kotolní a jeho vplyv na človeka. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2010: 73-78.
15. Žiaran S. Nízkofrekvenčný hluk v obytnom a pracovnom prostredí a jeho vplyv na zdravie. Zborník vedeckých prác. Bratislava: Univerzita Komenského, 2011: 38-43.
16. N. Castelo Branco and M. Alves-Pereira, Low Frequency Noise-Induced Pathology: Contributions provided by the Portuguese Wind Turbine Case, pp. 2659-2663, Euronoise 2015 Maastricht.
17. M. Alves-Pereira and N. Castelo Branco, Clinical Protocol for Evaluating Pathology Induced by Low Frequency Noise Exposure, pp. 2653-2658, Euronoise 2015 Maastricht.
18. B. Schäffer, S. Schlittmeier, K. Heutschi, M. Brink, R. Graf, R. Pieren and J. Hellbrück, Annoyance potential of wind turbine noise compared to road traffic noise, pp. 309-314, Euronoise 2015 Maastricht.

19. Argalasova L., Lekaviciute J., Jeram S., Sevcikova L., Jurkovicova J. Environmental Noise and Cardiovascular Disease in Adults: Research in Central, Eastern and South-Eastern Europe and Newly Independent States. *Noise & Health* 2013; 62:22-31.

**Výber výskumných správ súvisiacich s obťažovaním človeka nízkofrekvenčným hlukom a kmitaním (vibráciami)**

20. Žiaran, S.: Zníženie prenosu hluku a vibrácií do obytných priestorov. Odborná správa. Bratislava 1994 – Bytový podnik Dunajská Streda.
21. Žiaran, S.: Zníženie prenosu vibroakustickej energie z kotolne do pracovných priestorov. Výskumná správa, Bratislava 1997. str. 17 – MF SR.
22. Žiaran, S.-Michalíček, M.: Identifikácia a odstránenie zdrojov nadmerného mechanického kmitania jednorámovej pily. Výskumná správa. Bratislava 1995 – Garter Holíč.
23. Žiaran, S.: Dynamická analýza rámovej pily s opatreniami na zníženie prenosu kmitania do okolitého priestoru. Výskumná správa, Bratislava 2003, str. 39 – Stredisko drevárskej výroby Stupava.
24. Žiaran, S.: Posúdenie a predikcia vibračno-akustickej záťaže vonkajšieho a vnútorného prostredia s opatreniami na zabezpečenie vyžadovanej vibračno-akustickej klímy človeka. Výskumná správa Bratislava 2003, str. 30 – VODOSTAV–KAMENÁRSTVO Zlaté Moravce.
25. Žiaran, S.: Analýza hluku a kmitania vo výhrevniach. Výskumná správa, Bratislava 2004. str. 39 – Bytový podnik Vrakuňa.
26. Žiaran, S.: Hluková analýza kotlových sústav. Výskumná správa, Bratislava 2005, str. 53 – SES Tlmače (Torino, Taliansko).
27. Žiaran, S.: Analýza dynamického zaťaženia stavebných konštrukcií a podlažia od strojov DPR20, DPR26 a lisu LE 250 s návrhom odporúčania vibroizolácie. Výskumná správa, Bratislava 2005, str. 21 – PSL Považská Bystrica.
28. Žiaran, S.: Analýza príčin dynamického zaťaženia stavebných konštrukcií a ľudí oddelenia expedície od vonkajších zdrojov s návrhom opatrení na jeho redukciu. Výskumná správa, Bratislava 2006, str. 20 – WITZENMANN Slovakia Vlkanová.
29. Žiaran, S.: Stratégia smerovania technických opatrení na redukciu hladiny hluku v spoločnosti DOLVAP. Pilotná výskumná správa, Bratislava 2007, str. 18 – DOLVAP Varín.
30. Žiaran, S.: Návrh vibroakustických úprav na redukciu hluku v obytnom priestore. Výskumná správa, Bratislava 2010, str. 21 – Váš správca Bratislava.

31. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Expozícia nízkofrekvenčnému hluku bytu od kotolne na Švabinského ulici. Výskumná správa SjF STU Bratislava 2015, str. 12 – Lýdia Horníková.
32. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Príčiny nežiaduceho kmitania a hluku kogeneračnej jednotky v kotolni a návrh opatrení. Výskumná správa SjF STU Bratislava 2016, str. 32 – C-bau s.r.o. Bratislava.
33. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Dynamické vplyvy trojosovej seizmickej stolice LINK na blízke technologické a stavebné konštrukcie. Výskumná správa Bratislava 2016, str. 24 – VUJE a. s. Trnava.
34. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Dynamická analýza recirkulačného ventilátora s návrhom opatrení na redukcii dynamického zaťaženia. Projekt DenoxAlpiq Kladno pre GE Powers.r.o. – tepláreň Alpiq elektrárň Kladno. Výskumná správa SjF STU Bratislava 2018, str. 46.
35. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Expozícia nízkofrekvenčnému vlneniu RD na Kolibe. Výskumná správa SjF STU Bratislava 2018, str. 35 – JUDr. Novák.
36. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Identifikácia zdrojov kmitania a hluku v byte č. 16, Odborná správa 2021, str. 25 – Jaseňová 20, Žilina pre Mgr. Evu Sulovskú.
37. Žiaran, S.-Chlebo, O.: Vibroakustická analýza SND v súvislosti s plánovaným vybudovaním koľajovej trate nad podzemnými garážami pred budovou SND. Výskumná správa 2022, str.55 – Ministerstvo kultúry SR.
38. Žiaran, S., Chlebo, O.: Dynamická analýza ventilátora B102A pre SRU 100. Výskumná správa, str. 41 – Slovnaft a.s. firma AKUSON s.r.o. Bratislava 2024.