

KOREKCE NA ODRAZ ZVUKU OD FASÁD BUDOV S CHRÁNĚNÝM VENKOVNÍM PROSTOREM STAVEB

CORRECTION FOR SOUND WAVE REFLECTION FROM HOUSE FACADES WITH PROTECTED OUTDOOR ENVIRONS OF BUILDINGS

JAN ŠLECHTA¹, TOMÁŠ HELLMUTH²

¹České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov, Buřtěhrad

²Zdravotní ústav se sídlem v Ostravě, Národní referenční laboratoř pro komunální hluk, Ústí nad Orlicí

SOUHRN

Článek prezentuje výzkum provedený za účelem kvantifikace korekce na odraz zvuku od fasád budov s chráněným venkovním prostorem staveb. Kvantifikace této korekce je nezbytná vzhledem ke směrnici 2002/49/EC, která požaduje odečítat odraženou složku hladiny akustického tlaku od naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku A. Problémem se zabývá ČSN ISO 1996-2, která ovšem klasifikuje pouze tři situace a zdaleka nepokrývá další možné stavy, které mohou při měření nastat. Důležitým dokumentem v českém prostředí je Metodický návod pro hodnocení hluku v chráněném venkovním prostoru staveb, který však plošně všem situacím nedefinovaným v ČSN ISO 1996-2 přiřazuje korekci +2,0 dB.

Výzkumným nástrojem užítým pro kvantifikaci korekce na odraz zvuku od fasády je metoda hraničních prvků, která uvažuje homogenní podmínky šíření zvuku. Metodou hraničních prvků byla analyzována řada případových studií s proměnnou vzdáleností přijímače od odrazivé plochy. Poté byla získaným souborem dat proložena křivka, jejíž poloha byla nalezena metodou nejmenších čtverců. Získaná křivka pro danou situaci definuje vzorec, kterým je možné korekci na odraz zvuku od fasády vypočítat.

Klíčová slova: metodika hodnocení hluku, ukazatele hluku

SUMMARY

The paper presents research performed in order to classify the correction for sound wave reflection from house facades with protected outdoor environs of buildings. Quantification of this correction is necessary because of the Directive 2002/49/EC which demands to subtract the reflected component of the sound pressure level from the measured sound pressure level A. The norm ČSN ISO 1996-2 deals with the problem and classifies three situations which can occur during measurements. An important document in the Czech environment is the Methodical Manual for the Assessment of Noise in the Protected Outdoor Environs of Buildings which assigns to all situations not defined in ČSN ISO 1996-2 a correction of +2.0 dB.

The research tool used for the quantification of a correction for the sound reflection from the façade is the boundary element method which is valid for homogeneous conditions of sound propagation. The boundary element method was used to analyse several case studies with a variable distance from the reflecting surface. Consequently, a curve was fitted through the obtained data set whose position was found with the least squares method. The obtained curve defines a formula for any given situation which can be used for the calculation of the correction for sound reflection.

Key words: noise assessment methodology, noise indicators

<http://dx.doi.org/10.21101/hygiena.a1468>

Úvod

Jak udávají četné studie, hluk v životním prostředí je závažným problémem pro zdraví řady obyvatel Evropské unie. Proto se tento problém snaží řešit jak jednotlivé členské země EU, tak rovněž i Evropský parlament a Rada Evropské unie. Základním dokumentem v tomto úsilí je směrnice 2002/49/EC (1), která se vztahuje k hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí.

Směrnice se zabývá hlukem způsobeným automobilovou, železniční a leteckou dopravou a hlukem z průmyslových zdrojů. Dále směrnice definuje hlukové in-

dikátory L_{den} [dB] (den-večer-noc) [dB] a L_n [dB] (noc), které jsou určeny pro hodnocení hluku ve venkovním prostředí v rámci akčních plánů a strategického hlukového mapování.

Směrnice uvádí, že výška měřicího bodu nad terénem by měla být $4,0 \pm 0,2$ metru před fasádou objektu, která podléhá nejvyššímu hlukovému zatížení. Za nejexponovanější fasádu se v tomto případě uvažuje fasáda přivrácená ke zdroji hluku. Ve specifických případech, např. v případech jednopodlažních objektů, je možné zvolit i nižší výšku mikrofonu, která ale musí být více než 1,5 metru nad terénem.

Skutečnost, že měřicí bod je umístěn před fasádou objektu, znamená, že měřená hladina akustického tlaku je ovlivněna odrazem zvuku od fasády. Směrnice 2002/49/EC konstatuje, že obecným pravidlem pro získání dopadající hladiny akustického tlaku je odečtení korekce +3,0 dB od naměřené hodnoty.

Korekce +3,0 dB však odpovídá referenční modelové situaci obsahující odrazivou a rovinnou fasádu a vzdálený zdroj zvuku a která uvažuje dostatečně široké frekvenční spektrum vážené funkcí A. Pro jiné situace je korekce na odraz zvuku od fasády zpravidla nižší, ale za určitých podmínek může nabývat i vyšších hodnot.

Cílem tohoto článku je danou problematiku přehlednit. Hlavním nástrojem užitým v této publikaci je metoda hraničních prvků, která byla implementována v jazyce Matlab jako open source (tj. volně k užití) soubor zdrojových kódů OpenBEM*. Tyto zdrojové kódy byly vyvinuty na University of Southern Denmark pod vedením Petera Møllera Juhla a Vicente Cutandy Henriquize. Znalost zdrojového kódu je nutná, protože OpenBEM nedisponuje grafickým uživatelským rozhraním. Více informací o softwaru OpenBEM je možné získat z publikace (2) nebo z disertační práce Petera Møllera Juhla (3).

Metoda hraničních prvků (MHP) vychází z řešení Helmholtzovy rovnice, a proto uvažuje homogenní atmosféru a stacionární situaci. Pro získání korekce na odraz zvuku od fasády je takový model v pořádku, přesto je však vhodné získané výsledky prověřit měřeními v terénu, které je ovlivněno nehomogenitami v prostředí, kterým se zvuk šíří. Takové měření však není součástí prezentované práce a předpokládá se, že bude následovat jako další výzkumný úkol.

Stávající řešení problematiky

Důležitým dokumentem je norma ČSN ISO 1996-2 (4), která má být v budoucnu nahrazena připravovanou mezinárodní normou ISO/DIS 1996-2 (5). Pro české prostředí je rovněž důležitý Metodický návod pro hodnocení hluku v chráněném venkovním prostoru staveb (6).

Metodický návod odkazuje na normu (4) a při splnění podmínek uvedených v normě konstatuje, že by měla být užitá korekce +3,0 dB k získání dopadajícího zvukového pole. Pozice měřicího bodu by přednostně měla být umístěna 2,0 metru před fasádou. V případě, že podmínky splněny nejsou, je navržena korekce +2,0 dB. Je ovšem zřejmé, že takový návrh je do značné míry zjednodušující a bylo by vhodné korekci upřesnit.

Přesné určení korekce na odraz zvuku od fasády je důležité zejména vzhledem ke skutečnosti, že naměřená hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku A se po přepočtení na hodnotu dopadající ekvivalentní hladiny akustického tlaku A porovnává s limitem, který je stanoven příslušnou legislativou. Hygienické limity hluku pro chráněný venkovní prostor, chráněný venkovní prostor staveb a chráněný vnitřní prostor staveb jsou v České republice definovány v nařízení vlády 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací (NV 272/2011 Sb.) (7).

Metoda hraničních prvků

Metoda hraničních prvků je hlavním výzkumným nástrojem pro odvození korekce na odraz zvuku od fasády. Jedná se o numerickou metodu, která je v oblasti akustiky populární alternativou k metodě konečných prvků. Oproti konečným prvkům má metoda hraničních prvků výhodu snazšího řešení oblastí s nekonečným rozsahem (tj. venkovní prostředí). Metoda konečných prvků dělí celou oblast na jednotlivé prvky, což u nekonečných oblastí vyžaduje určitá zjednodušení. Oproti tomu metoda hraničních prvků dělí na prvky pouze hranici oblasti, a to je při analýze akustického tlaku ve venkovním prostředí výhodou.

Základem numerických metod je řešení parciální diferenciální rovnice. Šíření zvuku v kartézském souřadnicovém systému je popsáno vlnovou rovnicí (parciální diferenciální rovnicí druhého řádu). Vlnová rovnice má tvar (8):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

kde p [Pa] je akustický tlak, x, y, z [m] jsou souřadnice ve směru tří os (resp. dvou os při řešení 2D problému), c [m/s] je rychlost zvuku a t [s] je čas.

V případě, že se jedná o harmonické vlnění (jinak čistý tón) a je dostatečné vyjádřit akustický tlak pro stacionární stav, můžeme vlnovou rovnici převést na Helmholtzovu rovnici (8):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0$$

kde p [Pa] je akustický tlak, x, y, z [m] jsou souřadnice ve směru tří os (resp. dvou os při řešení 2D problému) a k [m⁻¹] je vlnové číslo.

Není cílem tohoto článku vysvětlovat čtenáři komplexní principy metody hraničních prvků. V tomto kontextu je čtenář odkázán na příslušnou literaturu, např. (3, 9, 10).

Proměnné algoritmu pro výpočet korekce na odraz zvuku od fasády

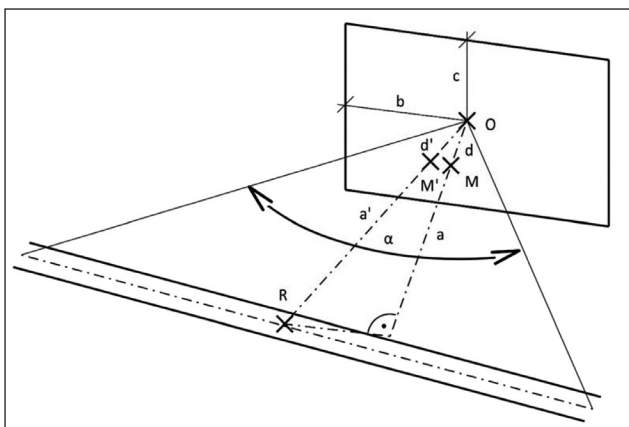
Korekce na odraz zvuku od fasády je v této publikaci definována:

$$C_{ref} = 10 \log \left(\frac{p_{ref}}{p_{ff}} \right)^2$$

kde C_{ref} [dB] je korekce na odraz zvuku, p_{ref} [Pa] je akustický tlak v situaci s překážkou (tj. fasádou objektu) a p_{ff} [Pa] je akustický tlak ve volném zvukovém poli (s ohledem na názvosloví užitá v normě (4) se za volné zvukové pole uvažuje situace s terénem bez dalších překážek).

Korekce na odraz zvuku od fasády je proto rovna záporné hodnotě vložného útlumu. Vložný útlum akustické clony se obvykle definuje jako rozdíl mezi hladinou akustického tlaku v situaci bez bariéry a hladinou akustického tlaku v situaci s bariérou. Vložný útlum vyjadřuje snížení hladiny akustického tlaku díky bariéře. Oproti tomu kladná hodnota korekce na odraz zvuku vyjadřuje

*<http://www.openbem.dk>



Obr. 1: Referenční situace pro řešení problematiky odrazu zvuku od fasády (volně dle (5)).

M – pozice mikrofónu, O – kolmý průmět bodu M na fasádu, M' – bod na ose úhlu a v kolmé vzdálenosti d od fasády, úsečka MM' je rovnoběžná s fasádou, R – bod na průsečnici osy úhlu a a osy zdroje zvuku, a – zorný úhel, pod kterým je vidět zdroj zvuku z bodu O , d – vzdálenost bodu M od bodu O , d' – vzdálenost bodu M' od bodu O , a' – vzdálenost bodu R od bodu O , a – kolmý průmět úsečky OR do přímky OM , b, c – nejkratší vzdálenosti od bodu O k okrajům fasády (horizontální a vertikální).

zvýšení hladiny akustického tlaku. Při užití korekce na odraz zvuku se její hodnota odečte od hladiny akustického tlaku A naměřené před fasádou. Geometrie modelované situace je znázorněna na obr. 1.

Definiční obor řešení výzkumného projektu je určen takto:

- 1) Kolmá vzdálenost přijímače od fasády objektu: od 0,001 m do 5,0 m od fasády
 - 2) Frekvenční pásmo: od 50 Hz do 5000 Hz
 - 3) Frekvenční spektrum:
 - a) Váhová funkce A
 - b) Frekvenční spektrum C_{tr} (ČSN EN ISO 717-1) (11)
- Proměnné řešení výzkumného záměru jsou:
- 1) Typ zdroje:
 - a) Liniový zdroj zvuku (zorný úhel α je alespoň 60°)
 - b) Bodový zdroj zvuku (zorný úhel α je nižší než 60°)
 - 2) Vzdálenost zdroje zvuku od překážky (viz obr. 1):
 - a) Vzdálený zdroj zvuku – definován jako:
 - i) Liniový zdroj zvuku: $a' \geq 10 \cdot d'$
 - ii) Bodový zdroj zvuku: $a' \geq 20 \cdot d'$
 - b) Blízký zdroj zvuku – definován jako:
 - i) Liniový zdroj zvuku: $10 \cdot d' > a' \geq 2 \cdot d'$ a zároveň $a > 10,0$ m
 - ii) Bodový zdroj zvuku: $20 \cdot d' > a' \geq 2 \cdot d'$ a zároveň $a > 10,0$ m
 - 1) Úhel dopadu zvukové vlny na fasádu (horizontální úhel β [°], vertikální úhel γ [°] a prostorový úhel ω [°], úhly se měří k přivrácené hraně, tj. vždy se pohybují v mezích 0° a 90°). Úhly β a γ se měří od průmětu úsečky OR do příslušné roviny (horizontální či vertikální).

V této publikaci je vzhledem k omezenému rozsahu prezentován pouze kolmý dopad zvuku na překážku. V původní studii je však obsažen jak kolmý dopad, tak kosý dopad zvuku (12).

Úhel ω je možné vypočítat pomocí trigonometrického vztahu (viz obr. 1):

$$\omega = \sin(a/a')$$

- a) Kolmý dopad zvuku na fasádu: $\beta \geq 75^\circ$ a zároveň $\gamma \geq 75^\circ$

b) Kosý úhel dopadu:

- i) $75^\circ > \beta \geq 15^\circ$ a zároveň $\gamma \geq 75^\circ$ (kosý dopad v horizontální rovině)
- ii) $75^\circ > \gamma \geq 15^\circ$ a zároveň $\beta \geq 75^\circ$ (kosý dopad ve vertikální rovině)
- iii) $75^\circ > \beta \geq 15^\circ$ a zároveň $75^\circ > \gamma \geq 15^\circ$ (prostorový kosý úhel dopadu)

Algoritmus pro výpočet korekce na odraz zvuku od fasády

V tomto článku je dostatek prostoru pouze pro ilustrativní odvození rovnice pro výpočet korekce na odraz zvuku od fasády pro jednu situaci. V původní studii jsou však odvozeny vzorce pro celou řadu dalších situací. Výsledky výzkumu jsou v článku tabelovány v další kapitole v tabulkách 1–3.

Řešení výzkumného úkolu spočívá v modelování vyšetřované situace se středními frekvencemi třetino-oktávových pásem od 50 Hz do 5000 Hz. Výpočet je tedy proveden v rozšířeném frekvenčním pásmu, což je výhodné z hlediska vzetí v potaz většího rozsahu situací. Problematické je určení frekvenčního spektra dopravního hluku. Autoři publikace se rozhodli užít váhovou funkci A a frekvenční spektrum C_{tr} z ČSN EN ISO 717-1 (11).

Vypočtené hodnoty hladin akustického tlaku ve třetino-oktávových pásmech jsou vždy řešeny ve dvou variantách, tj. varianta s fasádou a varianta ve volném zvukovém poli. Terén vzhledem k definici volného zvukového pole dle ČSN ISO 1996-2 není ve výpočtu uvažován. Po získání hodnot hladiny akustického tlaku ve třetino-oktávových pásmech ve dvou variantách jsou hodnoty váženy dle uvažované váhové funkce nebo frekvenčního spektra (A nebo C_{tr}). Váhová funkce A (někdy také váhový filtr A) slouží pro vyjádření korekce K_A pro konkrétní třetino-oktávové pásmo. Výsledná hladina akustického tlaku je poté ve výpočtovém bodu získána energetickým součtem. Posledním krokem je získání rozdílu mezi situací s fasádou a situací ve volném zvukovém poli – tímto rozdílem je korekce na odraz zvuku od fasády.

Výpočet je proveden v přijímačích ve vzdálenostech od 0,001 metru do 5,0 metru od fasády. Přijímače jsou rozmístěny s krokem 0,005 metru. Vypočtené hodnoty je proto možné pro modelovanou situaci zobrazit v grafu, kde na ose x je vzdálenost imisního bodu od fasády objektu v metrech a na ose y je korekce na odraz zvuku od fasády v decibelech.

Křivka, která je zobrazena v grafu, trpí určitým rozptylem. Praxe přitom vyžaduje transparentní pravidla, která budou jednoznačně uplatnitelná v procesu porovnání naměřené ekvivalentní hladiny akustického tlaku A s limitem. Výsledky je proto nutné zobecnit. Toto zobecnění je provedeno pomocí regresní analýzy, kterou je možné v Matlabu provést řadou zabudovaných funkcí (v závislosti na tom, jaká regresní křivka je optimalizována). Užitá regresní analýza je založena na metodě nejmenších čtverců, tzn. je minimalizována suma druhých mocnin odchylek souboru dat od prokládané regresní křivky.

Vzorce prezentované v původní studii jsou výsledky numerického modelování. Je však nutné vzít v potaz, že

Tab. 1: Hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády [dB] – kolmý dopad zvuku, odrazivá fasáda

Zdroj zvuku		Frekvenční spektrum	Vzdálenost mikrofonu od fasády [m]					
Vzdálenost	Typ		0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Vzdálený zdroj	Liniový + bodový	K_A	5,7	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
		C_{tr}	5,7	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9
Blízký zdroj	Liniový	K_A	5,7	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2
		C_{tr}	5,7	2,4	2,0	1,8	1,5	1,3
	Bodový	K_A	5,7	2,1	1,5	1,1	0,7	0,4
		C_{tr}	5,7	2,0	1,5	1,1	0,7	0,5

Tab. 2: Hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády [dB] – kolmý dopad zvuku, pohltivá fasáda

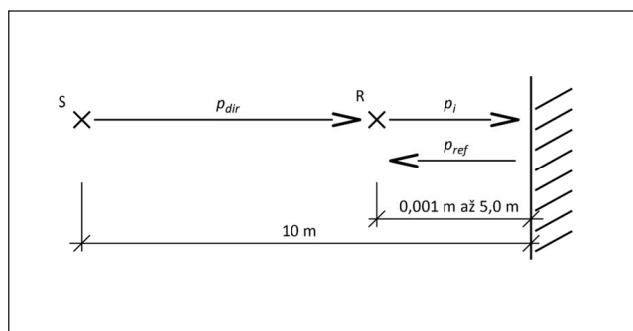
Zdroj zvuku		Frekvenční spektrum	Vzdálenost mikrofonu od fasády [m]					
Vzdálenost	Typ		0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Vzdálený zdroj	Liniový + bodový	K_A	5,7	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
		C_{tr}	5,7	2,4	2,3	2,3	2,3	2,3
Blízký zdroj	Liniový	K_A	5,7	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7
		C_{tr}	5,7	2,1	1,7	1,5	1,2	1,0
	Bodový	K_A	5,7	1,6	1,0	0,6	0,2	0,0
		C_{tr}	5,7	1,7	1,2	0,8	0,4	0,2

Tab. 3: Hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády [dB] – kolmý dopad zvuku, smíšená fasáda

Zdroj zvuku		Frekvenční spektrum	Vzdálenost mikrofonu od fasády [m]					
Vzdálenost	Typ		0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Vzdálený zdroj	Liniový + bodový	K_A	5,7	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
		C_{tr}	5,7	2,6	2,5	2,5	2,5	2,5
Blízký zdroj	Liniový	K_A	5,7	2,2	1,8	1,5	1,2	0,9
		C_{tr}	5,7	2,2	1,8	1,6	1,3	1,1
	Bodový	K_A	5,7	1,8	1,2	0,8	0,4	0,1
		C_{tr}	5,7	1,8	1,3	0,9	0,5	0,3

zvukové pole v reálné situaci může v blízkosti fasády trpět nehomogenitami. Je proto doporučeno, aby v praxi buď byla užita korekce +5,7 dB v případě, že mikrofon je umístěn přímo na fasádě nebo, pokud přímo na fasádě umístěn není, aby byly dodrženy minimální odstupy od fasády pro měření celkové hladiny akustického tlaku A dané ČSN ISO 1996-2 (4):

$$\begin{aligned} d'' &\geq 1,0 \text{ m} && \text{pro bodový zdroj} \\ d'' &\geq 0,5 \text{ m} && \text{pro liniový zdroj} \end{aligned}$$

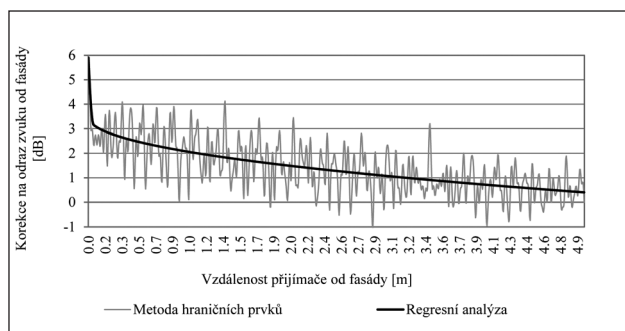


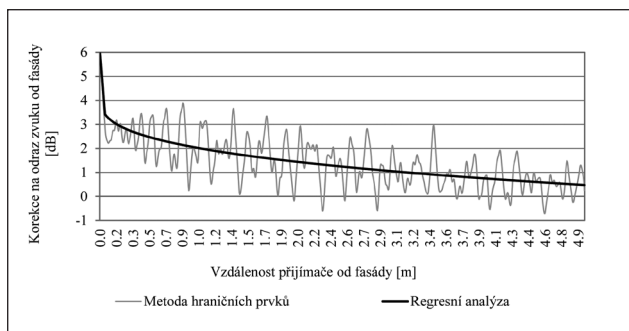
Obr. 2: Schéma situace pro výpočet korekce na odraz zvuku 2.

(S – zdroj zvuku, R – přijímač, p_{dir} – přímá složka akustického tlaku, p_i – dopadající složka, p_{ref} – odražená složka)

Příklad odvození korekce na odraz zvuku od fasády pro blízký, bodový zdroj zvuku

Modelovaná situace je schematicky zobrazená na obr. 2. Kolmá vzdálenost zdroje zvuku od fasády je 10,0 m, což je minimální předepsaná vzdálenost ($a \geq 10,0$ m). Vstupní parametry této situace jsou dle rozdělení vstupních parametrů v předešlé kapitole tyto: blízký, bodový zdroj zvuku, kolmý dopad zvuku na fasádu, odrazivá, velká a rovinná fasáda.

Obr. 3: Korekce na odraz zvuku od fasády vypočtená MHP a regresní analýzou jako funkce vzdálenosti přijímače od fasády – blízký, bodový zdroj zvuku, váhová funkce A .



Obr. 4: Korekce na odraz zvuku od fasády vypočtená MHP a regresní analýzou jako funkce vzdálenosti přijímače od fasády – blízký, bodový zdroj zvuku, frekvenční spektrum C_{tr} .

Vypočtená korekce na odraz zvuku od fasády pro váhovou funkci A společně s regresní křivkou v závislosti na vzdálenosti přijímače od fasády je na obr. 3.

Korekci na odraz zvuku od fasády C_{ref} [dB] pro blízký, bodový zdroj zvuku pro váhovou funkci A je možné vyjádřit jako funkci vzdálenosti přijímače od překážky d [m]:

$$C_{ref} = 956,02 d^2 - 104,66 d + 6 \quad \text{pro } d \leq 0,05 \text{ m}$$

$$C_{ref} = -1,43 d^{0,481} + 3,49 \quad \text{pro } d > 0,05 \text{ m}$$

Vypočtená korekce na odraz zvuku od fasády pro frekvenční spektrum C_{tr} společně s regresní křivkou v závislosti na vzdálenosti přijímače od fasády je na obr. 4.

Korekci na odraz zvuku od fasády C_{ref} [dB] pro blízký, bodový zdroj zvuku pro frekvenční spektrum C_{tr} je možné vyjádřit jako funkci vzdálenosti přijímače od překážky d [m]:

$$C_{ref} = -26,55 d^2 - 50,15 d + 6 \quad \text{pro } d \leq 0,05 \text{ m}$$

$$C_{ref} = -2,23 d^{0,329} + 4,26 \quad \text{pro } d > 0,05 \text{ m}$$

Shrnutí algoritmu výpočtu korekce na odraz zvuku od fasády

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády ve formě přehledných tabulek, které zjednoduší akustickým specialistům proces navrhování. Tabulkové hodnoty vychází z výsledku regresní analýzy. U každé tabulky je v krátkosti popsána situace, pro kterou jsou uvedené hodnoty platné. Hodnoty jsou zaokrouhleny na jedno desetinné místo.

Typ zdroje je definován (viz obr. 1):

a) Liniový zdroj zvuku (zorný úhel α je alespoň 60°)

b) Bodový zdroj zvuku (zorný úhel α je nižší než 60°)

Vzdálený zdroj zvuku je definován (viz obr. 1):

a) Liniový zdroj zvuku: $a' \geq 10 \cdot d'$

b) Bodový zdroj zvuku: $a' \geq 20 \cdot d'$

Blízký zdroj zvuku je definován (viz obr. 1):

a) Liniový zdroj zvuku: $10 \cdot d' > a' \geq 2 \cdot d'$ a zároveň $a > 10,0 \text{ m}$,

b) Bodový zdroj zvuku: $20 \cdot d' > a' \geq 2 \cdot d'$ a zároveň $a > 10,0 \text{ m}$

Minimální omezení vzdálenosti zdroje zvuku od fasády objektu ($a > 10,0 \text{ m}$) je dané tím, že ani u blízkého zdroje by dopadající akustická energie neměla být ve výrazném nepoměru s odraženou akustickou energií. Pokud by zdroj zvuku byl umístěn velmi blízko fasády, byla by hodnota korekce na odraz nezanedbatelně nižší vzhledem k dominantní přímé složce akustického tlaku.

Užitá frekvenční spektra jsou tato:

a) Váhová funkce A: zohledňuje citlivost lidského ucha. Doporučuje se užívat tuto korekci pro vysokorychlostní silniční dopravu (průměrná rychlost dopravního proudu nad cca 80 km/h) nebo pro kolejovou dopravu o středních a vysokých rychlostech.

b) Frekvenční spektrum C_{tr} : doporučuje se užívat pro nízkofrekvenční hluk, tj. městský dopravní hluk, kolejovou dopravu o nízkých rychlostech a průmyslové zdroje vyzařující hluk s dominantním zastoupením středních a nízkých frekvencí.

Minimální rozměry fasády jsou dle ČSN ISO 1996-2 definovány (viz obr. 1):

- $b \geq 4 \cdot d$ a zároveň $c \geq 2 \cdot d$

Dle numerických modelů provedených autorem je možné při měření mikrofonu blízko odrazivé plochy minimální rozměry fasády snížit na rozměry malé fasády, které jsou definovány:

- $b \geq 2 \cdot d$, $c \geq 2 \cdot d$ a zároveň $b \geq 2,5 \text{ m}$, $c \geq 2,5 \text{ m}$

Pro nejčastěji užívanou vzdálenost mikrofonu od fasády (tj. $2,0 \text{ m}$) proto platí, že $b \geq 4,0 \text{ m}$ a zároveň $c \geq 4,0 \text{ m}$

Pohltivost fasády je v tomto článku rozdělena do tří kategorií: odrazivá fasáda, pohltivá fasáda (měrný odpor proti proudění vzduchu $\sigma = 1000 \text{ kN s/m}^4$) a smíšená fasáda (měrný odpor proti proudění vzduchu $\sigma = 2000 \text{ kN s/m}^4$). Je vhodné podotknout, že standardní druhy omítek spadají do kategorie odrazivá fasáda.

Pro pohltivou fasádu by přinejmenším měly být splněny tyto podmínky:

- Podíl okenních ploch na celé ploše fasády je nižší než 40% ,
- Povrch obvodového pláště není svým činitelem pohltivosti blízký činiteli pohltivosti skla nebo pohledového betonu.

Klasifikace fasády do kategorie pohltivá je rovněž možné provést v případě, že mikrofon je umístěn před výrazně členěnou fasádou (lodžie, balkóny). Stanovení korekce na odraz zvuku od fasády pak není zcela přesné, ale pohybuje se na straně bezpečnosti.

Pro smíšenou fasádu by přinejmenším měly být splněny tyto podmínky:

- Podíl okenních ploch na celé ploše fasády je mezi 40% a 60% ,
- Povrch obvodového pláště není svým činitelem pohltivosti blízký činiteli pohltivosti skla nebo pohledového betonu.

Pokud je fasáda členěna více, než je předepsáno ČSN ISO 1996-2 (mezí úchylky $\pm 0,3 \text{ m}$) a zároveň fasáda neobsahuje výrazné prvky jako balkóny nebo lodžie, je možné fasádu zařadit mezi smíšené. Stanovení korekce na odraz zvuku od fasády se pak pohybuje na straně bezpečnosti.

Hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády pro pohltivou fasádu a kolmý dopad zvuku jsou uvedeny v tab. 2, zatímco pro smíšenou fasádu a kolmý dopad zvuku jsou hodnoty korekce na odraz zvuku uvedeny v tab. 3.

Závěr

Předložená publikace obsahuje hlavní body teoretického rozboru korekce na odraz zvuku od fasády. Hlavním nástrojem řešení výzkumného úkolu je metoda hra-

ničních prvků. Výstupy řešení výzkumného úkolu, které jsou zde uvedeny, jsou tabelované hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády. Předložená publikace navrhuje na výzkumnou studii (12), která problematiku rozzebírá výrazně podrobněji.

Problematiku výpočtu korekce na odraz zvuku od fasády je žádoucí dále objasnit vzhledem k nutnosti přepočtu naměřené ekvivalentní hladiny akustického tlaku A na podmínky volného zvukového pole. V současné době o tomto problému pojednávají ČSN ISO 1996-2 a metodický návod Ministerstva zdravotnictví. Tyto dokumenty však zdaleka neřeší všechny situace, které v praxi mohou nastat.

Rozbor byl proveden pro dvě frekvenční spektra: váhovou funkci A a frekvenční spektrum C_{tr} . Bylo zjištěno, že korekce na odraz zvuku od fasády pro nízké vzdálenosti přijímače od fasády rychle klesá a to zhruba až do vzdálenosti 0,05 metru. V praxi se pro malé vzdálenosti doporučuje používat paušálně korekci 5,7 dB, pokud je mikrofon umístěn přímo na fasádě. Pro jiné umístění mikrofonu je pak doporučeno dodržet odstupové vzdálenosti od fasády dané ČSN ISO 1996-2.

Hlavní pozornost byla věnována rozdílům mezi blízkým a vzdáleným zdrojem zvuku a rozdílům mezi liniovým a bodovým zdrojem zvuku. V poslední kapitole jsou hodnoty korekce tabelovány. Autoři publikace doufají, že tento způsob zápisu zjednoduší akustickým specialistům určení hodnoty korekce na odraz zvuku od fasády.

Akustický specialista se v praxi nepochybně může setkat s celou řadou netypických situací. Netypické situace však vyžadují řešení komplexními postupy (např. právě metodou hraničních prvků), protože jednoduché rovnice, které by tyto situace popisovaly, by nutně musely obsahovat příliš vysokou míru nepřesnosti.

Prezentované výsledky výzkumu by měly být následovány dalším výzkumným záměrem, který by problematiku dále řešil pomocí měření v terénu. Měření korekce na odraz zvuku od fasády trpí nejistotami v důsledku proměnných okrajových podmínek měření a v důsledku nutnosti volby referenční situace, ve které je možné měřit jak hladinu akustického tlaku A před fasádou, tak hladinu akustického tlaku A mimo fasádu v jinak srovnatelných podmínkách. Přesto je pomocí měření v terénu možné získat další informace, které pomohou dotčenou problematiku více objasnit.

Poděkování

Tato práce vznikla za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I č. LO1605 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Fáze udržitelnosti.

LITERATURA

1. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and

management of environmental noise. Off J Eur Communities. 2002 Jul 18;45(L189):12-25.

2. Cutanda Henríquez V, Juhl PM. OpenBEM - An open source Boundary Element Method software in Acoustics. In: 39 th International Congress on Noise Control Engineering 2010 (INTER-NOISE 2010); 2010 Jun 13-16; Lisbon, Portugal. Lisbon: Sociedade Portuguesa de Acustica; 2010. p. 5796-5805.
3. Juhl MP. The boundary element method for sound field calculations [dissertation thesis]. Lyngby: Technical University of Denmark, The Acoustics Laboratory; 1993.
4. ČSN ISO 1996-2. Akustika - Popis, měření a posuzování hluku prostředí - Část 2: Určování hladin hluku prostředí. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví; 2009.
5. ISO/DIS 1996-2. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva: ISO; 2015.
6. Ministerstvo zdravotnictví - Hlavní hygienik České republiky. Metodický návod pro hodnocení hluku v chráněném venkovním prostoru staveb. Praha: MZ ČR; 2010.
7. Nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Sbírka zákonů ČR. 2011;částka 97:3338-51.
8. Jacobsen F, Poulsen T, Rindel JH, Gade AC, Ohlrich M. Fundamentals of acoustics and noise control. Lyngby: Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark; 2011.
9. Troels AN. Modelling the influence of noise barriers on road noise by using the boundary element method [diploma thesis]. Odense: University of Southern Denmark, Institute of Technology and Innovation; 2012.
10. Kristiansen UR, Viggen EM. Computational methods in acoustics. Department of Electronics and Telecommunication, NTNU; 2010.
11. ČSN EN ISO 717-1. Akustika - Hodnocení zvukové izolace stavebních konstrukcí a v budovách - Část 1: Vzduchová neprůzvučnost. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví; 2013.
12. Šlechta J. Korekce na odraz zvuku od fasády. Výzkumná zpráva. Buštěhrad: ČVUT; 2015.

Došlo do redakce: 7. 4. 2016

Přijato k tisku: 4. 10. 2016

Ing. Jan Šlechta, Ph.D.

Univerzitní centrum energeticky efektivních budov

České vysoké učení technické v Praze

Třinecká 1024

273 43 Buštěhrad

E-mail: jan.slechta@cvut.cz