

MOŽNOSTI APLIKÁCIE SIMULAČNÝCH PROCEDÚR PRI MODELOCH IMISIÍ HLUKU V PRACOVNOM PROSTREDÍ

Zdenka BECK - Petra LAZAROVÁ - Alexandra GOGA BODNÁROVÁ

OPTIONS APPLICATION PROCEDURES FOR THE SIMULATION MODELS NOISE IMMISSION IN THE WORK ENVIRONMENT

Abstrakt

The paper is focused on possibilities of the application of simulation procedures at models of noise immissions in work environment. It deals with methodology prediction of noise in the workplace and input data needed for the simulation in software for creating noise maps in interior. It also deals with the simulation in software CadnaR depending on the location of the barriers of different parameters and their appropriate location.

KLúčové slová: Prediction of noise, simulation, work environment.

ÚVOD

Simuláciou akustickej situácie na pracoviskách sa zaoberajú viacerí autori, ktorí sa zameriavajú na experimentálne porovnávanie softvérových výpočtov so skutočnými meraniami. Dado v publikácii „*Predikcia hluku v pracovnom prostredí (2012)*“ na základe porovnania hodnôt dennej expozície hluku získaných predikciou a meraním v šiestich priemyselných halách vytvoril predikčný model v softvérovom nástroji Izofonik, kde bola zistená priemerná presnosť 1,55 dB. Hodgson v publikácii „*Case History: Factory Noise Prediction Using Ray-Tracing – Experimental Validation and Effectiveness of Noise Control Measures (1989)*“ za účelom validácie presnosti metódy sledovania lúča, vytvoril simulačný model kovoobrábacej dielne a porovnaním nameraných a predikovaných hodnôt hladín akustického tlaku zistil v piatich oktávových pásmach priemerný rozdiel 0,3 dB so smerodajnou odchýlkou 0,9 dB. Boudreau a L'Espérance v publikácii „*Techniques for Using Ray Tracing for Complicated Spaces (2001)*“ vytvorili akustický model hydroelektrárne v simulačnom programe Rayscat a na základe porovnania nameraných a predikovaných hodnôt zistili priemerný rozdiel 0,3 dB. Hodgson v publikácii „*Ray-Tracing Prediction of Noise Levels in a Nuclear Power – Generating Station (1997)*“ overoval presnosť simulačného modelu šírenia hluku v jadrovej elektrárni, vytvoreného pomocou metódy sledovania lúča. Priemerný rozdiel medzi predikovanými a nameranými hodnotami bol menší ako 2 dB. Dance v publikácii „*Minimal input models for sound level prediction in fitted enclosed spaces (2002)*“ overoval presnosť simulačných modelov šírenia hluku v dvoch priemyselných halách (opracovanie kovov, plnička fliaš) vytvorených pomocou metódy CISM, ktorá vychádza z geometrickej metódy zrkadlových zdrojov. Priemerný rozdiel medzi predikovanými a nameranými hodnotami bol 1,3 dB. Rindel a Christensen v publikácii „*Odeon, a design tool for noise control in indoor environments (2007)*“ porovnali hodnoty ekvivalentných hladín hluku v strojovni elektrárne získaných prostredníctvom simulačného programu Odeon s nameranými hodnotami a zistili dobrú zhodu (priemerný rozdiel medzi hodnotami 0,3 dB s maximálnou odchýlkou 2,2 dB). K podobným výsledkom došiel aj Probst v publikácii „*The Calculation of Sound Propagation in Rooms to determine Noise Exposure at Workplaces (2009)*“, ktorý vytvoril simulačný model výrobnéj haly v programe CadnaR.

Na základe dosiahnutých výsledkov je možné konštatovať, že v kontexte posudzovania rizík z expozície hluku v pracovnom prostredí, sú interiérové hlukové mapy vhodným informačným nástrojom pri vizualizácii dodržiavania najvyšších prípustných hodnôt v zmysle platnej legislatívy.

Zistené rozdiely pri porovnaní výsledkov merania a simulácie spočívajú predovšetkým v určitých obmedzeniach programov ako aj zjednodušeníach pri tvorbe samotných simulačných modelov. Vytvorené simulačné modely nezohľadňujú všetky akustické parametre reálnych priemyselných hál, napr. interiérové prvky (stĺpy, svetlíky, potrubia). Väčšinou sú hodnoty získané simuláciou nižšie ako hodnoty získané meraním. Existuje určitá neistota týkajúca sa vstupných parametrov. Predikcia hluku na pracoviskách totiž vyžaduje vstupné údaje opisujúce emisiu hluku strojov a ostatných prvkov vytvárajúcich hluk, akustické vlastnosti povrchov miestností a štruktúr a stanovenie uvedených parametrov je spojené s nepresnosťou (napr. skutočná hodnota hluku stroja je odlišná od výrobcom deklarovanej hodnoty alebo stanovenie koeficientov pohltivosti na základe odhadu). Imisné hladiny akustického tlaku s vážením A na pracovnom mieste sú vo všeobecnosti o 5 až 15 dB vyššie, než sú deklarované emisné hladiny akustického tlaku a to v dôsledku odrazov od stien, príspevkov od iných zdrojov hluku a prevádzkových podmienok odlišných od tých, pre ktoré sa deklaroval hluk.

1 METODOLOGIA PREDIKCIE HLUKU NA PRACOVISKÁCH

Základným a najväčším problémom pri predikcii hluku na pracoviskách zostáva a zostane i v najbližšej budúcnosti problematika kvalitných vstupných dát. Zaisťovanie, získanie, spracovanie a vhodná konverzia týchto vstupných dát tvorí najväčší problém pri spracovávaní hlukových máp. [4]

1.1 Vstupné údaje

Presnosť výsledkov výpočtu v programoch je daná predovšetkým presnosťou a kvalitou vstupných údajov. Akýkoľvek výpočtový program je iba výkonným nástrojom pre modelovanie akustickej situácie. Aby bol výpočtový postup, resp. použitý softvérový produkt pre výpočet hluku akceptovateľný, je nutné dbať na to, aby vykazoval výsledky v takej triede presnosti, s akou je možné získať výsledky meraniami. Čo väčšinou znamená, že rozdiel hodnoty L_{Aeq} od konvenčnej správnej hodnoty L_{Aeq} by mal byť menší ako 2 dB. [4]

Na výpočet akustického tlaku v určitých bodoch existujú metódy a programy, ku ktorým potrebujeme nasledovné vstupné parametre [5]:

- rozmery zdrojov hluku, informácie o emisii hluku zo zariadenia, ich jednotlivé akustické výkony (tzn. hluk pri zaťažení) – väčšinou sú uvedené v technických listoch,
- namerané hodnoty ekvivalentnej hladiny A zvuku, hodnoty hladín akustického tlaku v určitých miestach,
- rozmery objektu, celková stavebná situácia (napr. pôdorys), z ktorej je zrejme umiestnenie jednotlivých zdrojov hluku, zariadenie priestoru, umiestnenie priečok, okenných a dverových rámov a svetlíkov a so znázornením pracovných zón zamestnancov,
- stavebný materiál jednotlivých obvodových stien, priečok v interiéri vrátane stropu (strechy), typ okien a dverí, materiál použitý na svetlíky a pod.,
- koeficienty pohltivosti a odrazivosti povrchu, tieto možno zaokrúhliť podľa teoretických hodnôt,
- počet pracovných zmien,
- na výpočet expozície sú takisto potrebné časy expozície na rozličných stanoviskách pracoviska.

Výsledkom je mapa imisii hluku zložená z viacerých zdrojov a odrazov od stien. Interiérové hlukové mapy sa používajú pri projektovaní nových pracovísk a pracovísk, ktoré boli výrazne zrekonštruované. Predikujú budúci stav a umožňujú porovnanie niekoľkých alternatív s cieľom vybrať najlepšie riešenie alebo dosiahnuť nižšiu hladinu hluku.

Rôzne alternatívy možno porovnať na základe [4]:

- zmeny emisii zariadenia, čo by napríklad zahŕňalo inštaláciu tichšieho zariadenia alebo využite krytov,
- zmeny stanoviska pracovníka alebo zariadenia v dielni,
- zvýšením pohltivosti na príslušných povrchoch.

Programy pre tvorbu interiérových hlukových máp sú efektívnou pomôckou pri riešení akustickej situácie vo vnútri podniku i v jeho okolí. Výsledky zahŕňajú určitý stupeň neistoty v závislosti od metódy výpočtu, spoľahlivosti použitých parametrov a predpokladoch výpočtov. Napriek tomu možno rôzne výsledky, ktoré zodpovedajú rozličným riešeniam, porovnávať. Tieto výsledky teda môžu pomôcť pri rozumnom výbere.

K „rozumnému výberu“ možno dospieť po zvážení [4]:

- vypočítanej hladiny hluku pre každú situáciu,
- dôsledkov každého riešenia (cena, vplyv na pracovný postup, výrobný proces, kvalitu výstupu, vplyv na iné faktory – ochrana zdravia a bezpečnosti na pracovisku, obslužnosť, servis a bezpečnosť zariadení, znečistenie, atď.).

Zvolenie vhodného programu pre výpočet, tvorbu a prezentáciu hlukových štúdií závisí od rôznych faktorov ako napríklad:

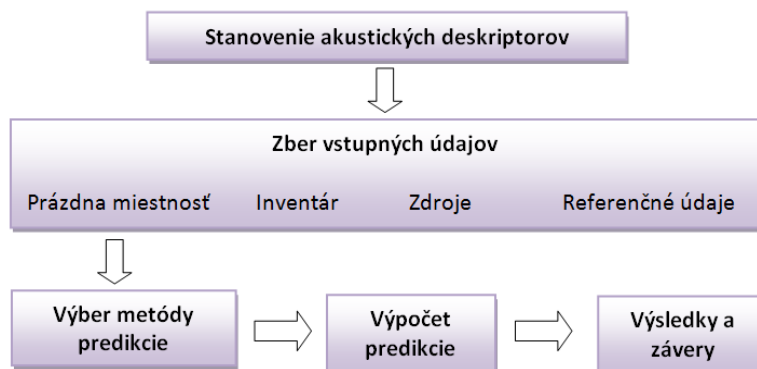
- možnosť výpočtu imisii hluku v požadovanom bode, resp. priestore,
- možnosť modelovania posudzovaného priestoru,
- metodiky používanej pre výpočet,
- možnosť zadania požadovaných parametrov, korekcií a pod.

Metodológia predikcie hluku na pracoviskách je opísaná v STN EN ISO 11690-3 a vychádza zo všeobecného vývojového diagramu na obr. 1.

V prvom kroku je potrebné zvoliť akustické deskriptory, ktorými môžu byť napr. hladiny akustického tlaku v miestach obsluhy, údaje o imisii, resp. expozícii, poklesové krivky alebo časy dozvuku. Zber vstupných údajov zahŕňa charakteristiku [2]:

- prázdnej miestnosti (t. j. priestoru ohraničeného stropom, podlahou a stenami),
- inventáru miestnosti (t. j. akejkol'vek časti zaplnenia miestnosti, ktorá ovplyvňuje šírenie zvuku napr. stroje, skladovaný materiál, piliere, potrubia, priečky) a
- zdrojov hluku v jednotlivých úrovniach komplexnosti (pozri tab. 1).

Referenčné údaje (napr. absorpčné koeficienty, emisie zdrojov hluku, hladiny akustického tlaku, hlukové mapy atď.) sa zhromažďujú buď z predchádzajúcich štúdií podobných prevádzok, alebo zo samotného pracoviska, ak už existuje.



Obr. 1 Všeobecný vývojový diagram na predikciu hluku na pracoviskách [3]

Tab. 1 Úroveň komplexnosti opisu vstupných parametrov [3]

Úroveň podkladov opisu	Absorpcia a tvar miestnosti	Opis inventára miestnosti	Opis zdroja
1	Miestnosť charakterizuje objem a stredný koeficient absorpcie povrchov.	Inventár sa neberie do úvahy.	Všesmerové bodové zdroje.
2	Tvar boxu, každý povrch charakterizuje vlastný absorpčný koeficient.	Inventár sa opisuje pre celkovú miestnosť jednou strednou hodnotou pre hustotu a jednou pre absorpciu.	Bodové zdroje so smerovou charakteristikou.
3	Tvar boxu, ďalšie rozdelenie povrchov miestnosti na prvky s rozdielnymi absorpčnými koeficientmi.	Inventár sa opisuje pre rozdielne časti miestnosti jednou strednou hodnotou pre hustotu a jednou pre absorpciu.	Komplexné zdroje.
4	Skutočný tvar miestnosti, rozdelenie absorpčných a odrazových vlastností povrchov miestnosti	Skutočný tvar a umiestnenie inventáru sa berie do úvahy, tienenie odrazom od týchto jednotlivých prekážok sa berie do úvahy.	

Výber predikčnej metódy závisí predovšetkým od typu predpokladaného zvukového poľa a úrovne komplexnosti opisu vstupných parametrov. Norma rozlišuje dve základné kategórie metód na predikciu hluku: metódy difúzneho poľa a geometrické metódy. Pri predikcii hluku prostredníctvom metód difúzneho poľa sa hladina akustického tlaku v bode získa súčtom príspevkov priamych a odrazených polí. Ak nie je zvukové pole v miestnosti difúzne, výpočet hladiny akustického tlaku použitím týchto metód vedie vo všeobecnosti k nadhodnoteniu. Geometrické metódy sú založené na geometrickej reprezentácii šírenia zvuku v miestnosti, v ktorej sa predpokladá šírenie zvuku pozdĺž priamok. Geometrické metódy zahŕňajú techniky sledovania lúča, obrazu zdroja a difúzných odrazov. [2]

Nasledujúca tabuľka uvádza odporúčaný rozsah úrovne podkladov vstupných parametrov pre každú kategóriu metódy predpovedania hluku.

Tab. 2 Odporúčaný rozsah úrovni podkladu vstupných parametrov pre každú kategóriu metódy predpovedania hluku [3]

Úroveň podkladov vstupných parametrov (tab. 1)			
Kategória metódy predpovedania	Absorpcia a tvar miestnosti	Opis inventára miestnosti	Opis zdroja
1) difúzne pole	1	1	od 1 do 3
2a) geometrická: miestnosti, ktoré sa môžu aproximovať jedným stredným absorpčným koeficientom pre každú stenu a jednou strednou hustotou pre inventár.	1,2	1,2	od 1 do 3
2b) geometrická: miestnosti, ktoré sa môžu aproximovať jedným stredným absorpčným koeficientom pre každý povrch miestnosti a jednou strednou hustotou pre inventár v každej zóne miestnosti.	od 1 do 3	od 1 do 3	od 1 do 3
2c) geometrická: miestnosti, pre ktoré sa musí brať do úvahy jednotlivé rozdelenie absorpcie a inventáru.	od 1 do 4	od 1 do 4	od 1 do 3

Výsledné hodnoty predikcie hluku je možné zobrazovať vo forme hlukových máp, ktoré zobrazujú imisné hladiny hluku alebo expozície hladiny hluku.

1.2 Metódy predikcie hluku v priemyselných prevádzkach

V súčasnosti existuje viacero typov softvérov, pomocou ktorých môžeme simulovať virtuálny priestor a získať jeho akustické vlastnosti. Mnohé z týchto programov dobre spolupracujú s CAD systémami čo prispieva k rýchlejšiemu vytvoreniu geometrie modelu, napríklad v AutoCADe a následným exportom geometrie miestnosti do akustického softvéru.

Čo sa týka simulačných metód, existuje viacero typov algoritmov používaných v praxi. Medzi najrozšírenejšie patrí metóda zrkadlového zdroja (Image Source Method - IMS) a lúčová metóda (Ray Tracing Method - RTM) ako aj jej varianty (Beam - Tracing, Cone -Tracing atd.). Niektoré programy využívajú i kombináciu týchto metód, najčastejšie metódu zrkadlového zdroja s lúčovou metódou. Známa je i metóda difúzneho poľa. [1]

Špeciálnu skupinu simulačných programov tvoria softvéry založené na metóde konečných prvkov (Finite Element Method - FEM) a jej variantoch, ktorými sú napr. metóda konečných objemov (Control Volume Method - CVM) alebo Metóda okrajových elementov (Boundary Element Method - BEM). Medzi najsofistikovanejšie metódy patria hybridné metódy: výpočet skorých odrazov (Early Reflection Method), výpočet neskorších odrazov (Late Reflection Method), Metóda „Late-ray“ odrazu.

Vo všeobecnosti sa pri tvorbe predikčných modelov uplatňujú dva rozdielne prístupy, výsledkom ktorých je:

- Vytvorenie empirických modelov.
- Odvodenie teoretických modelov.

Empirické modely sú založené na experimentálnych údajoch. Z nameraných hodnôt jednotlivých akustických deskriptorov sa prostredníctvom metód štatistického modelovania odvodí empirické rovnice. [2]

Na rozdiel od empirických modelov sú teoretické modely odvodené z princípov vlnovej, ale hlavne geometrickej a štatistickej akustiky. Mnohé z nich sa stali základom výpočtových algoritmov softvérových nástrojov, ktoré sa využívajú pri

tvorbe simulačných modelov akustických charakteristík priemyselných hál. V minulosti sa na akustickú simuláciu priestorov priemyselných hál používali aj merania uskutočnené vo fyzických modeloch vytvorených v určitej miere, ale vzhľadom na ich časovú a finančnú náročnosť v porovnaní s počítačovou simuláciou sa tento spôsob v súčasnosti používa len vo veľmi malej miere. [2]

2 VZOROVÉ SIMULÁCIE BARIÉR V SOFTVÉRI CADNA R

Pre pozorovanie možností softvéru Cadna R boli vytvorené simulácie zdroja hluku na základe ktorých je možné hodnotiť a analyzovať výhody a nevýhody softvéru, spôsob výpočtu a celkové modelovanie šírenia zvuku. V tomto softvéri bolo vytvorených niekoľko simulačných situácií:

- zdroj hluku v strede a v rohu miestnosti štvorcového pôdorysu 10x10x4 m (šxdxv m),
- zdroj hluku v strede a v rohu miestnosti pôdorysu v tvare obdĺžnika 15x10x4 m (šxdxv m).

Parametre zdroja hluku použité pri modelovaní:

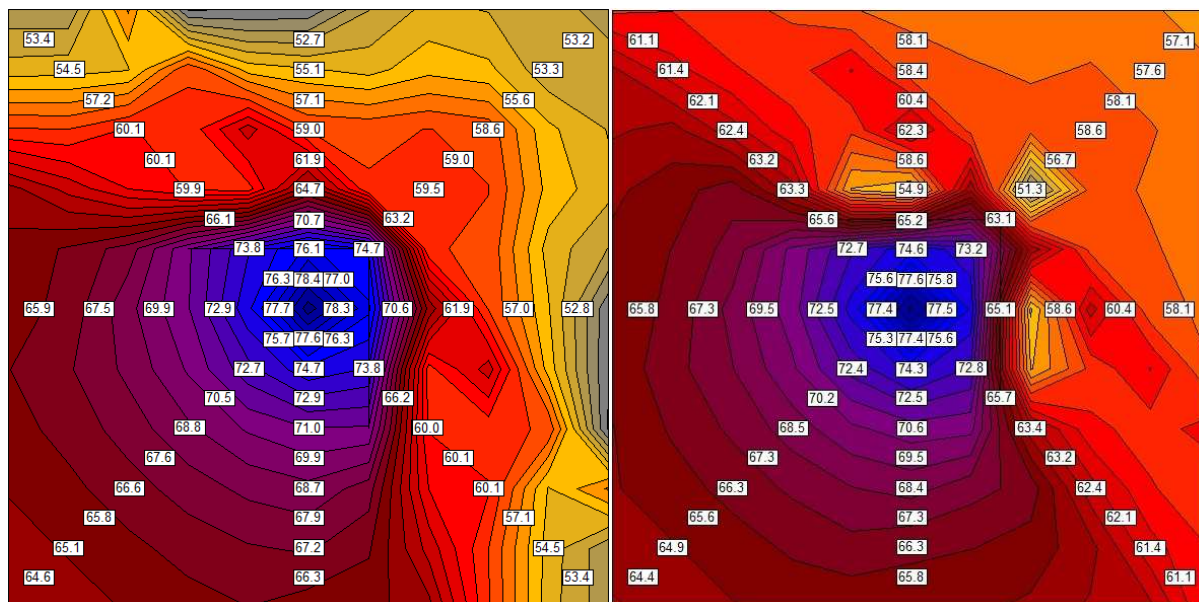
Zvolený akustický výkon zdroja hluku bol 85 dB vo výške 1,5 m.

V softvéri Cadna R je nutné zadať emisné spektrum, od ktorého je závislý akustický výkon zariadenia alebo opačne - akustický výkon zariadenia od ktorého je závislé emisné spektrum. V tomto prípade bola zvolená druhá možnosť.

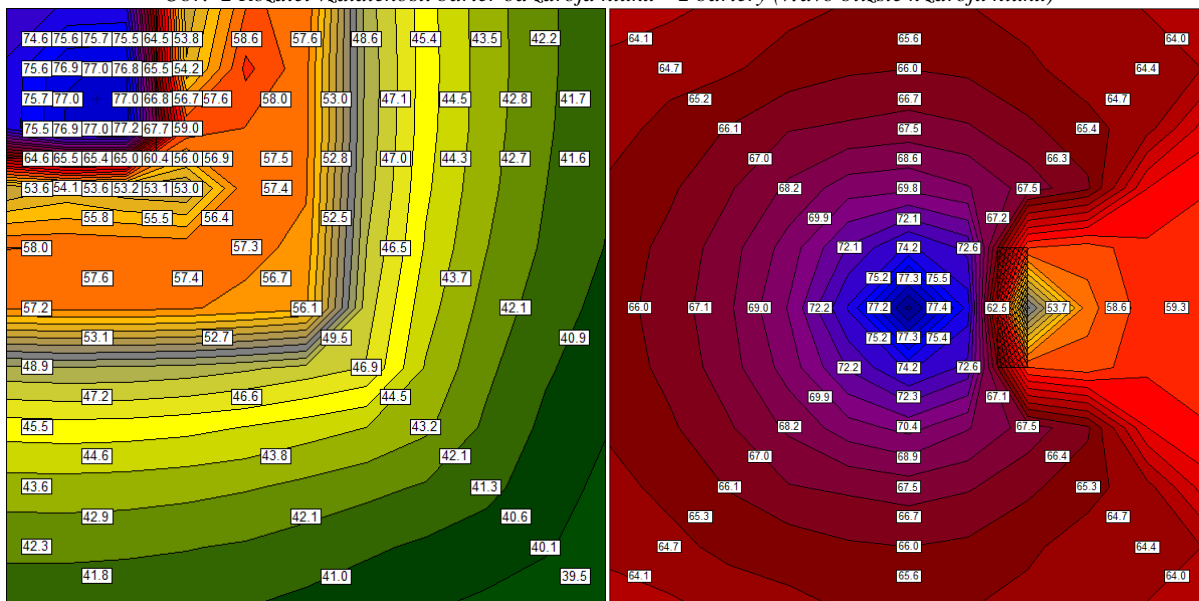
Na výpočet bola zvolená metóda „Image Sources“. Farebná škála bola vytvorená v 12 odtieňoch v rozmedzí 0 – 85 a viac dB. Teplota: 20 °C. Vlhkosť: 60 %

Princíp:

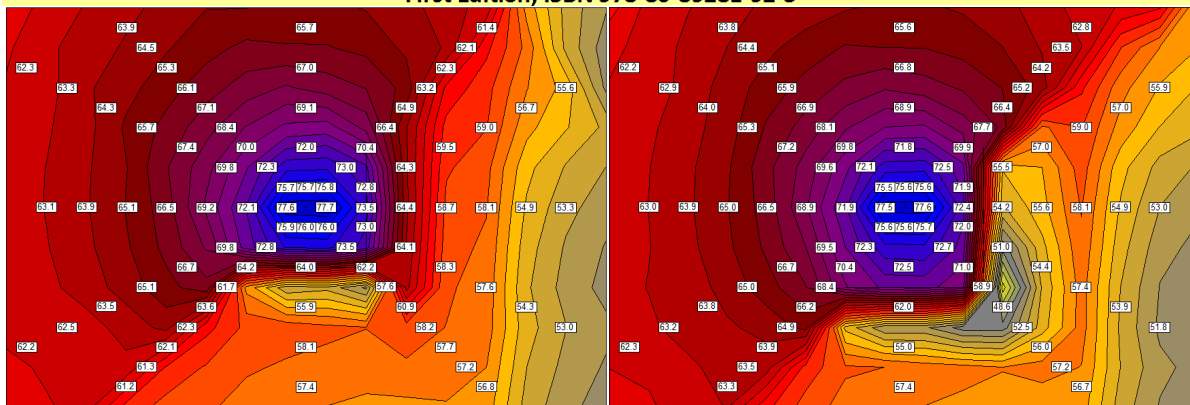
Pri modelovaní simulačných situácií šírenia hluku boli v rôznych vzdialenostiach od zdroja hluku s rôznou výškou a dĺžkou umiestňované bariéry s absorpčným koeficientom $\alpha = 0,3$.



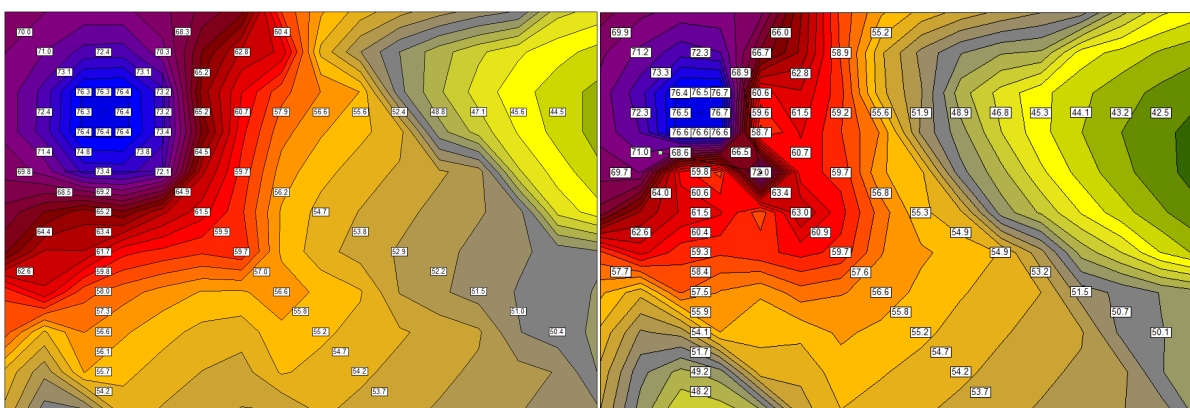
Obr. 2 Rozdiel vzdialenosti bariér od zdroja hluku – 2 bariéry (vľavo bližšie k zdroju hluku)



Obr. 3 Umiestnenie bariér k stenám (vľavo) a umiestnenie objektu namiesto bariéry (vpravo)



Obr. 4 Rozdielna výška a vzdialenosť od zdroja hluku (vľavo kratšie a nižšie bariéry)



Obr. 5 Umiestnenie bariér so sklonom k stenám priestoru (vpravo)

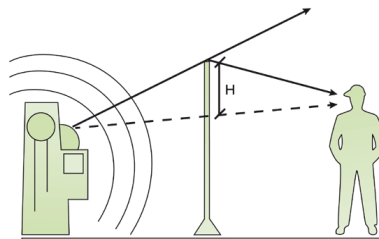
ZÁVER

Zvukové alebo protihlukové bariéry, ako sú steny alebo clony, sú navrhnuté tak, aby vytvorili akustický tieň tým, že blokujú voľný pohyb zvukových vln. Zníženie hladiny akustického tlaku v tejto oblasti tieňa za prekážkou je závislé na frekvencii. Pri vysokých frekvenciách je účinok bariéry jasný, zatiaľ čo pri nízkych frekvenciách (dlhá vlnová dĺžka) sa tieňový efekt znižuje.

Umiestnenie zvukovej bariéry musí byť dobre zvolené. Aby pracovala čo najlepšie, musí bariéra odkloniť dráhu zvuku čo najviac z priamej trasy a zmeniť smer čo najväčším uhlom. Najlepší účinok má clona, ak je umiestnená v blízkosti zdroja hluku, ako je možné vidieť na obrázkoch vyššie nasimulovaných v Cadne R. V polovici cesty medzi posudzovaným miestom – prijímač a zdrojom hluku je najhoršia pozícia. Tlmenie clony je určené hlavne účinnou výškou clony H a šírkou clony v porovnaní k veľkosti zdroja hluku (Obr. 6).

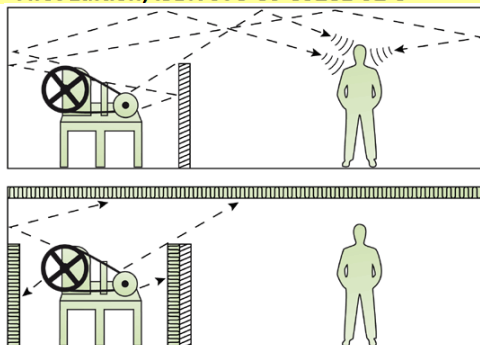
Ak nie je možné, aby bola bariéra umiestnená čo najbližšie k zdroju hluku (napr. z dôvodu prístupu k zariadeniu), je potrebné navrhnuť väčšiu výšku a dĺžku bariéry, poprípade zvažiť sklon bariéry voči stenám priestoru takým smerom a v takom uhle, aby sa zvuk šíril čo najmenej do chránenej časti priestoru.

Zdroje hluku je vhodné umiestňovať v rohoch miestnosti, aby sa zabránilo zbytočnému rozliehaniu hluku na všetky strany miestnosti. V takom prípade je potrebné dbať na to, aby hluk zo zariadenia neohrozoval vonkajšie prostredie cez steny priestoru alebo miestnosti za týmito stenami.



Obr. 6 Umiestnenie bariéry od zdroja hluku a prijímača v závislosti na výške bariéry

Clony vnútri budov musia byť vždy v kombinácii so zvuk pohlcujúcou strechou, aby sa zabránilo odrazom. Za normálnych okolností je účinok clony vnútri budovy cca 5-10 dB. Činiteľ vzduchovej nepriezvučnosti pre clonu musí byť asi 20 -25 dBA.



Obr. 7 Umiestnenie zvuk pohlcujúcich látok na strope a v okolí zdroja hluku

Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0432-12 a v rámci projektu VEGA 1/1216/12.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] TOMAŠEVIČ, P. a kol.: Akustika budov. Priestorová akustika. Bratislava: STU v Bratislave, 2010, 62-86 s. ISBN 978-80-227-3235-2.
- [2] DADO, M. – HNILICA, R.: Predikcia hluku v pracovnom prostredí. Zvolen: TU vo Zvolene, 2012. 64 s. ISBN 978-80-228-2370-8.
- [3] STN EN ISO 11690-3: 2000, Akustika - Odporúčané postupy na navrhovanie nízko-hlučných pracovísk vybavených strojovými zariadeniami - Časť 3: Šírenie zvuku a predpovedanie hluku na pracovisku.
- [4] LIPTAI, P. a kol.: Všeobecný postup pre tvorbu a hodnotenie hlukových máp. In: Fyzikálne faktory prostredia. Roč. 2, č. Mimoriadne, 2012, s. 30-33. - ISSN 1338-3922.
- [5] KLUKNAVSKÁ, Z.: Tvorba hlukových máp interiéru v priemyselných prevádzkach: Diplomová práca. Košice, 2011. 104 s.
- [6] HODGSON, M.: Case History: Factory Noise Prediction Using Ray Tracing - Experimental Validation and Effectiveness of Noise Control Measures. In: Noise Control Engineering Journal, 1989, Vol. 33, No. 3, pp. 97-104.
- [7] BOUDREAU, A. - L'ESPÉRANCE, A.: Techniques for Using Ray Tracing for Complicated Spaces. In: Canadian Acoustic. Canada, 2001, Vol 29, No. 2, pp. 11-20.
- [8] HODGSON, M.: Ray-Tracing Prediction of Noise Levels in a Nuclear Power - Generating Station. In: Applied Acoustic, 1997, Vol. 52, No. 1, pp. 19-29.
- [9] DANCE, S.M.: Minimal input models for sound level prediction fitted in enclosed spaces. In: Applied Acoustic, 2002, Vol. 63, pp. 359-372.
- [10] RINDEL, J. H. - CHRISTENSEN, C. L.: Odeon : a design tool for noise control in indoor environments. In: Proceedings of the International Conference Noise at work. Lille, 2007.
- [11] PROBST, W.: The Calculation of Sound Propagation in Rooms to Determine Noise Exposure at Workplaces. In: Processing of the International Conference on Acoustics NAG/DAGA. Rotterdam, 2009.

ADRESY AUTOROV

Ing. Zdenka BECK, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park Komenského 5, 042 00 Košice, Slovenská republika, tel.: +421 556022641, e-mail: zdenka.kluknavska@tuke.sk

Ing. Petra LAZAROVÁ, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park J.A. Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: petra.lazarova@tuke.sk.

Ing. Alexandra GOGA BODNÁROVÁ, Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra environmentalistiky, Park J.A. Komenského 5, 042 00 Košice, e-mail: alexandra.bodnarova@tuke.sk.

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.