

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta architektury

Ústav techniky staveb

Ing. Roman Číhal

**AKUSTIKA STAVEB
VZDUCHOVÁ A KROČEJOVÁ NEPRŮZVUČNOST**

**BUILDING ACOUSTICS
AIRBORNE AND IMPACT SOUND INSULATIONS**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: architektura

Školitel: Prof. Ing. Jiří Vaverka, DrSc.

Oponenti: Prof. Ing. Julius Puškáš, CSc.
Doc. RNDr. Marie Vaňková, CSc.
Ing. Jan Kaňka, Ph.D.

Datum obhajoby: 24. 9. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

akustika, vzduchová, kročejová neprůzvučnost

KEY WORDS

acoustics, airborne, impact sound, insulation

S disertační prací je možno se seznámit na Ústavu techniky staveb,
Vysoké učení technické v Brně, Fakulta architektury,
Poříčí 5, 639 00 Brno.

© uvedené názvy produktů nebo společností mohou být
registrovanými ochrannými známkami.

© Roman Číhal

ISBN 80-214-2271-8

ISSN 1213-4198

Obsah

I	ÚVOD	5
II	STRUKTURA A CÍL PRÁCE	5
III	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
1	Zvukové vlny	6
2	Akustické vlastnosti materiálů	7
3	Metody stanovení neprůzvučnosti	10
4	Pomůcky k projektování	13
IV	ANALÝZA VYZAŘOVÁNÍ ZVUKU Z KONSTRUKCÍ	14
1	Popis vyzařování zvuku z konstrukce	14
2	Vyzařování zvuku ohybově kmitající deskou	15
3	Rezonance ohybových vln	15
4	Excitace desky zvukovou vlnou	16
V	MODEL Y STANOVENÍ NEPRŮZVUČNOSTI	16
1	Predikční model vypracovaný Sewellem	17
2	Predikční model vypracovaný Jossem a Lamurem	17
VI	MODEL Y NEPRŮZVUČNOSTI EN-12354	18
1	Porovnání termínů	18
2	Vzduchová neprůzvučnost	19
3	Kročejevová neprůzvučnost	21
VII	VÝSLEDKY PRÁCE	22
1	Volba vhodného modelu	22
2	Stávající výpočetní programy	22
3	Vlastní realizace programu	26
4	Testování funkce	27
5	Dokumentace programu	28
VIII	ZHODNOCENÍ	28
	LITERATURA	28
	RESUME	32
	SUMMARY	32

I ÚVOD

V průběhu práce od roku 1997 do roku 2002 došlo k závažné změně normativní základny. Nebylo možné pokračovat podle původně zvolené metodiky Vaverka [43]-[46], Vrána [21], [23], [50] na základě řady akustických měření, empirických zkušeností, grafů a nomogramů ani podle teorie Čechura [7]. Práce byla přepracována v souladu s nově platnou metodikou a nově platnými termíny [52], [53]. Normativní základna se primárně odvíjí od hygienických požadavků na zabezpečení hlukové - exteriérové a zejména interiérové pohody. Úroveň hlukové zátěže je definována nejvýše přípustnými hladinami hluku, které jsou určeny pro jednotlivá místa osob v pracovním nebo klidovém cyklu [11], [12], [13].

Od 1.1.2001 platí Nařízení vlády č.502/2000 Sb. O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací, nahrazující platnost Hygienických předpisů č.37/1997 a směrnice č.41.

Česká republika se členstvím v mezinárodním sdružení CEN zavázala ke spolupráci při přípravě a k přebírání v současné době připravovaných společných evropských norem EN. V našem případě jde zejména o výpočtové metody a normy pro měření a hodnocení akustických vlastností [52], [53].

II STRUKTURA A CÍL PRÁCE

Práce shrnuje výsledky studia v teoretické a aplikační oblasti na téma „**Akustika staveb - vzduchová a kročejová neprůzvučnost**“. Práce vznikla ve spolupráci Ústavu techniky staveb VUT Fakulty architektury Brno s akreditovanou akustickou zkušebnou Centrum stavebního inženýrství (CSI) – Zlín. Poskytnuté výsledky akustických měření [48] k porovnání výsledků ale nebylo možno detailně uveřejnit. Zadavatelé měření nedovolují šíření všech informací o svém produktu - obvykle z konkurenčních důvodů. Zájemce může volně dostupné informace hledat v katalogových listech jednotlivých firem např.[21], [44].

Struktura disertační práce

Teoretická oblast

- určení vzduchové a kročejové neprůzvučnosti

Aplikační oblast

- volba výpočetního modelu
- zmapování stávajících programů
- realizace programu BA2000
- testování funkce programu
- dokumentace programu

Vlastní těžiště práce je zmapování stávajících programů a tvorba nového programu k návrhu a posouzení stavební konstrukce.

Cíl disertační práce

- určení vzduchové a kročejové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí pomocí nového programu k automatizaci návrhu a posouzení stavebních konstrukcí
- přiblížení se s dostatečnou přesností k hodnotám stavební neprůzvučnosti dělicího prvku
- použití vhodné, prakticky ověřené metodiky

III SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Akustika se zabývá mechanickými kmity, vlnami a souvisejícími jevy. Stavební akustika je obor technické akustiky. Zabývá se okruhem problémů souvisejících se šířením zvuku stavebními konstrukcemi v budovách a v jejich okolí, resp. zvukoizolačními vlastnostmi jednotlivých konstrukčních prvků.

1 Zvukové vlny

1.1 Základní charakteristiky

Zvukem vnímaným sluchem rozumíme mechanické vlnění v rozsahu slyšitelných kmitočtů, tj. přibližně v rozsahu kmitočtů 16 Hz až 16 kHz. (Posuzování stavebních konstrukcí z hlediska akustiky je v kmitočtovém rozsahu 100 Hz – 3150 Hz.) Přenos zvuku tuhými látkami je označován jako přenos mechanického kmitání nebo chvění [14]. V plynném, kapalném a tuhém prostředí se zvukové vlny šíří fázovou rychlostí závislou na fyzikálních vlastnostech prostředí. Přímočaré šíření zvukové vlny je ovlivňováno odrazem od překážek, ohybem v prostředí s měnícími se fyzikálními vlastnostmi nebo lomem při přechodu do prostředí s jinými vlastnostmi. Míra odrazu, ohybu nebo lomu je dána velikostí změny vlnové impedance prostředí.

Při šíření akustické vlny prostředím kmitají částice kolem rovnovážných poloh, nastává zhušťování a zředování prostředí. Projevuje se změnami tlaku nebo změnami vnitřního napětí. Pohyb elementů prostředí, kterým se šíří zvukové vlny, můžeme popsat vlnovou rovnicí a jejím řešením při respektování okrajových podmínek.

1.2 Hluk v životním a pracovním prostředí

Projevuje-li se zvuk rušivě nebo škodlivě - označuje se jako hluk. Častými zdroji hluku jsou ohybově kmitající desky. Prvky vyzařují akustický výkon, jehož velikost závisí na poměru vlnové délky ohybové vlny v konstrukci a vlnové délky zvukové vlny ve vzduchu. Rozhraní mezi oblastí s omezeným vyzařováním a oblastí, kde deska vyzařuje účinněji, určuje kritický kmitočet, při němž dochází k maximálnímu vyzařování zvukové energie. Kritický kmitočet závisí na rychlosti šíření podélných vln v konstrukci a tloušťce desky. Rychlost šíření podélných vln je jedním z parametrů ovlivňujícím volbu materiálu pro neprůzvučné konstrukce.

Při šíření zvukové vlny prostředím dochází ke ztrátám přenášené energie, k tzv. útlumu. Při šíření zvuku ve vzduchu venkovního prostředí dochází k útlumu

působením nerovnoměrného rozložení hustoty, teploty, vlhkosti vzduchu. V tuhých látkách dochází k útlumu v důsledku změn mechanické impedance (diskontinuity v konstrukci) a vnitřního tlumení materiálu konstrukce.

1.3 Negativní vliv hluku

Ochrana životního prostředí a minimalizace rizikových faktorů je jedním z důležitých úkolů současnosti. Některým oblastem je již věnována dostatečná pozornost, hluk a vibrace jsou však často opomíjeny. Nebezpečnost hluku pro zdraví již byla statisticky prokázána. Následky působení nadměrného hluku na člověka mají závažné důsledky i po stránce hospodářské. Roste počet úrazů, dopravních nehod a nemocí. Je tedy třeba uplatnit všechny dostupné prostředky k snižování hluku [18], [33].

1.4 Snižování hluku

Použité principy a fyzikální jevy vedou k pěti hlavním metodám snižování hluku [35]: metoda redukce zvuku, zvukové pohltivosti, zvukové izolace, dispozice, pasivní ochrany.

2 Akustické vlastnosti materiálů

V protihlukových úpravách bývá rozhodujícím činitelem vhodná volba použitého materiálu. Optimální je kombinace dostupného, levného, snadno opracovatelného a stabilního materiálu požadovaných vlastností. Akustické vlastnosti materiálů jsou hodnoceny charakteristickými parametry

2.1 Zvukově izolační vlastnosti

Činitel průzvučnosti τ charakterizuje vlastnost materiálu nebo konstrukce propustit část dopadající zvukové energie [7]. Je definován jako poměr akustického výkonu vyzářeného povrchem desky do místnosti příjmu W_{tot} k akustickému výkonu W_1 na desku dopadajícímu.

$$\tau = \frac{W_{tot}}{W_1} = \frac{|p_t|^2}{|p_0|^2} = \frac{1}{\left|1 + \frac{Z_\tau^* \cos \vartheta}{2\rho_0 c}\right|^2} \quad (\text{III.1})$$

kde

W_{tot}	celkový akustický výkon přenesený do místnosti příjmu	[W]
W_2	akustický výkon vyzářený povrchem desky v místnosti příjmu	[W]
W_1	akustický výkon dopadající na zvukově izolační prvek v místnosti zdroje	[W]
p_t	okamžitá hodnota akustického tlaku	[Pa]

p_0	referenční hodnota akustického tlaku $2 \cdot 10^{-5}$ Pa	[Pa]
Z_τ^*	vstupní impedance desky	[kg.m ⁻² s ⁻¹]
ϑ	úhel dopadu zvukové vlny	[rad]
ρ_0	hustota vzduchu	[kg.m ⁻³]
c	rychlost šíření zvuku ve vzduchu	[m.s ⁻¹]

Schopnost materiálu nebo konstrukce zvuk izolovat (propouštět v zeslabené míře) se vyjadřuje neprůzvučností (dříve stupněm vzduchové neprůzvučnosti) definovaným vztahem

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} = 10 \log \frac{W_1}{W_2} = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_\tau^* \cos \vartheta}{2\rho_0 c} \right| \quad (\text{III.2})$$

Po dosazení za vstupní impedanci lze získat

$$R = 10 \log \left(1 + \left(\omega m'' - \frac{\omega B' \sin^4 \vartheta}{c^4} \right)^2 \left(\frac{\cos \vartheta}{2\rho_0 c} \right)^2 \right) \quad (\text{III.3})$$

Výpočet neprůzvučnosti na základě tohoto vztahu je značně složitý pro všesměrový dopad zvukové vlny, kdy $\vartheta \in \langle 0, \pi/2 \rangle$. Proto se velmi často používá přibližného vyjádření spočívajícího v aproximaci vstupní impedance pro určité kmitočtové oblasti. Cremer a Heckel analyzují neprůzvučnost plošně neohraničené homogenní desky, která není tlumena, ve dvou kmitočtových oblastech $f < f_C$, $f > f_C$.

Pro $f < f_C$, je možné aproximovat

$$Z_\tau^* \approx -\frac{B'}{j\omega} k_B^4 = j\omega m'' \quad (\text{III.4})$$

Podle rovnice (3.4) je vstupní impedance v kmitočtové oblasti pod kritickou frekvencí dána pouze plošnou hmotností desky m'' . Vstupní impedance je v tomto případě někdy nazývána hmotnostní impedancí. Rovnice se redukuje na

$$R = 10 \log \left| 1 + \frac{j\omega m'' \cos \vartheta}{2\rho c} \right|^2 = 10 \log \left(1 + \frac{\omega^2 m''^2 \cos^2 \vartheta}{4\rho_0^2 c^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

který se nazývá hmotnostním zákonem.

Kmitočtové závislosti neprůzvučnosti mají průběh se třemi oblastmi

- **I. rezonanční oblast** obsahuje celou řadu rezonančních frekvencí, nejen základní frekvenci vlastních kmitů stěny $f_{1,1}$ a sahá přibližně po $2f_{1,1}$. Pro oblast je to charakteristické a z hlediska zvukové izolace nepříznivé. Neprůzvučnost v této oblasti je velmi nízká a značně kolísá. Rezonanční kmitočet stěny má být co nejnižší a ležet mimo zvukově izolační pásmo.

- **II. oblast platnosti hmotnostního zákona** - oblast $2f_{1,1}$ až $2f_c$. Pod kritickým kmitočtem převládá vyzařování vynucenými ohybovými kmity desky. Neprůzvučnost desky je určována především její plošnou hmotností.

$$R = 20 \log\{(m''f)\} - 47,5 \quad (\text{III.6})$$

kde

f	kmitočet	[Hz]
m''	plošná hmotnost prvku	[kg.m ⁻²]

- **III. oblast koincidence** - převládá vyzařování „povrchovými“ rezonančními módy, částečně se uplatňuje vliv vynucených ohybových kmitů. Na neprůzvučnost má vliv ohybová tuhost, plošná hmotnost a tlumení, jehož velikost ovlivňuje hloubku a šířku poklesu neprůzvučnosti při koincidenci.

$$f_c = \frac{6,4 \cdot 10^4}{h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} = \frac{6,4 \cdot 10^4}{c_L h} \quad (\text{III.7})$$

kde

f _c	kritický kmitočet	[Hz]
ρ	objemová hmotnost	[kg.m ⁻³]
E	modul pružnosti materiálu	[Pa]
c _L	rychlost podélné vlny	[m.s ⁻¹]
h	tloušťka konstrukce	[m]

2.2 Zvukově pohltivé vlastnosti

Pohlcování zvukové energie a její přeměna v jinou, nejčastěji tepelnou energii, je významným prostředkem k řešení akustických problémů uzavřených prostorů.

Aplikací pohltivé konstrukce se daří snížit zvukovou energii odráženou od stěn v místnosti zdroje zvuku.

Schopnost materiálu pohlcovat zvuk vyjadřuje činitel zvukové pohltivosti α . Je dán poměrem pohlceného akustického výkonu W_p plochou a celkového akustického výkonu W_I na tuto plochu dopadajícího, nezávisí na velikosti plochy.

$$\alpha = \frac{W_p}{W_I} \quad (\text{III.8})$$

Pro praktickou aplikaci je nejdůležitější měření pohltivých vlastností materiálů při kolmém dopadu zvuku metodou stojatých vln a v dozvukové komoře při všesměrovém dopadu zvuku. Získané hodnoty činitele zvukové pohltivosti jsou nepostradatelné pro vývoj akustických materiálů.

2.3 Tlumící vlastnosti

Přenos zvukové vlny konstrukcí je ovlivňován vnitřním tlumením materiálu. V technické akustice se používá k vyjádření tlumících vlastností ztrátový činitel η . Je definován poměrem mechanické energie vibrací W_e přeměněné během jednoho cyklu v teplo k celkové reverzibilní vibrační energii W_r .

$$\eta = \frac{W_e}{2\pi W_r} \quad (\text{III.9})$$

Velikost ztrátového činitele má podstatný vliv na všechny druhy dynamického namáhání. Ztrátový činitel materiálu η_{int} je jednou ze složek celkového ztrátového činitele η_{tot} .

$$\frac{1}{\eta_{tot}} = \frac{1}{\eta_{int}} + \frac{1}{\eta_k} + \frac{1}{\eta_s} \quad (\text{III.10})$$

kde

η_{tot}	celkový ztrátový činitel	[-]
η_{int}	ztrátový činitel materiálu	[-]
η_k	ztrátový činitel určený tvarem a uspořádáním konstrukce	[-]
η_s	ztrátový činitel související se ztrátou mechanické energie vibrací způsobené vyzařováním zvuku z konstrukce do vzduchu	[-]

Tlumící materiály snižují rezonanční amplitudy konstrukce. Tlumí chvění postupující od místa buzení k vyzařujícím plochám. Tím snižují množství akustické energie vyzařované do vzduchu a zkracují dobu doznívání konstrukce.

3 Metody stanovení neprůzvučnosti

Kategorie

- výpočtové metodiky – technické a provozní
- experimentální metodiky

3.1 Vzduchová neprůzvučnost

Vzduchová neprůzvučnost je vlastnost konstrukce, projevující se ztrátou akustického výkonu zvuku při přenosu vzduchem prostřednictvím konstrukce. Schopnost konstrukce přenést část akustického výkonu dopadající zvukové vlny lze vyjádřit **činitelem průzvučnosti** v kmitočtovém pásmu τ [-]. Hodnoty s rostoucím kmitočtem klesají.

Vhodnější je vyjadřovat izolační schopnost, tj. vzduchovou neprůzvučnost. Ukazatelem je veličina neprůzvučnost (dříve stupeň vzduchové neprůzvučnosti)

R [dB] v kmitočtovém pásmu. Podle normy představuje soubor šestnácti hodnot v třetinooktávových pásmech 100 Hz až 3150 Hz.

$$R = 10 \log(1/\tau) \quad (\text{III.11})$$

Požadavky na vzduchovou neprůzvučnost se vyjadřují váženou neprůzvučností (dříve index vzduchové neprůzvučnosti) R_w , R'_w [dB] – jednočíselným ukazatelem, kterým se přihlíží i ke kmitočtové skladbě neprůzvučnosti. Hodnota se určí podle posunutí směrné křivky v kmitočtovém pásmu 500 Hz.

Vážená stavební neprůzvučnost se určí ze vztahu

$$R'_w = R_w - C \quad (\text{III.12})$$

kde

C je korekce závislá na přenosu zvuku bočními cestami [dB]

Rozdíl hodnot stavební a laboratorní neprůzvučnosti téže konstrukce vyplývá z existence bočních přenosových cest zvuku mezi vysílací a přijímací místností. Rostoucím počtem přenosových cest při stejné skladbě dělicí konstrukce znamená snížení hodnoty R na R' .

Metody stanovení vzduchové neprůzvučnosti

Technická metoda

Hodnoty vážené neprůzvučnosti R_w se určují ze souboru vypočítaných hodnot neprůzvučnosti R v třetino-oktávových pásmech 100 až 3150 Hz, neboli na základě kmitočtové analýzy neprůzvučnosti konstrukcí.

K výpočtu neprůzvučnosti jednoduché konstrukce se nejčastěji používá modifikovaná tzv. Watersova metoda [51]. Frekvenční charakteristikou R f(f) této metody je tříkrát lomená čára. Zvukoizolační oblast se rozdělí na max. 4 intervaly vymezené kmitočty f_1 , f_2 , f_C [Hz]. Vypočítané hodnoty R se vynesou do normalizovaného grafu k určení hodnoty vážené neprůzvučnosti R_w .

Provozní metoda

Hodnoty neprůzvučnosti R_w se určují přímo. Závislost $R_w = f(m'')$ vážené neprůzvučnosti jednoduché konstrukce je dvakrát lomená čára. Plošné hmotnosti m'_c , m'_s [kg.m⁻²] jimž odpovídají zalomení grafu jsou mezemi, podle nichž se konstrukce dělí na ohybově poddajné, polotuhé a tuhé. Inverzním postupem k provozní metodě lze konstrukce racionálně navrhovat.

Teorie doc. Čechura

Počtení metoda

Výpočtem se u konstrukcí hodnocených z hlediska vzduchové neprůzvučnosti nejprve určí neprůzvučnosti pro střední kmitočty třetinooktávových pásem zvukoizolační oblasti. Vážená neprůzvučnost se určí podle ČSN EN ISO 717-1.

Grafická metoda

Grafická metoda určení vážené vzduchové neprůzvučnosti [45] je použita např. v programu NEPrůzvučnost k hodnocení dvojitého sádkartonových příček, pro které dává výsledky bližší laboratornímu měření než metoda početní. Pro použití v tomto programu je upravena.

3.2 Kročejová neprůzvučnost

Kročejová neprůzvučnost je vlastnost konstrukce, vzdorovat přenosu kročejového hluku do chráněných místností. Mechanickými impulsy se v konstrukcích budí ohybové vlny, které se šíří různými rychlostmi z místa vzniku a po odrazu na okrajích uvádějí konstrukce do difúzního chvění. Při tom vyzařují do vzduchu v přijímacích místnostech **kročejový hluk**.

K hodnocení kročejové neprůzvučnosti pochůzných konstrukcí slouží **normalizovaná hladina (akustického tlaku) kročejového zvuku** (stručně hladina kročejového zvuku) v kmitočtovém pásmu

$$L_n = L_{p2} + 10 \log \left(\frac{A_2}{A_0} \right) \quad (\text{III.13})$$

kde

L_{p2}	hladina akustického tlaku v kmitočtovém pásmu v poli odražených zvukových vln přijímacího prostoru, změřená při provozu zdroje normalizovaného kročejového hluku na měřené pochůzné konstrukci	[dB]
A_2	celková pohltivost přijímacího prostoru v kmitočtovém pásmu	[m ²]
A_0	referenční hodnota celkové pohltivosti přijímacího prostoru $A_0 = 10 \text{ m}^2$ ve všech kmitočtových pásmech	[m ²]

Představuje hodnotu ze souboru šestnácti hodnot v třetinooktávových pásmech 100 až 3150 Hz. **Vyšší hodnota L_n představuje nižší kročejovou neprůzvučnost.**

Požadavky na kročejovou neprůzvučnost se vyjadřují jednočíslným ukazatelem, **váženou normalizovanou hladinou (akustického tlaku) kročejového zvuku** (stručně váženou hladinou kročejového zvuku) $L_{nw} \approx L'_{nw}$ [dB]. Další jednočíslný ukazatel je **faktor přizpůsobení spektru**.

Vážená hladina kročejového zvuku L_{nw}, L'_{nw} [dB] je váženou hodnotou ze souboru hladin kročejového zvuku L_{nw}, L'_{nw} [dB] v pásmech zvukoizolační oblasti. Hodnoty se srovnávají s referenčními hodnotami hladiny kročejového zvuku směrné křivky podle normy.

Hodnota vážené hladiny kročejového hluku je hodnotou směrné křivky posunuté do hledané polohy v kmitočtovém pásmu 500 Hz.

Metody stanovení kročejové neprůzvučnosti

Technická metoda

Hodnoty vážené hladiny kročejového zvuku L_{nw} se určují ze souboru vypočítaných hodnot hladiny kročejového zvuku v třetinooktávových pásmech 100 až 3150 Hz, neboli na základě kmitočtové analýzy kročejové neprůzvučnosti konstrukcí.

K výpočtu kročejové neprůzvučnosti pro betonové konstrukce s hladkým povrchem lze použít metodu ve smyslu prací M.Heckla a I.L.Vera [6]. Vztahy pro jiné stropy platí pouze přibližně.

Provozní metoda

Hodnoty vážené hladiny kročejové neprůzvučnosti se určují přímo. Inverzním postupem k provozní metodě lze konstrukce racionálně navrhovat.

Hladina kročejového zvuku jednoduché desky (pro jiné stropy je rovnice pouze přibližná)

$$L_{nw} \approx 89,4 - 0,033 m'' \quad \text{(III.14)}$$

kde

m'' plošná hmotnost desky [kg.m⁻²]

Teorie doc. Čechura

Výpočtem se u konstrukcí hodnocených z hlediska kročejové neprůzvučnosti nejprve určí normalizované hladiny kročejového zvuku pro střední kmitočty třetinooktávových pásem zvukoizolační oblasti. Vážená normalizovaná hladina kročejového zvuku se určí podle ČSN EN ISO 717-2.

4 Pomůcky k projektování

Podklady k projektování v oblasti stavební akustiky tvoří komplex pomůcek - katalogových listů, tabulek, nomogramů. Autoři vycházeli vždy z momentálního stavu techniky. Na mysli měli přehledné uspořádání a jednoduché využití při zachování požadované přesnosti.

Pro praktické použití bylo vhodnější využívat výsledky, vzniklé rozsáhlým měřením, shrnuté do tabulek. Nomogramy, vycházející z předchozích pomůcek, vkládají do problematiky další rozměr. Dávají především lepší představy o reálné skutečnosti a snadněji se s nimi pracuje.

4.1 Matematické vztahy a algoritmy

Vztahy a algoritmy [43]-[46], [21], [23], [50] teoreticky odvozené a prověřené pomocí akustických měření, případně empiricky upravené.

V programu NEPrůzvučnost je použita metodika podle doc. Čechury. Nebere v úvahu vliv bočních cest. Teoreticky určená hodnota neprůzvučnosti se proto liší od skutečně naměřené na stavbě.

4.2 Katalogové listy, tabulky

Podklady obsahující číselné veličiny pro hodnocení neprůzvučnosti stavebních konstrukcí jsou rozptýleny do řady firemních materiálů a několika odborných publikací. Jsou často nesourodé, a někdy i obtížně dostupné pro účelové náklady organizací vydávajících je pro svoji potřebu [24], [25]. Zájemce může volně dostupné informace hledat v katalogových listech jednotlivých firem např.[21], [44].

4.3 Nomogramy

Pro zpracování výpočetní technikou lze výhodně použít matematické vztahy, obtížněji rozsáhlé tabulky s výsledky měření. Nomogramy byly proto transformovány na výpočtové vztahy [9] místo vkládání rozsáhlých číselných konstant do programu.

Transformované nomogramy

Řada empiricky vytvořených nomogramů nemá doloženo vyjádření výpočetním vztahem. Vznikly vesměs laboratorním měřením s vynaložením nemalých finančních prostředků. Výsledky byly zaznamenány v rozsáhlém tabulkovém a grafickém vyjádření.

4.4 Použití výpočetní techniky

Návrh a posouzení stavební konstrukce může podstatně usnadnit použití výpočetní techniky. Výhodou je především nižší pravděpodobnost vzniku hrubé numerické chyby a zřetelnost vlivu jednotlivých zásahů na výsledek. Pro zpracování výpočetní technikou se dají použít matematické vztahy i tabulky.

IV ANALÝZA VYZAŘOVÁNÍ ZVUKU Z KONSTRUKCÍ

1 Popis vyzářování zvuku z konstrukce

Akustický výkon vyzářovaný kmitajícím tělesem do okolního vzduchu je vyjádřen dle [6], [33] rovnicí

$$W_{tot} = \rho_0 c S \bar{v}_{ef}^2 \sigma \quad (IV.1)$$

kde

S	je velikost vyzářující plochy	[m ²]
\bar{v}_{ef}^2	průměrná efektivní rychlost kmitání povrchu tělesa	[m ² .s ⁻²]
$\rho_0 c$	vlnový odpor vzduchu	[kg.s.m ⁻²]
σ	činitel vyzářování	[-]

Činitel vyzařování vyjadřuje vztah mezi vyzářeným akustickým výkonem W_{tot} a strukturálními vibracemi povrchu tělesa.

$$\sigma = \frac{W_{tot}}{W_m} \quad (IV.2)$$

kde W_m je mechanický výkon určený vibracemi povrchu.

Činitel vyzařování akustického výkonu kmitající deskou závisí na celé řadě parametrů. Některé jsou známy jen velmi přibližně a často jsou odhadovány na základě experimentálních zkušeností. Na účinnost vyzařování zvuku má především vliv velikost budícího kmitočtu vzhledem ke kritickému kmitočtu desky, místo a způsob buzení. Velikost činitele vyzařování ovlivňují dále rozměry desky, okrajové podmínky a tlumení akustické energie, charakterizované ztrátovým činitelem.

2 Vyzařování zvuku ohybově kmitající deskou

Základy klasické teorie vyzařování zvuku jednoduchou ohybově kmitající příčkou položil L. Cremer [4], [5], [6]. Poprvé popsal koincidenční jev a poukázal na jeho důležitost. Nejnižší koincidenční kmitočet označil kritickou frekvencí a odvodil její závislost na plošné hmotnosti a ohybové tuhosti příčky.

Z klasické teorie vyzařování zvuku vycházejí a navazují práce dalších autorů především v oblasti zvukové izolace. Teorie je podrobně rozpracována v [6]. Vychází z předpokladu nekonečně velké homogenní a izotropní desky, kterou se šíří ohybová vlna.

Koincidenční kmitočet pak podle [2], [6], [32], vyjadřuje rovnice

$$f_k = \frac{c^2}{1,8 c_L' h \sin^2 \vartheta} \quad (IV.3)$$

Nejnižší hodnota koincidenčního kmitočtu se nazývá **kritický kmitočet**. Vypočítá se podle [2], [6], [32], z rovnice

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B'}} = \frac{c^2}{1,8 c_L' h} \quad (IV.4)$$

Při tomto kmitočtu nabývá činitel vyzařování zvuku teoreticky nekonečně velké hodnoty.

3 Rezonance ohybových vln

U každé desky konečných rozměrů existuje velké množství kmitočtů, při nichž dochází k rezonanci. Pro každý rezonanční kmitočet je na povrchu desky jiné uspořádání uzlových čar a kmitajících oblastí. Kmitající oblasti vyzařují zvukové vlny do okolního vzduchu. Intenzita vyzařování závisí na budícím výkonu

a rozložení vibračních obrazců na povrchu desky. Není obecně jednoduchou funkcí rychlosti kmitů desky.

Odvození vzorce pro vlastní kmitočty tenké a na okrajích podepřené homogenní desky vychází z vlnové rovnice pro ohybové vlny. Např. podle [2] lze řešení, splňující podmínky napsat ve tvaru

$$b(x, y) = A \sin \frac{m\pi x}{l_x} \sin \frac{n\pi y}{l_y} \quad (\text{IV.5})$$

kde A představuje maximální výchylku

Vyzařování rezonančními módy desky konečných rozměrů je charakteristicky odlišné od vyzařování z nekonečně velké desky. Výkon vyzařovaný deskou Okonečných rozměrů není v jednoduchém vztahu k rychlosti kmitání desky a v daleko větší míře závisí na rozložení výchylek.

4 Excitace desky zvukovou vlnou

Běžným problémem v technické akustice je vybuzení příčky nebo stěny dopadající zvukovou vlnou šířící se vzduchem a vyzařování zvukové vlny do prostoru na druhé straně stěny. Část energie dopadající zvukové vlny se odráží od desky zpět do téhož poloprostoru. Další část přivede desku do kmitavého pohybu. Nucenými ohybovými kmity vyzařuje deska zvukovou energii do okolí na druhé straně desky.

Za předpokladu stejného prostředí na obou stranách desky se šíří vyzařovaná zvuková vlna ve stejném směru jako dopadající vlna. Celkový akustický tlak, působící na desku, obsahuje příspěvky od dopadajících a odražených vln na jedné straně desky a příspěvek od vyzařované vlny na druhé straně desky.

$$\frac{p_t}{p_i} = \frac{1}{1 + \frac{Z_r^* \cos \vartheta}{2\rho_0 c}} \quad (\text{IV.6})$$

Poměr akustického tlaku přeneseného příčkou a akustického tlaku dopadajícího na příčku závisí pro daný úhel dopadu zvukové vlny na poměru vstupní impedance desky a vlnového odporu okolního prostředí.

V MODELY STANOVENÍ NEPRŮZVUČNOSTI

Doposud neexistuje všeobecně platný výpočtový model, pomocí kterého by bylo možné dostatečně přesně teoreticky stanovit hodnoty zvukově izolačních parametrů dělicích konstrukcí na základě fyzikálních vlastností jejich prvků, aniž by bylo nutné provádět akustická měření ve speciálních laboratořích. Teoreticky se nejčastěji počítá kmitočtová závislost vzduchové neprůzvučnosti pomocí vzorových řešení pro některé speciální případy nebo se používají empirické vztahy nebo již dříve naměřené hodnoty uváděné v katalogích. Často se zvukově izolační vlastnosti

ohybově měkkých jednoduchých příček (f_c nad zvukově izolační oblastí) hodnotí pomocí hmotnostního zákona na základě znalosti plošné hmotnosti příčky. Výpočet vzduchové neprůzvučnosti v závislosti na kmitočtu pomocí hmotnostního zákona nedává dostatečně přesnou predikci zvukově izolačních vlastností. Zákon nezohledňuje vliv dalších materiálních a strukturálních parametrů příčky na její zvukově izolační vlastnosti. Jsou to např. konečné rozměry, tvar a způsob uchycení příčky v základní konstrukci, velikost kritického kmitočtu a tlumení ohybových kmitů příčky způsobené ztrátami akustické energie uvnitř materiálu a ztrátami na obvodu.

Potřeba praxe sjednotit kvantifikaci vazeb mezi akustickými vlastnostmi konstrukčních prvků a akustickými vlastnostmi staveb v rámci Evropské unie vyžaduje všeobecně použitelný model výpočtu kmitočtové závislosti vzduchové neprůzvučnosti v kmitočtové oblasti zahrnující celé zvukově izolační pásmo.

Na zpracování tohoto modelu se podílejí přední světoví odborníci z oblasti stavební akustiky. Hledají možnosti zobecnění výpočtových vztahů pro různé podmínky. Základem jsou práce, jejichž autoři navazují jak na klasickou teorii vyzařování zvuku podloženou pracemi L.Cremera, tak na statistickou teorii zpracovanou G.Maidanikem. V doposud publikovaných pracích je provedena analýza vyzařování zvuku nucenými i rezonančními ohybovými kmity jednoduché příčky ve všech kmitočtových oblastech tj. $f < f_c$, $f \sim f_c$, $f > f_c$. Předpokládá se, že příčka konečných rozměrů je zabudována do konstrukce, která brání odvodu zvukové energie bočními cestami. Modely se liší přístupem k aproximacím nuceného a rezonančního vyzařování zvuku s ohledem na parametry příčky a okrajové podmínky.

1 Predikční model vypracovaný Sewellem

Sewell vycházel z klasické teorie vyzařování zvuku a odvodil výraz pro přenos zvuku deskou konečných rozměrů, zprostředkovaný vynucenými ohybovými kmity. Předpokládá, že na příčku dopadá zvuk o nižším kmitočtu než je kritický kmitočet příčky ($f < f_c$), a že zvukové pole je dokonale difúzní. Zavádí tzv. „tvarový faktor“, závisející na kmitočtu dopadající zvukové vlny, ploše a rozměrech kmitající desky. Při hledání vztahu pro výpočet činitele průzvučnosti používá maticového vyjádření.

2 Predikční model vypracovaný Jossem a Lamurem

Teorie vzduchové neprůzvučnosti odvozená Jossem a Lamurem je založena na studiu vzájemné vazby módů vlastních vibrací příčky s módy dvou pravoúhlých místností, které příčka odděluje. Boční únikové cesty jsou zanedbány. Vztahy mezi uvažovanými módy jsou zpracovány pomocí grafického znázornění vlastních módů místností a příčky.

Josse a Lamure sledují vybuzení nucených a rezonančních kmitů desky a jejich vyzařování odděleně pro kmitočtové oblasti $f < f_c$, $f > f_c$, $f = f_c$.

Vyhodnocení predikčních modelů

Soulad Sewellova modelu s experimentálními výsledky potvrzuje, že obecný model je velmi vhodný pro ohybově měkké konstrukce. Teoretickým výpočtem neprůzvučnosti jsou mnohem přesněji než podle hmotnostního zákona zhodnoceny zvukově izolační vlastnosti v podkoincidenční oblasti. V modelu je zanedbáno v oblasti pod kritickým kmitočtem vyzařování rezonančními módy. To je možné pro prvky z materiálu s vysokým ztrátovým činitelem. Ostatní modely přibližně souhlasí pouze ve střední kmitočtové oblasti. Rozdíly v oblasti nízkých kmitočtů jsou zřejmě způsobeny nesplněním předpokladu vysoké četnosti vlastních módů místnosti i prvku.

VI MODELY NEPRŮZVUČNOSTI EN-12354

1 Porovnání termínů

ČSN EN 12354-1 porovnává dříve používané termíny a uvádí nové názvosloví podle ISO, [52].

Anglicky	Značka	Český ekvivalent	Dříve používaný termín
Sound reduction index	R	Neprůzvučnost	Stupeň neprůzvučnosti, stupeň vzduchové neprůzvučnosti
Weighted sound reduction index	R_w	Vážená neprůzvučnost	Vážený stupeň neprůzvučnosti, index vzduchové neprůzvučnosti
Apparent sound reduction index	R'	Stavební neprůzvučnost	Stupeň zdánlivé neprůzvučnosti, stupeň stavební neprůzvučnosti
Weighted apparent sound reduction index	R'_w	Vážená stavební neprůzvučnost	Index stavební vzduchové neprůzvučnosti, index zdánlivé vzduchové neprůzvučnosti
Level difference	D	Rozdíl hladin	Stupeň zvukové izolace
Weighted level difference	D_w	Vážený rozdíl hladin	Index rozdílu hladin
Normalized level difference	D_n	Normovaný rozdíl hladin	Stupeň zvukové izolace, normalizovaný rozdíl hladin
Standardized level difference	D_{nT}	Normovaný rozdíl hladin	Stupeň zvukové normalizované izolace, normalizovaný stupeň zvukové izolace, stupeň standardizované zvukové izolace

Weighted normalized level difference	$D_{n,w}$	Vážený normovaný rozdíl hladin	Index normalizovaného rozdílu hladin, index zvukové izolace
Weighted standardized level difference	$D_{nT,w}$	Vážený normovaný rozdíl hladin	Index standardizované zvukové izolace
Impact sound pressure level	L	Hladina akustického tlaku kročejového zvuku	Hladina kročejového zvuku
Normalized impact sound pressure level	L_n	Normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku	Hladina normalizovaného kročejového hluku
Standardized impact sound pressure level	L_{nT}	Normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku	Hladina normalizovaného kročejového zvuku, hladina standardizovaného kročejového hluku
Weighted normalized impact sound pressure level	$L_{n,w}$	Vážená normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku	Index hladiny normalizovaného kročejového hluku
Source room		Místnost zdroje zvuku	Vysílací místnost
Receiving room		Místnost příjmu zvuku	Přijímací místnost

Tab. VI.1 Názvosloví - porovnání

2 Vzduchová neprůzvučnost

2.1 Výpočetní model

Akustický výkon v místnosti příjmu je způsoben zvukem vyzařovaným dělicími prvky a bočními prvky v místnosti a přímým a nepřímým přenosem zvuku vzduchem.

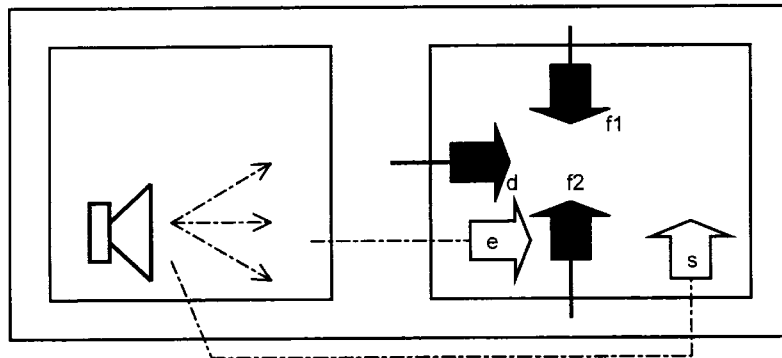
$$R = -10 \log \tau'$$

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s$$

kde

- d,f,e,s indexy odpovídající příspěvkům podle obr. VI.1 [-]
 τ' poměr celkového vyzářeného akustického výkonu v místnosti příjmu k akustickému výkonu dopadajícímu na [-]

	společnou část dělicího prvku	
τ_d	poměr akustického výkonu-cesty přenosu D_d a F_d	[-]
τ_f	poměr akustického výkonu-cesty přenosu F_f a D_f	[-]
τ_e	poměr akustického výkonu-přímý přenos vzduchem	[-]
τ_s	poměr akustického výkonu-nepřímý přenos vzduchem	[-]
n	počet bočních prvků	[-]
m	počet prvků s nepřímým přenosem zvuku	[-]
k	počet systémů s nepřímým přenosem zvuku	[-]



Obr. VI.1 Příspěvky k celkovému přenosu zvuku

Zvuk vyzařovaný stavebním prvkem lze považovat za součet přenosů zvuku konstrukcí několika cestami. Každou cestu lze popsat prvkem i v místnosti zdroje a vyzařujícím prvkem j v místnosti příjmu.

Hlavní předpoklady jsou nezávislost popsanych cest a statistické chování zvukových a vibračních polí.

Podrobný model

Počítá vlastnosti budov v kmitočtových pásmech. Z těchto výsledků lze odvodit jednočíslné hodnocení podle EN ISO 717-1. Podrobný model se zabývá přenosem konstrukcí, přímým a nepřímým přenosem vzduchem. Cesty lze považovat za nezávislé a výpočty mohou být oddělené.

Zjednodušený model

Počítá vlastnosti budov jako jednočíslné hodnocení, založené na jednočíslných hodnoceních vlastností příslušných prvků. Zahrnuje pouze přenosem konstrukcí.

2.2 Omezení

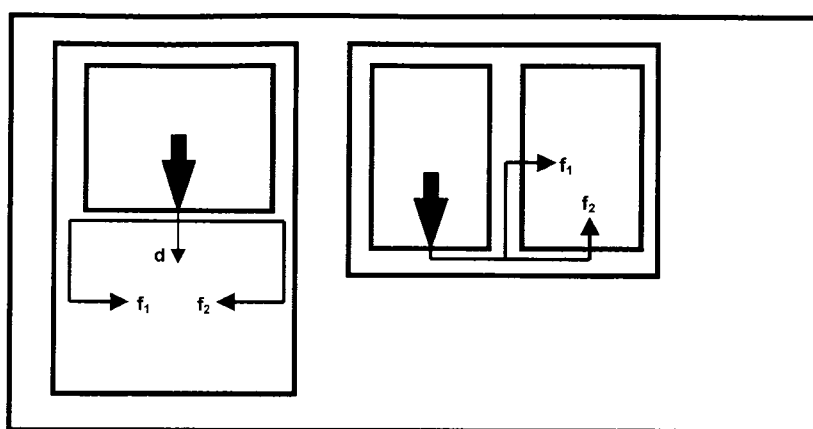
Model použitelný pro kombinace prvků, pro něž lze určit stykovou neprůzvučnost vibrací. Určen pro stavební prvky mající přibližně stejné vyzařovací vlastnosti na obě strany. Model popisuje pouze přenos mezi přilehlými místnostmi. Příspěvek

sekundárních cest přenosu zahrnujících více než jeden styk je zanedbán. Mohou se stát významnými při aplikaci přídavných vrstev na velkou část prvku.

3 Kročejová neprůzvučnost

3.1 Výpočetní model

Akustický výkon vyzařovaný do místnosti příjmu zvuku je způsoben zvukem vyzařovaným každým stavebním prvkem v této místnosti. Vyzařovaný zvuk je způsoben zvukem přeneseným do tohoto prvku nárazem na stavební prvek v místnosti zdroje zvuku. Předpokládá se, že přenos každou z cest lze považovat za nezávislý a že se zvuková a vibrační pole chovají statisticky. Hladinu akustického tlaku kročejového hluku L'_n lze získat součtem energií přenášených jednotlivými cestami



Obr. VI.2 Určení cest přenosu zvuku mezi dvěma místnostmi

$$L'_n = 10 \lg \left(10^{L_{n,d}/10} + \sum_{j=1}^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \quad (\text{VI.7})$$

kde

$L_{n,d}$ normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku [dB]
vyvolaná přímým přenosem

$L_{n,ij}$ normovaná hladina akustického tlaku kročejového zvuku [dB]
vyvolaná přenosem bočními cestami

n počet stavebních prvků [-]

d přímý přenos kročejového zvuku

f přenos kročejového zvuku bočními cestami

3.2 Omezení

Model použitelný pro kombinace prvků, pro něž lze určit přenos stykem. Prvek přibližně stejné vyzařovací charakteristiky na obě strany. Příspěvek sekundárních cest přenosu pro více než jeden styk je zanedbán. Snížení hladiny akustického tlaku kročejového zvuku změřený na hmotné podlaze nelze použít pro lehké složené podlahové konstrukce.

Zjednodušený model je použitelný pro homogenní stavební konstrukce s plovoucími podlahami. Použitelný pro místnosti nad sebou v bytech obvyklých rozměrů.

VII VÝSLEDKY PRÁCE

1 Volba vhodného modelu

Teoretická metodika [6], [7] nerespektuje vliv vedlejších cest přenosu zvuku. Proto jsou zvukově-izolační vlastnosti dělicího prvku naměřené v laboratoři vyšší než hodnoty stavební. Na výsledcích z programu NEPrůzvučnost a dalších se jasně prokázalo, že tento vliv nelze v praktických případech zanedbat [8].

Metodika popsaná v [23] není dosud použita v žádném známém programu. Zpracované tabulky a nomogramy jsou prakticky ověřeny řadou akustických měření. Metodika vychází z dlouholeté praxe a zohledňuje vliv vedlejších cest na stavební neprůzvučnost.

Česká republika se členstvím v Evropském výboru pro normalizaci (CEN) zavázala k přebírání společných evropských norem EN. V našem případě jde zejména o výpočtové metody a normy EN 12354. Práce na programu podle metodiky [23] byly přerušeny a zohledněna metodika EN 12354

2 Stávající výpočetní programy

V průběhu práce byly nejprve hledány existující programy k usnadnění výpočtů. Použity byly všechny veřejně dostupné zdroje – zejména WWW stránky autorů nebo výrobců.

NEPrůzvučnost98 pro Windows

Autor: Svoboda software ČR, verze: 1.0 z roku 1998, [8]

Dr. Ing. Zbyněk Svoboda laskavě zapůjčil v roce 1998 k bezplatnému otestování nový program **NEPrůzvučnost98** (Nep98) k teoretickému výpočtu vzduchové a kročejové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí. Nep98 počítá maximálně 5vrstvou konstrukci podle teorie [7]. Provádí výpočet stupňů a indexů vzduchové neprůzvučnosti. Stupňů a indexů kročejového hluku pro jednoduché, dvojité, složené konstrukce, stropy s plovoucí nebo povlakovou krytinou. Obsahuje vyhodnocení konstrukce podle ČSN 730532.

Hodnocení

Jednoduché konstrukce program počítá přesně. Dvojitě konstrukce vykazují průměrně odchylku 2 až 3 dB. Výpočet plovoucích podlah nelze prakticky použít. Na kontrolních příkladech byla zjištěna maximální odchylka 20 dB při porovnání se skutečně naměřenými hodnotami. Nelze spolehlivě předvídat kladnou nebo zápornou hodnotu odchylky výsledku. Tento poznatek vyplývá z metodiky výpočtu. Autor programu správně uvádí, že Nep98 počítá teoretickou neprůzvučnost, nikoli stavební.

NEPrůzvučnost2001 pro Windows

Autor: Svoboda software ČR, verze: 2001.01, distributor: K-CAD s.r.o.

Stavební fyzika pro Windows byla průběžně vyvíjena a aktualizována [39], [40]. V lednu 2002 se objevila na WWW stránce distributora kompletní instalace prvního update programu NEPrůzvučnost2001.01. Software pracuje na základě norem EU a je podle autora plně v souladu s ČSN.

Hodnocení

Program pro **TEORETICKÝ** výpočet vzduchové a kročejové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí. Hodnocení vzduchové neprůzvučnosti početní a grafickou metodou. Hodnocení kročejové neprůzvučnosti podle ČSN EN ISO 717-2.

ACOUBAT for Windows

Autor: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Francie, verze: 2.1 z roku 2000

Výpočet vzduchové a kročejové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí, detailní model podle DIN EN 12354 ve 1/3 oktávách. Vestavěná databanka materiálů pomáhá snadno určit akusticky optimální řešení. Uživatelsky přívětivé rozhraní umožňuje práci s programem i běžným uživatelům. Specialisté ocení nástroje pro možnost analýzy podle přenosových cest a kmitočtových pásem k optimalizaci řešení.

BASTIAN® for Windows

Autor: DataKustik München & Grünzweig und Hartmann Ludwigshafen, verze 1.0 + 1.1 z roku 1998, [17]

K výpočtu vzduchové a kročejové neprůzvučnosti stavebních konstrukcí program používá detailní a zjednodušený model podle DIN EN 12354, část 1, 2 a 3. Bastian® (The Building Acoustic Planning System) firem DataKustik & G+H nebylo možné testovat v plné verzi pro jeho nedostupnost.

Plná verze programu

Kompletní databanka obsahující 800 konkrétních hodnot stavebních konstrukcí zahraniční provenience. Možnost přidávat nové konstrukce. Uvedeny hodnoty R_w v 1/3 oktávy. Uložení a načtení komplexního zadání konstrukce, práce s několika zadáními současně. Program počítá a zobrazuje graficky výsledky. Tisk výsledků na libovolné v systému instalované tiskárně. Přiložen HW klíč na paralelní port počítače.

Light verze programu

Nelze počítat v 1/3 oktávy, databanka konstrukcí a ostatní funkce jsou totožné.

Hodnocení

Vhodné pro výpočty konstrukcí podle detailního a zjednodušeného modelu metodika DIN EN 12354, část 1,2 a 3.

CADNA for Windows

Autor: DataKustik München & Grünzweig und Hartmann, verze z roku 2001

Aktuálnost

Program počítá dle metodiky EN, v České Republice není zatím schválen k použití. Obsahuje interface k přímému načítání dat z analyzátorů Rion, Norsonic. Použita progresivní modulární konstrukce programu. Software analyzován s předpokladem budoucího propojení s programem BASTIAN od stejné firmy DataKustik.

Firma DataKustik GmbH München vytvořila programový systém **CADNA** (Computer Aided Noise Abatement). Slouží k akustickým výpočtům hlukového zatížení v exteriéru i interiéru. Obsahuje program **CADNA/A** k určení hladiny venkovního hluku a **CADNA/SAK** k výpočtům v prostorové akustice a optimalizaci pohltivosti obkladů. Systémem je možno určit zvukový útlum podle teorie Kuttruff and Jovicic, hladinu zvuku, dobu dozvuku a další akustické parametry.

Hodnocení

Podle dostupných informací se systém využívá s úspěchem u akustických firem v Německu. V České Republice není oficiálně schválen, i když počítá dle metodiky EN. Systém CADNA nebylo možné bohužel prakticky otestovat.

INSUL ®

Autor: **Marshall Day Acoustics**, Auckland - New Zealand, verze 4.8 z roku 2001
Distributor: Navcon Engineering Network

INSUL (Sound Insulation Prediction Software) - predikce zvukové izolace zdí, stěn, stropů a oken. Určení vážené neprůzvučnosti R_w . Použita je teorie podle hmotnostního zákona, koincidence, Sharp, Cremer a ostatní.

Hodnocení

Použitá teorie zásadně omezuje přesnost výpočtu.

BASTIK

Autor: GAF Meßsysteme Software

BASTIK je určen pro stavební fyziku a akustiku k vyhodnocování měření vzduchové a kročejové neprůzvučnosti podle norem DIN a ISO. Obsahuje napojení měřicích přístrojů s přímým přenosem dat do programu.

Firma zpracovává nový softwarový modul k systému BASTIK. Slouží pro vyhodnocení akustických měření bočního přenosu podle metodiky DIN EN 12354-1 a k určení akustických mostů při kombinacích stavebních prvků. Aktualizovaný software v souladu s EN bude nabízen komerčně na domácím trhu a v Evropě.

Schalldämmung nach EN 12354

Autor: Fraunhofer-Institut für Bauphysik, verze 2001

Název: Schalldämmung nach EN12354 - Luft- und Trittschallübertragung

Program k určení vzduchové a kročejové neprůzvučnosti konstrukcí. Použit je detailní model podle skupiny č.2 Technické komise 126 CEN – norma EN 12354, část 1 a 2, verze N111 a N112. Geometrie zadání je omezena na dvě pravoúhlé místnosti.

Hodnocení

Nový softwarový modul k systému BASTIK nebyl k dispozici k otestování.

JAVA - Luftschalldämmung nach prEN 12354-1

Autor: Fachhochschule Stuttgart-Hochschule für Technik (HfT); Studiengang Bauphysik, Stuttgart

Název: JAVA - Berechnung der Luftschalldämmung zwischen Räumen (vereinfachtes Modell)

JAVA skript se vyvolá stiskem tlačítka START na stránce v prohlížeči. Další stránka „Simple_Mod_Calc.htm“ obsahuje příkazy programu. Uživatel interaktivně vyplní vstupní údaje.

Hodnocení

Přesnost dána zjednodušeným modelem podle prEN 12354-1. Homogenní a masivní konstrukce, $m'' > 150 \text{ kg.m}^{-2}$, nebere ohled na elastické mezivrstvy,

3 Vlastní realizace programu

Volba operačního systému

Použitelnost programu

Pro použitelnost programu na většině počítačů je třeba pracovat s rozšířeným a oblíbeným operačním systémem. Tuto podmínku dnes splňuje firma Microsoft a počítače standardu IBM PC. Na trhu nejpoužívanějších počítačů kategorie PC má Microsoft prakticky dominantní postavení. Většina počítačů používá některou verzi operačního systému této firmy v různé jazykové mutaci.

Přenositelnost programu

Pro přenositelnost programu na libovolnou verzi operačního systému Microsoft prakticky vyhovuje použití vyššího programovacího jazyka a vývojového prostředí firmy pro 16 nebo 32 bitovou verzi kódu. Je třeba se přizpůsobit daným omezením konkrétních verzí a nepoužívat funkce nevyskytující se ve starších verzích.

Volba programovacího jazyka

Program neobsahuje výpočetně náročné iterace. Na závadu není použití vyššího programovacího jazyka proti rychlejšímu strojovému kódu.

Vývojové prostředí MS Visual Basic umožňuje vyvinout, ladit a distribuovat program pro všechny verze MS Windows. Navíc umožňuje snadnější propojení s měřicími přístroji ke kterým jsou dodávány knihovny a obslužné programy ve Visual Basicu.

Systémové požadavky

Počítač kompatibilní s IBM PC s českou verzí systému MS Windows. Místo na disku pro samotný program bez uživatelských dat přibližně 20 MB. Disketa 3.5“ nebo mechanika CD-ROM podle druhu instalačního média.

Oblast a podmínky využití

Omezující podmínky jsou dány v zásadě zvolenou metodikou. Program kontroluje smysl zadaných parametrů formálně. Nelze vybočit mimo prověřenou oblast danou metodikou.

Vstupní a výstupní údaje

Uživatel vkládá skladbu konstrukce a geometrické údaje. Materiálové údaje se přebírají z databanky vlastností. Výstupem jsou požadované hodnoty neprůzvučnosti.

Manuál

Jednoduchá interaktivní nápověda zobrazující se po stisku klávesy F1 nebo volbě *Nápověda* v uživatelském menu. Tištěná instalační a uživatelská příručka.

Schéma funkce programu

Algoritmy a vztahy

Použité vztahy jsou v souladu s platnou EN 12354-1,2 [52], [53].

Databanka

Pro dosažení kompatibility s ostatními aplikacemi použil autor databázi MS Jet. Datový soubor obsahuje údaje o konstrukcích a indexy pro vyhledávání a třídění záznamů. Struktura dat je obdobná jako u jediného českého programu Nep2001.

Uživatel má možnost používat pro oba programy totožnou databanku se svými doplněnými údaji o konstrukcích.

Vstup zadání

Uživatel vkládá interaktivně informace o zadání. Formát uložení zadání je zvolen tak, aby mohl být přenesen v budoucnu i na jiné operační systémy než MS Windows.

Výstup programu

Po provedení výpočtů je možno uložit zadání i výstup samostatně do souboru nebo vytisknout na libovolné instalované tiskárně. Grafické výstupy je možné prohlížet, nejsou ale zatím obsaženy v textovém výstupu.

4 Testování funkce

Ukázalo se, že je třeba omezit možnost zadání nesprávných vstupních hodnot do dílčích vztahů. Při extrémní hodnotě zadaného vstupního parametru konvergují výstupní parametry k nepřesným nebo fyzikálně nepřípustným hodnotám. Vztahy vedoucí k dělení nulou jsou programově ošetřeny.

Numerické příklady

Pro kontrolu výpočtu bylo použito příkladu z přílohy normy ČSN EN 12354 a hodnot získaných akustickým měřením skutečné konstrukce s vlivem bočních cest.

Podklady poskytlo CSI – Zlín, RNDr. Josef Vrána, CSc. Akustických měření se zúčastnilo 12 laboratoří. Jedna z laboratoří nebyla do výsledků měření zahrnuta pro zřetelnou chybnost naměřených hodnot

Výsledky

Vzduchová a kročejová neprůzvučnost stavebních konstrukcí určená pomocí nového programu se přibližuje s předpokládanou přesností k hodnotám stavební neprůzvučnosti dělicího prvku. Chyba výpočtu je v mezích 2-3 dB daných zvolenou metodikou. Na přesnost má zásadní vliv určení stykové neprůzvučnosti vibrací K_{ij} .

5 Dokumentace programu

Provedení příruček je v podobě jakou dostává konečný uživatel programu. Náповěda po stisku klávesy F1.

VIII ZHODNOCENÍ

Výsledek práce

Program implementuje pravidla a algoritmy uvedené v [52], [53]. Databanka obsahuje základní konstrukce a je modifikovatelná. Obsah databanky je obecně problém - vzniká postupným doplňováním údajů v průběhu práce. Výstupem programu je protokol o výpočtu a grafické vyjádření průběh neprůzvučnosti. Uživatelské rozhraní je standardní podle doporučení firmy Microsoft.

První informace o připravované normě EN-12354 se objevovaly od roku 1993 jako zahraniční pracovní verze. Návrh EN 12354 byl v ČR k dispozici v roce 2000. Vlastní norma v dubnu 2001. Na vývoj a odladění programu nebylo k dispozici velké množství času. Konkurenční produkty renomovaných firem jsou ve vývoji průběžně několik roků. Práce na projektu obvykle zastřešují velké a renomované firmy. Negativem je, že se program nepodařilo dokončit jako první. V průběhu práce vznikly v zahraničí programy Acoubat a Bastian, které jsou však pro běžné uživatele cenově nedostupné.

Nové poznatky a analýza

Podařilo se vytvořit ucelený přehled software k výpočtu vzduchové a kročejové neprůzvučnosti na trhu v České republice a v zahraničí.

Ověřil se prakticky na různých programech a metodikách předpoklad, že přesnost programů neuvažujících s vlivem bočních cest je velmi malá a prakticky neupotřebitelná pro běžnou praxi.

Zmapovala se situace používání a zavádění metodiky podle EN.

LITERATURA

- [1] Beranek, L.L. Snižování hluku, 1.vyd., Praha, SNTL, 1965, 744 s.
- [2] Beranek, L.L. Noise and Vibration Control, New York: McGraw Hill Book Company, 1971, 650 p., ISBN 07-004841-X.
- [3] Blessing, Steffen, Späh, M., Fischer, H.M., Schneider, M. Verifizierung des Rechenverfahrens für die Luftschalldämmung nach EN 12354-1 für den Massivbau; Teil 2: erreichbare Genauigkeit, Stuttgart, Fachhochschule Stuttgart-Hochschule für Technik Fachbereich Bauphysik, 2001.
- [4] Cremer, L. Theorie der Schalldämmung dünner Wände bei schrägem Einfall (Theorie zvukové izolace tenkých stěn při šikmém dopadu), Akust. Zeitschrift 7, 1942, s.81-104.

- [5] Cremer, L. Theorie der Entstehung des Klopfeschalls (Teorie vzniku kročejového zvuku), Frequenz 1, 1948, s.61-71.
- [6] Cremer, L., Heckl, M., E.E. Ungar Structure borne sound, (Zvuk šířený konstrukcí), 2nd edition, Berlin, New York, Springer-Verlag, 1988, 573p., ISBN 0-387-18241-1.
- [7] Čechura, J. Stavební fyzika 10, Akustika stavebních konstrukcí, 1.vydání, ČVUT Praha, 1997, 1999.
- [8] Číhal, R. Neprůzvučnost98 pro Windows, Seminární práce výpočetní technika, Brno, VUT FA, 1998.
- [9] Číhal, R. Transformace nomogramů na výpočtové vztahy v akustice, Sborník IV. vědecké konference doktorandů, Brno, VUT FA, 2000.
- [10] Číhal, R. Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi podle ČSN EN 12354-1, Sborník V. vědecké konference doktorandů, Brno, VUT FA, 2001.
- [11] Nařízení vlády č.81/1999 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky, 1999.
- [12] Vyhláška Ministerstva zdravotnictví ČSR O ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací č.13 / 1977 Sb., Svazek 37 - Hygienické předpisy.
- [13] Vyhláška ministerstva pro místní rozvoj č. 137/1998 Sb., o obecných technických požadavcích na výstavbu.
- [14] Day, B.F., Ford, R.D., Lord, P. Building acoustics, Elsevier Publishing Company Ltd, 1969, p.120.
- [15] Směrnice č. 89/106/EHS pro stavební výrobky.
- [16] Gerretsen, E. European developments in prediction models for building acoustics, (Evropské výzkumy predikčních modelů pro stavební akustiku), Acta Acustica, no.2, 1994, p.205-214.
- [17] G+H ISOVER, BASTIAN - Schallschutzberechnungsprogramm, 1998.
- [18] Havránek, J. Hluk a zdraví, 1.vyd., Praha, Avicenum, 1990, 278 s., ISBN 80-201-0020-2.
- [19] Heckel, M., Rathe, E.J. Relationship between the transmission loss and the impact noise insulation of floor structures (Vztah mezi neprůzvučností a kročejovou zvukovou izolací stropních konstrukcí), JASA, The Journal of The Acoustical Society of America, Vol. 35, 1963, p.1825-1830.
- [20] Heckel, M. Die Schalldämmung von homogenen Einfachen endlicher Fläche, (Zvuková izolace homogenních jednoduchých stěn konečné plochy), Acustica 20, 1968, s.98-108.
- [21] Hoffman, R., Vrána, J., Sklenář, M. Zásady pro navrhování a posuzování konstrukcí a prostorů bytových a občanských staveb – stavební akustika, Díl 2: Tabulky fyzikálních vlastností, katalogové listy konstrukcí, VÚPS Praha, pracoviště Gottwaldov, 1981.
- [22] Josse, R., Lamure, J. Transmission du son par une paroi simple, (Přenos zvuku jednoduchou příčkou), Acustica Vol.14, 1964, Vol.14, p.266-280.

- [23] Zásady pro navrhování a posuzování konstrukcí a prostorů bytových a občanských staveb, Díl 1, Kriteria. Principy navrhování. Výpočtové metody., 1.vyd., Praha: VÚPS Praha, 1972, 34/81, s. 126-226.
- [24] Zásady pro navrhování a posuzování konstrukcí a prostorů bytových a občanských staveb, Díl 2, Tabulky fyzikálních vlastností., 1.vyd., Praha: VÚPS Praha, 1972, 35/81, s. 3-82.
- [25] Ljunggren, S. Airborne sound insulation of thin walls, (Vzduchová zvuková izolace tenkých stěn), JASA, The Journal of The Acoustical Society of America, vol.89, no 5., 1991, p.2324-2337.
- [26] Ljunggren, S. Airborne sound insulation of thick walls, (Vzduchová zvuková izolace silných stěn), JASA, The Journal of The Acoustical Society of America, vol.89, no 5., 1991, p.2338-2345.
- [27] Ljunggren, S. Mechanical Excitation of Plates at Low Frequencies: A Discussion on the Use of the Bending Wave Equation, Acta Acoustica, 1995, no. 3, p.531-538.
- [28] Maidanik, G. Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustics fields, (Odezva žebrovaných panelů na dozvuková akustická pole), JASA, The Journal of the Acoustical Society of America, vol.34, no.6, 1962, p.809-826.
- [29] Mechel, F.P. Schall-Langsdämmung von Unterdecken, (Zvuková izolace podlahových desek), WKSB, Zeitschrift für Wärme-Kälte-Schall- und Brandschutz, special issue, Aug.1980, s.16-29.
- [30] Mouric, K. Stavební akustika, 1.vyd., ČVUT Praha, 1969, 128 s.
- [31] Mrlík, F. Stavební tepelná technika a stavební akustika, 3.vyd., Brno VUT, 1992, 172s.
- [32] Němec, J. Ransdorf, J. Šnédrle, M. Hluk a jeho snižování v technické praxi, 1.vyd. Praha, SNTL, 1970, 340 s., ISBN 04-222-70.
- [33] Nový, R. Hluk a ořesy, 3.vyd., ČVUT Praha, 1993, 190 s.
- [34] Preiss, B. Überprüfung der Berechnung der Trittschallübertragung durch das Rechenmodell nach EN 12354-2, HfT Stuttgart; Studiengang Bauphysik, Diplomarbeitsthema: Akustik / Schallimmissionsschutz, 2000.
- [35] Ransdorf, J. Hluk a akustika prostředí. Základní zásady pro snižování hluku. ČSVTS, 1988, 58 s., Komitét pro životní prostředí, ISBN 06-102-88.
- [36] Ryndová, A. Akustické vlastnosti polymerních odpadových materiálů s ohledem na možnosti jejich využití ke snižování hluku, Disertační práce, PhD Thesis, VUT FS, Brno, 1999.
- [37] Sewell, E.C. Transmission of reverberant sound through a single-leaf partition surrounded by an infinite rigid baffle, Journal of Sound and Vibration, 1970, no.12, p.21-32.
- [38] Späh, M., et al. Verifizierung des Rechenverfahrens für die Luftschalldämmung nach EN 12354-1 für den Massivbau, Teil 1: Eingangsgrößen, Hamburg, Vortrag DAGA 2001.

- [39] Svoboda, Z. Nové programy pro stavební fyziku-již podle evropských norem, In: Stavba. 2000, roč. 7, č. 5, s. 82-83. ČVUT: Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb 2000, ISSN 1210-9568.
- [40] Svoboda, Z. Program pro stavební fyziku, In: Stavitel. 1999, roč. 7, č. 2, s. 34-35. ČVUT: Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb 1999, ISSN 1210-4825.
- [41] Svoboda software, Svoboda, Z., Pelech, M. Akustika stavebních konstrukcí, Neprůzvučnost 98 pro Windows, Kladno, 1998.
- [42] Vaňková, M., Čurda, Z., Doložilek, M., Ryndová, A. Vzduchová neprůzvučnost tenkých desek různých rozměrů, 50. akustický seminář ČsAS, 1. vyd., Kouty u Ledče nad Sázavou, ed. středisko ČVUT Praha, 1995, s.244-249.
- [43] Vaverka, J. a kol. Akustika: Souhrn kritériálních požadavků a výpočtových metod v oboru stavební a prostorové akustiky, 1.vyd., Brno, VUT FA, 1996, s.156.
- [44] Vaverka, J., Chybík, J. Akustika staveb: Souhrn materiálů a jejich fyzikálních vlastností pro aplikace v prostorové akustice, Pracovní pomůcka pro návrh a posouzení konstrukcí z hlediska stavební a prostorové akustiky-katalogové listy materiálů, 1.vyd., Brno, VUT FA, 1996, s.200.
- [45] Vaverka, J., Kozel, V., Ládyš, L., Liberko, M., Chybík, J. Stavební fyzika 1, urbanistická, stavební a prostorová akustika, Brno, VUT, 1998.
- [46] Vaverka, J. Stavební fyzika 1, akustika, Brno, VUT IUM.
- [47] Vorländer, M., Thaden, R. Auralisation of airborne sound insulation in buildings, Acta Acustica, Vol. 86, p.70-76, 2000.
- [48] Vrána, J. Výsledky měření Centrum stavebního inženýrství, a.s. Praha, pracoviště CSI Zlín.
- [49] Vrána, J. Zlepšování užitných vlastností budov metodami stavební fyziky, Výzkumná zpráva, Zlín, VÚPS Praha, 1989.
- [50] Vrána, J. Výpočet neprůzvučnosti stropních konstrukcí. Sborník textů pro kurzy ČSVTS, Praha, SNTL, 1990.
- [51] Watters, B.G. The transmission loss of some masonry walls, JASA, J. Acoust. Soc. Am., July 1959, p.898-911.

ČSN

- [52] ČSN EN 12354-1 (730512) Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 1: Vzduchová neprůzvučnost mezi místnostmi, 2001.
- [53] ČSN EN 12354-2 (730512) Stavební akustika – Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebních prvků – Část 2: Kročejová neprůzvučnost mezi místnostmi, 2001.

RESUME

Pojednání ukazuje současný stav problematiky vzduchové a kročejové neprůzvučnosti. Uvádí základní charakteristiky zvukových vln. Popisuje negativní vliv hluku na životní prostředí a možnosti jeho snižování. Definuje zvukově izolační, pohltivé a tlumící vlastnosti materiálů. Rozebírá vhodné pomůcky k projektování ve stavební akustice. Teoreticky analyzuje vyzařování zvuku z konstrukcí na základě klasické teorie. Vyzařování ohybově kmitající deskou, rezonanci ohybových vln a excitaci desky zvukovou vlnou. Popisuje používané predikční modely neprůzvučnosti vypracované Sewellem, Jossem a Lamurem.

Vzhledem k aktuálnímu stavu normativní základny se detailněji zaměřuje na model neprůzvučnosti použitý v EN 12354. Provádí porovnání nových termínů s původním názvoslovím. Ukazuje výpočetní modely používané v EN. Analyzuje stávající výpočetní programy ve světě pro výpočet vzduchové a kročejové neprůzvučnosti. Vlastní realizace programu a testování funkce na příkladech. Dokumentace programu. Výsledkem práce je nový výpočetní program.

SUMMARY

Buildings acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products. Airborne sound insulation. Impact sound insulation. Rating of sound insulation in buildings and of building elements.

Stručný životopis

Roman Číhal, narozen 1967 v Brně. Střední průmyslová škola stavební Brno, obor pozemní stavby. VUT FAST Brno, obor pozemní stavby, specializace automatizace statických výpočtů. Absolvoval vojenskou katedru VUT FAST a základní službu. Zaměstnání: kalkulace stavebních prací, příprava výroby, projekce, aplikace CAD, programátor. Samostatná činnost v rámci živnostenských oprávnění.