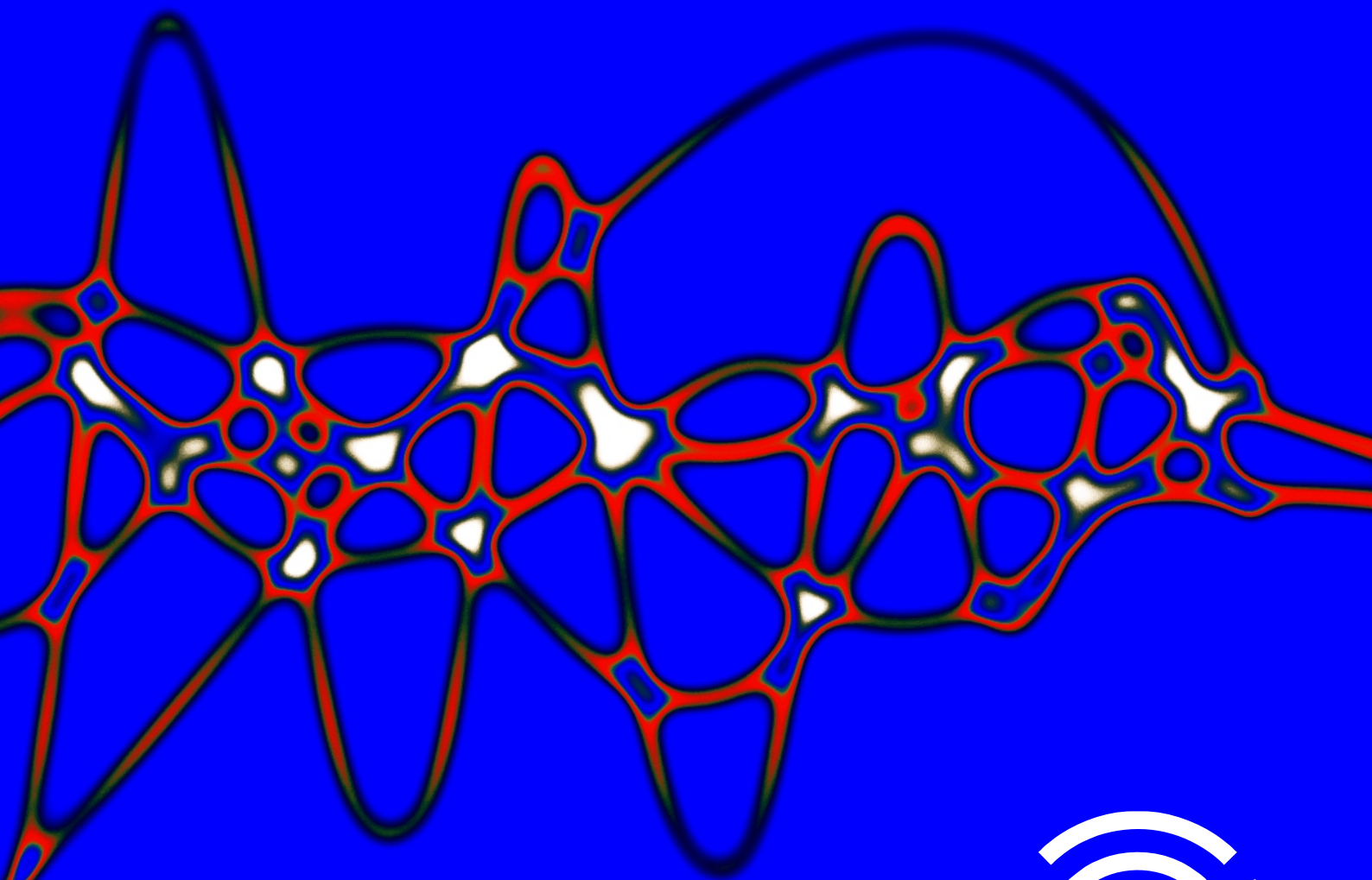


Vedecký recenzovaný zborník
Peer-reviewed Proceedings

Nové trendy akustického spektra

New Trends of Acoustic Spectrum



VÝROČIE
SLOVENSKEJ AKUSTICKEJ
SPOLOČNOSTI
PRI SAV



Martin Čulík – Anna Danihelová

2021

Technická univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta

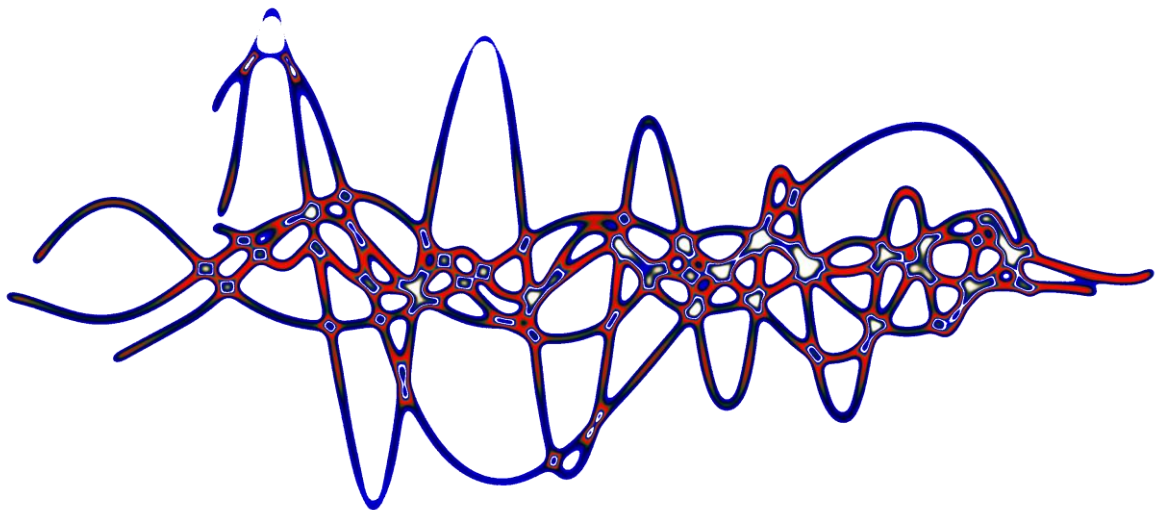
Editori / Editors:
Martin Čulík, Anna Danihelová

NOVÉ TRENDY AKUSTICKÉHO SPEKTRA

Vedecký recenzovaný zborník

NEW TRENDS OF ACOUSTIC SPECTRUM

Peer-reviewed Proceedings



2021

PodĎakovanie / Acknowledgement:

Vedecký recenzovaný zborník vznikol s podporou Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-17-0206 „Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva“.

The edition of the Peer-reviewed Proceedings was supported by the Slovak Research and Development Agency within the project no. APVV-17-0206 “Ultra-low Energy Green Building Based on Renewable Wood Material”.

Editori / Editors: Martin Čulík, Anna Danihelová

NOVÉ TRENDY AKUSTICKÉHO SPEKTRA

Vedecký recenzovaný zborník

NEW TRENDS OF ACOUSTIC SPECTRUM

Peer-reviewed Proceedings

Partneri / Partners:



**Katedra
protipožiarnej
ochrany**



**ZVÄZ SLOVENSKÝCH
VEDECKOTECHNICKÝCH
SPOLOČNOSTÍ**



**Katedra
drevených
stavieb**

Recenzenti / Reviewers: Recenzenti sú uvedení v Obsahu. Reviewers are listed in Contents.

I. vydanie

Rok vydania 2021

Počet strán 138, elektronická forma vydania

Za odbornú a jazykovú úroveň textu sú zodpovední autori jednotlivých príspevkov.

V zborníku sú publikované pôvodné vedecké práce. Príspevky boli recenzované.

Spracovanie obálky Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene

Zostavovateľ zborníka Martin Čulík | Grafický návrh obálky Miroslav Chovan

© Technická univerzita vo Zvolene

Všetky práva vyhradené. Nijaká časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autora alebo zostavovateľa zborníka.

ISBN 978-80-228-3267-0

OBSAH / CONTENTS

Predhovor (Preface)	5
Konštrukcia inovatívneho druhu nábytku s akustickými prvkami – projekt aktívneho kontrabasu Martin Čulík, Sebastian Kirchoff (<i>Dominik Spišiak, Peter Kičák</i>)	7
Let's try to find the sound of silence – Part 2 Radoslav Darula (<i>Peter Hockicko, Miroslav Němec</i>)	17
Predikcia krokovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie Richard Drahoš, Milan Drahoš (<i>Martin Jedovnický, Vojtech Chmelík</i>)	25
Predikcia vzduchovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie Richard Drahoš, Milan Drahoš (<i>Martin Jedovnický, Vojtech Chmelík</i>)	45
Predikcia vzduchovej nepriezvučnosti obvodových plášťov v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie Richard Drahoš, Milan Drahoš (<i>Martin Jedovnický, Vojtech Chmelík</i>)	67
Analýza akustických spektier fosfátových iónovo vodivých skiel pred a po dehydratácií Peter Hockicko, Francisco Munoz (<i>Luboš Krišťák, Miroslav Němec</i>)	83
Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosť stav difúznej stĺpikovej steny s parobrzdou na báze dreva Patrik Štompf, Stanislav Jochim, Dominik Hricko, Dominika Búryová, Michal Miklošovič (<i>Alena Rohanová, Jozef Štefko</i>)	87
Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosť stav difúznej stĺpikovej steny s parobrzdou na báze papiera Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko, Pavol Sedlák, Michal Miklošovič (<i>Alena Rohanová, Jozef Štefko</i>)	97
Tepelno-vlhkostné vlastnosti difúznych stĺpikových stien s rôznymi druhmi parobrzdy Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko, Jozef Štefko, Michal Miklošovič (<i>Alena Rohanová, Pavol Sedlák</i>)	107
Analýza tenkých vrstiev Jozef Kúdelčík, Peter Hockicko (<i>Luboš Krišťák, Miroslav Němec</i>)	119

Vplyv kvality výroby ložísk na obťažujúci hluk Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Lubomír Šooš (<i>Peter Hockicko, Miroslav Němec</i>)	127
Diagnostika drevených organových píšťal metódami akustiky Andrej Štafura, Martin Čulík, Štefan Nagy, Ondrej Chlebo (<i>Dominik Spišiak, Peter Kičák</i>)	135

PREDHOVOR / PREFACE

Publikovanie pôvodných vedeckých prác zameraním na akustiku a materiálové inžinierstvo pokračuje aj v roku 2021. Vedecký recenzovaný zborník „Nové trendy akustického spektra“ je už deviaty v sérii.

Zborník originálnych vedeckých príspevkov prezentuje nové vedecké poznatky. Je pre odborníkov a ďalších záujemcov významným zdrojom aktuálnych informácií z oblasti akustiky, jej aplikácií, materiálového inžinierstva a interdisciplinárnej spolupráce.

Editori

Publishing original research papers focused on acoustics and material engineering continues also in 2021. Scientific peer-review proceedings "New Trends of Acoustic Spectrum" is the ninth in this series.

The proceedings of genuine scientific papers present a new scientific knowledge. For scientists and other professionals, it is an important source of up-to-date information in the field of acoustics, its applications, material engineering and interdisciplinary cooperation.

Editors



Slovenská akustická spoločnosť pri SAV

Slovak Acoustical Society (SKAS)

www.skas.sk

Slovenská akustická spoločnosť pri SAV ako dobrovoľné neziskové združenie odborníkov pôsobiacich v interdisciplinárnom odbore akustika bola založená v roku 1991. V roku 1993 bola spoločnosť pridružená do vedecko-technických spoločností pri Slovenskej akadémii vied (SAV). Poslaním spoločnosti v podmienkach Slovenskej republiky je prispieť a napomáhať zachovaniu a optimálnemu rozvoju interdisciplinárneho odboru akustika. Jedným z cieľov spoločnosti je organizovanie národných a medzinárodných konferencií, odborných seminárov, sympózií, prednášok, konzultačných dní a iných odborných akcií pre svojich členov, pre zamestnancov orgánov verejného zdravotníctva a štátnej správy. Slovenská akustická spoločnosť pri SAV je členom domácich vedeckých spoločností a to Vedeckých spoločností pri SAV a Zväzu slovenských vedeckotechnických spoločností. Taktiež je členom viacerých medzinárodných vedeckých spoločností a to European Acoustics Association (EAA) a International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), v ktorých je registrovaná a akceptovaná ako Slovak Acoustical Society. Je taktiež riadnym členom International Commission for Acoustics (ICA), kde je registrovaná ako Slovenská Akustická Spoločnosť (SKAS).

Slovak Acoustical Society (SKAS) as a non-profit organisation of professionals active in the interdisciplinary field of Acoustics was founded in 1991. In 1993 the Society joined the scientific societies of the Slovak Academy of Sciences (SAV). The mission of the Society in the conditions of the Slovak Republic is to contribute and help in preserving the optimum development of the interdisciplinary field of Acoustics. One of the organisation 's objectives is organizing of national and international conferences, professional seminars, symposia, lectures, consultancy days and other professional events for its members, employees of public health care system and public service. Slovak Acoustical Society (SKAS) is a member of the European Acoustics Association (EAA) and of the International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), where the society is registered and accepted as Slovak Acoustical Society. The society is also a regular member of the International Commission for Acoustics (ICA), where it is registered as Slovenská Akustická Spoločnosť (SKAS).

30. výročie Slovenskej akustickej spoločnosti pri SAV

Slovenská akustická spoločnosť pri Slovenskej akadémii vied je dobrovoľné neziskové združenie fyzických a právnických osôb v multidisciplinárnom odbore akustiky. Spoločnosť vyvíja činnosť pri Slovenskej akadémii vied (SAV), ku ktorej sa pridružila na základe uznesenia Predsedníctva SAV č. 191 zo dňa 29.11.1990.



**ZVÄZ SLOVENSÝCH
VEDECKOTECHNICKÝCH
SPOLOČNOSTÍ**

KONŠTRUKCIA INOVATÍVNEHO DRUHU NÁBYTKU S AKUSTICKÝMI PRVKAMI – PROJEKT AKTÍVNEHO KONTRABASU

Martin Čulík, Sebastian Kirchhoff

1 Úvod

Nábytok ako materiálny statok vznikol pre uľahčenie existencie človeka, pre uspokojenie jeho fyziologických potrieb, ukladanie predmetov či uľahčenie každodenných činností iného charakteru, v procese jeho bývania. Samozrejme sa od nábytku ako výrobku z dreva očakáva, a tomu sa prispôsobuje aj výber materiálu, takisto plnenie estetického účelu jeho využitia. Hudobný nástroj je materiálny statok, ktorý ale vznikol aj z potrieb naplňania duchovných hodnôt človeka.

Príspevok sa venuje problematike špeciálneho nábytku, teda nábytku, ktorý má okrem bežných estetických a úžitkových prvkov aj iné pridané hodnoty. Navrhovaný projekt sa zameriava najmä na nábytok s akustickými, zvuk vyludzujúcimi prvkami. V histórii sa takýto nábytok vyskytoval sporadicky a bol vyrábaný iba kusovo. Z hľadiska akustiky u nábytku sa najviac prihliada na jeho schopnosť usmerňovať zvukové vlny, tlmiť zvuk či hluk okolitého prostredia z dôvodu minimalizácie rušivých podnetov, napríklad na pracoviskách, kde sú isté zvukové podnety nežiaduce. Nábytok so zvuk vyludzujúcimi prvkami, práve naopak, je zdrojom zvukových signálov. Dopyt ľudí po nábytku s takýmito funkciami je skôr raritou, nie je veľmi rozšírený.

Nábytok so zvuk vyludzujúcimi prvkami spĺňa funkciu, pre ktorú je určený predovšetkým, ale zároveň mu dáva možnosť využívať aj jeho akustické aspekty. Akustické prvky takéhoto nábytku majú za úlohu vyludzovať zvuk, ktorý je človeku príjemný a nejakým spôsobom obohatí jeho existenciu. Väčšinou sa stretávame s umiestnením samotných akustických zariadení do zostáv úložného nábytku ako doplnkových zariadení nezávislých na danom type nábytku. Príspevok sa venuje nábytku, v ktorom sú akustické prvky zabudované ako jeho podstatná súčasť. Uspokojuje potreby úzkej skupiny ľudí, pre ktorých je do istej miery atraktívny. Z hľadiska typológie nezapadá do žiadnej konkrétnej kategórie, skôr je zmesou viacerých typologických kategórií a podkategórií.

Pri realizácii nábytku s akustickými prvkami treba venovať zvýšenú pozornosť najmä pri správnom výbere druhu a kvality dreva s jeho následným spracovaním. Treba prihliadať aj na optimálny pomer medzi vlastnosťami dreva vhodnými pre akustické prvky nábytku a vlastnosťami, vhodnými pre účely výroby samotného nábytku. Proces začína už prvostupňovým spracovaním dreva, t. j. vyťažením daného druhu dreveniny na tento účel a vymanipulovaním jeho častí optimálnych pre kvalitatívne požiadavky a rozmery navrhovanej výroby špeciálneho výrobku z dreva. Ďalej sa pozornosť venuje sušeniu dreva na potrebnú vlhkosť s dôrazom na prirodzené sušenie ako aj na druhostupňové spracovania dreva do požadovaného tvaru a kvality. Pri zostavovaní častí do finálnej podoby sa využívajú aj ručné nástroje so špeciálne pripravenými šablónami. Rovnako treba dbať pri finalizácii výrobku z dreva na vhodnú povrchovú úpravu, ktorá má minimálny nepriaznivý vplyv na jeho akustické vlastnosti a na úžitkovú funkciu nábytku.

Navrhovanú konštrukciu inovatívneho druhu nábytku s akustickými prvkami – aktívny kontrabas, by bolo možné považovať aj za sláčikový hudobný nástroj s pridanou hodnotou osadených nábytkových prvkov a prvkov reprodukovateľného zvuku.

2 Inovatívne návrhy špeciálneho druhu nábytku s akustickými prvkami

Vo svete sa, najmä v prosperujúcich krajinách, dostávajú do povedomia všemožné druhy extravagantných dizajnových výrobkov s účelom vyhovieť aj nevšedným potrebám zákazníka. Ľudia môžu mať hneď niekoľko motívácií pre kúpu nábytku, ktorý je odlišný od komerčného štandardu: vyhovieť vlastnému estetickému cíteniu a nájsť produkt, ktorý im bude najbližšie alebo nájsť chýbajúci kus, ktorý vyplní prázdne miesto v domácnosti. Dôvodom kúpy môže byť aj potreba zákazníka nejakým spôsobom zaujať okolie, resp. návštevy bytových priestorov. Dá sa stretnúť aj s nábytkom, ktorý imituje hudobný nástroj a plní funkciu daného druhu nábytku, pre ktorý je aj navrhnutý dizajn. Bicie nástroje ako konferenčné stolíky, imitácia klasických strunových nástrojov ako skrinky, dychové nástroje, z ktorých vychádza zdroj svetla, či korpusy klávesových nástrojov využitých ako knižnice. Cieľom takýchto imitácií je aplikovať estetický charakter do úžitkového objektu, akým je nábytok a poskytnúť autentický produkt napríklad milovníkom hudby alebo čohokoľvek iného podľa charakteru danej imitácie. Pri takomto nábytku však treba obzvlášť dbať na kompromis medzi jeho estetickou a funkčnou stránkou.

Za prvý nábytok, ktorý vyludzoval zvuk sa začal považovať začiatkom 20. storočia predchodca gramofónu tzv. fonograf. Okolo roku 1920 sa zaznamenaný zvuk stával v americkej domácnosti čoraz bežnejším javom a to vďaka úplne novému objektu v bytovom priestore, fonografu. Aby si ale získal uznanie v domácnosti, musel splynúť s existujúcim kontextom, musel sa z neho stať nábytok. Spoločnosti, ktoré sa zaoberali výrobou, museli fonograf uviesť na trh tak, aby sa dištancovali od vlastnej technologickej minulosti a prišli na trh s úplnou novinkou. Tak, aby sa z neho stal hudobný nábytok, „Nenápadná prítomnosť v idealizovanom prostredí rodinného života“. Kľúčom k predaju zvuk vyludzujúceho zariadenia bolo prezentovanie gramofónu ako nábytkového doplnku do interiéru s praktickými, napríklad úložnými funkciami. Keď spoločnosti pochopili, že rozšírenie ich podnikania znamená presvedčiť spotrebiteľov, že si táto technológia môže nájsť miesto v ich domovoch, dekoratívne aspekty fonografov a ich skriniek sa stávali čoraz dôležitejšie. „Kľúčom k prijatiu fonografu bolo, aby ho spotrebiteľia nevideli ako technológiu, ale ako nábytok“ (BARNETT, 2006).

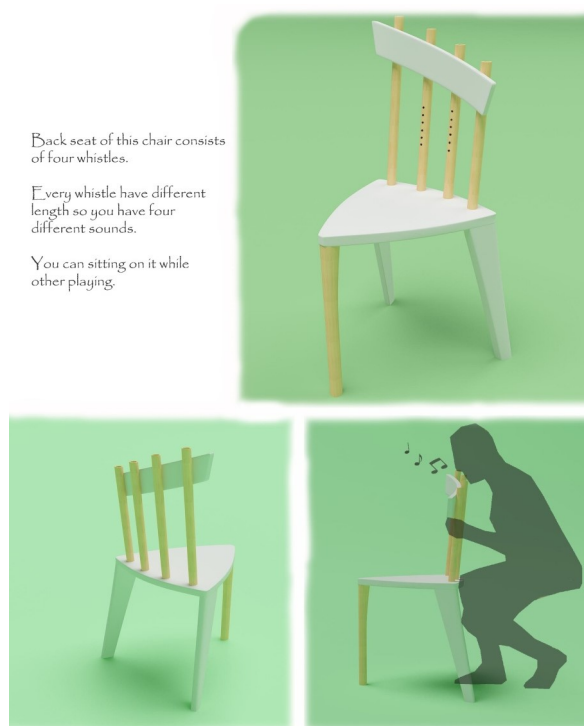
Nábytok, ktorý zvuky vyludzuje, vo svete ani na Slovensku nie je veľmi rozšírený, ale predsa existuje. Vo svete ho môžeme nájsť pod pojmi „Musical furniture“ alebo „Acoustic decor“. Najčastejšie ide o stolový a úložný nábytok s akustickými prvkami v podobe perkusívnych alebo bicích prvkov pre rytmickú hru alebo klávesových prvkov schopných vylúdiť tóny väčšinou na báze xylofónu. Projekt takého stolíka sa realizoval-aj na Drevárskej fakulte TU vo Zvolene ako jeden z výsledkov workshopu v roku 2011, zameraného na dizajn hudobných nástrojov (Obrázok 1.). Hlavná myšlienka dizajnu „Music Coffee Table“ pochádza z princípu xylofónu, ktorý má jednotlivé časti upevnené tak, aby každá táto časť vydávala iný tón. S podobným princípom prichádza aj tento netradičný stolík. Stôl sa skladá z jednej pevnej časti, ktorá plní nosnú funkciu a tiahne sa celou dĺžkou stola. Pri hraní plní taktiež funkciu odkladacieho priestoru pre šálky, poháre a ostatné veci pretože táto časť je aj pri hraní statická. Na ňu sú prichytené jednotlivé doštičky, tzv. kamene. Tie, vďaka tomu, že každá má iný tvar a dĺžku vydávajú po údere rôzne tóny po úderoch. Doštičky je potrebné pri výrobe dôkladne vyladiť, čím pri počte 8 kusov dostávame základnú hudobnú stupnicu. K stolu sú pripojené aj dva páry paličiek. Každý je uchytený na jednej nohe stola, kde je k nim ľahký prístup a taktiež dotvárajú celkový výraz stola. Keďže ide o zábavný a hravý stôl

zvolená je aj jeho farebná hravosť. Jednotlivé časti sú farebne odlišené a vytvárajú farebnú dúhu (ČULÍK A SPOL., 2012).



Obrázok 1. Grafický návrh xylofónového stola.

Ďalším zaujímavým výstupom workshopu študentov dizajnu na DF TU vo Zvolene bola v roku 2012 navrhnutá pískajúca stolička s názvom „Whistle Chair“ (Obrázok 2.), v ktorej konštrukcii boli zakomponované dychové hudobné nástroje typu slovenskej koncovky a píšťalky. Operadlo tejto stoličky pozostáva zo štyroch píšťal. Každá píšťala má inú dĺžku, takže dostávame štyri rozličné tóny. Na tejto stoličke sa dá sedieť aj počas hrania (MOČÁRI A ČULÍK, 2012).



Obrázok 2. Grafický návrh pískajúcej stoličky.

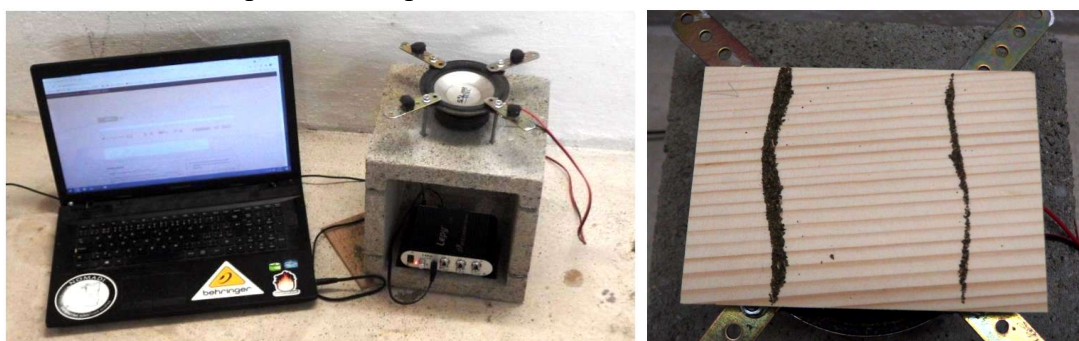
V rámci praktickej realizácie projektu spolupráce Pracoviska fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene s Fakultou architektúry STU BA vznikol návrh experimentálneho stolíka s multisenzorickým otváraním (Obrázok 3.). Predpokladom jeho návrhu bola tvorba počuteľného a príjemného zvuku (na princípe tvorby akustického signálu u idiofónov – xylofón) vo výsuvnej časti stolového nábytku a cieľom nášho pracoviska bolo navrhnuť popri vyhodnotení fyzikálno-akustických vlastností dreva rôznych drevín aj kompletnú konštrukciu pre zvukotvornú časť tohto stolového nábytku (KOTRADYOVÁ A SPOL., 2017).



Obrázok 3. Vyrobený prototyp návrhu experimentálneho stolíka s multisenzorickým otváraním.

3 Meranie vlastností materiálu na výrobu aktívneho kontrabasu

Merania boli uskutočnené za účelom zistenia vlastností, kvality vstupného materiálu so zreteľom na optimalizáciu určitých prvkov konštrukcie navrhovaného aktívneho kontrabasu. Pre merania bola použitá metóda modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov (ČULÍK, 2013). Skúšobné telesá, v počte 3 ks z každého materiálu, mali tvar tenkých pravouhlých dosiek, ktoré boli vymanipulované z rôznych častí dosky s viditeľne odlišnou štruktúrou. Meranie vlhkosti skúšobných telies (w) smreka obyčajného (SM), javora horského (JV) a brezovej preglejky (BP4 – hrúbka 4 mm a BP9 – hrúbka 9 mm) počas merania sa uskutočnilo pomocou odporového vlhkomera.



Obrázok 4. Experimentálna aparátúra merania rezonančnej frekvencie módu (2,0) pomocou vizualizácie Chladniho obrazcov a ukážka na smrekovej doske.

Aparatúra použitá na zistenie rezonančnej frekvencie $f_{2,0}$ základného módu kmitania (2,0) je zobrazená na Obrázku 4. Pozostáva z notebooku, tónového generátora, zosilňovača, reproduktora a podpernej konštrukcie na uloženie skúšobného telesa. Softvérový frekvenčný generátor budí cez zosilňovač a reproduktor harmonické sínusové zvukové vlny. Rezonančná frekvencia $f_{2,0}$ sa odčítava z aplikácie v notebooku. Zo známej hustoty dreva a PGD (ρ_w) a rezonančnej frekvencie módu (2,0) sa vypočítali fyzikálno-akustické charakteristiky skúšaného materiálu (FACH) – v pozdĺžnom smere a prevládajúcim dĺžkovom rozmere preglejky (E_x, A, c_x), podľa daných vzťahov (ČULÍK, 2013).

V Tabuľke 1. sú uvedené hodnoty nameraných charakteristík dreva skúšobných telies z materiálu, ktorý sa stáva podkladom na výrobu aktívneho kontrabasu.

Tabuľka 1. Tabuľka nameraných hodnôt FACH materiálu určeného na výrobu aktívneho kontrabasu.

Materiál	w/ %	$\rho_w / \text{kg/m}^{-3}$	$f_{2,0} / \text{Hz}$	E_x / GPa	$A / \text{m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$c_x / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
SM ₁	8,7	375	925	7,45	11,87	4455
SM ₂	8,7	412	1066	11,14	12,64	5202
SM ₃	5,7	408	1073	11,29	12,91	5262
JV ₁	9,3	557	1192	13,52	8,62	4883
JV ₂	10,0	571	1224	13,44	8,49	4851
JV ₃	9,7	560	1172	12,21	8,34	4670
BP4 ₁	12,7	672	801	15,47	7,14	4798
BP4 ₂	14,3	671	813	16,40	7,37	4944
BP4 ₃	14,0	697	770	16,00	6,88	4791
BP9 ₁	12,0	710	453	13,18	6,07	4308
BP9 ₂	12,0	703	449	13,00	6,12	4299
BP9 ₃	13,0	714	447	13,01	5,98	4270

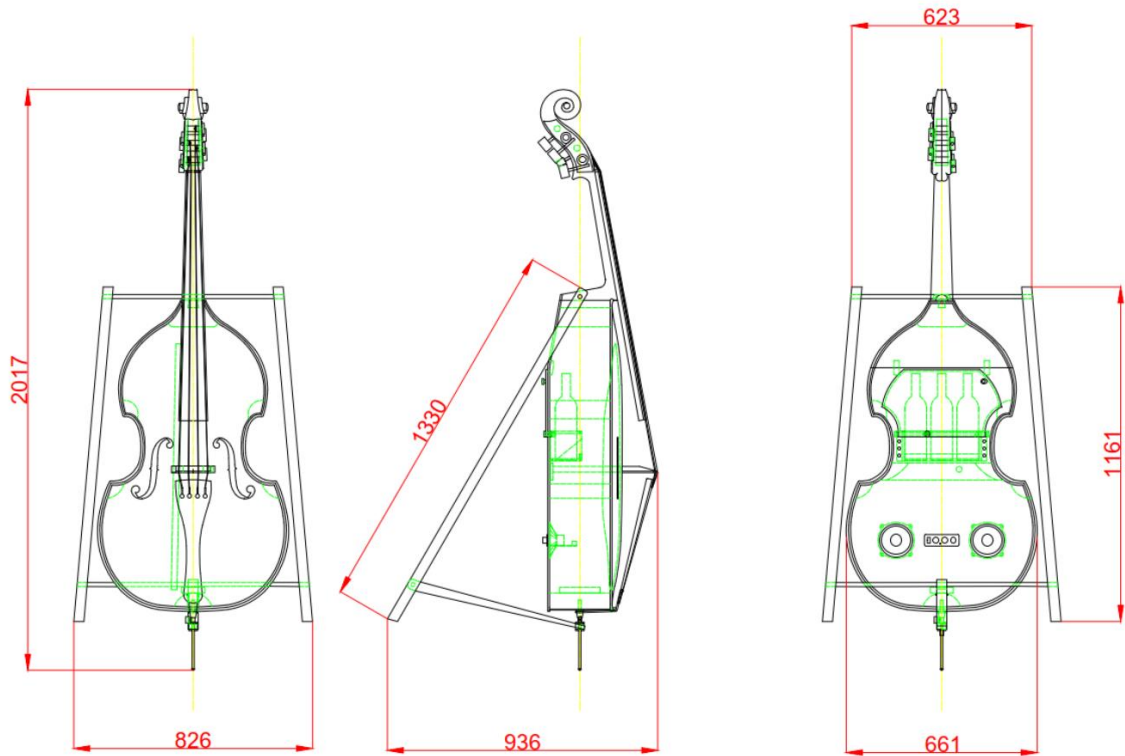
4 Návrh aktívneho kontrabasu

Ku tvorbe tohto jedinečného interiérového doplnku s akustickými prvkami viedol nápad skombinovať nábytok a sláčikový hudobný nástroj. Nevyhnutné bolo čo najlepšie pochopiť konštrukciu tohto nástroja pre vypracovanie optimálnych konštrukčných riešení. Konceptom samotného projektu bolo minimalizovať prvky, ktoré by mali nepriaznivý vplyv na funkciu objektu ako hudobného nástroja, a zároveň zakomponovať stojan v úložnom priestore na nádoby s tekutinou, ktorý by sa dal bezproblémovo využívať. Ďalšia súčasť tohto konceptu boli reproduktory, pomocou ktorých sa bude dať tento objekt použiť aj ako nezávislá hracia bytová HI-FI sústava, dokonca aj s vlastným nabíjateľným zdrojom napájania. Kontrabas má vlastný stojan, preto sa dá používať ako samostatný nábytkový solitér. Pre tento návrh bola vypracovaná séria nákresov s dodržaním rozmerov a proporcií samotného hudobného nástroja. Na nákrese v Obrázku 5. sú okótované základné rozmery finálneho návrhu, podľa ktorých sa o produkte v priestore dá vytvoriť predstava jeho umiestnenia.

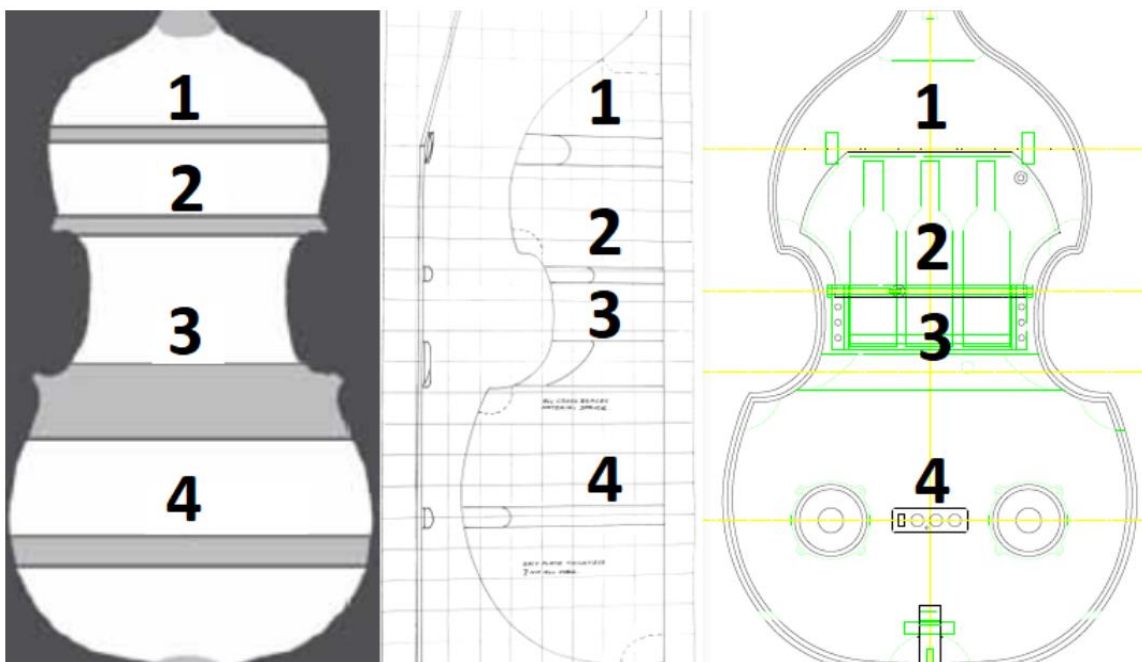
Charakter rebrovania dvoch rozdielnych konštrukčných riešení a navrhnuté rebrovanie spodnej dosky projektu aktívneho kontrabasu v podobe rozmiestnenia nábytkových a akustických prvkov stužujúcich spodnú dosku v približných miestach potrebného rebrovania je na Obrázku 6.

Z hľadiska polohy v korpuse aktívneho kontrabasu budú navrhované dvierka nábytkovej časti návrhu naložené, t. j. osadené z vonkajšej strany bez zásahu do korpusu (Obrázok 7.). Dvierka budú zavesené na jednobodovom otočnom klznom otváraní, v bode mimo stredovej osi dvierok. Excentrické uchytenie dvierok má významnú úlohu v otváracíj stabilite dvierok.

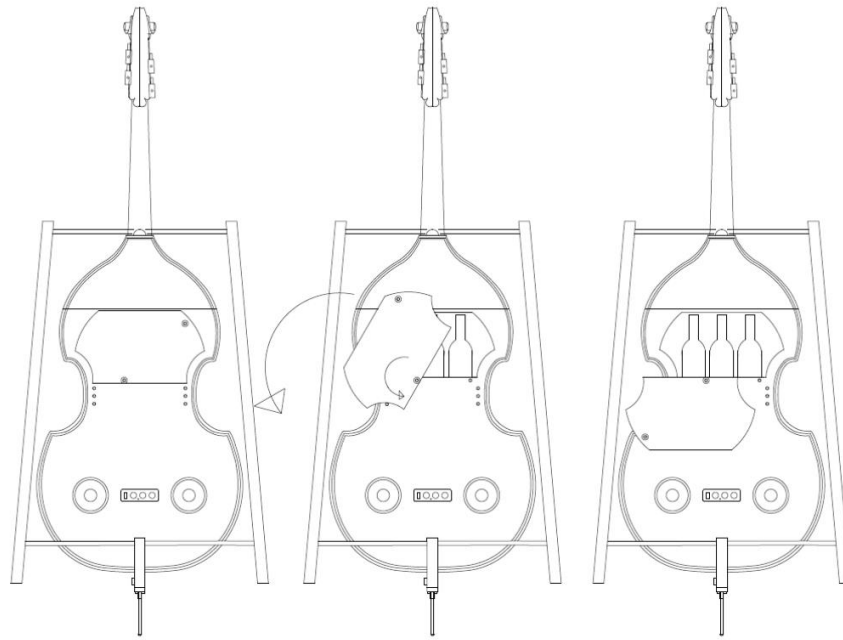
Pre reprodukovanie hudby boli navrhnuté v spodnej časti (v širšom ovále) korpusu zadnej dosky reproduktory s feritovým magnetom pre ich nízku hmotnosť. Reprodukory budú uchytené malými skrutkami za vyrezanými otvormi v strede dosky. Sú budené zosilňovačom, uchyteným v stredovej línii medzi oboma reproduktormi, taktiež malými skrutkami. Na zosilňovači bude ekvalizér pre nastavenie výšky frekvencií (basy a výšky) prehrávanej hudby, potenciometer pre reguláciu hlasitosti, vstup na AUX kábel a vstup na nabíjačku internej batérie kontrabasu (Obrázok 8.). Zdroj bude uchytený na spodnom bloku kontrabasu blízko vnútorného uchytenia bodca. Vodiče budú vedené po obvode kontrabasu uchytené háčikmi, zaskrutkovanými do rohových blokov lubov. Prehrávanie hudby bude možné cez AUX kábel z mobilného telefónu, smartfónu alebo akéhokoľvek zariadenia s funkciou MP3 formátu prehrávania hudby.



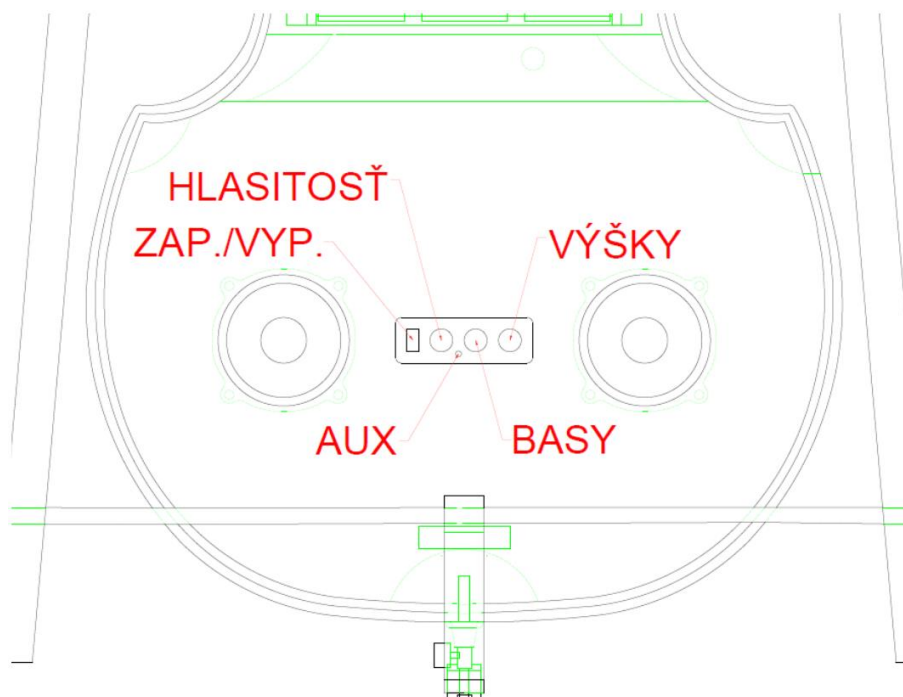
Obrázok 5. Technický náčrt projektu aktívneho kontrabasu so základnými rozmermi.



Obrázok 6. Charakter rebrovania dvoch rozdielnych konštrukčných riešení a rebrovanie spodnej dosky projektu aktívneho kontrabasu.



Obrázok 7. Otváranie špeciálnych dvierok úložného priestoru v korpuse.



Obrázok 8. Umiestnenie ovládacích prvkov audio sústavy HIFI.

5 Záver

Uskutočnené merania vlastností materiálu a návrh projektu aktívneho kontrabasu ako interiérového nábytkového doplnku s akustickými prvkami prináša tieto závery:

- Na základe meraní sa zistil viditeľný rozdiel hodnôt FACH medzi skúšobným telesom SM₁ z riedko rastenej časti a SM₃ s veľmi husto rastenej časti dreva, charakterizujúceho makroskopicky už ako rezonančný materiál. Merania ukázali, že je medzi týmito skúšobnými telesami rozdiel v ich akustickej konštante, module pružnosti ako aj rýchlosti šírenia zvuku, a hustejšia doska disponuje vyššími hodnotami týchto veličín. Preto bude použitá na výrobu vrchnej rezonančnej dosky kontrabasu práve táto časť smrekového dreva.
- Skúšobné telesá javora horského mali o niečo vyššiu akustickú konstantu, ale zároveň aj nižšiu hustotu ako uvádzajú doterajšie výskumy zaoberajúce sa vlastnosťami dreva na výrobu sláčikových hudobných nástrojov. Napriek tomu sa javorové drevo použije na výrobu krku a lubov aktívneho kontrabasu, kde požiadavka na kvalitu materiálu môže byť odlišná ako pri ostatných členoch sláčikovej rodiny hudobných nástrojov.
- Výsledky meraní potvrdili, že preglejka má pre svoju štruktúru rozdielne vlastnosti a keď sa jedná o rezonančnú dosku, pri akejkoľvek svojej hrúbke nemôže konkurovať kvalitnému smrekovému drevu. Výsledky taktiež potvrdili, že čím má preglejka viac vrstiev tým sa jej akustická konštanta a rýchlosť šírenia zvuku znižuje. Uskutočnené merania potvrdili, že preglejka (z ktorej má pozostávať zadná doska) s väčším počtom vrstiev dýh má odlišné vlastnosti, pri jemne vyššej hustote sa nepriaznivo znížil modul pružnosti v pozdĺžnom smere dosky. Preglejka s menšou hrúbkou mala prijateľnejšie hodnoty skúmaných vlastností, ale je na konštrukciu výrobku až príliš tenká s malou ohybovou tuhosťou. Na zadnú rovnú dosku kontrabasu sa nakoniec ako kompromis využije preglejka hrúbky 6,5 mm.
- Po rozsiahlom náhľade do prostredia fyzikálno-akustických javov a ich pôsobenia v konštrukcii hudobného nástroja, sa dospelo ku návrhu vhodného spôsobu rebrovania spodnej dosky nástroja, pozmenenej nábytkovými a hudbu reprodukujúcimi prvkami.
- Pri navrhovaní konštrukcie, vzhľadom na limitované rozmery korpusu kontrabasu, sa museli navrhnuť nezvyčajné inovatívne riešenia, ako napríklad vyklápacia debnička na ukladanie nádob s tekutinami, špeciálne excentrické dvierka a osadenie prvkov audio sústavy.
- Akustické prvky, ktoré nevlývajú negatívne na funkciu nábytku, sú jeho pridanou hodnotou a v porovnaní s bežným nábytkom rovnakého typu, sa môže daný nábytok naceniť podstatne vyššie, jeho technologická náročnosť výroby je však omnoho väčšia.

Na základe vyhodnotenia informácií o vlastnostiach a faktoroch, ktoré vplývajú na činnosť jednotlivých komponentov navrhovaného špeciálneho výrobku z dreva a na základe výsledkov meraní vlastností vstupných materiálov, sa návrh konštrukcie stáva podkladom pre nasledujúcu realizáciu projektu aktívneho kontrabasu.

Literatúra

BARNETT, Kyle S. "Furniture Music: The Phonograph as Furniture". In: *Journal of Popular Music Studies* (2006), s. 324. ISSN: 1524-2226, 1533-1598.

ČULÍK, Martin, Miroslav CHOVAN, Anna DANIHELOVÁ, Zuzana TONČÍKOVÁ, Miroslav NĚMEC, Stanislav KOŠŮTH a Andrej OČENÁŠ. *Music coffee table* [online]. Banská Bystrica: Úrad priemyselného vlastníctva Slovenskej republiky, 2012.

ČULÍK, Martin. *Drevo a jeho využitie vo výrobe hudobných nástrojov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2013, s. 93. ISBN: 978-80-228-2511-5.

KOTRADYOVÁ, Veronika, Slavomír ARTIN, Martin ČULÍK a Vojtěch ONDREJKA. Drevo ako materiál pre všetky zmysly a prípadová štúdia stolíka s inovatívnym otváraním korpusu s akustickým efektom. *Nové trendy akustického spektra: vedecký recenzovaný zborník*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2017, , 95-110. ISBN 978-80-228-2947-2.

MOČÁRI, Michal a Martin ČULÍK. Whistle chair. *Material - Acoustics - Place 2012: 7th international conference, September 12-14, 2012, Zvolen - Slovakia*. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2012. ISBN 978-80-228-2372-2.

Summary

Construction of an Innovative Type of Furniture with Acoustical Elements – Project of Active Double Bass. Furniture takes many forms, and its consumers are often appealed to its unusual to extravagant forms or added value. This paper is focused on the topic of acoustic, sound emitting elements, incorporated in the construction of furniture in order to increase its attractiveness and expand the range of its functions. The project creates its own design of an unusual, innovative interior accessory in the form of double bass, which has not only its full use as a musical instrument but also functional furniture elements and acoustic, sound-emitting elements in the form an HI-FI sound reproduction system. To design functional elements, in accordance with this classical bow string instrument, it is necessary to know the entire production process of this instrument, so that there is a clear line between what is and what is not feasible. The construction of this interior accessory requires many compromises. These are considered in the project when optimizing its elements for a given concept. The design includes technical drawings, containing the structural elements and their function, that are designed for this project. However, acoustic elements and their location raise many questions that only material measurements can answer. Therefore, in order to determine the nature and quality of the input material and to design structural solutions of its elements, measurements of physical and acoustical characteristics of the material were performed. Measurements were also made to expand knowledge about the properties of the materials. For the relevance of the measurements, 3 samples from its different parts were selected from each tested material. The measured quantities were moisture, density, resonant frequency in the vibrating mode (2.0) and from the results of the given measurements the modulus of elasticity, acoustical constant and the speed of sound were calculated (method of modal analysis with harmonic excitation using Chladni patterns). The idea and goal of the project was mainly to bring something new by uniquely connecting the world of furniture and music.

Keywords

Wood; physical and acoustical properties; musical instrument; furniture; double bass.

Contact Address

Martin Čulík

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology, Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

culik@acoustics.sk

<http://www.acoustics.sk>

Sebastian Kirchhoff

info@woodcubed.sk



Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko
<http://www.acoustics.sk/>



LET'S TRY TO FIND THE SOUND OF SILENCE – PART 2

Radoslav Darula

1 Introduction

Back in 2014, the first article (i.e. part 1) focused on a search of the sound of silence was published (DARULA, R., 2014). Its aim was to provide a general comparison of various situations of the silence from the viewpoint of sound levels together with a brief and coarse assessment using the CPB analysis.

In 2021, after the musician I Am Planet (IAMP) released the album called 'Zaznamy ticha' (i.e. 'Recordings of the silence'), there came new series questions - how could he record the 'lack of sound or noise', the silence is defined as (MERRIAM WEBSTER, 2021)? And can we record any missing sound at the first place? Is it the lower hearing threshold which dictates what silence is, i.e. is there still some low level sound present? Is it just the sound out of the audible frequency range? Or do we perceive different sounds as the silence? What is the frequency content of such sound then?

Thus, returning back to the pursue of the sound of silence, let's analyse deeper one of the recordings/IAMP's songs and do the same with the performance of famous John Cage's 4:33 together with recordings of silence at the sea and in the forest done for the previous article. And let's try to find out from a different angle, what the sound of silence is composed of.

2 Do we need the silence?

Before digging more deeper into the composition of the silence, it can be interesting to find out if the silence is needed at the first place.

In the paper (BERNARDI, L., et al., 2006), authors analysed the effect of different music on relaxation from cardio-vascular viewpoint and concluded that with only two minutes of silence after musical exposure, the tension in a body and brain is and the silence is more relaxing than music as such. Thus, the short-term silence brings a positive health impact.

The silence has also a positive impact on concentration. As shown in (RADUN, J., et al., 2021), the subjects performing required tasks in silence had the lowest cognitive load and stress levels. Furthermore, the study in (KIRSTE, I., et al. 2015) done on mice showed, that the two hours of silence caused the stimulation of the new cells growth in the hippocampus, i.e. in the region of learning, memories and emotion.

On the other hand, as already stated in the part 1 of the series (DARULA, R., 2014), it was also shown that too much silence has a negative impact on psychical health and can one drive crazy (GRAY R., 2017). So, there is needed a balance in low level sound and complete sound exclusion for longer time periods.

3 Methodology of the search

In this paper the time signals of the particular case of silence, or the interpretation of silence, are going to be converted into the frequency domain using the FFT analysis. For this purpose, the BK Connect software is used. All recordings are converted into the wav format with at least 44 kHz sampling rate to be able analyse the recordings at least up to 16 kHz, i.e. within the audible range. The FFT is presented either in a form of a spectrogram (in order to see the variation of frequencies in time) as well as in a form of an overall FFT and zoom FFT with

the aim to analyse the lower frequencies up to 200 Hz. For the analysis of the music and the nature (section 4.2 and 4.3) the range of the zoom FFT was increased to 5 kHz. Both the overall FFT and zoom FFT is done with max. hold averaging to capture all transients and not smooth them out as would happen with the linear averaging.

Furthermore, analysing the sound and noise from the human perspective, the A-weighting was used in the frequency domain, i.e. the results are compensated for the human ear.

4 Pursue the search of the sound of silence

Let us analyse some different examples of silence and dig into their frequency composition with the aim to find what the corresponding silence is composed of and so what the sound of silence as such is.

4.1 Analysis of the John Cage's 4:33

The first approach of silence in musical performances, already presented in the previous article (DARULA, R., 2014), was to exclude playing any sounds within the 'song'. The classical example of this approach is John Cage's three movements 'song' 4:33, where for the whole length of the performance, which takes 4min and 33s, musicians do not play any instruments. Then the only sounds perceived are the background noise of e.g. the building's HVAC systems or any noises created by audience/musicians standing at the stage.

It is a bit difficult to generalize the sound of silence of John Cage's 4:33, since each 'performance' is different, i.e. we can say that the sound of John Cage's silence is 'site specific'. For this paper, the performance from Berlin's Philharmonic (BERLINER PHILHARMONIKER, 2020) is taken and analysed as shown in Figure 1.

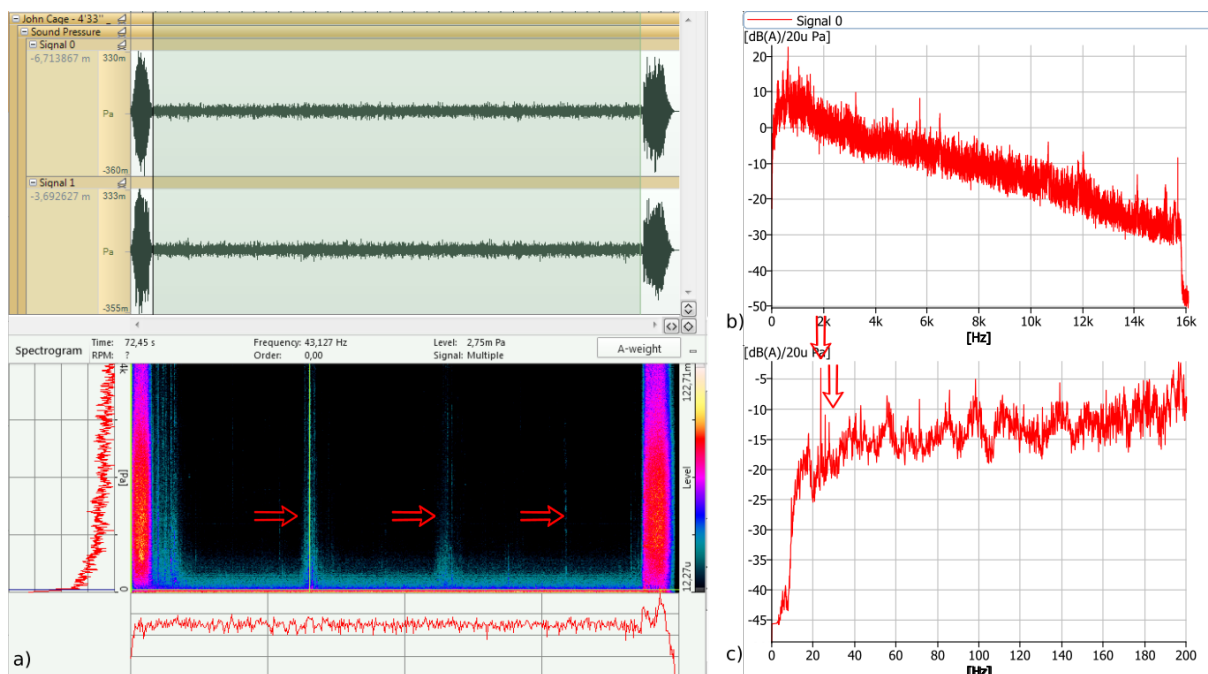


Figure 1. The John Cage's 4:33 performed by Berlin Philharmonic: (a) the time capture and the spectrogram; b) FFT up to 16kHz and c) zoom FFT up to 200Hz.

From the spectrogram one can see (Figure 1a, marked with red arrows), that there were some short-term higher level noises, e.g. a caught, movement on the stage, in the seats, etc. This produces the short term broadband noise, which is however perceived due to the high loudness ‘contrast’ as an annoyance and so in this case it disturbs the silence. In the zoom FFT (Figure 1c), there are some distinct low frequency components, present during the whole performance (they visible also in the spectrogram) and they can be attributed to the HVAC or other appliances installed and running in or transferred into the room. In general, one does not notice them during other performances, but when no other sounds are present, the background noise becomes the dominant component, the ears perceive. Thus, the sound of silence of the analyzed performance of the John Cage’s 4:33 is the low frequency background sound/noise of HVAC and other appliances running in or transferred into the concert hall.

Another performance of Cage’s 4:33 is done by Egnekn Montgomery in the home kitchen using a fridge (MONTGOMERY, E., 2013). It shows how different this piece can be approached, yet it provides the main idea and that is to perceive the background noise as the dominant component of the silence, in this case produced by a compressor and other elements of the fridge as well as an unwanted short-termed transient noises created by a cat.

Furthermore, since the recording is done in a wooden house with wooden furniture, and as shown in (ČULÍK, M. et al., 2020), the wooden surfaces used in wooden houses are not very sound absorptive, the environment used for recording of Montgomery’s interpretation of Cage’s 4:33 is not so acoustically controlled as was in the case of concert hall, i.e. the previous case. This also contributes to a higher background noise levels.

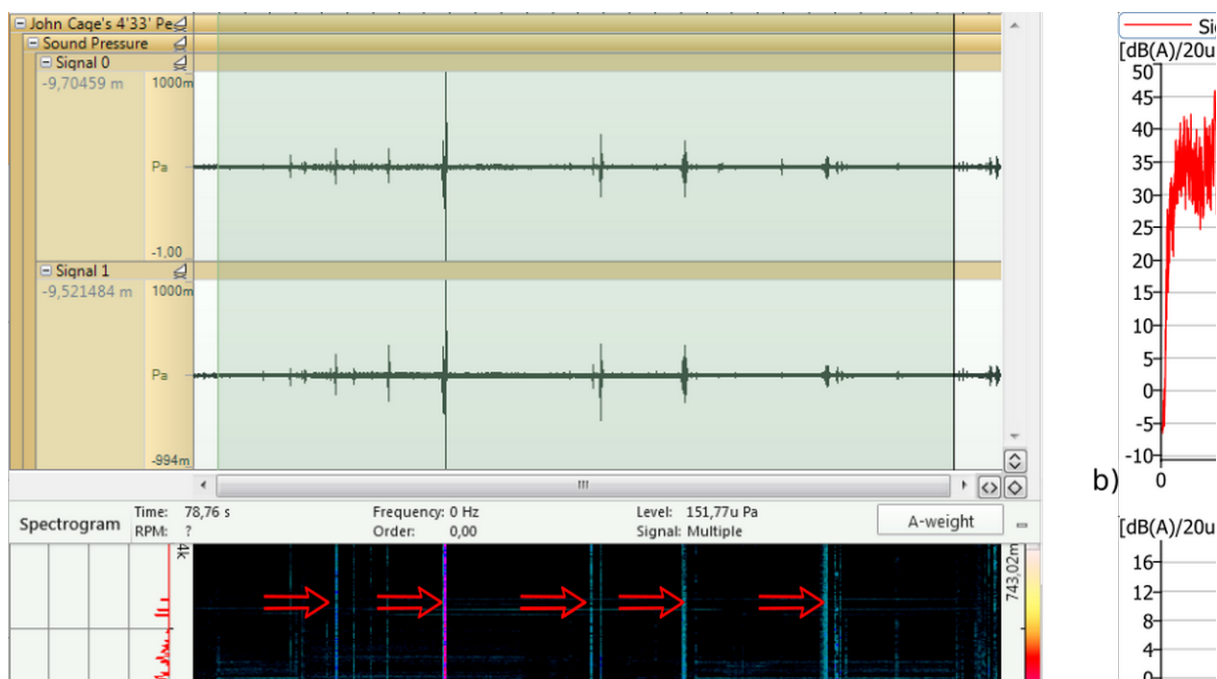


Figure 2. The John Cage’s 4:33 performed by Egnekn Montgomery: (a) the time capture and the spectrogram; b) FFT up to 16kHz and c) zoom FFT up to 200 Hz.

During his interpretation, Egnekn Montgomery opened either fridge or freezer, depending which out of the three ‘movements’ was performed. This caused additional noise disturbance (the transients marked with red arrows in Figure 2a). The components of the low frequencies are present during the whole performance and are seen in the spectrogram in Figure 2a as well as visible from zoom FFT in Figure 2c. They are more dominant with a higher number of tonal components than it was in the previous performance in a concert hall, which is expectable due to the nature of the environment of the private home, where not only HVAC but also other appliances (e.g. a compressor of the fridge) are running and so contributing to the background noise.

From the comparison of the two performances of the Cage’s work, it can be concluded that the Cage’s interpretation of the silence – i.e. the background sounds is composed of the sounds present at the site of the performance. The sound is produced mostly by the HVAC systems or other machinery generating dominantly low frequency tonal noise at low levels. However, the lack of the primary sound causes that these background noises become dominant and so they are perceived as the sought sound of silence. Thus, the sound of silence of the in the John Cage’s 4:33 is a low frequency, low level, mostly tonal sound.

4.2 Using the sound of silence in IAMP’s song

A bit different approach to perceive the silence and so to interpret the sound of silence is seen in the I Am Planet’s work. In his ‘Zaznamy ticha’, Patrik Korinok (i.e. I Am Planet, or IAMP) uses piano, strings (violin, viola, violoncello), guitar, bass and drums, all mixed in a neoclassical minimalistic atmosphere combined with the silence, i.e. with the time periods, where no music is played.

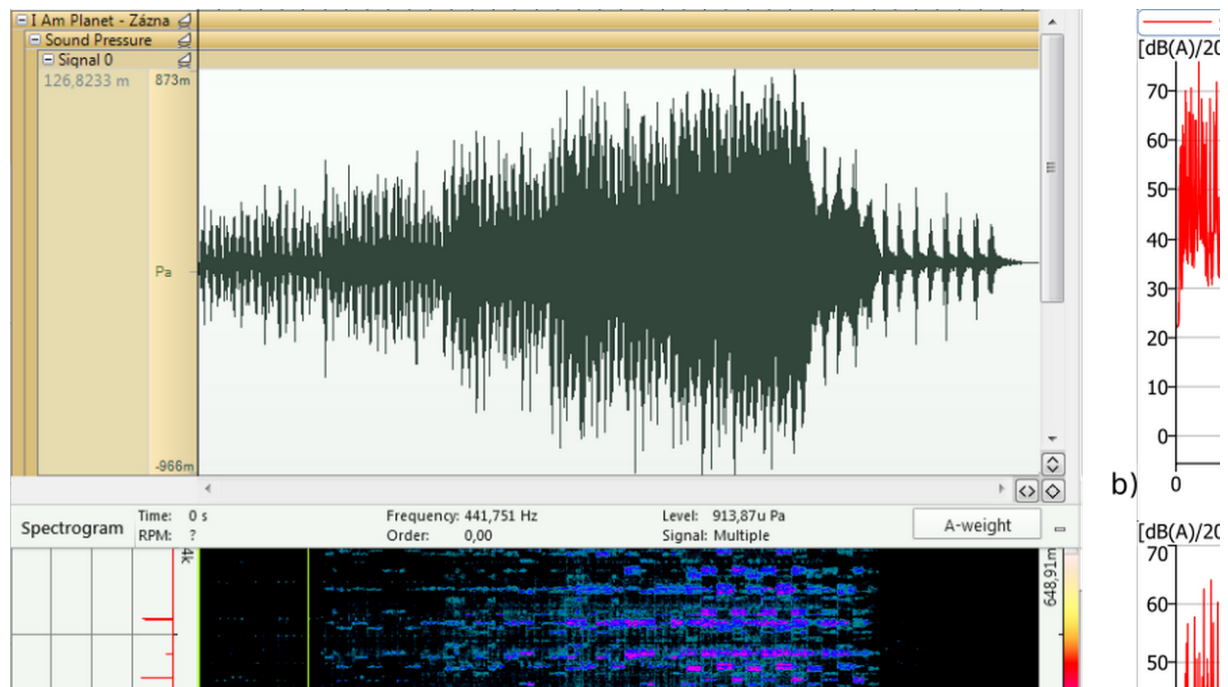


Figure 3. I Am Planet’s song ‘Svatojanskou dolinou’: (a) the time capture and the spectrogram with an extract of slice at 441,751Hz (around A4 piano tone); b) FFT up to 16kHz and c) zoom FFT up to 5kHz.

To analyse more deeply how IAMP works with silence and perceives its sound, let us take the song 'Svatojanskou dolinou' (KORINOK, P. 2021), played mostly by piano with strings added. This is demonstrated in the FFT and zoom FFT as a train of tonal components spread through the whole audible range (Figure 3b-c).

The composition of 'Svatojanskou dolinou' is done in such a way, that even though the piano strokes in fact create the short term transients, they are not perceived as an annoying noise but due to their harmonic mixture, they are forming a pleasant sound (which is always a subjective view point though). This is in contrast with the transients in John Cage's work, where the transient sounds (or noise) are indeed annoying due to their non-harmonic broadband fashion interrupting the much lower level background sounds.

Furthermore, as can be seen from the spectrogram in Figure 3a, with a slice done at around 440Hz, i.e. at the A4 piano tone (SUITS, B.H., 2021), the silence periods are used to let the tones to fade away, i.e. there is no successive tone which would mask the previous one in a harmonic fashion. The length of the attenuation period, which affects the perception of silence, depends on damping / logarithmic decrement coefficient, which differs for different musical instrument's material. E.g. as measured in (ČULÍK, M. et al., 2016), for the wood materials used in some instruments it spreads between 0.019 for bow sticks up to 0.068 for xylophone bars. In a case of IAMP the piano is used, where the piano sound board has the logarithmic decrement coefficient 0.027.

Each silence time section in the IAMP's song is filled up with the attenuating tone played just before the silence period started (marked with a circle in Figure 3a). Is then the sound of silence IAMP uses in his work the tone we heard just a second before the silence occurred and is still kept in our memory?

4.3 Sound of silence in the nature (Atlantic ocean and forest)

In the previous work (DARULA, R., 2014), there were presented also recordings of the silence acquired at the beach of the Atlantic ocean as well as one done in the forest.

If we start with the Atlantic ocean (Figure 4), there is just a broadband component up to 600Hz which corresponds to the sound of the sound waves hitting the beach. Thus, the sound of silence at the sea-front is in fact a low frequency broadband sound. However, since it does not contain any significant tonal components, the sound of the sea is perceived positively as a silence and similarly to the John Cage's 4:33, its sound is composed just by the background noise, and for the sea it is the broadband low frequency sound.

A bit different story is the silence in the forest (Figure 5). The spectrogram as well as FFT reveals that again some low frequencies are present. They are mostly induced by the wind and are captured even though the windscreen was used on the microphone during the recording (DARULA, R., 2014). Furthermore, the white arrows in the spectrogram in Figure 5a show some short-termed higher frequency transients, which were produced by the birds singing. These sounds are again not perceived as annoyance, on a contrary a pleasant background sound is filling up the 'no sound'.

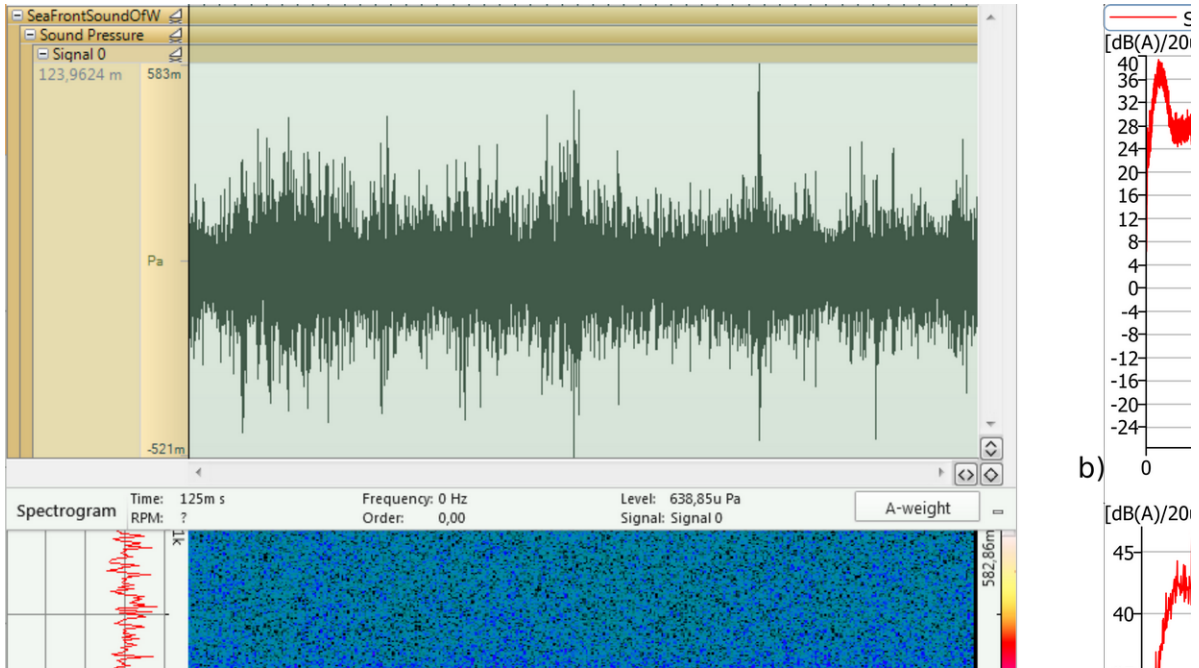


Figure 4. Analyzed recording done at the beach of the Atlantic ocean: (a) the time capture and the spectrogram; b) FFT up to 16kHz and c) zoom FFT up to 5kHz.

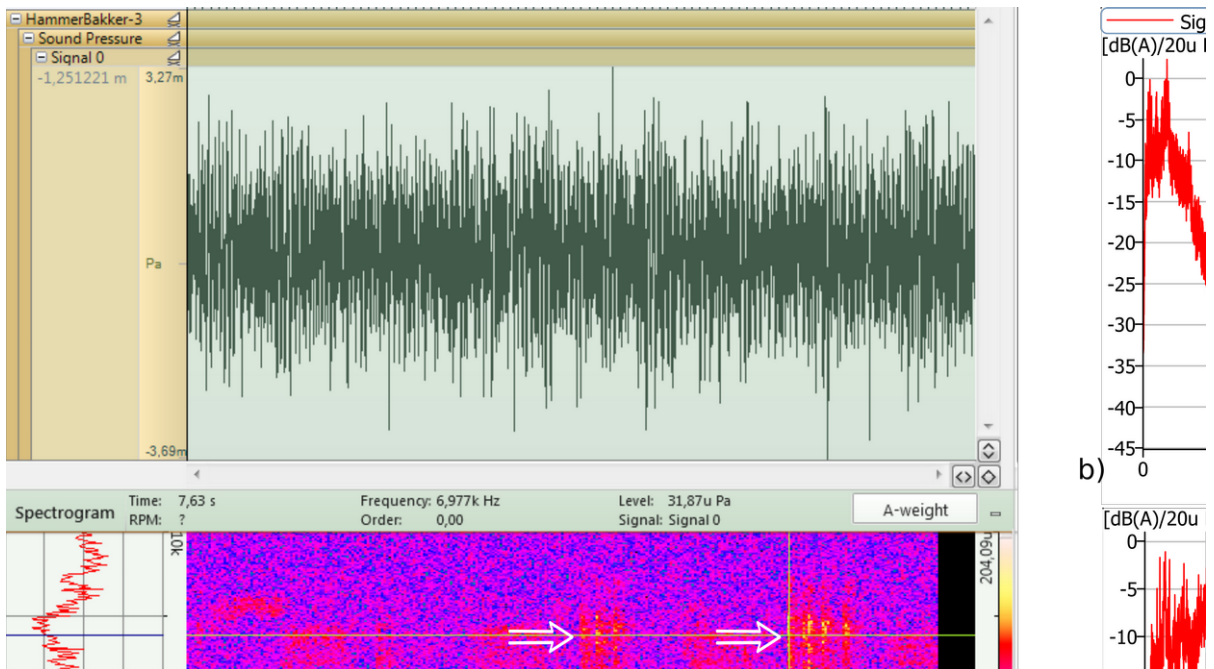


Figure 5. Analyzed recording done in the forest (Hammer bakker): (a) the time capture and the spectrogram; b) FFT up to 16kHz and c) zoom FFT up to 5kHz.

5 Conclusion

In the article we returned back to the question what is the sound of silence analyzing the silence recordings using FFT and digging a bit into the composition of the recorded signals. Each silence has some frequencies present (mostly low frequencies), i.e. we can't talk about any 'absolute silence'. Contrary, even though the environment was perceived as silent, the background noise was present and filled up the 'silence'. So, should we stick to so strict

definition of silence as ‘an absence of any sound of noise’? Do we not perceive the low level harmony of sounds also as silence? If we look back at the John Cage’s ‘silence’, which was interrupted by the transient noises and so breaking the silence or even ‘anechoic chamber’ silence which became annoying after some time (GRAY R., 2017), the ‘absence of sound and noise’ is uncomfortable. So then if we have some sounds present in the silence, it can direct us to the assumption that there is indeed a sound of silence. The silence which is not annoying is composed by the background sounds with mostly broadband low frequencies which are not perceived as noise but can be pleasant and calming us down.

Even, as pointed out in (HEDLIN M., 2006), the silence around us is filled with other sounds out of the audible range (e.g. Earth’s ‘hum’, volcanic eruptions, tornadoes, earthquakes, meteors, etc.). Thus, we are in fact always exposed to the natural sounds in all the silent environments.

So, can we conclude that the sound of silence is ‘site specific’ and it is composed of the background sound components always present in the environment? Then in fact we can really measure and so also record the sound of silence. So, the IAMP was correct and could provide the ‘recordings of the silence’.

What about the next step – if we can record the silence can we then also generate the silence? The answer to the last question is straightforward – yes, we can and it’s already done e.g. with a help of sound masking and noise canceling (e.g. in ANC headphones). But then, what should be the more representative sound of silence we want to achieve? Should it be just a white noise or some frequencies are allowed to pass through? Let’s keep it open and try to address it in the next article.

Acknowledgements

Silence, in the wild world with rules and promises broken on daily bases, is greatly acknowledged.

References

- BERLINER PHILHARMONIKER : *A John Cage: 4'33" / Petrenko - Berliner Philharmoniker* [online]. 2020. YouTube [cit. 2021-09-10]. Available on internet: <<https://www.youtube.com/watch?v=AWVUp12XPpU>>
- BERNARDI, L., PORTA, C., SLEIGHT, P. 2006. Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non-musicians: the importance of silence. In *Heart*. ISSN 1468-201X, 2006 issue 92, p. 445–452.
- ČULÍK, M., DANIHELOVÁ A., DANIHELOVÁ, Z. 2016. Wood for musical instruments: Drevo na hudobné nástroje. In *Akustika: odborný časopis o akustice a vibráciách*. ISSN 1801-9064, 2016, issue 25(březen), p. 66–72.
- ČULÍK, M., DANIHELOVÁ, A., ONDREJKA V., ALÁČ, P. 2020. Sound absorption of board construction materials used in wooden buildings: Zvuková pohltivosť doskových stavebných materiálov používaných v drevostavbách. In *Akustika: odborný časopis o akustice a vibráciách*. 2020 issue 37, p. 52–58.
- DARULA, R. 2014. Let’s try to find the sound of silence. In *Material - Acoustics - Place 2014 : proceedings of the 9th International Conference : September 12-14, 2014, Zvolen – Slovakia*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2014. ISBN 978-80-228-2258-9, p. 25-31.

GRAY R. : *Inside the quietest place on Earth* [online]. 2017. BBC [cit. 2021-10-17]. Available on internet: <<https://www.bbc.com/future/article/20170526-inside-the-quietest-place-on-earth>>

HEDLIN, M. : *The sound of silence*. [online]. 2006. PhysicsWorld.com, USA [cit. 2021-09-10]. Available on internet: <<https://physicsworld.com/a/the-sound-of-silence/>>

KIRSTE, I., et al. 2015. Is silence golden? Effects of auditory stimuli and their absence on adult hippocampal neurogenesis. In *Brain Struct Funct*. ISSN 1863-2653. vol. 220, issue 2, p. 1221–1228.

KORINOK, P. : *I am Planet – Zaznamy ticha – Svatojanskou dolinou*. 2021. Deadred records, SK.

MERRIAM WEBSTER : *Dictionary – Silence* [online]. 2021. Merriam-Webster, USA. [cit. 2021-09-10]. Available on internet: <<http://www.merriam-webster.com/dictionary/silence>>

MONTGOMERY, E. : *John Cage's 4'33" Performed on a Refrigerator-(with uninvited guest: Nimbu)* [online]. 2013. YouTube [cit. 2021-09-10]. Available on internet: <<https://www.youtube.com/watch?v=Gjj9VBcLQJ8>>

RADUN, J., et al. 2021. Speech is special: The stress effects of speech, noise, and silence during tasks requiring concentration. In *Indoor air*. ISSN 1600-0668, 2021, vol.31, issue 1, p 264–274.

SUITS, B.H. : *Frequencies for equal-tempered scale, A4 = 440 Hz*. [online] MIT, USA. [cit. 2021-09-10]. Available on internet: <<https://pages.mtu.edu/~suits/notefreqs.html>>

Summary

Let's try to find the sound of silence – part 2. The article returns back to the question rose in 2014 and continues in a pursue of the search for the sound of silence. This time an FFT analysis of the silence in John Cage's 4:33 as well as I Am Planet's song "Svatojanskou dolinou" was analysed together with a re-analysis of the recordings done at the Atlantic ocean and in the forest. It has been found that the low frequency sounds are always present in what is perceived as silence. The content of this background sounds which is always present and fills up the 'silence' is either of low frequency harmonic or broadband nature, depending where the silence is measured, i.e. the sound of silence is 'site specific'.

Keywords

Silence; Music; FFT analysis; Low frequency; Background noise.

Contact Address

Radoslav Darula
Department of Materials and Production
Aalborg University
Fibigerstraede 16
DK-9220 Aalborg East, Denmark
dra@m-tech.aau.dk
<http://vibroacoustics.m-tech.aau.dk>

PREDIKCIA KROKOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI MEDZI MIESTNOSŤAMI V ŠTÁDIU PROJEKTOVEJ PRÍPRAVY BUDOV NA BÝVANIE

Richard Drahoš, Milan Drahoš

1 Úvod

Deliace horizontálne a vertikálne konštrukcie medzi miestnosťami v budovách (stavbách) tvoria stavebné prvky. Akustické (zvukovoizolačné) vlastností horizontálnych stavebných prvkov, pri ich nárazovom vybudení, vyjadruje kroková nepriezvučnosť. Kroková nepriezvučnosť je schopnosť stavebných prvkov prenášať zvuk z vybudeného stavebného prvku v miestnosti zdroja nárazu, priamym prenosom a bočným (nepriamym) prenosom, a vyžarovať ju do miestnosti príjmu. Zdrojom nárazu môže byť pád alebo náraz predmetu, chôdza alebo dupot a to v priamom kontakte s deliacim horizontálnym stavebným prvkom.

Priamy prenos (priama prenosová cesta) je spôsobený nárazovým vybudením a vyžiarovaním zvuku horizontálnym stavebným prvkom do miestnosti príjmu. Bočná prenos (bočná prenosová cesta) je prenos zvuku z vybudeného prvku v miestnosti zdroja do miestnosti príjmu cez prenosové (vibračné, konštrukčné) cesty, napr. stropom, podlahou a stenami.

Prenos zvuku z vybudeného stavebného cez priamu prenosovú cestu a bočné prenosové cesty je formou akustických vibrácií a zvuk v prijímacej miestnosti je posudzovaný ako krokový zvuk. Predpokladá sa, že prenos zvuku každou z týchto ciest sa môže považovať za nezávislý, preto veličina vyjadrujúca krokovú nepriezvučnosť sa získa súčtom príspevkov prenášaných jednotlivými cestami.

Krokovú nepriezvučnosť medzi miestnosťami nad sebou alebo vedľa seba podľa STN EN ISO 16283-2 [1] vyjadrujú dve veličiny, medzi ktorými existuje vzťah. Z hodnôt týchto veličín sa postupom uvedeným v STN EN ISO 717-2 [2] môžu získať hodnoty jednočíselných veličín na predikciu (vyhodnotenie) akustických vlastností stavebných prvkov alebo budov.

Požiadavky na krokovú nepriezvučnosť horizontálnych (stropných) konštrukcií v budovách na bývanie sú v STN 73 0532 [3] vyjadrené jednočíselnými hodnotami dvoch veličín krokovej nepriezvučnosti.

V štádiu projektovej prípravy budov (stavieb) na bývanie, napr. pre územné alebo stavebné konanie, predikcia hodnôt veličín krokovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami, je predovšetkým na základe laboratórnych údajov stavebných prvkov alebo vypočítaných hodnôt veličín, ktoré charakterizujú priamy prenos a bočný (nepriamy) prenos príslušnými stavebnými prvkami podľa teoreticky odvodených vzťahov prenosu (šírenia) krokového zvuku.

Na predikciu hodnôt veličín krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií tvorených stavebnými prvkami sú v STN EN ISO 12354-2 [4] uvedené dva modely - podrobný model a zjednodušený model.

2 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku

Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku sú vstupnými údajmi k predikcii akustických (zvukoizolačných) vlastností budovy (stavby). Hodnoty akustických veličín stavebných prvkov sa stanovujú v tretinooktávových pásmach od 100 Hz do 3 125 Hz alebo v oktávových pásmach minimálne od 125 Hz do 2 000 Hz. Z týchto veličín sa získajú jednočíselné veličiny stavebných prvkov postupom uvedeným v STN EN ISO 717-2 [2].

Pri výpočte akustických vlastností stavebného prvku sú potrebné aj ďalšie údaje o stavebnom prvku, napr. materiál, plošná hmotnosť, dynamická tuhosť, typ stavebného prvku a pod.

Akustické vlastnosti stavebného prvku vyjadrujú tieto veličiny:

- a) **normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku** L_n (k pohltivej ploche) je hladina akustického tlaku krokového zvuku vzťahovaná k referenčnej ekvivalentnej pohltivej ploche v miestnosti príjmu (určená podľa STN ISO 10140-3 [5]), daná vzťahom:

$$L_n = L_i + \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

kde L_i je hladina akustického tlaku krokového zvuku zmeraná v miestnosti príjmu pri použití normalizovaného zdroja krokového zvuku podľa STN EN ISO 16286-2 [1]) v dB; A je zmeraná ekvivalentná plocha v miestnosti príjmu v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná pohltivá plocha v m^2 (pre byty $A_0 = 10 \text{ m}^2$).

- b) **znížená hladina akustického tlaku krokového zvuku** ΔL vyplývajúca z inštalácie skúšanej podlahy (určená podľa STN EN ISO 10140-3 [5]) je daná vzťahom:

$$\Delta L = (L_{n,0} - L_n) \text{ dB} \quad (2)$$

kde $L_{n,0}$ normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku bez podlahy v dB, L_n normovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku s inštalovanou podlahou v dB.

- c) **znížená hladina akustického tlaku krokového zvuku** ΔL_d (znížená pridanou vrstvou na prijímacej strane deliaceho prvku – stropnej konštrukcie (určená podľa STN EN ISO 10140 [6]).

- d) **normovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku** $L_{n,f}$ (k pohltivej ploche) pre bočný prenos (určená podľa STN EN ISO 10848-1 [7]) je daná vzťahom:

$$L_{n,f} = L_i + \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

Poznámky:

1) Veličina $L_{n,f}$ je hladina priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku v miestnosti príjmu zvuku, vyvolaná činnosťou normalizovaného zdroja krokového zvuku na rôznych miestach stavebného prvku v miestnosti zdroja krokového zvuku, normalizovaná k referenčnej ekvivalentnej ploche $A_0 = 10 \text{ m}^2$ v miestnosti príjmu.

2) Veličina $L_{n,f}$ sa používa, keď je prenos zvuku daný iba jednou bočnou cestou (dominantná prenosová cesta f) a veličina $L_{n,f,ij}$ sa používa, keď sa uvažuje iba jedna konkrétna prenosová cesta (ij) z viacerých prenosových ciest (napr. prenos konštrukciou na stykoch troch alebo štyroch spojených stavebných prvkov).

- e) **nepriezvučnosť** R je desaťnásobok dekadického logaritmu pomeru akustického výkonu W_1 dopadajúceho na skúšanú vzorku stavebného prvku k akustickému výkonu W_2 preneseného touto vzorkou (určená podľa STN ISO 10140-2 [8]) je daná vzťahom:

$$R = \left(10 \log \frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

- f) **zlepšenie nepriezvučnosti** ΔR je rozdiel nepriezvučnosti základného stavebného prvku s pridanou vrstvou (plávajúcou podlahou, stropným podhl'adom) a základného stavebného prvku bez tejto vrstvy (pre priamy prenos určená v prílohe G, STN EN ISO 10140-1 [10]).

- g) **styková nepriezvučnosť vibrácií** K_{ij} sa vzťahuje k prenosu vibrácií stykmi medzi stavebnými prvkami (i) a (j), stanovuje sa normalizovaným rozdielom hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku k dĺžke styku a k ekvivalentnej pohltivej dĺžke oboch prvkov (určená podľa STN EN ISO 10848-1 [7] a STN EN ISO 10848-4 [11]) je daná vzťahom:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

kde $D_{v,ij}$ je rozdiel hladín medzi prvkami (i) a (j), ak je vybudovaný prvok (i) v dB; $D_{v,ji}$ je rozdiel hladín medzi prvkami (j) a (i), ak je vybudovaný prvok (j) v dB; l_{ij} je spoločná dĺžka styku medzi prvkami (j) a (i) v m; $S_{n,i}$ je plocha prvku (i), cez ktorú je rýchlosť priemerovaná v m²; $S_{n,j}$ je plocha prvku (j), cez ktorú je rýchlosť priemerovaná v m²; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1$ m).

Ekvivalentná pohltivá dĺžka (dĺžka fiktívneho pohltivého okraja styku za predpokladu jeho kritickej frekvencie 1000 Hz, vykazujúca stratu ako celkové straty prvku) je daná vzťahom:

$$a = \frac{2,2 \pi^2 S}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad (6)$$

kde T_s je čas doznievania konštrukcie prvku (i) alebo (j) v sekundách; S je plocha prvku (i) alebo (j) v m²; f je stredná frekvencia pásma v Hz; f_{ref} je referenčná frekvencia ($f_{\text{ref}} = 1\ 000$ Hz); c_0 je rýchlosť zvuku vo vzduchu v m.s⁻¹.

Poznámka: Stavebné prvky (i) v miestnosti zdroja sú označené písmenom F pre bočný prvok a písmenom D pre deliaci prvok. V miestnosti príjmu sú stavebné prvky (j) označené písmenom f pre bočný prvok a písmenom d pre deliaci prvok.

- h) **normalizovaný rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií** $\bar{D}_{v,ij,n}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (i) a (j), priemerovaný cez budenie z (i) a budení z (j), a normalizovaný k dĺžke styku a meracím plochám oboch prvkov (určená podľa STN EN ISO 10848-1 [7] a STN EN ISO 10848-4 [11]), daný vzťahom:

$$\bar{D}_{v,ij,n} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_{m,i} S_{m,j}}} \right) \quad (7)$$

kde $D_{v,ij}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (i) a (j), ak je budovaný prvok (i) v dB; $D_{v,ji}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (j) a (i), ak je budovaný prvok (j) v dB; l_{ij} je spoločná dĺžka styku medzi prvkami (j) a (i) v m; $S_{m,i}$ je plocha prvku (i), cez ktorú je rýchlosť vibrácií priemerovaná v m²; $S_{m,j}$ je plocha prvku (j), cez ktorú je rýchlosť vibrácií priemerovaná v m²; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1$ m).

- i) **rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti v styku** $\bar{D}_{v,ij}$ je priemer rozdielu hladín rýchlosti vibrácií v styku prvku (i) s prvkom (j) a prvku (j) s prvkom (i), daný vzťahom:

$$\bar{D}_{v,ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad (8)$$

Stavebné prvky podľa STN EN ISO 12354-2 [3] sa delia na prvky typu A a B. Stavebný prvok typu A je konštrukcia homogénneho prvku s časom doznievania T_s , ktorý je určený predovšetkým spojenými prvkami (aspoň do tretinooktávového pásma 1000 Hz) a poklesom hladiny vibrácií o menej ako 6 dB cez prvok v smere kolmom na styk prvkov (aspoň do tretinooktávového pásma 1 000 Hz), napr. monolitický betón, tehly, tvárnice a pod.

Stavebným prvkom B je každý stavebný prvok, ktorý nie je prvkom A, napr. sadrokartónové obklady a drevené obklady na drevených alebo kovových rámochoch.

3 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti budov

Krokovú nepriezvučnosť medzi miestnosťami v budovách podľa STN EN ISO 16283-2 [1] vyjadrujú dve veličiny medzi ktorými existuje vzťah a ich hodnoty sa zisťujú v tretinovo-oktávových alebo v oktávových pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti (100 Hz až 3 125 Hz). Z hodnôt týchto veličín sa môžu stanoviť jednočíselné veličiny krokovej nepriezvučnosti postupom uvedeným v STN EN ISO 717-2 [2].

Akustické vlastnosti medzi miestnosťami v budove vyjadrujú veličiny:

- a) **normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku** L'_n (k pohltivej ploche) je hladina akustického tlaku krokového zvuku zodpovedajúca referenčnej ekvivalentnej pohltivej ploche v miestnosti príjmu, daná vzťahom:

$$L'_n = L_i + \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

kde L_i je hladina akustického tlaku krokového zvuku zameraná v miestnosti príjmu v dB; A je zameraná ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná pohltivá plocha v m^2 (pre byty $A_0 = 10 \text{ m}^2$).

- b) **normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku** $L'_{n,T}$ (k času dozvuku) je hladina akustického tlaku krokového zvuku zodpovedajúca referenčnej hodnote času dozvuku v miestnosti príjmu, daná vzťahom:

$$L'_{n,T} = L_i + \left(10 \log \frac{T}{T_0} \right) \text{ dB} \quad (10)$$

kde L_i je hladina akustického tlaku krokového zvuku zameraná v miestnosti príjmu v dB; T je čas dozvuku v mieste príjmu v sekundách; T_0 je referenčný čas dozvuku v sekundách (pre byty $T_0 = 0,5 \text{ s}$).

Medzi týmito veličinami platí vzťah:

$$L'_{n,T} = L'_n - \left(10 \log \frac{C_{\text{sab}} V}{A_0 T_0} \right) \text{ dB} \quad (11)$$

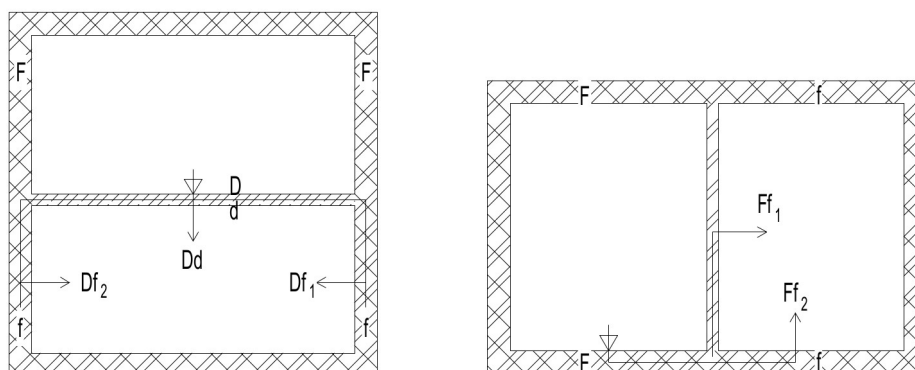
kde C_{sab} je Sabinova konštanta v s.m^{-1} ($C_{\text{sab}} = 0,16 \text{ s.m}^{-1}$); V je objem miestnosti príjmu v m^3 .

4 Cesty prenosu zvuku medzi miestnosťami

Celkový akustický výkon vyžiarený do miestnosti príjmu je spôsobený zvukom vyžarovaným každým stavebným prvkom v tejto miestnosti. Zvuk vyžarovaný každým zo stavebných prvkov je spôsobený zvukom prenesením do tohto prvku nárazom na stavebný prvok v miestnosti zdroja zvuku. Jednotlivé prenosové cesty sú určené deliacim stavebným prvkom (i) v miestnosti zdroja zvuku, a vyžarujúcimi stavebnými prvkami (j) v miestnosti príjmu. Deliaci stavebný prvok (i) v miestnosti zdroja je označený písmenom F pre bočný prvok a písmenom D pre deliaci prvok. V miestnosti príjmu sú stavebné prvky (j) označené písmenom f pre bočný prvok a písmenom d pre deliaci prvok.

Určenie ciest prenosu zvuku (ij) medzi miestnosťami nad sebou je na Obrázku 1a a medzi miestnosťami vedľa seba je na Obrázku 1b. Na Obrázku 1a priama (direct) cesta je označená

Dd a bočné (flanking) cesty Df₁ a Df₂. a na Obrázku 1b bočné (flanking) cesty sú označené Ff₁ a Ff₂.



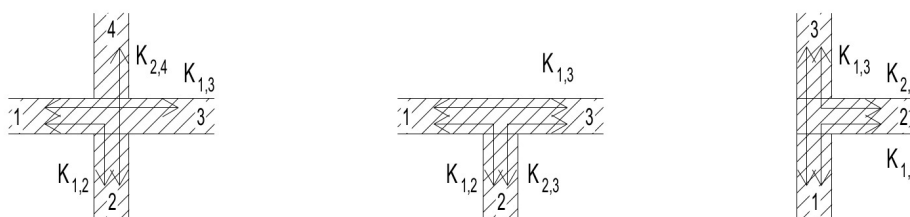
Obrázok 1.

a: Cesty prenosu zvuku medzi dvoma miestnosťami nad sebou.
b: Cesty prenosu zvuku medzi dvoma miestnosťami vedľa seba.

5 Prenos akustických vibrácií cez styky stavebných prvkov

Prenos akustických vibrácií cez styky stavebných prvkov je vyjadrený stykovou nepriezvučnosťou vibrácií K_{ij} . Získanie údajov o K_{ij} je buď z empirických údajov odvodených z normalizovaných laboratórnych meraní alebo z teoretických vzťahov, prípadne z údajov o simulácii.

Styková nepriezvučnosť vibrácií K_{ij} môže sa stanoviť aj v závislosti na plošnej hmotnosti m' stavebných prvkov spojených v styku (tvoriacich styk). Prítom je nutné rozlišovať typ styku tvaru kríža (väčšinou vo vnútri budovy) a typ styku tvaru T (u obvodového plášťa budovy). Na Obrázku 2a je tvar tupého krížového styku a na Obrázku 2b je tvar tupého T-styku [12].



Obrázok 2.

Obrázok 2a: Tupý krížový styk stavebných prvkov.
Obrázok 2b: Tupý T-styk stavebných prvkov.

Pri výpočte stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{ij} , napr. tupého krížového styku sa predpokladá, že protiľahlé dvojice stavebných prvkov sú v rovnakej rovine (1 - 3 a 2 - 4), majú rovnakú plošnú hmotnosť a vzájomne sú pevné spojené. Vzťahy pre výpočet K_{ij} sú dané ako funkcia veličiny M danej vzťahom:

$$M = \left(\log \frac{m'_1}{m'_i} \right) \quad (12)$$

kde m'_i je plošná hmotnosť prvku (i) v ceste prenosu ij , kde $ij = Df$ a Ff v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; m'_\perp je plošná hmotnosť druhého, kolmého prvku (\perp) tvoriaceho styk v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Pre homogénne stropné konštrukcie sa styková nepriezvučnosť vibrácií K_{ij} podľa [12] vypočíta pre:

- tupý krížový styk (Obrázok 2a) podľa vzťahu:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (13)$$

$$K_{12} = K_{23} = 8,7 + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (14)$$

$$K_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (15)$$

- tupý T-styk (Obrázok 2b) podľa vzťahu:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (16)$$

$$K_{12} = K_{23} = 5,7 + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (17)$$

Poznámka: V prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [11] je uvedené grafické zobrazenie vzťahov (13, 14) pre tupý krížový styk a vzťahov (16, 17) pre tupý T-styk.

6 Stavebné prvky s pridanou vrstvou

Pridanú vrstvu na horizontálnych stavebných prvkoch (stropných konštrukciách) tvoria podlahy, ktoré sú dôležitým konštrukčným stavebným prvkom a spoločne výrazne ovplyvňujú krokovú nepriezvučnosť. Konštrukcia podlahy zahŕňa všetky vrstvy uložené na stropnú konštrukciu a spolu so stropnou konštrukciou predstavuje dvojprvkovú (dvojvrstvovú) konštrukciu [12].

Jedným prvkom je nášlapná vrstva, roznášacia vrstva a vrstva zvukovej (tepelnej) izolácie, a druhým prvkom je nosná konštrukcia stropu napr. železobetónová doska.

6.1 Konštrukcia podláh

Konštrukcie podláh sa podľa akustických vlastností a konštrukčného zloženia vrstiev delia na:

- a) ťažké plávajúce podlahy s hrúbkou $h \geq 50$ mm, $m' \geq 75$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,
- b) ľahké plávajúce podlahy s hrúbkou 25 mm $\leq h \leq 40$ mm, $m' \geq 15$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,
- c) povlakové podlahy z PVC, gummy alebo textílií (nulové podlahy) s hrúbkou 5 mm $\leq h \leq 25$ mm, $m' \geq 2,5$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,
- d) izolačné povlakové podlahy z PVC a pružnej izolačnej podložky (nulové izolačné podlahy).

Ťažkú plávajúcu podlahu tvorí:

1. nášlapná vrstva (laminátové parkety, drevené vlysy, keramická dlažba a pod.),
2. roznášacia vrstva (betónová mazanina, anhydritový poter s $h_{\min} = 40$ až 50 mm oddelená od zvukovoizolačnej podložky hydroizoláciou,
3. pružná zvukovoizolačná podložka s požadovanou dynamickou tuhosťou $s' < 30$ MN.m⁻³ z minerálnych alebo sklenených vlákien, pružný polystyrén, oddeľujúca hornú vrstvu od stropnej konštrukcie a zvislých stien.

6.2 Optimalizácia návrhu vrstiev podlahy

Na optimalizáciu návrhu vrstiev podlahy na nosnú stropnú konštrukciu je vhodné vychádzať z tzv. zníženej váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $\Delta L_{n,w}$, ktorá charakterizuje zlepšenie krokovej nepriezvučnosti len vplyvom podlahy [12] a je vyjadrená vzťahom:

$$\Delta L_{n,w} = (L_{n,eq,0,w} - L_{n,w}) \quad \text{dB} \quad (18)$$

kde $L_{n,eq,0,w}$ je vypočítaná vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku nosnej stropnej konštrukcie bez podlahy; $L_{n,w}$ je vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku nosnej stropnej konštrukcie s podlahou, získaná meraním v akustickom laboratóriu.

7 Predikcia krokovej nepriezvučnosti podrobným modelom

Podrobný model vyjadruje akustické vlastnosti budov vo frekvenčných pásmach a je založený na akustických údajoch stavebných prvkov minimálne v tretinovo-oktávových pásmach od 100 Hz až 3 125 Hz alebo minimálne v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz. Z údajov vo frekvenčných pásmach, tzn. spektrálneho priebehu veličín krokovej nepriezvučnosti L_n alebo L'_n sa môže získať jednočíselné vyhodnotenie akustických vlastností budov.

Pri aplikácii podrobného modelu, prenos krokového zvuku pre každú z prenosových ciest môže byť stanovený z týchto veličín:

- a) normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku stropnej konštrukcie – L_n ,
Poznámka: Informácie o normalizovanej hladine krokového zvuku pre bežné homogénne stropné konštrukcie sú uvedené v prílohe B1, STN EN ISO 12354-2 [3].
- b) znížená hladina akustického tlaku krokového zvuku podlahou – ΔL ,
Poznámka: Informácie o znížení hladiny akustického tlaku krokového zvuku pre bežné podlahy sú uvedené v prílohe C1, STN EN ISO 12354-2 [3].
- c) znížená hladina akustického tlaku krokového zvuku prídavnými vrstvami k deliacemu prvku i na prijímacej strane – ΔL_d ,
- d) nepriezvučnosť budeného stavebného prvku i (stropnej konštrukcie) – R_i ,
Poznámka: Informácie o nepriezvučnosti homogénnych stavebných prvkov sú uvedené v prílohe B, STN EN ISO 12354-1 [9].
- e) nepriezvučnosť pre priamy prenos krokového zvuku bočného stavebného prvku (j) v miestnosti príjmu – R_j ,
- f) zlepšenie nepriezvučnosti pomocou vnútorných vrstiev bočného stavebného prvku (j) v mieste príjmu – $\Delta R'_j$,
Poznámka: Informácie o stykovej nepriezvučnosti vibrácií a o normalizovanom rozdiel hladín pre bočný prenos pre bežné styky stavebných prvkov sú uvedené v prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [9].
- g) čas doznievania konštrukcie prvku, zmeraná v laboratóriu – $T_{s,lab}$,
- h) styková nepriezvučnosť vibrácií pre každú prenosovú cestu medzi prvkom (i) a prvkom (j) – K_{ij} ,
- i) normalizovaný rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií medzi prvkom (i) a (j) – $D_{v,ij,n}$,

- j) normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku pre bočný prenos – $L_{n,f}$,
- k) plochy deliaceho prvku (i) – S_i ,
- l) plochy bočného prvku (j) v miestnosti príjmu – S_j ,
- m) spoločná dĺžka styku medzi prvkom (i) a bočným prvkom (j) – l_{ij} .

Poznámka: Nepriezvučnosť R navrhovaných stavebných prvkoch sa má pre každú prenosovú cestu vzťahovať iba k rezonančnému prenosu. Nad kritickou frekvenciou je vhodnejšie použiť laboratórne hodnoty nepriezvučnosti a pod kritickou frekvenciou musí byť použitá korekcia, zvlášť pre stavebné prvky s vysokou kritickou frekvenciou podľa prílohy B, STN ISO EN 12354-1[9].

7.1 Prevod vstupných údajov na hodnoty in situ

Akustické údaje pre stavebné prvky (deliace a bočné stavebné prvky, prídavné vrstvy, styky) pred vlastným stanovením prenosu krokového zvuku v budovách musia byť prevedené na hodnoty „in situ“.

Pre prídavné a krycie vrstvy sa môžu použiť laboratórne hodnoty, ako aproximačné hodnoty in situ, pričom platí:

$$\Delta R_{\text{situ}} = \Delta R, \quad \Delta L_{\text{situ}} = \Delta L, \quad \Delta L_{Dd,\text{situ}} = \Delta L_{Dd}.$$

Poznámka: Ak nie sú dostupné hodnoverné údaje o znížení ΔL_{Dd} stropnými podhl'admi na prijímacej strane stropnej konštrukcie, zlepšenie ΔR pre priamy prenos vzduchom môže pri aproximácii viesť k chybám.

7.1.1 Stavebné prvky typu A

Pre stavebné prvky typu A, hodnoty in situ normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,\text{situ}}$ a nepriezvučnosti R_{situ} sa vypočítajú podľa vzťahov:

$$L_{n,\text{situ}} = L_n + \left(10 \log \frac{T_{s,\text{situ}}}{T_{s,\text{lab}}} \right) \text{ dB} \quad (19)$$

$$R_{\text{situ}} = R - \left(10 \log \frac{T_{s,\text{situ}}}{T_{s,\text{lab}}} \right) \text{ dB} \quad (20)$$

kde $T_{s,\text{situ}}$ je čas doznievania konštrukcie (homogénneho) prvku v in situ, v sekundách; $T_{s,\text{lab}}$ je čas doznievania konštrukcie každého prvku v laboratórnych podmienkach v sekundách.

Poznámka: Pre prvé priblíženie sa dá predpokladať, že $L_{n,\text{situ}} = L_n$ a $R_{\text{situ}} = R$.

Pre styk medzi prvkami typu A je prenos in situ charakterizovaný rozdielom hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku $\bar{D}_{v,ij,\text{situ}}$ podľa vzťahu:

$$\bar{D}_{v,ij,\text{situ}} = K_{ij} - \left(10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,\text{situ}} a_{j,\text{situ}}}} \right) \text{ dB} \quad (21)$$

kde

$$a_{i,\text{situ}} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,\text{situ}}} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad (22)$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}}$$

kde $a_{i,situ}$ je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (i) in situ v m; $a_{j,situ}$ je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (j) in situ v m; f je stredná frekvencia pásma v Hz; f_{ref} je referenčná frekvencia ($f_{ref} = 1\ 000$ Hz); c_0 je rýchlosť zvuku vo vzduchu v m/s; l_{ji} je spoločná dĺžka styku medzi prvkom (i) a prvkom (j) v m; S_i je plocha prvku (i) v m²; S_j je plocha prvku (j) v m²; $T_{s,i,situ}$ je čas doznievania konštrukcie prvku (i) in situ v sekundách; $T_{s,j,situ}$ je čas doznievania konštrukcie prvku (j) in situ v sekundách; K_{ij} je daná vzťahom (6).

7.1.2 Stavebné prvky typu B

Pre stavebné prvky typu B musí byť čas doznievania konštrukcie prvku $T_{s,situ}$ považovaný za rovný $T_{s,lab}$, čo vedie ku korekčnému členu 0 dB, tzn. $L_{n,situ} = L_n$ a $R_{n,situ} = R_n$.

Pre styky medzi prvkami typu B vychádza rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku in situ $\bar{D}_{v,ij,situ}$ z rozdielu hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku s referenčnou dĺžkou $l_0 = 1$ m podľa vzťahu:

$$\bar{D}_{v,ij,n} = \bar{D}_{v,ij,n} - \left(10 \log \frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_{i,situ} S_{j,situ}}} \right) \quad (23)$$

V prípade styku zloženého z oboch prvkov (napr. stena typu B a stropná konštrukcia typu A, môže byť vzťah (24) použitý s priblížením, pričom ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (i) typu B $a_{i,situ}$ je úmerná ploche prvku podľa vzťahu:

$$a_{i,situ} = S_{i,situ} / l_0 \quad (24)$$

7.2 Určenie priameho a bočného prenosu in situ

7.2.1 Priamy prenos in situ

Normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná priamym prenosom $L_{n,Dd}$ je stanovená z upravených vstupných údajov podľa vzťahu:

$$L_{n,d} = (L_{n,situ} - \Delta L_{situ} - \Delta L_{n,situ}) \text{ dB} \quad (25)$$

7.2.2 Bočný prenos in situ

Pri bočnom prenosu krokového zvuku sa musia zohľadniť stavebné prvky typu A a typu B.

Pre stavebné prvky typu A, normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočným prenosom $L_{n,ij}$ z deliaceho prvku (i) – stropnej konštrukcie na bočný prvok (j) je stanovená z upravených vstupných údajov a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$L_{n,ij} = L_{n,situ} - \Delta L_{situ} + \frac{R_{i,situ} - R_{j,situ}}{2} - \Delta R_{j,situ} - \bar{D}_{v,ij,situ} - \left(10 \log \sqrt{\frac{S_i}{S_j}} \right) \text{ dB} \quad (26)$$

Poznámka: Pre miestnosti vedľa seba napr. pre zdvojené podlahy, dominantný prenos je cestou Ff_2 (styk má malý vplyv a preto je možné príspevok z cesty Ff_1 zanedbať).

Pre stavebné prvky typu B, môže byť bočný prenos vyjadrený buď normalizovanou hladinou akustického tlaku krokového zvuku pre bočný prenos $D_{n,f,ij}$ alebo normalizovaným rozdielom hladín smerovej priemerovanej rýchlosti vibrácií v styku $\bar{D}_{v,ij,n}$.

Normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočným prenosom $L_{n,ij}$ môže byť prevedená na in situ postupom uvedenom v prílohe D, STN EN ISO 12354-2 [4] a vypočítaná sa podľa vzťahu:

$$L_{n,ij} = L_{n,f,ij} - \left(10 \log \frac{S_i l_{lab}}{S_i l_{ij,lab}} \right) \text{ dB} \quad (27)$$

Normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočným prenosom $L_{n,ij}$ môže byť odvodená aj z vlastností prvkov (i) a (j) kombináciou vzťahov (28) a (25) a vypočítaná sa podľa vzťahu:

$$L_{n,ij} = L_{n,ji} - \Delta L_i + \frac{R_i - R_j}{2} - \Delta R_j - \bar{D}_{v,ij,n} - \left(10 \log \sqrt{\frac{S_i}{l_0 l_{ij}}} \right) \text{ dB} \quad (28)$$

7.3 Celkový prenos zvuku in situ

Celkový prenos zvuku medzi miestnosťami nad sebou, vyjadruje normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku L'_n v miestnosti príjmu krokového zvuku a vypočítaná sa podľa vzťahu:

$$L'_n = \left[10 \log \left(10^{L_{n,Dd}/10} + \sum_j^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \right] \text{ dB} \quad (29)$$

kde $L_{n,Dd}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná priamou cestou (Dd) v dB; $L_{n,ij}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočnými cestami (Df) v dB; n je počet bočných (vyžarujúcich) stavebných (j) prvkov.

Celkový prenos zvuku medzi miestnosťami vedľa seba, vyjadruje normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku L'_n v miestnosti príjmu krokového zvuku a vypočítaná sa podľa vzťahu:

$$L'_n = \left(10 \log \sum_j^n 10^{L_{n,ij}/10} \right) \text{ dB} \quad (30)$$

kde $L_{n,ij}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočnými cestami (Ff), v dB; n je počet bočných (vyžarujúcich) stavebných (j) prvkov.

Poznámka: Pre miestnosti nad sebou sa obvykle uvažuje počet bočných (j) prvkov $n = 4$ a pre miestnosti vedľa seba $n = 2$.

Vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ s uvedením adaptačného činiteľa spektra (C_1) sa stanoví podľa STN EN ISO 717-2 [2].

7.4 Podmienky požitia predikcie

- Podrobný model predikcie krokovkej nepriezvučnosti sa môže použiť iba pre kombináciu prvkov, o ktorých je známa styková nepriezvučnosť vibrácií alebo normovaný rozdiel hladín vibrácií, alebo ich je možné odvodiť zo známych hodnôt.
- Základné stavebné prvky majú približne rovnaké vyžarovacie vlastností pre obidve strany.
- Príspevok sekundárnych ciest prenosu zahrňujúcich viac ako jeden styk je zanedbateľný.
- Zníženie hladiny akustického tlaku krokového zvuku ΔL zmerané u ťažkej podlahy podľa STN EN ISO 10140-3 [6] sa nemôže použiť pre drevené stropné konštrukcie alebo iné kompozitné stropné konštrukcie.

7.5 Neistota predikcie

Neistota predikcie akustických vlastností budov a stavebných prvkov pri aplikácii podrobného modelu podľa STN EN ISO 12354-2 [4] závisí od presnosti vstupných údajov, typov stavebných prvkov a stykov, geometrii situácie v budove (stavbe) a odbornosti spracovateľa v oblasti stavebnej akustiky. Z týchto dôvodov nie je možné obecné stanoviť neistotu predikcie veličín krokovej nepriezvučnosti.

Ak v návrhu budov na bývanie, sú aplikované homogénne stavebné prvky (betónové stropy a steny, murované steny, tvárnice pod.), predikcia jednočíselnej hodnoty celkovej (výslednej) váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ v miestnosti príjmu:

- a) pri priamom prenose krokového zvuku je bez systémovej chyby so smerodajnou odchýlkou 2 dB,
- b) pri bočnom prenose sa systematická chyba predikcie mení od 0 dB do 5 dB so smerodajnou odchýlkou 3 dB. Systematická chyba je hlavne spôsobená zanedbaním času doznievania konštrukcie prvkov.

8 Predikcia krokovej nepriezvučnosti zjednodušeným modelom

Zjednodušeným modelom sa stanovujú akustické vlastnosti budov jednočíselným vyhodnotením, ktoré je založené na jednočíselných údajoch o akustických vlastnostiach navrhovaných stavebných prvkov a to v obmedzenom frekvenčnom rozsahu od 100 Hz do 3 125 Hz.

Týmto modelom sa predikuje vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ v miestnosti príjmu na základe vážených normalizovaných hladín akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,w}$ stavebných prvkov, stanovených buď z laboratórnych meraní alebo zistených výpočtom, alebo meraním stropných konštrukcií (prvkov) v tretinovo-oktávových pásmach podľa STN EN ISO 10140-3 [5] a následne jednočíselne vyjadrené postupom uvedenom v STN EN ISO 717-2 [2] aj s adaptačným činiteľom ($L_{n,w} + C_1$).

8.1 Vstupné údaje

Pri aplikácii zjednodušeného modelu, vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,w}$ pre každú prenosovú cestu je predikovaná z týchto vstupných údajov:

- a) ekvivalentnej váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku – $L_{n,eq,0,w}$ základnej stropnej dosky,

Poznámka: Informácie o hodnotách $L_{n,eq,0,w}$ pre bežné homogénne stropy (dosky) sú uvedené v prílohe B.2 a B.3, STN EN ISO 12354-2 [4].

- b) váženej zníženej hladiny akustického tlaku krokového zvuku podlahou – ΔL_w ,

Poznámka: Informácie o hodnotách ΔL_w pre bežné plávajúce podlahy sú uvedené v prílohe C.2, STN EN ISO 12354-2 [4].

- c) váženej zníženej hladiny akustického tlaku krokového zvuku podlahou – $\Delta L_{d,w}$,

Poznámka: Pri prítomnosti podlahy a obloženia na strane príjmu deliaceho prvku, musí byť použitá polovica hodnoty $\Delta L_{d,w}$.

- d) váženej nepriezvučnosti homogénneho stavebného prvku – R_w ,

Poznámka: Informácia o R_w bežných homogénnych stavebných prvkov sú uvedené v prílohe B, STN EN ISO 12354-1 [9].

- e) zlepšenia váženej nepriezvučnosti – ΔR_w ,

Poznámka: Informácie o $\Delta R_{j,w}$ bežných obložení sú uvedené v prílohe D, STN EN ISO 12354-1 [9]. Pri prítomnosti podlahy a obloženia na strane príjmu deliaceho prvku, musí byť použitá polovica hodnoty ΔR_w .

f) stykovej nepriezvučnosti vibrácií – K_{ij} ,

Poznámka: Informácia o K_{ij} pre bežné homogénne konštrukcie sú uvedené v prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [9].

g) váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku pre bočný prenos – $L_{n,f,ij,w}$.

Poznámka: Informácie o $L_{n,f,ij,w}$ v prílohe D, STN EN ISO 12354-2 [4].

8.2 Priamy prenos

Pri priamom prenose, vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,Dd,w}$ je daná vzťahom:

$$L_{n,Dd,w} = (L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w}) \text{ dB} \quad (31)$$

kde $L_{n,eq,0,w}$ je ekvivalentná hladina akustického tlaku krokového zvuku homogénnej (holej) stropnej konštrukcie; ΔL_w je vážené zníženie hladiny akustického tlaku krokového zvuku položenou podlahou; $\Delta L_{d,w}$ je vážené zníženie hladiny akustického tlaku krokového zvuku prídavnou vrstvou na strane príjmu deliaceho prvku (podhl'adom).

Pre homogénnu stropnú konštrukciu, ekvivalentná vážená hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,eq,0,w}$ v rozsahu plošnej hmotnosti m' od $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ do $600 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ sa môže vypočítať podľa vzťahu:

$$L_{n,eq,0,w} = 154 - \left(35 \log \frac{m'}{m'_0} \right) \text{ dB} \quad (32)$$

kde m'_0 je referenčná (vzť'azná) plošná hmotnosť $m'_0 = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

V prílohe B, STN EN ISO 12354-2 [4] sú v tabuľke B.3 znázornené stropné konštrukcie, ktoré sa chovajú ako homogénne konštrukcie a v tabuľke B.4 znázornené sú stropné konštrukcie z nosníkov a keramických tvaroviek s vrchnou vrstvou ľahkého poteru.

Pre stropné konštrukcie s dutými keramickými tvarovkami a vrchnou vrstvou ľahkého poteru, ekvivalentná vážená hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,eq,0,w}$ v rozsahu plošnej hmotnosti m' od $270 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ do $360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ sa môže vypočítať podľa vzťahu:

$$L_{n,eq,0,w} = 160 - \left(35 \log \frac{m'}{m'_0} \right) \text{ dB} \quad (33)$$

kde m'_0 je referenčná (vzť'azná) plošná hmotnosť, $m'_0 = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Väčšina stropných konštrukcií bez podlahy však nespĺňa normované požiadavky na krokovú nepriezvučnosť.

8.3 Bočný prenos

Vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,ij,w}$ vyvolaná bočným prenosom zo stropnej konštrukcie s podlahou (i) a vyžiarená bočným prvkom (j) sa vypočíta podľa vzťahu:

$$L_{n,ij,w} = (L_{n,eq,0,w} - \Delta L_w) + \frac{R_{i,w} - R_{j,w}}{2} - \Delta R_{j,w} - K_{ij} - \left(10 \log \sqrt{\frac{S_i}{l_0 l_{ij}}} \right) \text{ dB} \quad (34)$$

kde $L_{n,eq,0,w}$ je ekvivalentná hladina akustického tlaku krokového zvuku homogénnej (holej) stropnej konštrukcie; ΔL_w je vážené zníženie hladiny akustického tlaku krokového zvuku položenou podlahou; $R_{i,w}$ je vážená nepriezvučnosť stropu s podlahou (i); $R_{j,w}$ je vážená nepriezvučnosť prvku (j); K_{ij} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu (ij); $\Delta R_{j,w}$ je vážené zlepšenie nepriezvučnosti pridanou vrstvou na strane príjmu bočného prvku (j).

Pre prvky typu B musí byť pre každú izolovanú prenosovú cestu stanovená vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{ij,w}$ vyvolaná bočným prenosom z odpovedajúcej vázenej hladiny akustického tlaku $L_{n,f,ij,lab,w}$ zmeranej v laboratóriu podľa vzťahu:

$$L_{n,ij,w} = L_{n,f,ij,lab,w} + \left(10 \log \sqrt{\frac{S_{i,lab} I_{ij}}{S_{i,lab} I_{ij}}} \right) \text{ dB} \quad (35)$$

Poznámka: Pre miestnosti vedľa seba napr. pre zdvojené podlahy, dominantný prenos je cestou Ff_2 (styk má malý vplyv a preto je možné príspevok z cesty Ff_1 zanedbať).

8.4 Celkový prenos zvuku in situ

Celkový prenos zvuku pre miestnosti nad sebou, vyjadruje normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku L'_n v miestnosti príjmu krokového zvuku a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$L'_n = \left[10 \log \left(10^{L_{n,Dd}/10} + \sum_j^n 10^{L_{n,Df}/10} \right) \right] \text{ dB} \quad (36)$$

kde $L_{n,Dd}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná priamou cestou (Dd) v dB; $L_{n,Df}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočnými cestami (Df) v dB; n je počet bočných (vyžarujúcich) stavebných (j) prvkov.

Celkový prenos krokového zvuku pre miestnosti vedľa seba, vyjadruje normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku L'_n v miestnosti príjmu krokového zvuku a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$L'_n = \left(10 \log \sum_j^n 10^{L_{n,Ff}/10} \right) \text{ dB} \quad (37)$$

kde $L_{n,Ff}$ je normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku vyvolaná bočnými cestami (Ff) v dB; n je počet bočných (vyžarujúcich) stavebných (j) prvkov.

Poznámka: Pre miestnosti vedľa seba sa obvykle uvažuje počet bočných (j) prvkov $n = 2$ a pre miestnosti nad sebou sa uvažuje počet bočných (j) prvkov $n = 4$.

8.5 Neistota predikcie

Neistota predikcie akustických vlastností budov a stavebných prvkov pri aplikácii zjednodušeného modelu podľa STN EN ISO 12354-2 [3] závisí od presnosti vstupných údajov, typov stavebných prvkov a stykov, geometrii situácie v budove (stavbe) a odbornosti spracovateľa v oblasti stavebnej akustiky. Z týchto dôvodov nie je možné obecné stanoviť neistotu predikcie veličín krokovej nepriezvučnosti.

Ak v návrhu budov na bývanie, sú aplikované homogénne stavebné prvky (betónové stropy a steny, murované steny, tvárnice pod.), predikcia jednočíselnej hodnoty celkovej (výslednej) váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ v miestnosti príjmu, neistota zjednodušeného modelu vykazuje smerodajnú odchýlku 2 až 5 dB. Neistota zjednodušeného modelu môže byť stanovená podľa postupu uvedeného v prílohe K, STN EN ISO 12354-1 [9].

9 Adaptačný činiteľ spektra

Za účelom posúdenia vplyvu krokového zvuku vyvolaného chôdzou po podlahe v oblasti nízkych frekvencií je v prílohe A, STN EN ISO 717-2 [2], uvedený postup výpočtu adaptačného činiteľa spektra C_1 pre hladinu krokového zvuku, na základe výsledkov merania alebo predikcie normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,i}$, $L'_{n,i}$ alebo $L'_{nT,i}$ v tretinovo-oktávových pásmach.

Adaptačný činiteľ spektra C_1 , napr. z predikovaných hodnôt $L'_{n,i}$ sa vypočíta podľa vzťahu:

$$C_1 = \left(10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1L'_{n,i}} \right) - 15 - L'_{n,w} \quad (38)$$

kde $L'_{n,i}$ je hodnota normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku pri i -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB; $L'_{n,w}$ je hodnota váženej normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku v dB; n je počet tretinovo-oktávových pásiem.

Poznámka: Výpočet adaptačného činiteľa C_1 sa môže doplniť pre rozšírený frekvenčný rozsah tretinovo-oktávových pásiem (50 Hz, 63 Hz a 80 Hz) s označením $C_{1,50-2500}$ alebo $C_{1,63-2000}$.

Hodnota adaptačného činiteľa spektra C_1 sa uvádza za hodnotou váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ ($L_{n,w}$) v zátvorkách so zaokrúhlením na celé číslo a pri posudzovaní krokovej nepriezvučnosti sa pripočíta k jednočíselnej hodnote.

Poznámka: Pre obdĺžnikové miestnosti príjmu s objemom menším ako 25 m³ (prípadne aj s väčším objemom) je v prílohe E, STN EN ISO 12354-2 [3], uvedený postup odhadu krokovej nepriezvučnosti in situ v tretinooktávových pásmach pod 250 Hz so zohľadnením Waterhouseovej korekcie C_w .

10 Požiadavky na krokovú nepriezvučnosť stropných konštrukcií

Požadované hodnoty jednočíselných veličín krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií v budovách na bývanie podľa STN 73 0532 [3] sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1. Požadované hodnoty veličín krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií.

Chránená miestnosť príjmu	Hlučný priestor (miestnosť so zdrojom zvuku)	$L'_{nw}; L'_{nT,w}$ dB
Obytné miestnosti bytov	Všetky ostatné miestnosti toho istého bytu	63
	Všetky miestnosti druhých bytov, vrátane príslušenstva	55
	Spoločné priestory domu (schodiská, chodby, terasy, kočíkárne)	55
	Miestnosti s technickým zázemím (výmenníkové stanice, kotolne, strojovne výťahov a pod.) s hladinou: $L_{Amax} \leq 80$ dB	48
	$80 \text{ dB} < L_{Amax} \leq 85$ dB	48
Prevádžky v budove s hladinou $L_{Amax} \leq 85$ dB:	do 22.00 h	53
	aj po 22.00 h	48

Poznámka: Ak posudzovaná podlaha alebo strop nie je súčasťou spoločného stropu stanovuje a posudzuje sa veličina $L_{nT,w}$.

V STN 73 0532 [3] sú zavedené aj tzv. triedy zvýšenej zvukovej izolácie bytu (TZZI), ktoré majú charakter odporúčania a môžu sa uplatňovať pri nových alebo rekonštruovaných budovách na bývanie. Zvýšené požiadavky na zvukovú izoláciu sa môžu stanoviť aj individuálne podľa požiadaviek investora napr. pri výstavbe rezidenčných bytov, hotelov, nemocníc a pod.

V Tabuľke 2. sú uvedené zvýšené hodnoty veličín krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií (TZZI) v budovách na bývanie (bytové a rodinné domy).

Tabuľka 2. Požadované zvýšené hodnoty veličín krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií.

Chránená miestnosť príjmu	Hlučný priestor (priestor so zdrojom zvuku)	TZZI	$L'_{n,w}; L'_{nT,w}$ dB
Obytné miestnosti bytov	Všetky ostatné obytné miestnosti jedného bytu	I	63
		II	63
	Všetky miestnosti druhých bytov, spoločné priestory domu (schodisko, chodby, terasy a pod.)	I	48
		II	42

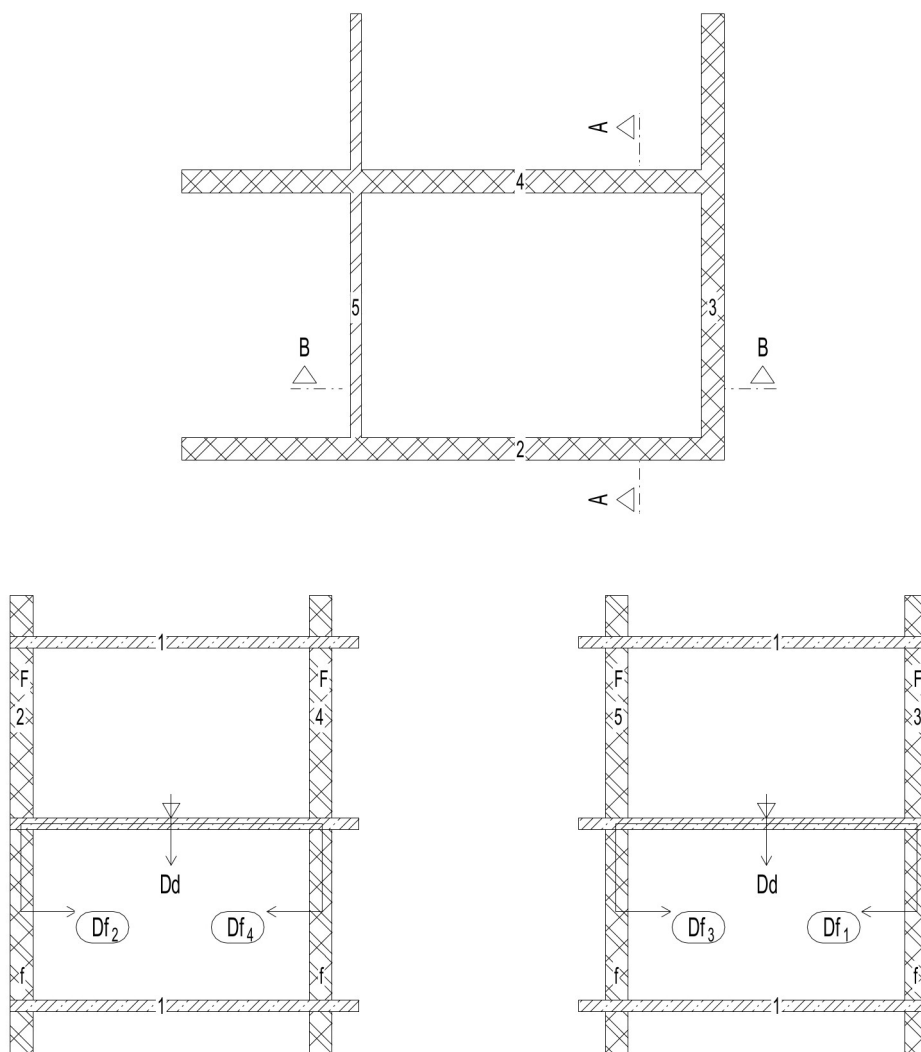
Pri posudzovaní zhody vypočítaných hodnôt veličín krokovej nepriezvučnosti s ich normovanými hodnotami, je nutné prihliadať aj na skutočnosť, že pri bežnom užívaní bytov zdrojom zvuku prenášaného do stropnej konštrukcie je chôdza po podlahe, ktorá v miestnosti príjmu vyvolá zvuk, ktorý má náhodný charakter a jeho akustické (frekvenčné) spektrum je sústredené v oblasti nízkych frekvencií.

Pri posudzovaní zhody predikovaných hodnôt váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ s normovanými (požadovanými) hodnotami $L'_{n,w,N}$ sa odporúča uplatňovať kritérium:

$$L'_{n,w}(C_1) \leq L'_{n,w,N} \quad (39)$$

11 Príklad predikcie krokovej nepriezvučnosti zjednodušeným modelom

Príklad predikcie krokovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami nad sebou s objemom miestnosti $V = 55 \text{ m}^3$ je pre homogénne konštrukcie stavebných prvkov v budove podľa Obrázkov 4a, 4b a 4c.



Obrázok 3.

a: Pôdorys situovania miestnosti a označenie stien v budov

b: Rez A – A.

c: Rez B – B.

Legenda k obrázkom:

1 - Stropná konštrukcia

2 - Vonkajšia stena

4 - Vnútoraná stena

Dd - priamy prenos

Df₂ - bočný prenos (1 – 2)

Df₄ - bočný prenos (1 – 4)

1 - Stropná konštrukcia

3 - Vonkajšia stena

5 - Vnútoraná stena

Df₁ - bočný prenos (1 – 3)

Df₃ - bočný prenos (1 – 5)

11.1 Konštrukcia stavebných prvkov

Stropná nosná konštrukcia 1 (i), betón 220 mm s $m'_i = 0,22 \text{ m} \times 2 \text{ 200 kg} = 484 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, $S_i = 4,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m} = 20 \text{ m}^2$.

Rožnášacia vrstva: plávajúca podlaha – 35 mm betón na doske z minerálnej vlny s dynamickou tuhosťou $s' = 8 \text{ MN.m}^3$, $m' = 0,35 \text{ m} \times 2 \text{ 100 kg.m}^{-2} = 73,5 \text{ kg.m}^{-2}$.

Bočné stavebné prvky tvoria vonkajšie (obvodové) steny 3 ($j-1$) a 2 ($j-2$) a vnútorné steny 5 ($j-3$) a 4 ($j-4$). V Tabuľke 3a je uvedená konštrukcia týchto stien a ich rozmery a vypočítaná plocha a v Tabuľke 3b sú uvedené vypočítané hodnoty ich plošnej hmotnosti m' .

Tabuľka 3. a: Materiál a rozmery bočných stavebných prvkov.

Rez	Bočný prvok / Materiál	L	H	S_j m^2
		m		
B - B	Vonkajšia stena 3 / 200 mm ľahčená betónová tvárnica	4	2,75	$S_{j-1} = 11,00$
	Vnútorná stena 5 / 365 mm vápenokremičitá tvárnica	4	2,75	$S_{j-3} = 11,00$
A - A	Vonkajšia stena 2 / 200 mm ľahčená betónová tvárnica	5	2,75	$S_{j-2} = 13,75$
	Vnútorná stena 4 / 365 mm vápenokremičitá tvárnica	5	2,75	$S_{j-4} = 13,75$

b: Plošná hmotnosť bočných stavebných prvkov.

Rez	Bočný prvok	Plošná hmotnosť m'_j
B - B	Vonkajšia stena 3 ($j-1$)	$m'_{j-1} = 0,365 \text{ m} \times 600 \text{ kg.m}^{-3} = 219 \text{ kg.m}^{-2}$
	Vnútorná stena 5 ($j-3$)	$m'_{j-3} = 0,200 \text{ m} \times 1 \text{ 800 kg.m}^{-3} = 360 \text{ kg.m}^{-2}$
A - A	Vonkajšia stena 2 ($j-2$)	$m'_{j-2} = 0,365 \text{ m} \times 600 \text{ kg.m}^{-3} = 219 \text{ kg.m}^{-2}$
	Vnútorná stena 4 ($j-4$)	$m'_{j-4} = 0,200 \text{ m} \times 1 \text{ 800 kg.m}^{-3} = 360 \text{ kg.m}^{-2}$

Poznámka: Parametre uvedených deliacich stavebných prvkov: celkový stratový činiteľ η_{int} , rýchlosť pozdĺžnych vln c_L a kritická frekvencia f_c a vrstiev podlahy sú uvedené v prílohe G, STN EN ISO 12354-2 [4].

11.2 Predikcia krokovej nepriezvučnosti stropnej konštrukcie bez podlahy

Pre homogénnu (holú) stropnú konštrukciu 1 (i) sa hodnota ekvivalentnej váženej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,\text{eq},0,\text{w}}$ vypočítala podľa vzťahu (32) a hodnota váženej nepriezvučnosti R_w sa vypočítala podľa vzťahoch uvedených v STN EN 12354-1 [9].

Vypočítaná hodnota ekvivalentnej váženej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,\text{eq},0,\text{w}}$ a hodnota váženej nepriezvučnosti R_w pre stropnú konštrukciu 1 je uvedená v Tabuľke 4.

Tabuľka 4. Hodnoty $L_{n,\text{eq},0,\text{w}}$ a R_w pre homogénnu stropnú konštrukciu (i).

Stavebný prvok / Materiál	m'_i kg.m^{-2}	S_i m^2	$L_{n,\text{eq},0,\text{w},i}$ dB	$R_{w,i}$ dB
Stropná konštrukcia 1 (i) / betón 220 mm	484	20,00	70,0	58,7

11.3 Vážené zníženie krokovej nepriezvučnosti plávajúcou podlahou ΔL_w

Vážené zníženie hladiny akustického tlaku krokového zvuku ΔL_w plávajúcou podlahou závisí od plošnej hmotnosti plávajúcej podlahy m' a od dynamickej tuhosti s' na jednotku plochy pružnej vrstvy a podľa prílohy C, STN EN ISO 12354-2 [4] je dané vzťahom:

$$\Delta L_w = (13 \log m' - 14,2 \log s' + 20,8) \text{ dB} \quad (40)$$

Pre plávajúcu podlahu: 35 mm betón na doske z minerálnej vlny s $s' = 8 \text{ MN.m}^{-3}$ a $m' = 73,5 \text{ kg.m}^{-2}$, $\Delta L_w = 32,2 \text{ dB}$.

11.4 Vážená nepriezvučnosť R_w pre bočné prvky

Vypočítané hodnoty vázenej nepriezvučnosti R_w pre bočné stavebné prvky (j) podľa vzťahu (5) sú uvedené v Tabuľke 5.

Tabuľka 5. Hodnoty vázenej nepriezvučnosti R_w bočných stavebných (j) prvkov.

Stavebný prvok / Materiál	m'_j kg.m ⁻²	S_j m ²	$R_{w,j}$ dB
Vonkajšia stena 3 / 365 mm ľahčená betónová tvárnica ($j-1$)	219	11,00	$R_{w,j-1} = 45,8$
Vonkajšia stena 2 / 365 mm ľahčená betónová tvárnica ($j-2$)	219	13,75	$R_{w,j-2} = 45,8$
Vnútorňá stena 5 / 200 mm vápenokremičitá tvárnica ($j-3$)	360	11,00	$R_{w,j-3} = 53,9$
Vnútorňá stena 4 / 200 mm vápenokremičitá tvárnica ($j-4$)	360	13,75	$R_{w,j-4} = 53,9$

11.5 Stykové nepriezvučnosti vibrácií K_{ij}

Hodnota stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{ij} pre typy stykov medzi homogénnu konštrukciu stropu (i) a bočnými prvkami (j):

- a) vonkajšími stenami 3 a 2 sa vypočíta podľa vzťahu:

$$K_{Df} = 5,7 + 5,7M^2 \text{ dB} \quad (41)$$

- b) vnútornými stenami 5 a 4 sa vypočíta podľa vzťahu:

$$K_{Df} = 8,7 + 5,7M^2 \text{ dB} \quad (42)$$

Vypočítané hodnoty stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Df} pre cesty prenosu a typy tvaru styku homogénnej konštrukcie stropu (i) s bočnými prvkami (j) sú uvedené v Tabuľke 6.

Tabuľka 6. Postup výpočtu stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Df} .

Cesta prenosu medzi (i) a (j)	Typ styku	m'_i	m'_\perp	l_{ij} m	M -	K_{Df} dB
		kg.m ⁻²				
Strop 1 – Vonk. stena 3 (Df_1)	tupý T-styk	219	484	4,0	0,344	$K_{Df1} = 6,4$
Strop 1 – Vonk. stena 2 (Df_2)	tupý T-styk	219	484	5,0	0,344	$K_{Df2} = 6,4$
Strop 1 – Vnúť. stena 5 (Df_3)	tupý krížový styk	484	360	4,0	- 0,129	$K_{Df3} = 8,8$
Strop 1 – Vnúť. stena 4 (Df_4)	tupý krížový styk	484	360	5,0	- 0,129	$K_{Df4} = 8,8$

11.6 Vážené normalizované hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,w}$ podľa cesty prenosu

Vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,Dd,w}$ pre priamy prenos cez stropnú konštrukciu s podlahou je vypočítaná podľa vzťahu (33). Vážené normalizované hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,Df,w}$ pre bočné prenosy cez vonkajšie steny 3 a 2 (Df_1 a Df_2) a vnútorné deliace steny 5 a 4 (Df_3 a Df_4) sú vypočítané podľa vzťahu (37).

Vypočítané vážené normalizované hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L_{n,Dd,w}$ pre priamy prenos Dd a $L_{n,Df,w}$ bočné prenosy Df_1 až Df_4 podľa Obrázku 5. sú uvedené v Tabuľke 7.

Tabuľka 7. Výsledky predikcie odhadu vážených normalizovaných hladín akustického tlaku krokového zvuku pre priamy prenos Dd a bočné prenosi Df.

Cesta prenosu	$L_{n,Dd,w} / L_{n,Df,w}$
Strop 1 s pláv. podlaha (Dd)	$L_{n,Dd,w} = 37,8$ dB
Strop 1 – Vonk. stena 3 (Df ₁)	$L_{n,Df1,w} = 70,0 - 32,2 + (58,7 - 45,8) / 2 - 6,4 - 7,0 = 30,9$ dB
Strop 1 – Vonk. stena 2 (Df ₂)	$L_{n,Df2,w} = 70,0 - 32,2 + (58,7 - 45,8) / 2 - 6,4 - 6,0 = 31,7$ dB
Strop 1 – Vnút. stena 5 (Df ₃)	$L_{n,Df3,w} = 70,0 - 32,2 + (58,7 - 45,8) / 2 - 8,8 - 7,0 = 24,4$ dB
Strop 1 – Vnút. stena 4 (Df ₄)	$L_{n,Df4,w} = 70,0 - 32,2 + (58,7 - 45,8) / 2 - 6,4 - 6,0 = 25,4$ dB

Celková (výsledná) hodnota vázenej normalizovanej hladina akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$ v miestnosti príjmu zvuku podľa vzťahu (39):

$$L'_{n,w} = 39,7 \text{ dB.}$$

12 Záver

V štádiu projektovej prípravy obytných budov, požadované (normované) hodnoty veličín charakterizujúcich krokovú nepriezvučnosť stropných konštrukcií s podlahou sa môžu preukazovať podľa STN EN ISO 12354-2 [3].

Podrobný model predikcie krokovej nepriezvučnosti však vyžaduje značný rozsah vstupných údajov s prihliadnutím na typ stavebných prvkov A a B. Vstupné údaje o príslušných stavebných prvkoch môžu byť prevzaté z laboratórnych meraní [13], získané pomocou teoretických výpočtov a empirických odhadov alebo aj z údajov získaných meraní in situ v budovách.

Zjednodušený model predikcie veličín krokovej nepriezvučnosti je obmedzená na frekvenčný rozsah od 100 Hz do 3 125 Hz a vstupnými údajmi sú jednočíselné vážené hodnoty veličín krokovej nepriezvučnosti príslušných stavebných prvkov typu A alebo B. Vstupné údaje o príslušných stavebných prvkoch sú prevzaté z laboratórnych meraní, empirických odhadov alebo z údajov získaných meraní in situ v budovách.

Na predikciu hodnôt veličín krokovej nepriezvučnosti sú k dispozícii softvérové produkty (výpočtové modely), obsahujúce databázu stavebných prvkov s ich fyzikálno-materiálovými vlastnosťami [14].

V akustickom posudku (štúdiu) predikcie krokovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami nad sebou alebo vedľa seba v budovách na bývanie, okrem uvedenia aplikovaného modelu predikcie nepriezvučnosti musia byť uvedené podklady (zdroje) použitých vstupných údajov o stavebných prvkoch.

Zabezpečiť akustický komfort v chránených miestnostiach bytov pred krokovým zvukom súvisiacim s bežným užívaním bytov, znamená už v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie aplikovať podrobný model na predikciu krokovej nepriezvučnosti a pri posudzovaní zhody predikovaných hodnôt veličín krokovej nepriezvučnosti s normovanými hodnotami, zohľadniť aj hodnotu adaptačného činiteľa spektra C_1 a $C_{1,50-2500}$ [15].

Predikcia krokovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami nad sebou v budovách na bývanie podľa zjednodušeného modelu je vyhovujúca pre krokový zvuk vyvolaný chôdzou na betónových alebo drevených stropoch s účinnými podlahami. Nedostatočne vyjadruje krokovú nepriezvučnosť drevených trámových alebo nosných (holých) betónových stopov.

Literatúra

- [1] STN EN ISO 16283-2: Akustika. Meranie zvukovej izolácie stavebných konštrukcií a v budovách in situ. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť
- [2] STN EN ISO 717-2:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť
- [3] STN 73 0532:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky
- [4] STN EN 12354-2:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť medzi miestnosťami
- [5] STN EN ISO 10140-3:2011 Akustika. Laboratórne meranie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 3: Meranie krokovej nepriezvučnosti
- [6] STN EN ISO 10140:2011 Akustika. Laboratórne meranie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Všeobecná časť
- [7] STN EN ISO 10848-1:2018 Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 1: Aplikácia pre styk najmenej jedného ťažkého prvku
- [8] STN EN ISO 10140-2:2011 Akustika. Laboratórne meranie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 2: Meranie vzduchovej nepriezvučnosti
- [9] STN EN 12354-1:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť medzi miestnosťami
- [10] STN EN ISO 10140-1:2000 Akustika. Meranie zvukoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 1: Požiadavky na skúšobné laboratória s potlačeným bočným prenosom
- [11] STN EN ISO 10848-4:2018 Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 4: Aplikácia pre styk najmenej jedného ťažkého prvku
- [12] Kaňka J.: Akustika stavebných objektu, Vydavateľství ERA Brno, 2009
- [13] Tomašovič P. a spol.: Akustika budov II. Laboratórna nepriezvučnosť stavebných konštrukcií prvkov, STU Bratislava 2014, ISBN 978-80-227-4145-3
- [14] NEPrůzvučnost 2010, Svoboda software 2010.
- [15] Zaťko P.: Ťažké plávajúce podlahy a subjektívne vnímanie ich akustických vlastností, FFP 2/2020, ISSN 1338-3922

Kontaktná adresa

Richard DRAHOŠ, Ing., PhD.
Milan DRAHOŠ, Ing.
D2R engineering, s.r.o., Poprad
e-mail: d2r@d2r.sk

PREDIKCIA VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI MEDZI MIESTNOSŤAMI V ŠTÁDIU PROJEKTOVEJ PRÍPRAVY BUDOV NA BÝVANIE

Richard Drahoš, Milan Drahoš

1 Úvod

Deliace horizontálne a vertikálne konštrukcie v budovách (stavbách) tvoria stavebné prvky, ktorých akustické vlastností pri prenose zvuku vzduchom, vyjadruje vzduchová nepriezvučnosť. Nepriezvučnosť je vlastnosť stavebných prvkov a deliacich konštrukcií v budovách prenášať zvuk z miestnosti zdroja zvuku do miestnosti príjmu, priamym a nepriamym prenosom vzduchom, ale aj cez bočné prenosové cesty.

Priamy prenos vzduchom je prenos spôsobený iba zvukom dopadajúcim na deliaci stavebný prvok, ktorý je potom priamo z tohto prvku vyžiarený alebo prenesený jeho časťou napr. štrbinami a pod. do miestnosti príjmu. Nepriamy prenos vzduchom je prenos zvuku vzduchovou prenosovou cestou napr. chodbami, dvojitémi fasádami, vetracími zariadeniami a podobne.

Bočný (nepriamy) prenos konštrukciou je prenos zvuku z vybudeneho prvku v miestnosti zdroja do miestnosti príjmu cez prenosové (konštrukčné, vibračné) cesty, napr. stropom, podlahami a stenami.

Predpokladá sa, že každý prenos sa môže považovať za nezávislý, preto sa jednotlivé prenosi stanovujú samostatne a veličina vyjadrujúca nepriezvučnosť medzi susediacimi miestnosťami sa získa súčtom príspevkov z jednotlivých prenosových ciest.

Nepriezvučnosť medzi miestnosťami (medzi miestom zdroja zvuku a miestom príjmu zvuku) v budovách podľa STN EN ISO 16283-1 [1] vyjadruje niekoľko veličín, medzi ktorými existuje vzťah. Z hodnôt týchto veličín sa postupom uvedeným v STN EN ISO 717-1 [2] môžu získať hodnoty jednočíselných veličín nepriezvučnosti na predikciu (vyhodnotenie) akustických vlastností stavebných prvkov alebo deliacich konštrukcií budov.

Požiadavky na nepriezvučnosť medzi miestnosťami vedľa seba alebo nad sebou v budovách, podľa STN 73 0532 [3] sú vyjadrené jednočíselnými hodnotami veličín nepriezvučnosti a majú zabezpečiť dodržanie prípustných hodnôt určujúcich veličín hluku, ustanovených vo vyhláske MZ SR č. 549/2007 Z. z. [4] pre vnútorné zdroje hluku.

Preto, už v štádiu projektovej prípravy stavieb, najmä budov na bývanie sa má posúdiť nepriezvučnosť medzi miestnosťami a to predovšetkým na základe laboratórnych údajov stavebných prvkov alebo vypočítaných hodnôt veličín, ktoré charakterizujú priamy a nepriamy prenos vzduchom a bočný prenos príslušnými konštrukciami stavebných prvkov podľa teoreticky odvodených vzťahov prenosu (šírenia) zvuku.

Na predikciu jednočíselných hodnôt veličín vzduchovej nepriezvučnosti deliacich konštrukcií budovách, tvorených stavebnými prvkami sú v STN EN ISO 12354-1 [5] uvedené dva modely – podrobný model a zjednodušený model.

2 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku

Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku sú vstupnými údajmi k predikcii akustických (zvukoizolačných) vlastností budovy (stavby). Hodnoty akustických veličín stavebných prvkov sa stanovujú v tretinooktávových pásmach od 100 Hz do 3 125 Hz alebo v

oktávových pásmach minimálne od 125 Hz do 2 000 Hz. Z týchto veličín sa získajú jednočíselné veličiny stavebných prvkov postupom uvedeným v STN EN ISO 717-1 [2].

Pri výpočte akustických vlastností stavebného prvku sú potrebné aj ďalšie údaje o stavebnom prvku, napr. materiál, plošná hmotnosť, dynamická tuhosť, typ stavebného prvku a podobne.

Akustické vlastnosti stavebného prvku vyjadrujú tieto veličiny:

- a) **nepriezvučnosť** R je desaťnásobok dekadického logaritmu pomeru akustického výkonu W_1 dopadajúceho na skúšanú vzorku stavebného prvku k akustickému výkonu W_2 preneseného touto vzorkou (určená v STN ISO 10140-1 [6]), daná vzťahom:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

- b) **zlepšenie nepriezvučnosti** ΔR je rozdiel nepriezvučnosti základného stavebného prvku s pridanou vrstvou (obložením stien, stropným podhlľadom) a základného stavebného prvku bez tejto vrstvy (podrobnosti v prílohe G, STN EN ISO 10140-1 [6]).

- c) **normalizovaný rozdiel hladín prvkov** $D_{n,e}$ (k pohltivej ploche) je rozdiel priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach zdrojom zvuku v jednej z nich, kde prenos zvuku je spôsobený iba malým stavebným prvkom (vzduchotechnickým alebo elektrickým kanálom a pod.), daný vzťahom:

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

kde A_0 je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu ($A_0 = 10 \text{ m}^2$).

- d) **normalizovaný rozdiel hladín prvkov pre nepriamy prenos vzduchom** $D_{n,s}$ (k pohltivej ploche) je rozdiel priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach zdrojom zvuku v jednej z nich, daný vzťahom:

$$D_{n,s} = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

kde A_0 je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu ($A_0 = 10 \text{ m}^2$), s označuje typ prenosu (vetracím systémom, chodbami a pod.).

- e) **normalizovaný rozdiel hladín prvkov pre bočný prenos** $D_{n,f}$ (k pohltivej ploche) je rozdiel priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach zdrojom zvuku v jednej z nich (určený podľa STN EN ISO 10848-1 [7], STN EN ISO 10848-2 [8] a STN EN ISO 10848-3 [9]), je daný vzťahom:

$$D_{n,f} = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

Poznámka: $D_{n,f}$ sa používa, ak sa zvuk prenáša iba jednou bočnou cestou medzi miestnosťami (stropom z podhlľadom, zdvojenou podlahou, fasádou) a sa vzťahuje k referenčnej ploche $A_0 = 10 \text{ m}^2$.

- f) **styková nepriezvučnosť vibrácií** K_{ij} sa vzťahuje k prenosu vibrácií stykmi medzi stavebnými prvkami (i) a (j), a stanovuje sa normalizovaným rozdielom hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku k dĺžke styku a k ekvivalentnej pohltivej dĺžke oboch prvkov (určená podľa STN EN ISO 10848-1 [7] a STN EN ISO 10848-4 [10]), je daná vzťahom:

$$K_{ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i a_j}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

kde: $D_{v,ij}$ je rozdiel hladín medzi prvkami (i) a (j), ak je budený prvok (i) v dB; $D_{v,ji}$ je rozdiel hladín medzi prvkami (j) a (i), ak je budený prvok (j) v dB; l_{ij} je spoločná dĺžka styku medzi prvkami (j) a (i) v m; a_i je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (i) v m²; a_j je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (j) v m².

Ekvivalentná pohltivá dĺžka (dĺžka fiktívneho pohltivého okraja styku za predpokladu jeho kritickéj frekvencie 1000 Hz, vykazujúca stratu ako celkové straty prvku) je daná vzťahom:

$$a = \frac{2,2\pi^2 S}{c_0 T_s} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad (6)$$

kde T_s je čas doznievania konštrukcie prvku (i) alebo (j) v sekundách; S je plocha prvku (i) alebo (j) v m; f je stredná frekvencia pásma v Hz; f_{ref} je referenčná frekvencia $f_{\text{ref}} = 1000$ Hz; c_0 je rýchlosť zvuku vo vzduchu v m.s⁻¹.

- g) **normalizovaný rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií** $\overline{D}_{v,ij,n}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (i) a (j), priemerovaný cez budenie z (i) a budený z (j), a normalizovaný k dĺžke styku a meracím plochám oboch prvkov (určená podľa STN EN ISO 10848-1 [7] a STN EN ISO 10848-4 [10]), daný vzťahom:

$$\overline{D}_{v,ij,n} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} + \left(10 \log \frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_{m,i} S_{m,j}}} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

kde: $D_{v,ij}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (i) a (j), ak je budený prvok (i) v dB; $D_{v,ji}$ je rozdiel hladín rýchlosti vibrácií medzi prvkami (j) a (i), ak je budený prvok (j) v dB; l_{ij} je spoločná dĺžka styku medzi prvkami (j) a (i) v m; $S_{m,i}$ je plocha prvku (i), cez ktorú je rýchlosť vibrácií priemerovaná v m²; $S_{m,j}$ je plocha prvku (j), cez ktorú je rýchlosť vibrácií priemerovaná v m²; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1$ m).

- h) **rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti v styku** $D_{v,ij}$ je priemer rozdielu hladín rýchlosti vibrácií v styku prvku (i) s prvkom (j) a prvku (j) s prvkom (i), daný vzťahom:

$$\overline{D}_{v,ij} = \frac{D_{v,ij} + D_{v,ji}}{2} \quad (8)$$

- i) **nepriezvučnosť** R_{ij} **pre bočný prenos** je mínus desaťnásobok dekadického logaritmu činiteľa bočnej priezvučnosti τ_{ij} , daná vzťahom:

$$R_{ij} = -(10 \log \tau_{ij}) \text{ dB} \quad (9)$$

kde τ_{ij} je činiteľ bočnej priezvučnosti:

$$\tau_{ij} = \left(\frac{W_{ij}}{W_1} \right) \quad (10)$$

W_{ij} je akustický výkon vyžiarený z bočného prvku (j) v miestnosti príjmu z dôvodu dopadu zvuku na prvok (i) v miestnosti zdroja akustického výkonu W_1 ; W_1 je akustický výkon dopadajúci na referenčnú plochu deliaceho prvku v miestnosti zdroja.

Stavebné prvky podľa STN EN ISO 12354-1 [5] sa delia na prvky typu A a B. Stavebný prvok typu A je konštrukcia homogénneho prvku s časom doznievania T_s , ktorý je určený predovšetkým spojenými prvkami (aspoň do tretinooktávového pásma 1 000 Hz) a poklesom hladiny vibrácií o menej ako 6 dB cez prvok v smere kolmom na styk prvkov (aspoň do tretinooktávového pásma 1 000 Hz), napr. monolitický betón, tehly, tvárnice a pod.

Stavebným prvkom B je každý stavebný prvok, ktorý nie je prvkom A, napr. sadrokartónové obklady a drevené obklady na drevených alebo kovových rámoch.

3 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti budov

Nepriezvučnosť medzi miestnosťami v budovách podľa STN EN ISO 16283-1 [1] vyjadruje niekoľko veličín, medzi ktorými existuje vzťah a ich hodnoty sa zisťujú v tretinooktávových alebo v oktávových pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti (100 Hz až 3 125 Hz). Z hodnôt týchto veličín sa môžu stanoviť jednočíselné veličiny nepriezvučnosti postupom uvedeným v STN EN ISO 717-1 [2].

Akustické vlastnosti medzi miestnosťami v budove vyjadrujú veličiny:

a) **stavebná nepriezvučnosť** R' je mínus desaťnásobok dekadického logaritmu pomeru celkového akustického výkonu W_{tot} preneseného do miestnosti príjmu k akustickému výkonu W_1 dopadajúcemu na deliaci stavebný prvok, daná vzťahom:

$$R' = -(10 \log \tau') \quad \text{dB} \quad (11)$$

kde τ' je celkový činiteľ priezvučnosti:

$$\tau' = \left(\frac{W_{tot}}{W_1} \right) \quad (12)$$

Poznámka: Celkový akustický výkon W_{tot} prenesený do miestnosti príjmu pozostáva z akustického výkonu vyžarovaného deliacim prvkom, bočnými prvkami a prípadnými a nepriamym prenosom vzduchom.

Stavebná nepriezvučnosť R' sa spravidla určuje z výsledkov merania nepriezvučnosti medzi miestnosťami podľa vzťahu:

$$R' = L_1 - L_2 + \left(10 \log \frac{S_s}{A} \right) \quad \text{dB} \quad (13)$$

kde L_1 je priemerná hladina akustického tlaku v miestnosti zdroja v dB; L_2 je priemerná hladina akustického tlaku v miestnosti príjmu v dB; A je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu v m^2 ; S_s je plocha deliaceho prvku v m^2 .

b) **normalizovaný rozdiel hladín** $D_{n,T}$ (k času dozvuku) je rozdiel hladín priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach jedným alebo viacerými zdrojmi zvuku v jednej z nich a vzťahovaný k referenčnému času dozvuku v miestnosti príjmu, daný vzťahom:

$$D_{n,T} = L_1 - L_2 + \left(10 \log \frac{T}{T_0}\right) \text{ dB} \quad (14)$$

kde T je čas dozvuku v mieste príjmu v sekundách; T_0 je referenčný čas dozvuku (pre byty $T_0 = 0,5$ s).

c) **normalizovaný rozdiel hladín** D_n (k pohltivej ploche) je rozdiel hladín priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach jedným alebo viacerými zdrojmi zvuku v jednej z nich a vzťahovaný k referenčnej ekvivalentnej pohltivej ploche v miestnosti príjmu, daný vzťahom:

$$D_n = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0}\right) \text{ dB} \quad (15)$$

kde A je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná pohltivá plocha (pre byty $A_0 = 10 \text{ m}^2$).

Medzi normalizovanými rozdielmi hladín ($D_n, D_{n,T}$) a stavebnou nepriezvučnosťou (R') platia vzťahy:

$$D_n = R' + \left(10 \log \frac{A_0}{S_s}\right) = R' + \left(10 \log \frac{10}{S_s}\right) \text{ dB} \quad (16)$$

$$D_{n,T} = R' + \left(10 \log \frac{C_{\text{sab}} V}{T_0 S_s}\right) = R' + \left(10 \log \frac{0,32V}{S_s}\right) \text{ dB} \quad (17)$$

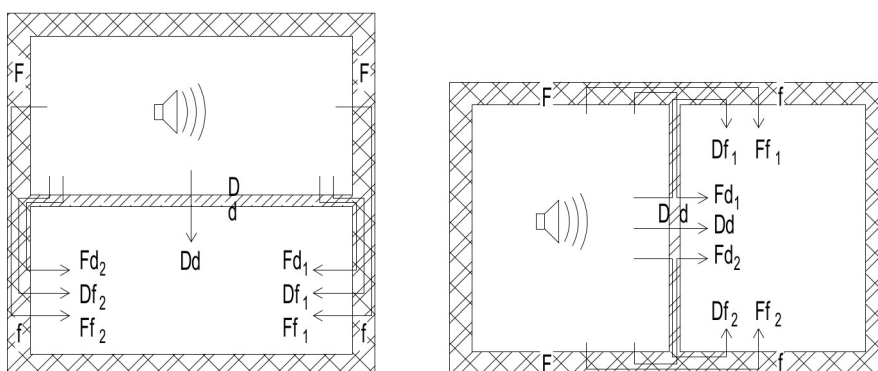
kde C_{sab} je Sabinova konštanta, $C_{\text{sab}} = 0,16 \text{ s.m}^{-1}$; V je objem miestnosti príjmu v m^3 ; S_s je plocha deliaceho prvku v m^2 .

4 Cesty prenosu zvuku medzi miestnosťami

Celkový akustický výkon v miestnosti príjmu je spôsobený zvukom vyžiareným deliacimi stavebnými prvkami a bočnými stavebnými prvkami v tejto miestnosti a príslušným priamym a nepriamym prenosom vzduchom.

Zvuk vyžarovaný stavebnými prvkami sa môže považovať za súčet prenosov zvuku konštrukciami charakterizovaných prenosovými cestami. Jednotlivé prenosové cesty sú určené stavebným prvkom (i), na ktorý dopadá zvuk v miestnosti zdroja, a vyžarujúcim stavebným prvkom (j) v miestnosti príjmu. Stavebné prvky (i) v miestnosti zdroja sú označené písmenom F pre bočný prvok a písmenom D pre deliaci prvok. V miestnosti príjmu sú stavebné prvky (j) označené písmenom f pre bočný prvok a písmenom d pre deliaci prvok.

Určenie ciest prenosu zvuku (ij) medzi miestnosťami vedľa seba je na Obrázku 1a a medzi miestnosťami nad sebou je na Obrázku 1b, kde priama (direct) cesta je označená Dd a bočné (flanking) cesty Df, Ff a Fd.



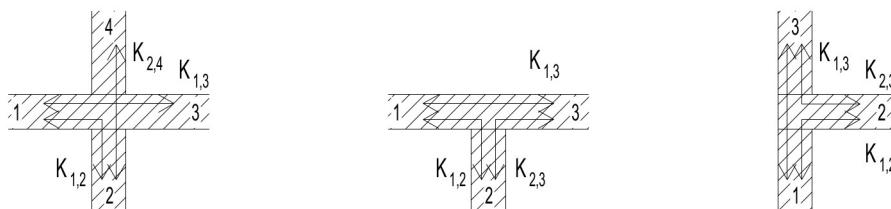
Obrázok 1.

a: Cesty prenosu zvuku (ij) medzi dvoma miestnosťami vedľa seba.
 b: Cesty prenosu zvuku (ij) medzi dvoma miestnosťami vedľa seba.

5 Prenos akustických vibrácií cez styky stavebných prvkov

Prenos akustických vibrácií cez styky stavebných prvkov je vyjadrený stykovou nepriezvučnosťou vibrácií K_{ij} . Získanie údajov o K_{ij} je buď z empirických údajov odvodených z normalizovaných laboratórnych meraní alebo z teoretických vzťahov, prípadne z údajov o simulácii.

Styková nepriezvučnosť vibrácií K_{ij} môže sa stanoviť aj v závislosti na plošnej hmotnosti m' stavebných prvkov spojených v styku (tvoriacich styk). Pritom je nutné rozlišovať typ styku tvaru kríža (väčšinou vo vnútri budovy) a typ styku tvaru T (u obvodového plášťa budovy). Na Obrázku 2a je tvar tupého krížového styku a na Obrázku 2b je tvar tupého T-styku [11].



Obrázok 2.

a: Tupý krížový styk stavebných prvkov.
 b: Tupý T-styk stavebných prvkov

5.1 Styk homogénnych stavebných prvkov

Pri výpočte stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{ij} , napr. tupého krížového styku sa predpokladá, že protiľahlé dvojice stavebných prvkov sú v rovnakej rovine (1 - 3 a 2 - 4), majú rovnakú plošnú hmotnosť a vzájomne sú pevné spojené. Vzťahy pre výpočet K_{ij} sú dané ako funkcie veličiny M , ktorá je daná vzťahom:

$$M = \log \frac{m'_{\perp}}{m_i} \quad (18)$$

kde m'_i je plošná hmotnosť prvku (i) v ceste prenosu ij , kde $ij = Df$ a Ff v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$; m'_{\perp} je plošná hmotnosť druhého, kolmého prvku (tvoriaceho \perp styk) v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Pre homogénne stropné konštrukcie sa styková nepriezvučnosť vibrácií K_{ij} podľa [11] vypočíta pre :

a) tupý krížový styk (Obrázok 2a) podľa vzťahu:

$$K_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (19)$$

$$K_{12} = K_{23} = 8,7 + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (20)$$

$$K_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (21)$$

b) tupý T-styk (Obrázok 2b) podľa vzťahu:

$$K_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (22)$$

$$K_{12} = K_{23} = 5,7 + 5,7M^2 \quad \text{dB} \quad (23)$$

Poznámka: V prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [5] je uvedené grafické zobrazenie vzťahov (19, 20) pre tupý krížový styk a vzťahov (22, 23) pre tupý T-styk.

5.2 Styk homogénnych stavebných prvkov s pružnými vrstvami

Prítomnosť pružných medzivrstiev v styku môže zmeniť typ styku, napr. krížový styk môže byť premenený na T-styk alebo T-styk môže byť premenený na L-styk (rohový styk).

Pre styky murovaných stien a bežnými pružnými vrstvami (so zdanlivou dynamickou tuhosťou s_i' medzi 50 MN.m^{-3} a 100 MN.m^{-3}), pokiaľ prenosová cesta podľa STN EN ISO 29052-1 [12] prechádza:

a) cez jednu vrstvu

$$K_{ij} = K_{ij \text{ rigid}} + \Delta_i \quad \text{dB} \quad (24)$$

b) prechádza cez dve vrstvy

$$K_{ij} = K_{ij \text{ rigid}} + 2\Delta_i \quad \Delta_i = C_c \log\left(\frac{f}{f_1}\right) \text{dB} \quad (25)$$

kde f_1 je charakteristická frekvencia pre vplyv pružných vrstiev na styk; C_c je činiteľ pre záťaž na pružnú vrstvu, pričom:

$C_c = 20$, platí pre záťaž menšiu ako 80 kN.m^{-2} ; $C_c = 15$, platí pre záťaž medzi 80 kN.m^{-2} a 750 kN.m^{-2} ; $C_c = 10$, platí pre záťaž väčšiu ako 750 kN.m^{-2} ; a $\Delta_i \geq 5 \text{ dB}$.

Poznámka 1: Vzťah (25) platí pre typickú pružnú vrstvu, pre ktorú podľa STN EN ISO 29052-1 [12] je s_i' medzi 50 kN.m^{-2} a 100 kN.m^{-2} , je $f_1 = 100 \text{ Hz}$. Pre pružnejšiu vrstvu, pre ktorú s_i' je medzi 30 kN.m^{-2} a 45 kN.m^{-2} , je $f_1 = 50 \text{ Hz}$.

Poznámka 2: Znárodnenie stykov stien s pružnými medzivrstvami je v prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [5].

6 Predikcia akustických vlastností budov podrobným modelom

Podrobný model vychádza z údajov nepriezvučnosti stavebných prvkov v tretinovo-oktávových pásmach od 100 Hz do 3125 Hz v súlade STN EN ISO 717-1 [2] s možnosťou rozšírenia až k tretinovo-oktávovému pásmu 50 Hz , pokiaľ sú dostupné údaje o stavebnom prvku a stykoch. Jednočíselné posúdenie nepriezvučnosti medzi miestnosťami v budove je stanovené výpočtom.

Predikciou podľa podrobného modelu sa stanovujú priame a bočné cesty prenosy, ako aj priamy a nepriamy prenos vzduchom v budove. Pretože tieto prenosové cesty sa považujú za

nezávislé znamená, že sa posudzujú oddelené, tzn. ako prenos zvuku konštrukciou stavebných prvkov a prenos zvuku vzduchom.

6.1 Prenos zvuku konštrukciou stavebných prvkov

Pri aplikácii podrobného modelu, prenos zvuku konštrukciou stavebných prvkov pre každú z prenosových ciest môže byť stanovený z týchto veličín:

- a) nepriezvučnosť deliaceho prvku – R_s ,
- b) nepriezvučnosť prvku (i) v miestnosti zdroja – R_i ,
- c) nepriezvučnosť prvku (j) v miestnosti zdroja – R_i ,
- d) zlepšenie nepriezvučnosti deliaceho prvku prídavnými vrstvami v miestnosti zdroja zvuku a/alebo v miestnosti príjmu – $\Delta R_D / \Delta R_d$,
- e) zlepšenie nepriezvučnosti prídavnými vrstvami pre prvok (i) v miestnosti zdroja zvuku a/alebo prvkom (j) v miestnosti príjmu – $\Delta R_i / \Delta R_j$,
- f) čas doznievania konštrukcie prvku, zmeraná v laboratóriu – $T_{s,lab}$,
- g) styková nepriezvučnosť vibrácií pre každú prenosovú cestu z prvku (i) do prvku (j) – K_{ij} ,
- h) normalizovaný rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií medzi prvkom (i) a (j) – $D_{v,ij,n}$,
- i) normalizovaný rozdiel hladín pre bočný prenos – $D_{n,f}$,
- j) plochy deliaceho prvku (i) – S_i ,
- k) plochy bočného prvku (j) v miestnosti príjmu – S_j ,
- l) spoločná dĺžka styku medzi prvkom (i) a bočným prvkom meraná od povrchu k povrchu (j) – l_{ij} .

Poznámka 1: Akustické údaje o navrhovaných stavebných prvkoch sa získajú z výsledkov laboratórnych meraní, alebo môžu byť odvodené z teoretických výpočtov, empirických odhadov alebo meraní v budovách.

Poznámka 2: Pokiaľ sú vstupné údaje získané z laboratórnych meraní sú hodnoverné nad kritickou frekvenciou, a pod touto frekvenciou sa musí použiť korekcia podľa prílohy B, STN ISO EN 12354-1[5].

6.1.1 Prevod vstupných údajov na hodnoty in situ

Akustické údaje pre stavebné prvky (deliace a bočné stavebné prvky, prídavné vrstvy, styky) pred vlastným stanovením prenosu zvuku v budovách musia byť prevedené na hodnoty „in situ“.

Pre prídavné a krycie vrstvy sa môžu použiť laboratórne hodnoty, ako aproximačné hodnoty zlepšenia nepriezvučnosti in situ, pričom platí:

$$\Delta R_{\text{situ}} = \Delta R$$

Poznámka: Zlepšenie nepriezvučnosti ΔR príslušných stavebných prvkov sa má pre každú bočnú prenosovú cestu vzťahovať iba k rezonančnému prenosu. Postup zlepšenia nepriezvučnosti je uvedený v prílohe D, normy STN EN ISO 12354-1[5].

6.1.1.1 Stavebné prvky typu A

Pre stavebné prvky typu A, hodnoty in situ nepriezvučnosti R_{situ} deliaceho prvku a každého z bočných prvkov sa vypočítajú podľa vzťahu:

$$R_{\text{situ}} = R - \left(10 \log \frac{T_{\text{s,situ}}}{T_{\text{s,lab}}} \right) \text{ dB} \quad (26)$$

kde $T_{\text{s,situ}}$ je čas doznievania konštrukcie prvku v in situ v sekundách; $T_{\text{s,lab}}$ je čas doznievania konštrukcie každého prvku v laboratórnych podmienkach v sekundách.

Poznámka: Pre prvé priblíženie sa dá predpokladať, že $R_{\text{situ}} = R$.

Pre styk medzi stavebnými prvkami typu A je prenos in situ charakterizovaný rozdielom hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku $\bar{D}_{\text{v},ij,\text{situ}}$ podľa vzťahu:

$$\bar{D}_{\text{v},ij,\text{situ}} = K_{ij} - \left(10 \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,\text{situ}} a_{j,\text{situ}}}} \right) \text{ dB} \quad (27)$$

kde

$$a_{i,\text{situ}} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{\text{s},i,\text{situ}}} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}} \quad (28)$$

$$a_{j,\text{situ}} = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{\text{s},j,\text{situ}}} \sqrt{\frac{f_{\text{ref}}}{f}}$$

kde $a_{i,\text{situ}}$ je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (i) in situ v m; $a_{j,\text{situ}}$ je ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (j) in situ v m; f je stredná frekvencia pásma v Hz; f_{ref} je referenčná frekvencia ($f_{\text{ref}} = 1\,000$ Hz); c_0 je rýchlosť zvuku vo vzduchu v m/s; l_{ij} je spoločná dĺžka styku medzi prvkom (i) a prvkom (j) v m; S_i je plocha prvku (i) v m²; S_j je plocha prvku (j) v m²; $T_{\text{s},i,\text{situ}}$ je čas doznievania konštrukcie prvku (i) in situ v sekundách; $T_{\text{s},j,\text{situ}}$ je čas doznievania konštrukcie prvku (j) in situ v sekundách; K_{ij} je daná vzťahom (6).

Poznámka: Pri styku prvkov typu A musí byť zohľadnený čas doznievania konštrukcie in situ (príloha C STN EN ISO 12354-1).

6.1.1.2 Stavebné prvky typu B

Pre stavebné prvky typu B musí byť čas doznievania konštrukcie prvku $T_{\text{s,situ}}$ považovaný za rovný $T_{\text{s,lab}}$, čo vedie ku korekčnému členu 0 dB, tzn. $R_{\text{situ}} = R$.

Pre styk medzi prvkami typu B vychádza rozdiel hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku in situ $\bar{D}_{\text{v},ij,\text{situ}}$ z rozdielu hladín smerovej priemernej rýchlosti vibrácií v styku s referenčnou dĺžkou $l_0 = 1$ m podľa vzťahu:

$$\bar{D}_{\text{v},ij,\text{n}} = \bar{D}_{\text{v},ij,\text{n}} - \left(10 \log \frac{l_{ij} l_0}{\sqrt{S_{i,\text{situ}} S_{j,\text{situ}}}} \right) \quad (29)$$

V prípade styku zloženého z oboch prvkov (napr. stena typu B a stropná konštrukcia typu A, môže byť vzťah (27) použitý s priblížením, pričom ekvivalentná pohltivá dĺžka prvku (i) typu B $a_{i,\text{situ}}$ je úmerná ploche prvku podľa vzťahu:

$$a_{i,\text{situ}} = S_{i,\text{situ}} / l_0 \quad (30)$$

6.1.2 Určenie priameho a bočného prenosu in situ

6.1.2.1 Priamy prenos in situ

Nepriezvučnosť pre priamy prenos vzduchom je stanovená z údajov v tretinovo-oktávových pásmach pre deliaci stavebný prvok podľa vzťahu:

$$R_{Dd} = R_{s, situ} + \Delta R_{D, situ} + \Delta R_{d, situ} \quad \text{dB} \quad (31)$$

6.1.2.2 Bočný prenos in situ

Pri bočnom prenose in situ sa pri stanovení nepriezvučnosti musia zohľadniť stavebné prvky typu A a typu B.

Pre stavebné prvky typu A, nepriezvučnosť pre bočný prenos je stanovená z upravených vstupných údajov) s $ij = Ff, Fd$ a Df podľa vzťahu:

$$R_{ij} = \frac{R_{i, situ}}{2} + \Delta R_{i, situ} + \frac{R_{j, situ}}{2} + \Delta R_{j, situ} + \bar{D}_{v, ij, situ} - \left(10 \log \frac{S_{ij}}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \text{dB} \quad (32)$$

Poznámka: V prípade prenosu v diagonálnom smere sa musí použiť deliaci prvok o ploche $S_s = 10 \text{ m}^2$.

Pre stavebné prvky typu B, nepriezvučnosť pre bočný prenos môže byť stanovená buď normalizovaným rozdielom hladín pre bočný prenos D_{nf} alebo normalizovaným rozdielom hladín smerovej priemerovanej rýchlosti v styku $D_{n, f, ij}$.

Nepriezvučnosť pre bočný prenos môže byť odvodená aj z rozdielu hladín pre bočný prenos (príloha G, STN EN ISO 12354-1[5]) a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$R_{ij} = D_{n, f, ij, situ} + \left(10 \log \frac{S_s I_{lab}}{A_0 l_{ij}} \right) \text{dB} \quad (33)$$

Poznámka: Ak prevláda prenos zvuku konštrukciou, môže byť hodnota $D_{n, f, ij, situ}$ považovaná za hodnotu v zistenú v laboratóriu $D_{n, f, lab}$.

Nepriezvučnosť pre bočný prenos môže byť odvodená aj z vlastnosti prvkov (i) a (j) kombináciou vzťahov (31) a (28) s $ij = Ff, Fd$ a Df a sa vypočíta podľa vzťahu:

$$R_{ij} = \frac{R_{i, situ}}{2} + \Delta R_{i, situ} + \frac{R_{j, situ}}{2} + \Delta R_{j, situ} + \bar{D}_{v, ij, n} + \left(10 \log \frac{S_i}{l_0 l_{ij}} \right) \text{dB} \quad (34)$$

6.2 Prenos zvuku vzduchom

Príspevok z priameho prenosu vzduchom pre malé technické prvky (štrbiny, alebo vzduchotechnické systémy) sa môže stanoviť z hodnôt normalizovaného rozdielu hladín navrhovaných stavebných prvkov $D_{n, e}$ podľa vzťahu:

$$D_{n, e} = -10 \log \tau_e - 10 \log \left(\frac{S_s}{A_0} \right) \text{dB} \quad (35)$$

a nepriameho prenosu vzduchom prenosovým systémom (s) podľa vzťahu:

$$D_{n, s} = -10 \log \tau_s - 10 \log \left(\frac{S_s}{A_0} \right) \text{dB} \quad (36)$$

kde τ_e je pomer akustického výkonu vyžiareného v miestnosti príjmu prvkom v deliacom prvku spôsobeného priamym prenosom zvuku, dopadajúceho na tento prvok, vzduchom, k akustickému výkonu dopadajúcom na spoločnú časť deliaceho prvku; τ_s je pomer akustického výkonu vyžiareného systémom (s) v miestnosti príjmu, spôsobeného nepriamym prenosom zvuku, dopadajúceho na tento prenosový systém, vzduchom, k akustickému výkonu dopadajúcom na spoločnú časť deliaceho prvku; S_s je plocha deliaceho prvku v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná pohltivá plocha v m^2 .

Špecifiká priameho prenosu zvuku vzduchom pre malé technické prvky a nepriameho prenosu vzduchom cez vzduchové prenosové cesty a ventilačné systémy sú uvedené v prílohe H, STN EN ISO 12354-1 [5].

6.3 Celkový prenos zvuku

Celkový prenos zvuku medzi miestnosťami vyjadruje stavebná nepriezvučnosť R' v tretinovo-oktávových pásmach pre každú prenosovú cestu (príspevok z priamej cesty prenosu D_d a príspevkov z jednotlivými bočných prenosových ciest (ij) = Ff, Df a Fd) a vypočíta sa podľa vzťahu:

$$R' = \left[-10 \log \left(10^{R_{Dd}/10} + \sum_{Ff=1}^n 10^{-R_{n,Ff}/10} + \sum_{Df=1}^n 10^{-R_{n,Df}/10} + \sum_{Fd=1}^n 10^{-R_{n,Fd}/10} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{n,j}/10} \right) \right] \text{ dB} \quad (37)$$

kde R_{Dd} je nepriezvučnosť pre priamy prenos vzduchom v dB; R_{Ff} je nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Ff) v dB; R_{Df} je nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Df) v dB; R_{Fd} je nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Fd) v dB; $D_{n,j}$ je normalizovaný rozdiel hladín s akustického tlaku pre priamy prenos cez malý technický prvok ($D_{n,e}$) alebo systém s prenosom vzduchom ($D_{n,s}$) v dB; n je počet bočných stavebných (i) prvkov v miestnosti (spravidla $n = 4$); m je počet bočných stavebných prvkov alebo systémov (j) s prenosom vzduchom; S_s je plocha deliaceho prvku v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná plocha v m^2 ($A_0 = 10 \text{ m}^2$).

Vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w s uvedením adaptačných činiteľov spektra (C , C_{tr}) sa stanoví podľa STN EN ISO 717-1 [2].

6.4 Podmienky použitia podrobného modelu

- Model sa môže použiť iba pre kombináciu prvkov (i) a (j), o ktorých je známa styková nepriezvučnosť vibrácií alebo normovaný rozdiel hladín vibrácií, alebo ich je možné odvodiť zo známych hodnôt.
- Model je aplikovaný len pre základné stavebné prvky, ktoré majú približne rovnaké vyžarovacie vlastností pre obidve strany.
- V prípade veľmi rozmerných podláh so stĺpmi a ľahkými vnútornými priečkami, podlaha v miestnosti sa nemôže považovať za nezávislý prvok (riešenie v prílohe J, STN EN ISO 12354-1[5]).
- Príspevok sekundárnych ciest prenosu zahrňujúcich viac ako jeden styk je zanedbateľný.
- Model charakterizuje iba prenos medzi susediacimi miestnosťami.

6.5 Neistota predikcie

Pri aplikácii podrobného modelu, neistota predikcie akustických vlastností budov, závisí od presnosti vstupných údajov, typov stavebných prvkov a stykov, geometrie situácie v budove

(stavbe) a odbornosti spracovateľa v oblasti stavebnej akustiky. Z týchto dôvodov nie je možné obecné stanoviť neistotu predikcie jednočíselných veličín vzduchovej nepriezvučnosti. Ak v návrhu budov na bývanie, sú aplikované homogénne stavebné prvky (murované steny, tvárnice pod.), predikcia jednočíselného vyhodnotenia vzduchovej nepriezvučnosti je so smerodajnou odchýlkou od 1,5 dB do 2,5 dB (vyššia hodnota zodpovedá zložitým situáciám, keď je zanedbaný čas doznievania konštrukcie).

7 Predikcia akustických vlastností budov zjednodušeným modelom

Zjednodušeným modelom sa stanovujú akustické vlastnosti budov jednočíselným vyhodnotením, ktoré je založené na jednočíselných údajoch o akustických vlastnostiach použitých stavebných prvkov a to v obmedzenom frekvenčnom rozsahu od 100 Hz do 3 125 Hz.

Týmto modelom sa predikuje vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w na základe vážených nepriezvučností R_w stavebných prvkov, ktoré sú stanovené buď z laboratórnych meraní alebo hodnôt zistených meraním konštrukcií stavebných prvkov A a B v tretinovo-oktávových pásmach podľa STN EN ISO 10140-2 [13] a následne jednočíselné vyjadrené postupom uvedenom v STN EN ISO 717-1 [2] aj s adaptačným činiteľom spektra ($R_w + C$) alebo ($R_w + C_{tr}$).

Vážená nepriezvučnosť R_w homogénnych stavebných prvkov podľa prílohy B, STN EN ISO 12354-1 [5] v závislosti na ich plošnej hmotnosti s $m' > 150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, je daná vzťahom:

$$R_w = \left(37,5 \log \frac{m'}{m_0} - 42 \right) \text{ dB} \quad (38)$$

kde m_0 je referenčná (vzťažná) plošná hmotnosť ($m_0 = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$).

7.1 Vstupné údaje

Pri aplikácii zjednodušeného modelu, vážená nepriezvučnosť R_w pre každú prenosovú cestu je predikovaná z týchto vstupných údajov:

a) vážené nepriezvučnosti prvkov – $R_{s,w}$, $R_{F,w}$, $R_{f,w}$,

Poznámka: Informácie o hodnotách $R_{s,w}$, $R_{F,w}$, $R_{f,w}$ sú uvedené v prílohe B, STN EN ISO 12354-1 [5].

b) stykové nepriezvučnosti vibrácií pre všetky styky a cesty – K_{Ff} , K_{Fd} , K_{Df} ,

Poznámka: Informácie pre spoločné styky sú uvedené v prílohe E, STN EN ISO 12354-1 [5].

c) váženého normalizovaného rozdielu hladín akustického tlaku pre bočný prenos a prenosovú cestu Ff – $D_{n,f,Ff,w}$,

d) celkového zlepšenia vázenej nepriezvučnosti pre deliaci prvok – $\Delta R_{Dd,w}$,

Poznámka: Informácie o stanovení hodnoty $\Delta R_{Dd,w}$ sú uvedené v prílohe D, STN EN ISO 12354-1 [5].

e) celkového zlepšenia vázenej nepriezvučnosti pre každú bočnú cestu – $\Delta R_{Ff,w}$, $\Delta R_{Fd,w}$, $\Delta R_{Df,w}$,

Poznámka: Informácie o hodnotách $\Delta R_{Ff,w}$, $\Delta R_{Fd,w}$, $\Delta R_{Df,w}$ sú uvedené v prílohe D, STN EN ISO 12354-1 [5].

f) váženého normalizovaného rozdielu hladín akustického tlaku pre technické prvky – $D_{n,e,w}$,

g) váženého normalizovaného rozdielu hladín akustického tlaku pre nepriamy prenos zvuku vzduchom cez systém – $D_{n,s,w}$.

7.2 Priamy prenos vzduchom

Vážená nepriezvučnosť deliaceho prvku pri priamom prenose vzduchom je daná vzťahom:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} - \Delta R_{Dd,w} \quad \text{dB} \quad (39)$$

kde $R_{s,w}$ je vážená nepriezvučnosť deliaceho prvku, v dB; $\Delta R_{Dd,w}$ je celkové zlepšenie nepriezvučnosti prídavným obložením na strane zdroja a/alebo na strane príjmu deliaceho prvku v dB.

7.3 Bočný prenos konštrukciami

Vážená nepriezvučnosť pre jednotlivé bočné prenosy $ij = Ff, Fd$ a Df je stanovená zo vstupných údajov bočných prvkov podľa vzťahov:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} - R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad \text{dB} \quad (40)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} - R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad \text{dB} \quad (41)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} - R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \right) \quad \text{dB} \quad (42)$$

kde $R_{F,w}$ je vážená nepriezvučnosť stavebného prvku F v miestnosti zdroja v dB; $R_{f,w}$ je vážená nepriezvučnosť bočného stavebného prvku f v miestnosti príjmu v dB; $R_{s,w}$ je vážená nepriezvučnosť deliaceho prvku v dB; $\Delta R_{Ff,w}$ je celkové zlepšenie váženej nepriezvučnosti prídavným obložením na strane zdroja a/alebo na strane príjmu bočného prvku v dB; $\Delta R_{Fd,w}$ je celkové zlepšenie váženej nepriezvučnosti prídavným obložením na bočnom prvku na strane zdroja a/alebo na strane príjmu v dB; $\Delta R_{Df,w}$ je celkové zlepšenie váženej nepriezvučnosti prídavným obložením na deliacom prvku na strane zdroja a/alebo na bočnom prvku na strane príjmu v dB; K_{Ff} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Ff v dB; K_{Fd} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Fd v dB; K_{Df} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Df v dB; S_s je plocha deliaceho prvku v m^2 , l_f je spoločná dĺžka styku medzi deliacim a bočnými prvkami F a f v m; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1$ m).

Pre ľahké konštrukcie musí byť pre každú cestu Ff, Fd a Df, stanovená vážená nepriezvučnosť pre bočný prenos R_{ij} , z odpovedajúceho váženého normalizovaného rozdielu hladín $D_{n,f,ij,w}$ zmeraného v laboratóriu podľa vzťahu:

$$R_{ij,w} = D_{n,f,ij,w} + \left(10 \log \sqrt{\frac{l_{\text{lab}} S_s}{l_{ij} A_0}} \right) \quad \text{dB} \quad (43)$$

Poznámka: Pre určité bočné konštrukcie, napr. stropné podhlady a ľahké fasády, spravidla prevláda prenos cestou Ff, ktorý je charakterizovaný váženým rozdielom hladín pre bočný prenos $D_{n,f,w}$, a preto je možné príspevok z ciest Df a Fd zanedbať.

Pri bočných prenosoch bez prídavného obloženia na strane zdroja a/alebo na strane príjmu bočného prvku, vážená nepriezvučnosť bočných prvkov sa stanoví podľa vzťahov:

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} - R_{f,w}}{2} + K_{Df} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f}\right) \text{ dB} \quad (44)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} - R_{s,w}}{2} + K_{Fd} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f}\right) \text{ dB} \quad (45)$$

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} - R_{f,w}}{2} + K_{Ff} + \left(10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f}\right) \text{ dB} \quad (46)$$

kde $R_{F,w}$ je vážená laboratórna nepriezvučnosť bočného prvku F v miestnosti zdroja v dB; $R_{f,w}$ je vážená laboratórna nepriezvučnosť bočného prvku f v miestnosti príjmu v dB; $R_{s,w}$ je vážená nepriezvučnosť deliaceho prvku v dB; K_{Ff} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Ff v dB; K_{Fd} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Fd v dB; K_{Df} je styková nepriezvučnosť vibrácií pre prenosovú cestu Df v dB; S_s je plocha deliaceho prvku v m²; l_f je spoločná dĺžka styku medzi deliacim prvkom a bočnými prvkami F a f v m; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1$ m).

7.4 Celkový prenos zvuku in situ

Celková (výsledná) vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w medzi miestnosťami sa vypočíta podľa vzťahu:

$$R'_w = \left[-10 \log \left(10^{-R_{Dd,w}/10} + \sum_{Ff=1}^n 10^{-R_{n,Ff,w}/10} + \sum_{Df=1}^n 10^{-R_{n,Df,w}/10} + \sum_{Fd=1}^n 10^{-R_{n,Fd,w}/10} + \frac{A_0}{S_s} \sum_{j=1}^m 10^{-D_{n,j,w}/10} \right) \right] \text{ dB} \quad (47)$$

kde $R_{Dd,w}$ je vážená nepriezvučnosť pre priamy prenos vzduchom v dB; $R_{Ff,w}$ je vážená nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Ff) v dB; $R_{Df,w}$ je vážená nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Df) v dB; $R_{Fd,w}$ je vážená nepriezvučnosť pre bočný prenos, pre cestu prenosu (Fd) v dB; $D_{n,j,w}$ je vážený normalizovaný rozdiel hladín s akustického tlaku pre priamy prenos cez malý technický prvok ($D_{n,e}$) alebo systém s prenosom vzduchom ($D_{n,s}$) v dB; n je počet bočných stavebných (i) prvkov v miestnosti (spravidla $n = 4$); m je počet bočných stavebných prvkov alebo systémov (j) s prenosom vzduchom; S_s je plocha deliaceho prvku v m²; A_0 je referenčná ekvivalentná plocha v m² ($A_0 = 10$ m²).

7.5 Podmienky použitia zjednodušeného modelu

- Podmienky uvedené pre podrobný model platia aj pre zjednodušený model.
- Model sa môže použiť pre stavby, v ktorých sú rozmery prvkov podobné rozmerom v laboratórnom prostredí.
- Model predpokladá, že stavebné prvky majú podobnú frekvenčnú závislosť nepriezvučnosti.

7.6 Neistota predikcie

Pri aplikácii zjednodušeného modelu, neistota predikcie akustických vlastností stavebných prvkov a budov, závisí od presnosti vstupných údajov, typov stavebných prvkov a stykov, geometrii situácie v budove (stavbe) a odbornosti spracovateľa v oblasti stavebnej akustiky. Z týchto dôvodov nie je možné obecné stanoviť neistotu predikcie jednočíselných veličín vzduchovej nepriezvučnosti.

Ak v návrhu budov na bývanie, sú aplikované homogénne stavebné prvky (murované steny, tvárnice pod.), neistota predikcie jednočíselnej veličiny vzduchovej nepriezvučnosti vykazuje smerodajnú odchýlku cca 2 dB.

8 Adaptačné činitele spektra

Hluk prenikajúci z prevádzky technických zariadení v budove (kotolňa, strojovňa výťahu a pod.) alebo hluk z prevádzky chladiacich a mraziacich zariadení v polyfunkčných budovách, ako aj zvuky pri bežnom užívaní bytov (hovor, hudba, rozhlas a televízia) ovplyvňujú akustický komfort najmä v chránených miestnostiach bytov. Preto, už v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie sa má posúdiť vplyv akustických (frekvenčných) spektier uvedených vnútorných zdrojov hluku na predikovanú stavebnú nepriezvučnosť.

Pre prevádzky emitujúce hluk na nízkych a stredných frekvenciách sa v prílohe A, STN EN ISO 717-1 [2] odporúča zohľadniť adaptačný súčiniteľ spektra C_{tr} a pre hlučné činnosti v byte sa odporúča zohľadniť adaptačný súčiniteľ spektra C . Akustické spektrá hladín akustického tlaku na výpočet C a C_{tr} sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1. Akustické spektrá hladín akustického tlaku na výpočet C a C_{tr} .

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
$L_{1,i}$ [dB]	- 29,0	- 28,0	- 23,0	- 21,0	- 19,0	- 17,0	- 15,0	- 13,0
$L_{2,i}$ [dB]	- 20,0	- 20,0	- 18,0	- 16,0	- 15,0	- 14,0	- 13,0	- 12,0

f [Hz]	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 125
$L_{1,i}$ [dB]	- 12,0	- 11,0	- 10,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0
$L_{2,i}$ [dB]	- 11,0	- 9,0	- 8,0	- 9,0	- 10,0	- 11,0	- 13,0	- 15,0

Adaptačný súčiniteľ spektra C alebo C_{tr} k váženej vzduchovej nepriezvučnosti R_w konštrukcie staveného prvku sa vypočíta podľa vzťahov:

$$C = \left[-10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{1,i} - R_i)} - R_w \right] \text{ dB} \quad (48)$$

$$C_{tr} = \left[-10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{2,i} - R_i)} - R_w \right] \text{ dB} \quad (49)$$

kde $L_{1,i}$ je hladina akustického tlaku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového pásma spektra č. 1 (spektrum ružového šumu) v dB; $L_{2,i}$ je hladina akustického tlaku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového spektra č. 2 (spektrum dopravného hluku) v dB; R_i je nepriezvučnosť stavebného prvku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového pásma s presnosťou 0,1 dB; n je počet tretinovo-oktávových pásiem.

Poznámka: Pre obdĺžnikové miestnosti príjmu s objemom menším ako 25 m³ (prípadne aj s väčším objemom) je v prílohe I, STN EN ISO 12354-1 [5], uvedený postup odhadu krokovej nepriezvučnosti in situ v tretinooktávových pásmach pod 250 Hz so zohľadnením Waterhouseovej korekcie C_w .

Hodnota adaptačného činiteľa spektra C a C_{tr} sa uvádza za hodnotou váženej nepriezvučnosti R_w alebo váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w v zátvorkách so zaokrúhlením na celé číslo.

9 Požiadavky na vzduchovú nepriezvučnosť medzi miestnosťami

Požadované hodnoty jednočíselných veličín vzduchovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami v budovách na bývanie stanovené v STN 73 0532 [3] sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2. Požadované hodnoty veličín vzduchovej nepriezvučnosti deliacich konštrukcií.

Chránená miestnosť príjmu	Hlučný priestor (miestnosť so zdrojom zvuku)	Stropy	Steny
		$R'_{w}; D_{nT,w}$ dB	
Obytné miestnosti bytov	Všetky ostatné miestnosti toho istého bytu	47	42
	Všetky miestnosti druhých bytov, vrátane príslušenstva	53	53
	Spoločné priestory domu (schodiská, chodby, terasy, kočíkárne)	52	52
	Miestnosti s technickým zázemím (výmenníkové stanice, kotolne, strojovne výťahov a pod.) s hladinou: $L_{Amax} \leq 80$ dB $80 \text{ dB} < L_{Amax} \leq 85$ dB	57 62	57 62
	Prevádzky v budove s hladinou $L_{Amax} \leq 85$ dB: do 22.00 h aj po 22.00 h	57 62	57 62

Poznámka: Ak miestnosti nemajú spoločnú deliacu konštrukciu, tzn. bezprostredne spolu nesusedia alebo v špeciálne odôvodnených prípadoch (deliacu plochu S nie je možné jednoznačne určiť), stanovuje a posudzuje sa veličina $D_{nT,w}$.

V STN 73 0532 [3] sú zavedené aj tzv. triedy zvýšenej zvukovej izolácie bytu (TZZI), ktoré majú charakter odporúčania a môžu sa uplatňovať pri nových alebo rekonštruovaných budovách. Zvýšené požiadavky na zvukovú izoláciu sa môžu stanoviť aj individuálne podľa požiadaviek investora napr. pri výstavbe rezidenčných bytov, hotelov, nemocníc a pod.

Zvýšené hodnoty veličín vzduchovej nepriezvučnosti vnútorných deliacich konštrukcií v budovách na bývanie sú uvedené v tabuľke 3.

Tabuľka 3. Požiadavky na zvýšené hodnoty veličín nepriezvučnosti deliacich konštrukcií.

Chránená miestnosť príjmu	Hlučný priestor (miestnosť so zdrojom zvuku)	TZZI	Stropy	Steny
			$R'_{w}; D_{nT,w}$ dB	
Obytné miestnosti bytov	Všetky ostatné obytné miestnosti jedného bytu	I	47	42
		II	47	42
	Všetky miestnosti druhých bytov, spoločné priestory domu (schodisko, chodby, terasy a pod.)	I	55	55
		II	59	59

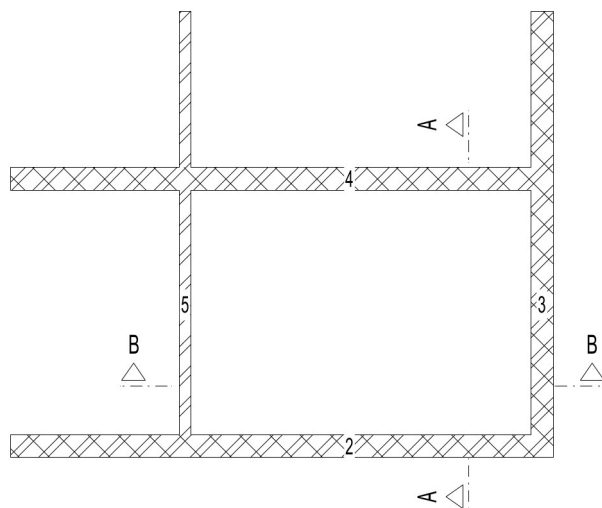
Pri posudzovaní zhody vypočítaných jednočíselných hodnôt veličín vzduchovej nepriezvučnosti s ich normovanými hodnotami, je nutné prihliadať aj na akustické (frekvenčné) spektrum vnútorných zdrojov hluku a zvukov z bežného užívania bytov, aby sa zabezpečil akustický komfort bývania.

Pri posudzovaní zhody predikovaných hodnôt váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_{w} s normovanými (požadovanými) hodnotami $R'_{w,N}$ sa odporúča uplatňovať kritérium:

$$R'_{w}(C; C_{tr}) \geq R'_{w,N}.$$

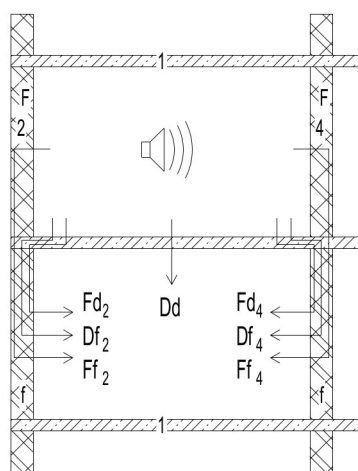
10 Príklad predikcie váženej vzduchovej nepriezvučnosti R'_w zjednodušeným modelom

Príklad predikcie váženej vzduchovej nepriezvučnosti R'_w medzi miestnosťami nad sebou s objemom miestnosti $V = 55 \text{ m}^3$ je pre homogénne konštrukcie stavebných prvkov v budove podľa Obrázkov 3a, 3b a 3c.

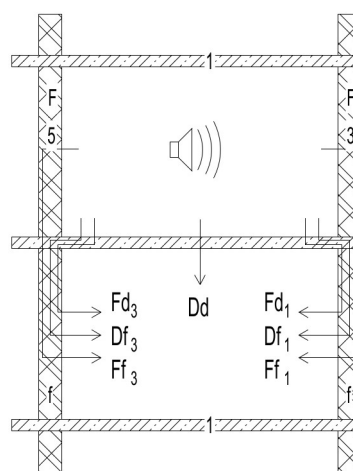


Obrázok 3.

a: Pôdorys situovania miestnosti a označenie stien v budove.



b: Rez A – A.



c: Rez B – B.

Legenda k obrázkom:

1 - Stropná konštrukcia

2 - Vonkajšia stena

4 - Vnútorňa stena

Dd - priamy prenos ($D1 - d1$)

Fd₂ - bočný prenos ($d1 - f2$)

Df₂ - bočný prenos ($D1 - f2$)

1 - Stropná konštrukcia

3 - Vonkajšia stena

5 - Vnútorňa stena

Dd - priamy prenos ($D1 - d1$)

Fd₁ - bočný prenos ($d1 - f3$)

Df₁ - bočný prenos ($D1 - f3$)

Ff₃ - bočný prenos (F2 – f2)

Fd₄ - bočný prenos (d1 – f4)

Df₄ - bočný prenos (D1 – f4)

Ff₄ - bočný prenos (F4 – f4)

Ff₁ - bočný prenos (d1 – f3)

Fd₃ - bočný prenos (d1 – f5)

Df₃ - bočný prenos (D1 – f5)

Ff₃ - bočný prenos (F5 – f5)

Poznámka: Vzhľadom na to, že bočné prvky (konštrukcie) sú štyri (vonkajšie steny 2, 3 a vnútorné steny 4, 5), prenos zvuku špecifikujú štyri prenosové cesty Ff, štyri prenosové cesty Df s štyri prenosové cesty Fd, spolu 12 bočných prenosových ciest.

10.1 Konštrukcia stavebných prvkov

Stropná nosná konštrukcia 1 (i): betón 220 mm s $m_i' = 0,22 \text{ m} \times 2 \text{ 200 kg} = 484 \text{ kg.m}^{-2}$ a plochou $S_i = 4,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m} = 20 \text{ m}^2$.

Roznášacia vrstva: plávajúca podlaha – 35 mm betón na doske z minerálnej vlny s dynamickou tuhosťou $s' = 8 \text{ MN.m}^3$, $m' = 0,35 \text{ m} \times 2 \text{ 100 kg.m}^{-2} = 73,5 \text{ kg.m}^{-2}$.

Bočné stavebné prvky (j) tvoria vonkajšie (obvodové) steny 3 (j-1) a 2 (j-2) a vnútorné (deliace) steny 5 (j-3) a 4 (j-4). V Tabuľke 4a je uvedená konštrukcia týchto stien a ich rozmery a vypočítaná plocha a v Tabuľke 4b sú uvedené vypočítané hodnoty ich plošnej hmotnosti m' .

Tabuľka 4. a: Materiál a rozmery bočných stavebných prvkov (j).

Rez	Bočný prvok / Materiál	L	H	S _j m ²
		m		
B - B	Vonkajšia stena 3 / 200 mm ľahčená betónová tvárnica	4	2,75	S _{j-1} = 11,0
	Vnútorná stena 5 / 365 mm vápenokremičitá tvárnica	4	2,75	S _{j-3} = 11,0
A - A	Vonkajšia stena 2 / 200 mm ľahčená betónová tvárnica	5	2,75	S _{j-2} = 13,75
	Vnútorná stena 4 / 365 mm vápenokremičitá tvárnica	5	2,75	S _{j-4} = 13,75

b: Plošná hmotnosť bočných stavebných prvkov (j).

Rez	Bočný prvok	Plošná hmotnosť prvkov (j)
B - B	Vonkajšia stena 3 (j-1)	$m'_{j-1} = 0,365 \text{ m} \times 600 \text{ kg.m}^{-3} = 219 \text{ kg.m}^{-2}$
	Vnútorná stena 5 (j-3)	$m'_{j-3} = 0,200 \text{ m} \times 1 \text{ 800 kg.m}^{-3} = 360 \text{ kg.m}^{-2}$
A - A	Vonkajšia stena 2 (j-2)	$m'_{j-2} = 0,365 \text{ m} \times 600 \text{ kg.m}^{-3} = 219 \text{ kg.m}^{-2}$
	Vnútorná stena 4 (j-4)	$m'_{j-4} = 0,200 \text{ m} \times 1 \text{ 800 kg.m}^{-3} = 360 \text{ kg.m}^{-2}$

Poznámka: Parametre uvedených deliacich stavebných prvkov: celkový stratový činiteľ η_{int} , rýchlosť pozdĺžnych vln c_L a kritická frekvencia f_c a vrstiev podlahy sú uvedené v prílohe G, STN EN ISO 12354-1 [5].

10.2 Nepriezvučnosť stropnej konštrukcie bez podlahy

Hodnota vázenej nepriezvučnosti $R_{w,i}$ homogénnej (holej) stropnej konštrukcie 1 vypočítaná podľa vzťahu (2) je uvedená v tabuľke 5.

Tabuľka 5. Hodnota $R_{w,i}$ pre homogénnu stropnú konštrukciu (i).

Stavebný prvok / Materiál	m_i' kg.m ⁻²	$R_{w,i}$ dB
Stropná konštrukcia 1 (i) / betón 220 mm	484	58,7

10.3 Zlepšenie nepriezvučnosti plávajúcou podlahou

Zlepšenie nepriezvučnosti ΔR_w plávajúcou podlahou (podrobnosti v prílohe C, STN EN ISO 12354-2 [14]) je dané vzťahom:

$$\Delta R_w = 30 \log \frac{f}{f_0} \text{ dB} \quad f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (50)$$

kde s' je dynamická tuhosť pružnej vrstvy bez záťaže v MN.m^{-3} ; m' je plošná hmotnosť plávajúcej podlahy v kg.m^{-2} ; f je rezonančná frekvencia systému v Hz.

Pre plávajúcu podlahu: 35 mm betón na doske z minerálnej vlny s $s' = 8 \text{ MN.m}^{-3}$ a $m' = 73,5 \text{ kg.m}^{-2}$, $f_0 = 52,8 \text{ Hz}$, pre $f > f_0$ je $\Delta R_w = 10,6 \text{ dB}$.

10.4 Vážená nepriezvučnosť R_w bočných prvkov

Hodnoty vázenej nepriezvučnosti R_w pre bočné prvky (j), tzn. pre vonkajšie steny 3 a 2 a pre vnútorné deliace steny 5 a 4 vypočítané podľa vzťahu (2) sú uvedené v Tabuľke 6.

Tabuľka 6. Hodnoty vázenej nepriezvučnosti R_w bočných stavebných prvkov (j).

Stavebný prvok / Materiál	m'_j kg.m ⁻²	$R_{w,j}$ dB
Vonkajšia stena 3 / 365 mm ľahčená betónová tvárnica ($j-1$)	219	$R_{w,j-1} = 45,8$
Vonkajšia stena 2 / 365 mm ľahčená betónová tvárnica ($j-2$)	219	$R_{w,j-2} = 45,8$
Vnútorná stena 5 / 200 mm vápenokremičitá tvárnica ($j-3$)	360	$R_{w,j-3} = 53,9$
Vnútorná stena 4 / 200 mm vápenokremičitá tvárnica ($j-4$)	360	$R_{w,j-4} = 53,9$

10.5 Stykové nepriezvučnosti vibrácií K_{ij} pre prenosové cesty

Pre prenosovú cestu D_f (medzi homogénnu konštrukciu stropu 1 a vonkajšími stenami 3 ($j-1$) a 2 ($j-2$)) sa hodnota stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Df} vypočíta podľa vzťahu:

$$K_{Df} = 5,7 + 5,7M^2 \text{ dB} \quad (51)$$

Pre prenosovú cestu F_d (medzi homogénnu konštrukciu stropu 1 a vnútornými stenami 5 ($j-3$) a 2 ($j-4$)) sa hodnota stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Fd} vypočíta podľa vzťahu:

$$K_{Fd} = 8,7 + 7M^2 \text{ dB} \quad (52)$$

Pre prenosovú cestu F_f (cez vnútorné steny 5 ($j-3$) a 4 ($j-4$)) sa hodnota stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Ff} vypočíta podľa vzťahu:

$$K_{Ff} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \text{ dB} \quad (53)$$

V Tabuľke 7 sú uvedené vypočítané hodnoty stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Df} , K_{Ff} a K_{Fd} pre prenosové cesty D_d , F_d a F_f .

Tabuľka 7. Vypočítané hodnoty stykovej nepriezvučnosti vibrácií K_{Df} , K_{Ff} a K_{Fd} .

Cesta prenosu medzi (i) a (j)	Typ styku	m'_i	m'_\perp	l_f m	M -	K_{Df}	K_{Fd}	K_{Ff}
		kg.m ⁻²				dB		
Strop 1 - Vonk. stena 3	tupý T-styk	219	484	4,0	0,344	6,4	6,4	11,2
Strop 1 - Vonk. stena 2	tupý T-styk	219	484	5,0	0,344	6,4	6,4	11,2
Strop 1 - Vnút. stena 5	tupý krížový styk	484	360	4,0	- 0,129	8,8	8,8	11,0
Strop 1 - Vnút. stena 4	tupý krížový styk	484	360	5,0	- 0,129	8,8	8,8	11,0

10.6 Vážené nepriezvučnosti R_w pre jednotlivé cesty prenosu

Hodnoty váženej nepriezvučnosti R_w pre vedľajšie cesty prenosu (Df, Fd, a Ff) sa vypočítali podľa vzťahov (44, 45 a 46). Vypočítané hodnoty váženej nepriezvučnosti R_w pre jednotlivé cesty prenosu (Dd, Df, Fd, a Ff) medzi miestnosťami nad sebou sú uvedené v Tabuľke 8.

Tabuľka 8. Vypočítané hodnoty R_w pre priamu cestu prenosu (Dd) a vedľajšie cesty prenosu (Df, Fd, a Ff).

Cesta prenosu medzi (i) a (j)		Styk	l_f m	Vážená nepriezvučnosť pre cesty prenosu
Strop + podlaha	Dd	-	-	$R_{Dd,w} = 58,7 + 10,8 = 69,3$ dB
Strop 1 / Stena 3	Df ₁	tupý T-styk	4	$R_{D1,w} = (58,7 + 45,8) / 2 + 10,6 + 6,4 + 7,0 = 76,3$ dB
Strop 1 / Stena 2	Df ₂	tupý T-styk	5	$R_{D2,w} = (58,7 + 45,8) / 2 + 10,6 + 6,4 + 6,0 = 75,3$ dB
Strop 1 / Stena 5	Df ₃	tupý krížový styk	4	$R_{D3,w} = (58,7 + 53,9) / 2 + 10,6 + 8,8 + 7,0 = 82,7$ dB
Strop 1 / Stena 4	Df ₄	tupý krížový styk	5	$R_{D4,w} = (58,7 + 53,9) / 2 + 10,6 + 8,8 + 6,0 = 81,7$ dB
Strop 1 / Stena 3	Fd ₁	tupý T-styk	4	$R_{1d,w} = (45,8 + 58,7) / 2 + 6,4 + 7,0 = 65,7$ dB
Stena 3 / Stena 3	Ff ₁	tupý T-styk	4	$R_{11,w} = (45,8 + 45,8) / 2 + 11,2 + 7,0 = 64,0$ dB
Strop 1 / Stena 2	Fd ₂	tupý T-styk	5	$R_{2d,w} = (45,8 + 58,7) / 2 + 6,4 + 6,0 = 64,7$ dB
Stena 2 / Stena 2	Ff ₂	tupý T-styk	5	$R_{22,w} = (45,8 + 45,8) / 2 + 11,2 + 6,0 = 63,0$ dB
Strop 1 / Stena 5	Fd ₃	tupý krížový styk	4	$R_{3d,w} = (53,9 + 58,7) / 2 + 8,8 + 7,0 = 72,1$ dB
Stena 5 / Stena 5	Ff ₃	tupý krížový styk	4	$R_{33,w} = (53,9 + 53,9) / 2 + 11,0 + 7,0 = 71,9$ dB
Strop 1 / Stena 4	Fd ₄	tupý krížový styk	5	$R_{4d,w} = (53,9 + 58,7) / 2 + 8,8 + 6,0 = 71,1$ dB
Stena 4 / Stena 4	Ff ₄	tupý krížový styk	5	$R_{44,w} = (53,9 + 53,9) / 2 + 11,0 + 6,0 = 70,9$ dB

Poznámka: Veľké písmená (D, F) slúžia pre označenie stavebného prvku v miestnosti zdroja a malé písmená (d, f) označujú stavebné prvky v miestnosti príjmu.

Celková (výsledná) hodnota váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w medzi miestnosťami nad sebou vypočítaná podľa vzťahu (47): $R'_w = 57,0$ dB.

11 Záver

V štádiu projektovej prípravy budov na bývanie, požadované (normované) hodnoty veličín charakterizujúcich nepriezvučnosť medzi miestnosťami sa môžu preukazovať podrobným alebo zjednodušeným modelom podľa STN EN ISO 12354-1 [5].

Podrobný model predikcie váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w však vyžaduje značný rozsah vstupných údajov s prihliadnutím na typ stavebných prvkov A a B. Vstupné údaje o príslušných stavebných prvkoch môžu byť prevzaté z laboratórnych meraní [15], získané pomocou teoretických výpočtov a empirických odhadov alebo aj z údajov získaných meraním in situ.

Zjednodušený model predikcie váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w je obmedzený na frekvenčný rozsah od 100 Hz do 3 125 Hz a vstupnými údajmi sú jednočíselné vážené hodnoty veličín nepriezvučnosti príslušných stavebných prvkoch typu A alebo B. Vstupné údaje o príslušných stavebných prvkoch sú prevzaté z laboratórnych meraní, empirických odhadov alebo z údajov získaných meraním in situ.

Na predikciu hodnôt veličín vzduchovej nepriezvučnosti deliacich konštrukcií v budovách sú k dispozícii softvérové produkty (výpočtové modely), obsahujúce databázu stavebných prvkov s ich fyzikálno-materiálovými vlastnosťami [16].

V akustickom posudku (štúdiu) predikcie nepriezvučnosti medzi miestnosťami nad sebou alebo vedľa seba v budovách, okrem uvedenia aplikovaného modelu predikcie

nepriezvučnosti musia byť uvedené podklady (zdroje) použitých vstupných údajov o stavebných prvkoch.

Zabezpečiť akustický komfort v chránených miestnostiach bytov pred prenikajúcim zvukom súvisiacim s bežným užívaním bytov, znamená už v štádiu návrhu projektovej prípravy budov na bývanie, aplikovať podrobný model na predikciu nepriezvučnosti a pri posudzovaní zhody predikovaných hodnôt váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w s normovanými hodnotami, zohľadniť aj hodnoty adaptačných činiteľov spektra C , C_{tr} .

Predikcia váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w medzi miestnosťami nad sebou alebo vedľa seba v budovách na bývanie podľa zjednodušeného modelu je vyhovujúca pre homogénne deliace konštrukcie, ale nedostatočne vyjadruje nepriezvučnosť dvojitého ľahkých stavebných prvkov a prvkov s frekvenčne závislou nepriezvučnosťou.

Literatúra

- [1] STN EN ISO 16283-1 Akustika. Meranie zvukovej izolácie stavebných konštrukcií a v budovách in situ. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť
- [2] STN EN ISO 717-1:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť
- [3] STN 73 0532:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky
- [4] Vyhláška MZ SR č. 549/2007 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o prípustných hodnotách hluku, infrazvuku a vibrácií a o požiadavkách na objektivizáciu hluku, infrazvuku a vibrácií v životnom prostredí
- [5] STN EN 12354-1:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť medzi miestnosťami
- [6] STN EN ISO 10140-1:2000 Akustika. Meranie zvukoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 1: Požiadavky na skúšobné laboratória s potlačeným bočným prenosom
- [7] STN EN ISO 10848-1:2018 Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 1: Rámcový dokument
- [8] STN EN ISO 10848-2:2018 Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 2: Aplikácia na ľahké prvky s malým vplyvom stykov
- [9] STN EN ISO 10848-3:2018 Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 1: Aplikácia na ľahké prvky s podstatným vplyvom stykov.
- [10] STN EN ISO 10848-4:2018. Akustika. Laboratórne meranie bočného prenosu zvuku šíreného vzduchom a krokového zvuku medzi miestnosťami. Časť 1: Aplikácia pre styk najmenej jedného ťažkého prvku
- [11] Kaňka J.: Akustika stavebných objektu, Vydavatelství ERA Brno, 2009
- [12] STN EN ISO 29052-1:1997 Akustika. Stanovenie dynamickej tuhosti. Časť 1: Materiály na izoláciu plávajúcich podláh v bytových objektoch
- [13] STN EN ISO 10140-2:2010 Akustika. Laboratórne meranie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 2: Meranie vzduchovej nepriezvučnosti
- [14] STN EN 12354-2:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť medzi miestnosťami

[15] Tomašovič P. a spol.: Akustika budov II. Laboratórna nepriezvučnosť stavebných konštrukcií prvkov, STU Bratislava 2014. ISBN 978-80-227-4145-3

[16] NEPrůzvučnost 2010, Svoboda software 2010.

Kontaktná adresa

Richard DRAHOŠ, Ing., PhD.

Milan DRAHOŠ, Ing.

D2R engineering, s.r.o., Poprad

e-mail: d2r@d2r.sk

PREDIKCIA VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI OBVODOVÝCH PLÁŠŤOV V ŠTÁDIU PROJEKTOVEJ PRÍPRAVY BUDOV NA BÝVANIE

Richard Drahoš, Milan Drahoš

1 Úvod

Obvodový plášť budov tvoria rôzne stavebné prvky, ktorých akustické vlastností pri prenose zvuku vzduchom vyjadruje nepriezvučnosť. Nepriezvučnosť je vlastnosť stavebných (fasádnych) prvkov a obvodových plášťov budov prenášať zvuk z vonkajšieho prostredia do vnútorných priestorov (miestnosti príjmu), priamym prenosom vzduchom a bočným prenosom [1].

Priamy prenos vzduchom je prenos spôsobený iba zvukom dopadajúcim na stavebný prvok, ktorý je potom priamo z tohto prvku vyžiarený do miestnosti príjmu. Bočný prenos je prenos cez spojené stavebné prvky plášťa s inými tuhými prvkami v miestnosti príjmu zvuku.

Predpokladá sa, že každý prenos sa môže považovať za nezávislý, preto sa jednotlivé prenosi stanovujú samostatne a veličina vyjadrujúca nepriezvučnosť obvodových plášťov sa získa súčtom príspevkov z jednotlivých prenosových ciest.

Zvukovú izoláciu obvodových plášťov budov podľa STN EN ISO 12354-3 [1] vyjadrujú viaceré veličiny, ktorých hodnoty sú prezentované v tretinovo-oktávových alebo oktávových pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti. Z hodnôt týchto veličín sa postupom uvedeným v STN EN ISO 717-1 [2] môžu získať hodnoty jednočíselných veličín na predikciu (vyhodnotenie) akustických vlastností stavebných prvkov tvoriacich obvodový plášť alebo obvodových plášťov ako celku.

Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov a ich častí sú v STN 73 0532 [3] vyjadrené jednočíselnými hodnotami veličín – váženou stavebnou nepriezvučnosťou R'_w alebo váženým normalizovaným rozdielom hladín $D_{nT,w}$ majú zabezpečiť dodržanie prípustných hodnôt určujúcich veličín hluku, ustanovených vo vyhláske MZ SR č. 549/2007 Z. z. [4] pre hluk prenikajúci do chránených vnútorných priestorov (miestnosti) z vonkajších zdrojov.

Preto už v štádiu projektovej prípravy stavieb, najmä budov na bývanie sa má posúdiť zvuková izolácia obvodových plášťov a ich častí, a to predovšetkým na základe laboratórnych údajov stavebných prvkov alebo vypočítaných hodnôt veličín, ktoré charakterizujú priamy prenos vzduchom a bočný prenos príslušnými konštrukciami stavebných prvkov podľa teoreticky odvodených vzťahov prenosu (šírenia) zvuku.

Na predikciu jednočíselných hodnôt veličín vzduchovej nepriezvučnosti obvodových plášťov budov, tvorených stavebnými prvkami sú v STN EN ISO 12354-3 [1] uvedené predikčné (výpočtové) modely.

2 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku

Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti stavebného prvku sú vstupnými údajmi k predikcii akustických (zvukovo-izolačných) vlastností obvodových konštrukcií budovy (stavby). Hodnoty akustických veličín stavebných prvkov sa stanovujú v tretinooktávových pásmach od 100 Hz do 3 125 Hz alebo v oktávových pásmach minimálne od 125 Hz do 2 000 Hz.

Pri výpočte akustických vlastností stavebného prvku sú potrebné aj ďalšie údaje (materiál, plošná hmotnosť a pod.), ako aj akustické údaje o jeho častiach (zasklenie, tesnenie) v prípade zložených stavebných prvkov.

Akustické vlastnosti stavebného prvku vyjadrujú tieto veličiny:

- a) **nepriezvučnosť** R je desaťnásobok dekadického logaritmu pomeru akustického výkonu W_1 dopadajúceho na skúšanú vzorku stavebného prvku k akustickému výkonu W_2 preneseného touto vzorkou (určená v STN ISO 10140-1 [5]), daná vzťahom:

$$R = 10 \log \left(\frac{W_1}{W_2} \right) \text{ dB} \quad (1)$$

- b) **normalizovaný rozdiel hladín prvkov** $D_{n,e}$ (k pohltivej ploche) je rozdiel priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného v dvoch miestnostiach zdrojom zvuku v jednej z nich, kde prenos zvuku je spôsobený iba malým stavebným prvkom (vzduchotechnickým alebo elektrickým kanálom a pod.), daný vzťahom:

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

kde A_0 je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu ($A_0 = 10 \text{ m}^2$),

Poznámka: Vážená nepriezvučnosť R_w homogénnych stavebných prvkov podľa prílohy B, STN EN ISO 12354-1 [6] v závislosti na ich plošnej hmotnosti $s m' > 150 \text{ kg.m}^{-2}$, je daná vzťahom:

$$R_w = \left(37,5 \log \frac{m'}{m_0} - 42 \right) \text{ dB}$$

kde m_0 je referenčná (vzťažná) plošná hmotnosť ($m_0 = 1 \text{ kg.m}^{-2}$).

- c) **zlepšenie nepriezvučnosti** ΔR je rozdiel nepriezvučnosti základného stavebného prvku s pridanou vrstvou (opláštenie) a základného stavebného prvku bez tejto vrstvy,
- d) **nepriezvučnosť spojov alebo štrbín** R_s je rozdiel priestorovo a časovo priemerovaného akustického tlaku vyvolaného vo dvoch miestnostiach zdrojom zvuku v jednej z nich, kde je prenos zvuku spôsobený iba spojom alebo štrbinou (určená v STN ISO 10140-1 [5]), daná vzťahom:

$$R_s = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{S_0 l}{A_0 l_0} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

Poznámka: Nepriezvučnosť R_s je normalizovaná k dĺžke spoja alebo štrbiny a k ekvivalentnej pohltivej ploche v miestnosti príjmu, pričom $S_0 = 1 \text{ m}$ a $l_0 = 1 \text{ m}$.

V prípade potreby sa z hodnôt veličín (1) a (2) vo frekvenčných pásmach môže získať jednočíselné vyhodnotenie vlastnosti stavebných prvkov podľa STN EN ISO 717-1 [2], napr. $R_w(C;C_{tr})$ alebo $D_{n,e,w}(C;C_{tr})$.

3 Veličiny vyjadrujúce akustické vlastnosti budov

Zvukovú izoláciu obvodových plášťov budov podľa STN EN ISO 12354-3 [1] vyjadruje niekoľko veličín, ktorých hodnoty sa stanovujú v tretinooktávových alebo v oktávových pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti (100 Hz až 3 125 Hz).

Akustické vlastnosti obvodových plášťov vyjadrujú veličiny:

a) **stavebná nepriezvučnosť** R'_{45° (k reproduktorovej sústave) je vzduchová nepriezvučnosť, stavebného prvku, ak zdrojom zvuku je reproduktorová sústava a uhol dopadu zvukových vln je 45° , daná vzťahom:

$$R'_{45^\circ} = L_{1,s} - L_2 + \left(10 \frac{S}{A}\right) - 1,5 \text{ dB} \quad (4)$$

kde $L_{1,s}$ je priemerná hladina akustického tlaku na vonkajšom povrchu stavebného prvku zahrňujúca odraz zvuku od obvodového plášťa, v dB; L_2 je priemerná hladina akustického tlaku v miestnosti príjmu, v dB; A je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu, v m^2 ; S je plocha stavebného prvku, v m^2 .

Poznámka: Uhol dopadu zvukových vln 45° , je uhol, ktorý zvierá os reproduktora smerujúca na stred stavebného prvku a normálou na povrchu obvodového plášťa (fasády).

b) **stavebná nepriezvučnosť** $R'_{tr,s}$ (k cestnej doprave) je vzduchová nepriezvučnosť stavebného prvku, ak zdrojom zvuku je cestná doprava, daná vzťahom:

$$R'_{tr,s} = L_{eq,1,s} - L_{eq,2} + \left(10 \frac{S}{A}\right) - 3 \text{ dB} \quad (5)$$

kde $L_{eq,1,s}$ je priemerná ekvivalentná hladina akustického tlaku na vonkajšom povrchu stavebného prvku zahrňujúca odraz zvuku od obvodového plášťa, v dB; L_2 je priemerná ekvivalentná hladina akustického tlaku v miestnosti príjmu, v dB; A je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu, v m^2 ; S je plocha stavebného prvku, v m^2 .

c) **normalizovaný rozdiel hladín** $D_{2m,n,T}$ (k času dozvuku) je rozdiel medzi hladinou akustického tlaku vo vzdialenosti 2 m pred obvodovým plášťom a hladinou akustického tlaku v miestnosti príjmu zvuku, vzťahovaný k referenčnému času dozvuku v miestnosti príjmu, daný vzťahom:

$$D_{2m,n,T} = L_{1,2m} - L_2 + \left(10 \log \frac{T}{T_0}\right) \text{ dB} \quad (6)$$

kde $L_{1,2m}$ je priemerná ekvivalentná hladina akustického tlaku vo vzdialenosti 2 m pred obvodovým plášťom zahrňujúca odraz zvuku od obvodového plášťa, v dB; L_2 je priemerná hladina akustického tlaku v miestnosti príjmu, v dB; T je čas dozvuku v mieste príjmu zvuku, v sekundách; T_0 je referenčný čas dozvuku (pre byty $T_0 = 0,5$ s).

d) **normalizovaný rozdiel hladín** $D_{2m,n}$ (k pohltivej ploche) je rozdiel medzi hladinou akustického tlaku vo vzdialenosti 2 m pred obvodovým plášťom a hladinou akustického tlaku v miestnosti príjmu zvuku, vzťahovaný k referenčnej hodnote pohltivej plochy v miestnosti príjmu, daný vzťahom:

$$D_n = L_1 - L_2 - \left(10 \log \frac{A}{A_0}\right) \text{ dB} \quad (7)$$

kde A je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu, v m^2 ; A_0 je referenčná ekvivalentná pohltivá plocha (pre byty $A_0 = 10$ m^2).

Normalizovaný rozdiel hladín obvodového plášt'a ($D_{2m,nT}$) závisí na stavebnej nepriezvučnosti (R') uvažovanej pri pohľade zvnútra, na vplyve tvaru obvodového plášt'a (balkónov) a na rozmeroch miestnosti príjmu a je daný vzťahom:

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + \left(10 \log \frac{C_{sab} V}{T_0 S} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

kde C_{sab} je Sabinova konštanta, $C_{sab} = 0,16 \text{ s.m}^{-1}$; V je objem miestnosti príjmu, v m^3 ; S je celková plocha obvodového plášt'a pri pohľade zvnútra miestnosti, v m^2 ; ΔL_{fs} je zmena hladín vyvolaná tvarom obvodového plášt'a, v dB.

Medzi normalizovanými rozdielmi hladín obvodového plášt'a ($D_{2m,nT}$ a $D_{2m,n}$) platí vzťah:

$$D_{2m,n} = D_{2m,nT} - \left(10 \log \frac{C_{sab} V}{A_0 T_0} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

Poznámka: Pri meraní nepriezvučnosti obvodového plášt'a, keď zdrojom hluku je cestná doprava (tr) alebo reproduktorová sústava (ls) platí, že $D_{tr,2m,nT} = D_{ls,2m,nT}$.

e) nepriezvučnosť obvodového plášt'a R' hypotetický zmeraná pre difúzne dopadajúce zvukové pole v budove in situ,

Poznámka: Táto veličina je používaná ako obecná výpočtová veličina podľa ktorej sa môžu získať rôzne veličiny na vyjadrenie akustických vlastností budov.

f) rozdiel hladín vyvolaný tvarom obvodového plášt'a ΔL_{fs} je rozdiel hladín akustického tlaku dopadajúceho na tvarovaný obvodový plášť a hladinou akustického tlaku na povrchu roviny obvodového plášt'a + 6 dB, daný vzťahom:

$$\Delta L_{fs} = L_{1,in} - L_{1,s} + 6 \text{ dB} \quad (10)$$

kde $L_{1,in}$ je priemerná hladina akustického tlaku v mieste roviny obvodového plášt'a, bez obvodového plášt'a, v dB; $L_{1,s}$ je priemerná hladina akustického tlaku na vonkajšom povrchu skutočného obvodového plášt'a, v dB.

Poznámka: Tvar vonkajších obvodových plášťov ovplyvňuje pozitívne, ale aj negatívne prenos zvuku stavebnými prvkami obvodových plášťov. Príklady rozdielu hladín akustického tlaku vyvolaného tvarom obvodového plášt'a sú uvedené v prílohe C, STN EN ISO 12354-3 [1].

V prípade potreby sa z hodnôt veličín (5) a (8) vo frekvenčných pásmach môže stanoviť jednočíselné vyhodnotenie vlastností budovy podľa STN EN ISO 717-1 [2], napr. R'_w , $D_{2m,nT,w}$ alebo $(R'_w + C_{tr})$.

4 Predikcia akustických vlastností obvodových plášťov

Obvodový plášť budov sa skladá z rôznych stavebných (fasádnych) prvkov, ako sú okná, balkónové dvere a steny v niektorých prípadoch aj strecha a vetracie zariadenie. Prenos zvuku obvodovým plášťom z vonkajšieho prostredia (priestoru) je vyvolaný prenosom zvuku, každým zo stavebných prvkov plášt'a. Pri predikcii akustických vlastností obvodového plášt'a sa predpokladá, že prenos zvuku každým stavebným prvkom je nezávislý na prenose inými stavebnými prvkami.

Rôzne vonkajšie zvukové polia použité pri meraní vedú k rôznym hodnotám veličín vyjadrujúcich akustické vlastnosti budov. Preukázateľným predpokladom je, že prenos pre difúzne dopadajúce zvukové pole je dostatočne reprezentatívnym pre rôzne vonkajšie zvukové polia [1]. Z tohto dôvodu sa stavebná nepriezvučnosť R' obvodového plášťa vypočíta pre difúzne dopadajúci zvuk, z ktorej sú odvodené ďalšie veličiny.

Stavebná nepriezvučnosť R' obvodového plášťa pre difúzne dopadajúci zvuk sa vypočíta pomocou sčítania akustických výkonov prenesených priamym prenosom jednotlivými stavebnými prvkami a akustického výkonu preneseného bočným prenosom podľa vzťahu:

$$R' = \left[-10 \log \left(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{f=1}^m \tau_f \right) \right] \text{ dB} \quad (11)$$

kde $\tau_{e,i}$ je pomer akustického výkonu vyžiareného v miestnosti príjmu zvuku stavebným prvkom (i) priamym prenosom zvuku dopadajúcim na tento prvok k akustickému výkonu dopadajúcemu na celý obvodový plášť; τ_f je pomer akustického výkonu vyžiareného v miestnosti príjmu zvuku obvodovým plášťom alebo bočným stavebným prvkom (f) bočným prenosom k akustickému výkonu dopadajúcemu na celý obvodový plášť; n je počet stavebných prvkov obvodového plášťa pre priamy prenos; m je počet bočných stavebných prvkov obvodového plášťa.

Poznámka 1: Pomer akustických výkonov $\tau_{e,i}$ priamo označuje príspevok stavebného prvku (i) k celkovému prenosu zvuku, a pre tento účel vzťah $R_p = -10 \log \tau_{e,i}$ môže určovať čiastkovú nepriezvučnosť prvku vo frekvenčnom pásme.

Poznámka 2: Pri priamom prenose zvuku sa môže vzťah (12) a (13) zlúčiť do vzťahu (11) a tento vzťah vyjadruje nepriezvučnosť zložených stavebných prvkov v obvodovom plášti.

4.1 Stanovenie priameho prenosu z akustických údajov prvkov

Pri predikcii akustických vlastností obvodových plášťov musia byť zahrnuté všetky jeho stavebné (fasádne) prvky s rozdelením na malé technické prvky a na ďalšie prvky.

4.1.1 Malé technické prvky

Pri priamom prenose zvuku, pomer akustických výkonov $\tau_{e,i}$ sa môže stanoviť pre každý malý technický (stavebný) prvok obvodového plášťa podľa vzťahu:

$$\tau_{e,i} = \frac{A_0}{S} 10^{-D_{n,e,i}} \quad (12)$$

kde $D_{n,e,j}$ je normalizovaný rozdiel hladín malého prvku (i) v dB; S je celková plocha obvodového plášťa zvnútra miestnosti príjmu v m^2 ; A_0 je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu ($A_0 = 10 \text{ m}^2$).

4.1.2 Ďalšie stavebné prvky

Pri priamom prenose zvuku, pomer akustických výkonov $\tau_{e,i}$ sa môže stanoviť pre každý ďalší stavebný prvok obvodového plášťa podľa vzťahu:

$$\tau_{e,i} = \frac{S_i}{S} 10^{-R_i/10} \quad (13)$$

kde R_i je nepriezvučnosť stavebného prvku (i) v dB; S je plocha stavebného prvku (i) v m^2 .

V prípade, že stavebný prvok (i) pozostáva zo základného prvku, nepriezvučnosť sa môže vyjadriť pre celý prvok alebo ako kombinácia nepriezvučnosti základného prvku a zlepšenia nepriezvučnosti obložením podľa vzťahu:

$$R_i = R_{\text{basic},i} + \Delta R_{\text{oblož},i} \text{ dB} \quad (14)$$

Akustické údaje o príslušných stavebných prvkoch musia byť prevzaté z laboratórnych meraní, môžu sa použiť aj údaje z teoretických výpočtov, empirických odhadov alebo z výsledkov meraní in situ.

4.2 Stanovenie bočného prenosu

Pomer akustických výkonov τ_f pre bočný prenos stavebným prvkom f vyplýva zo súčtu činiteľov bočnej nepriezvučnosti pre všetky bočné prenosové cesty súvisiace s týmto prvkom. Činitele bočnej nepriezvučnosti môžu byť stanovené podľa STN EN ISO 12354-1[5], s plochou S_s uvažovanou pre celú plochu S obvodového plášťa.

Obvykle je príspevok bočného prenosu zanedbateľný, až na prípady, keď sú tuhé prvky z betónu alebo tehly spojené s inými tuhými prvkami v miestnosti príjmu zvuku, napr. stropné konštrukcie alebo priečky.

5 Modely predikcie akustických vlastností obvodových plášťov

Prvý model predikcie akustických vlastností obvodových plášťov budov je založený na akustických údajoch navrhovaných stavebných prvkov vo frekvenčných pásmach a druhý model je založený na priamom jednočíselnom vyhodnotení akustických vlastností obvodových plášťov z jednočíselných údajov navrhovaných stavebných prvkov so zohľadnením adaptačných faktorov spektra.

Prvý model vychádza z laboratórnych alebo vypočítaných údajov hodnôt veličín stavebných prvkov v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz alebo v tretinovo-oktávových pásmach od 100 Hz do 3 125 Hz. V prípade potreby sa frekvenčné pásma môžu rozšíriť k vyšším alebo nižším frekvenciám. Z týchto údajov sa môže získať jednočíselné vyhodnotenie akustických vlastností obvodových plášťov podľa STN EN ISO 717-1 [2].

Druhý model umožňuje priamy výpočet jednočíselného vyhodnotenia akustických vlastností obvodových plášťov, založených na jednočíselných údajoch navrhovaných stavebných prvkov tvoriacich obvodový plášť.

V prípade, že nie sú k dispozícii údaje o akustických vlastnostiach pre celý (zložený) stavebný prvok aplikovaný v obvodovom plášti budovy, môže sa tento prvok ako celok:

- vypočítať z akustických údajov časti tohto prvku,
- alebo aplikovať nepriezvučnosť všetkých častí tvoriacich stavebný prvok a ich relatívnych plôch, pričom tesnenie škár a stykov tvorí zvláštnu časť, ktorých akustické vlastnosti sú vyjadrené pomocou nepriezvučnosti pre jednotkovú dĺžku pri uvažovanej skutočnej dĺžke.

5.1 Stanovenie prenosu zložených stavebných prvkov

Pomer akustických výkonov pre stavebný prvok zložený z niekoľkých častí (j) a tesnení (k) medzi časťami sa vypočíta vo frekvenčných pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti podľa vzťahov:

$$\tau_e = \left[\sum_{j=1}^n \frac{S_j}{S} 10^{-0,1R_j} + \frac{l_0}{S} \sum_{k=1}^m l_{s,k} 10^{-0,1R_{s,k}} \right] \quad (15)$$

$$R = -10 \log \tau_c \quad \text{dB} \quad (16)$$

kde R_j je nepriezvučnosť častí (j) stavebného prvku v dB; S_j je plocha častí (j) stavebného prvku v m^2 ; $R_{s,k}$ je nepriezvučnosť tesnenej škáry alebo stykov (k) na jednotku dĺžky v dB; $l_{s,k}$ je dĺžka tesnenej škáry alebo stykov v m, s referenciou $l_0 = 1\text{m}$; l_0 je referenčná dĺžka styku v m ($l_0 = 1\text{m}$); n je počet častí tvoriacich stavebný prvok; m je počet tesniacich škár alebo stykov medzi časťami prvkov.

Poznámka: Vzťah (14) sa môže použiť aj v prípade inej kvality tesnenia ako bola použitá pri laboratórnom meraní nepriezvučnosti stavebného prvku.

5.2 Nepriezvučnosť častí stavebných prvkov

Štandardnými časťami stavebných prvkov obvodového plášťa sú zasklenie okien, rámy okien, dvere so zasklením, zárubne a tesnenia. Preto aj nepriezvučnosť týchto častí stavebných prvkov pri predikcii nepriezvučnosti obvodových plášťov je nutné zohľadniť.

5.2.1 Nepriezvučnosť zasklenia

Nepriezvučnosť zasklenia sa stanovuje podľa prílohy D, STN EN ISO 10140-1 [5]. V tabuľke B.1 STN EN ISO 12354-3 [1] sú uvedené príklady nepriezvučnosti zasklenia jednoduchých a vrstvených skiel a dvojskiel so vzduchovou medzerou v oktávových pásmach 125 Hz a 2 000 Hz.

5.2.2 Nepriezvučnosť dverí

Pri stanovení nepriezvučnosti dverí sa zohľadňuje prenos zvuku dverným krídlom, zasklením (ak je použité), dvernou zárubňou vrátane tesnenia. Nepriezvučnosť dverí sa stanovuje podľa prílohy B, STN EN ISO 10140-1 [5].

5.2.3 Nepriezvučnosť okenných rámov

Nepriezvučnosť okenných rámov sa vzťahuje k ploche rámu.

5.2.4 Kvalita tesnenia škár a stykov

Kvalitu tesnenia škár a stykov medzi stavebnými prvkami a ich časťami sa môže vyjadriť nepriezvučnosťou R na jednotku dĺžky škáry, stanovená podľa prílohy J, STN EN ISO 10140-1 [5].

5.3 Podmienky použitia predikčných modelov

- Predpokladá sa, že pri vzdialenosti mikrofónu 2 m pred obvodovým plášťom je dostatočne obmedzený vplyv interferencií spôsobený plášťom, tento vplyv nie je pri predikcii uvažovaný.
- Rôznorodosť zvukového poľa v budovách a predpoklad existencie difúzneho poľa spôsobujú, že oproti laboratórnym podmienkam sú príčinou systémových odchýlok.

5.4 Neistota predikcie

Neistota predikcie akustických vlastností obvodových plášťov a ich častí, závisí od presnosti vstupných údajov rôznych typov stavebných prvkov, geometrie situácie v budove a odbornosti spracovateľa v oblasti stavebnej akustiky. Z týchto dôvodov nie je možné obecné stanoviť neistotu predikcie jednočíselných veličín.

Výpočet normalizovaného váženého rozdielu hladín z jednotlivých častí obvodového plášťa v tretinooktávových pásmach pri jednočíselnom vyhodnotení ($D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$) vykazujú

smerodajnú odchýlku cca 1,5 dB, zatiaľ čo pre jednotlivé oktávové pásma sú smerodajné odchýlky väčšie až do 3,0 dB.

6 Adaptačné súčinitele spektra

Pre hluk z vonkajšieho prostredia na nízkych a stredných frekvenciách sa v prílohe A, STN EN ISO 717-1 [2] odporúča zohľadniť adaptačný súčiniteľ spektra C a pre hluk z cestnej dopravy zohľadniť adaptačný súčiniteľ spektra C_{tr} .

Adaptačný súčiniteľ spektra C alebo C_{tr} k váženej vzduchovej nepriezvučnosti R_w konštrukcie staveného prvku sa vypočíta podľa vzťahov:

$$C = \left[-10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{1,i} - R_i)} - R_w \right] \text{ dB} \quad (17)$$

$$C_{tr} = \left[-10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1(L_{2,i} - R_i)} - R_w \right] \text{ dB} \quad (18)$$

kde $L_{1,i}$ je hladina akustického tlaku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového pásma spektra č. 1 (spektrum ružového šumu) v dB; $L_{2,i}$ je hladina akustického tlaku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového spektra č. 2 (spektrum dopravného hluku) v dB; R_i je nepriezvučnosť stavebného prvku pri i -tej frekvencii tretinovo-oktávového pásma s presnosťou 0,1 dB; n je počet tretinovo-oktávových pásiem.

Akustické spektrá hladín akustického tlaku na výpočet C a C_{tr} sú uvedené v Tabuľke 1.

Tabuľka 1. Akustické spektrá hladín akustického tlaku na výpočet C a C_{tr} .

f [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500
$L_{1,i}$ [dB]	- 29,0	- 28,0	- 23,0	- 21,0	- 19,0	- 17,0	- 15,0	- 13,0
$L_{2,i}$ [dB]	- 20,0	- 20,0	- 18,0	- 16,0	- 15,0	- 14,0	- 13,0	- 12,0

f [Hz]	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 125
$L_{1,i}$ [dB]	- 12,0	- 11,0	- 10,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0	- 9,0
$L_{2,i}$ [dB]	- 11,0	- 9,0	- 8,0	- 9,0	- 10,0	- 11,0	- 13,0	- 15,0

Hodnota adaptačného činiteľa spektra C a C_{tr} sa uvádza za hodnotou váženej nepriezvučnosti R_w alebo váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w v zátvorkách so zaokrúhlením na celé číslo. V prípade stanovenia váženého normalizovaného rozdielu hladín $D_{nT,w}$ sa uvádza len hodnota adaptačného činiteľa spektra C_{tr} .

7 Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov

Požadované hodnoty jednočíselných veličín vyjadrujúcich akustické vlastnosti obvodových plášťov budov na bývanie stanovené v STN 73 0532 [3] pre deň/večer sú uvedené v tabuľke 2a a pre noc v tabuľke 2b.

Tabuľka 2. a: Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov pre deň/večer [3].

Chránený vnútorný priestor	Požadovaná hodnota R'_w alebo $D_{nT,w}$ v dB						
	$L_{Aeq,2m}$ v dennom/večernom čase ¹⁾						
	< 50	> 50	> 55	> 60	> 65	> 70	> 75
		≤ 55	≤ 60	≤ 65	≤ 70	≤ 75	≤ 80
Obytné miestnosti bytov, izby v ubytovniach, hoteloch a penziónoch, internáty a pod.	30	30	30	33	38	43	46

b: Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov pre noc [3].

Chránený vnútorný priestor	Požadovaná hodnota R'_w alebo $D_{nT,w}$ v dB						
	$L_{Aeq,2m}$ v nočnom čase ¹⁾						
	< 40	> 40	> 45	> 50	> 55	> 60	> 60
		≤ 45	≤ 50	≤ 55	≤ 60	≤ 65	≤ 70
Obytné miestnosti bytov, izby v ubytovniach, hoteloch a penziónoch, internáty a pod.	30	30	30	33	38	43	46

Poznámky:

¹⁾ V prípade interpolácie požadovanej hodnoty R'_w ($D_{nT,w}$) podľa predikovanej alebo nameranej hodnoty $L_{Aeq,2m}$ (s uplatnením rozšírenej neistoty U) sa postupuje jednoduchou lineárnou regresiou.

²⁾ Požadované hodnoty R'_w ($D_{nT,w}$) v príprave novoprojektovaných obytných budov a občianskych budov.

Prvky obvodovej konštrukcie budovy (okná, zasklené časti, dvere, svetlíky, vetracie otvory a pod.), z akustického hľadiska vytvárajú zložený obvodový plášť (zloženú obvodovú stenu), ktorá je plošne nehomogénna a to z dôvodu rozdielnych vzduchových nepriezvučností jednotlivých prvkov.

Pri posudzovaní zhody vypočítaných jednočíselných hodnôt veličín zvukovej izolácie s ich normovanými hodnotami, je nutné prihliadať aj na akustické (frekvenčné) spektrum vonkajších zdrojov hluku a zvukov, aby sa zabezpečil akustický komfort bývania. Preto už v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie sa má posúdiť vplyv akustických (frekvenčných) spektier vonkajších zdrojov hluku na predikovanú váženú stavebnú nepriezvučnosť.

Pri posudzovaní zhody predikovaných hodnôt váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w s normovanými (požadovanými) hodnotami $R'_{w,N}$ sa odporúča uplatňovať kritérium:

$$(R'_w + C) \geq R'_{w,N}; \quad (R'_w + C_{tr}) \geq R'_{w,N}, \text{ prípadne } (D_{nT,w} + C_{tr}) \geq D_{nT,w,N}.$$

8 Príklady predikcie akustických vlastností obvodového plášťa

Príklad predikcie akustických vlastností obvodového plášťa v miestnosti bez balkóna, o ploche obvodového plášťa $11,3 \text{ m}^2$, s objemom miestnosti 50 m^3 .

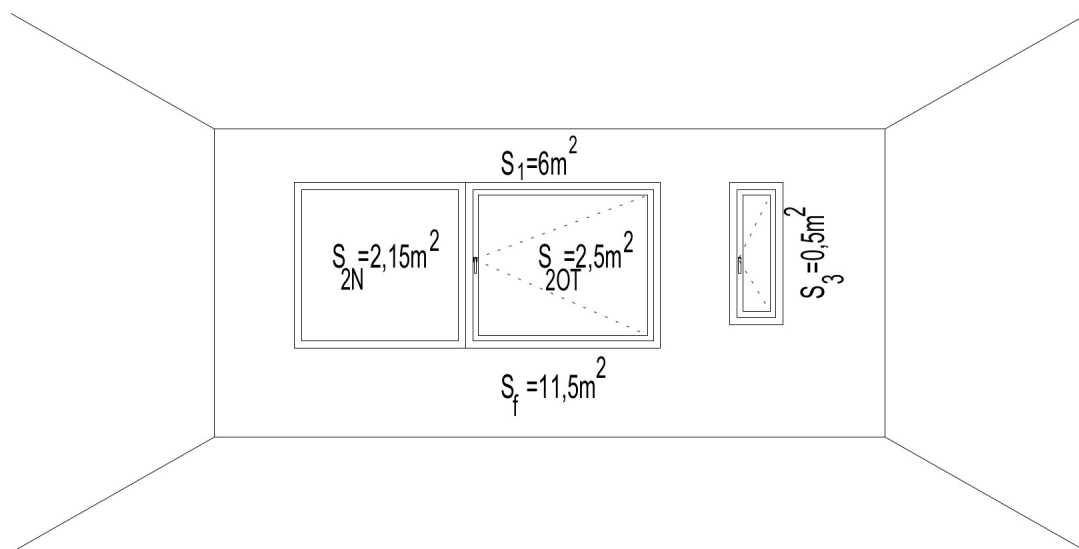
8.1 Konštrukcia stavebných prvkov

Obvodový plášť tvoria stavebné (fasádne) prvky v tomto poradí:

1. Dvojité tehlové murivo $120 \times 50 \times 100 \text{ mm}$ o ploche $S_1 = 6 \text{ m}^2$,
2. Drevené okno o ploche $S_2 = 4,5 \text{ m}^2$ so zasklením (dvojsklo 6-12-4 mm), časť otvárateľná o ploche $2,5 \text{ m}^2$,

3. Drevené okno o ploche $S_3 = 0,5 \text{ m}^2$ so zasklením (jednosklo 6 mm), otvárateľné.

Pohľad na obvodový plášť z uvedenými stavebnými prvkami zvnútra miestnosti v budove je znázornený na Obrázku 1.



Obrázok 1. Pohľad na konštrukciu obvodového plášťa zvnútra miestnosti.

8.2 Model predikcie akustických veličín obvodového plášťa z laboratórnych údajov stavebných prvkov

Tento model vychádza z laboratórnych hodnôt nepriezvučnosti stavebných prvkov v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz alebo v tretinovo-oktávových pásmach od 100 Hz do 3 125 Hz.

8.2.1 Laboratórna nepriezvučnosť R jednotlivých stavebných prvkov

Laboratórna nepriezvučnosť R jednotlivých stavebných prvkov obvodového plášťa v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz a váženej nepriezvučnosti R_w s uvedením adaptačných činiteľov spektra (C ; C_{tr}) je v Tabuľke 3.

Tabuľka 3. Laboratórna nepriezvučnosť R a R_w stavebných prvkov obvodového plášťa.

Č. prvku	Stavebný prvok	Nepriezvučnosť R v dB					$R_w (C; C_{tr})$	$(R_w + C_{tr})$
		125	250	500	1 000	2 000		
		Hz					dB	
1.	Dvojitá stena, 400 kg/m	41,0	46,0	52,0	58,0	64,0	57 (-2; -6)	51,0
2.	Okno (6-12-4) mm	23,0	22,0	30,0	36,0	37,0	33 (-1; -4)	29,0
3.	Okno 6 mm	24,0	27,0	30,0	33,0	30,0	32 (-1; -2)	30,0

Poznámka: Miestnosť bez balkóna znamená, že rozdiel hladín vyvolaný tvarom obvodového plášťa $\Delta L_{fs} = 0 \text{ dB}$.

8.2.2 Výpočet akustických vlastností obvodového plášt'a

Pri zohľadnení pomeru plôch jednotlivých stavebných prvkov S_i k celkovej ploche obvodového plášt'a S_f , vypočítané hodnoty čiastkovej nepriezvučnosti R_p 1., 2. a 3. stavebného prvku v oktávových pásmach podľa vzťahu (15, 16) sú uvedené v tabuľke 4a.

Tabuľka 4. a: Vypočítané hodnoty čiastkovej nepriezvučnosti R_p v oktávových pásmach stavebných prvkov.

Č. prvku	Pomer plôch		Čiastková nepriezvučnosť R_p v dB				
			125	250	500	1 000	2 000
			Hz				
1.	S_1/S_f	6,0/11,3 = 0,53	43,7	48,7	54,7	60,7	66,7
2.	S_2/S_f	4,5/11,3 = 0,40	27,0	26,0	34,0	40,0	41,0
3.	S_3/S_f	0,5/11,3 = 0,044	37,6	40,6	43,6	46,6	43,6

Akustické vlastností obvodového plášt'a ako celku, vyjadrené hodnotami stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach podľa vzťahu (15, 16) a normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT}$ v oktávových pásmach podľa vzťahu (8) sú uvedené v tabuľke 4b.

b: Vypočítané hodnoty hodnôt stavebnej nepriezvučnosti R' a normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT}$ v oktávových pásmach obvodového plášt'a

Obvodový plášť ako celok	$R' / D_{2m,nT}$ v dB				
	125	250	500	1 000	2 000
	Hz				
	25,6 / 26,9	22,7 / 24,0	26,1 / 27,5	36,6 / 37,9	38,7 / 40,0

Jednočíselné vyjadrenie akustických veličín obvodového plášt'a z hodnôt stavebnej nepriezvučnosti R' a normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT}$ v oktávových pásmach podľa STN EN ISO 717-1 [2]:

- vážená stavebná nepriezvučnosť $R'_w(C; C_{tr}) = 32(-1; -3)$, a pre hluk z cestnej dopravy ($R'_w + C_{tr}$) = 29 dB,
- vážený normalizovaný rozdiel hladín $D_{2m,nT,w}(C_{tr}) = 34$ dB(-4), a pre hluk z cestnej dopravy ($D_{2m,nT,w} + C_{tr}$) = 30 dB.

8.3 Model predikcie akustických veličín obvodového plášt'a z konštrukčných častí jednotlivých stavebných prvkov

V prípade, že nie sú k dispozícii údaje o akustických vlastnostiach pre celý (zložený) stavebný prvok aplikovaný v obvodovom plášti budovy, môže sa tento prvok ako celok vypočítať z nepriezvučnosti všetkých častí tvoriacich stavebný prvok a ich relatívnych plôch, pričom tesnenie špár a stykov tvorí zvláštnu časť, ktorých akustické vlastnosti sú vyjadrené pomocou nepriezvučnosti pre jednotkovú dĺžku pri uvažovanej skutočnej dĺžke.

Príklad predikcie akustických vlastností obvodového plášt'a z nepriezvučnosti konštrukčných častí stavebných prvkov uvedených v bode 8.1.

8.3.1 Stavebný prvok 1

Laboratórna nepriezvučnosť R 1. stavebného prvku v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz a váženej nepriezvučnosti R_w s adaptačnými činiteľmi spektra ($C; C_{tr}$) je uvedená v Tabuľke 5.

Tabuľka 5. Laboratórna nepriezvučnosť R a R_w 1. stavebného prvku.

Stavebný prvok	Nepriezvučnosť R v dB					R_w (C; C_{tr})	(R_w+C_{tr})
	125	250	500	1 000	2 000		
	Hz					dB	
Dvojitá stena, 400 kg/m	41,0	46,0	52,0	58,0	64,0	57 (-2; -6)	51,0

8.3.2 Stavebný prvok 2

Laboratórne hodnoty nepriezvučnosti R častí 2. stavebného prvku v oktávových pásmach od 125 Hz do 2 000 Hz a stanovená vážená nepriezvučnosť R_w s adaptačnými činiteľmi spektra (C; C_{tr}) sú uvedené v Tabuľke 6.

Tabuľka 6. Laboratórna nepriezvučnosť R a R_w časti 2. stavebného prvku.

Časti 2. stavebného prvku	Nepriezvučnosť R v dB					R_w (C; C_{tr})	(R_w+C_{tr})
	125	250	500	1 000	2 000		
	Hz					dB	
Dvojsklo (6-12-4) mm	22,0	21,0	29,0	37,0	37,0	33 (-2;-5)	28,0
Rám okna	31,0	34,0	34,0	39,0	41,0	39 (-1;-2)	37,0

Pri zohľadnení pomeru plôch jednotlivých častí 2. stavebného prvku $S_{2,j}$ a pomeru dĺžky tesnenia $l_{k,j}$ k celkovej ploche obvodového plášťa S_f , vypočítané hodnoty čiastkových nepriezvučností R_p častí 2. stavebného prvku v oktávových pásmach podľa vzťahu (15, 16) sú uvedené v Tabuľke 7a.

Tabuľka 7. a: Vypočítané hodnoty čiastkových nepriezvučností R_p v oktávových pásmach častí 2. stavebného prvku.

2. stavebný prvok a jeho častí	Pomer plôch		Čiastková nepriezvučnosť R_p v dB				
			125	250	500	1 000	2 000
			Hz				
Zasklenie – dvojsklo	S_{2-1}/S_f	$3,2/11,3 = 0,28$	27,5	26,5	34,5	42,5	42,5
Okenný rám 6,3 m	S_{2-2}/S_f	$1,4/11,3 = 0,12$	40,2	43,2	43,2	48,2	53,2
Neotvárateľná časť okna tesnenie 6,3 m s $R = 60$ dB	l_{k-1}/S_f	$6,3/11,3 = 0,56$	62,5	62,5	62,5	62,5	62,5
Otvárateľná časť okna, tesnenie 8,4 m s $R = 45$ dB	l_{k-2}/S_f	$8,4/11,5 = 0,74$	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3

Akustické vlastnosti 2. stavebného prvku ako celku, tzn. vypočítané hodnoty stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach podľa vzťahu (15,16) sú uvedené v Tabuľke 7b.

b: Vypočítané hodnoty hodnôt stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach 2. stavebného prvku ako celku.

2. stavebný prvok ako celok	R' v dB				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz
	28,3	27,5	34,8	41,3	41,8

8.3.3 Stavebný prvok 3

Laboratórne hodnoty nepriezvučnosti R častí 3. stavebného prvku v oktávových pásmach a stanovená vážená nepriezvučnosť R_w s adaptačnými činiteľmi spektra (C ; C_{tr}) sú uvedené v Tabuľke 8.

Tabuľka 8. Laboratórna nepriezvučnosť R a R_w častí 3. stavebného prvku.

Časti 3. stavebného prvku	Nepriezvučnosť R v dB					$R_w (C; C_{tr})$	$R_w (C_{tr})$
	125	250	500	1 000	2 000		
	Hz					dB	
Jednosklo 6 mm	21	25	28	31	27	39 (-1; -1)	28
Rám okna 2,4 m	31	34	34	39	41	39 (-1; -2)	37

Pri zohľadnení pomeru plôch jednotlivých častí 3. stavebného prvku S_{3-j} a pomeru dĺžky tesnenia l_{k-j} k celkovej ploche obvodového plášťa S_f , vypočítané hodnoty čiastkových nepriezvučností R_p častí 3. stavebného prvku v oktávových pásmach podľa vzťahu (15, 16) sú uvedené v Tabuľke 9a.

Tabuľka 9. a: Vypočítané hodnoty čiastkových nepriezvučností R_p častí 3. stavebného prvku v oktávových pásmach.

3. stavebný prvok a jeho časti	Pomer plôch		Čiastková nepriezvučnosť R_p v dB				
			125	250	500	1 000	2 000
			Hz				
Jednosklo 6 mm	S_{3-1}/S_f	$0,25/11,3 = 0,022$	37,6	41,6	44,6	47,6	
Okenný rám 2,4 m	S_{3-2}/S_f	$0,25/11,3 = 0,022$	47,6	50,6	50,6	55,6	60,6
Otvárateľné okno, tesnenie 2,4 m s $R = 35$ dB	l_{k-1}/S_f	$2,4/11,5 = 0,21$	41,7	41,7	41,7	41,7	41,7

Akustické vlastnosti 3. stavebného prvku ako celku, tzn. vypočítané hodnoty stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach podľa vzťahu (15, 16) sú uvedené v Tabuľke 9b.

b: Vypočítané hodnoty stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach 3. stavebného prvku ako celku.

3. stavebný prvok ako celok	R' v dB				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz
	37,0	39,5	40,7	41,7	40,6

8.3.4 Výpočet akustických vlastností obvodového plášťa

Akustické vlastnosti 1. stavebného prvku a 2. a 3. stavebného prvku ako celku, vyjadrené hodnotami stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach (Tabuľka 7b, 9b) sú uvedené v Tabuľke 10a.

Tabuľka 10. a: Vypočítané hodnoty stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach jednotlivých stavebných prvkov obvodového plášťa.

Č. prvku	Stavebný prvok	Stavebná nepriezvučnosť R' v dB				
		125	250	500	1 000	2 000
		Hz				
1.	Dvojitá stena, 400 kg/m	43,7	48,7	54,7	60,7	66,7
2.	Okno (6-12-4) mm	28,3	27,5	34,8	41,3	41,8
3.	Okno 6 mm	37,0	39,5	40,7	41,7	40,6

Akustické vlastnosti obvodového plášťa tvoreného stavebnými prvkami 1., 2. a 3., vyjadrené hodnotami stavebnej nepriezvučnosti R' v oktávových pásmach podľa vzťahov (15, 16) a hodnotami normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT}$ v oktávových pásmach podľa vzťahu (8) sú uvedené v tabuľke 10b.

b: Vypočítané hodnoty hodnôt stavebnej nepriezvučnosti R' a normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT}$ v oktávových pásmach obvodového plášťa ako celku.

Obvodový plášť ako celok	$R' / D_{2m,nT}$ v dB				
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz
	25,5 / 26,9	22,6 / 24,0	25,8 / 27,2	36,0 / 37,4	37,4 / 38,8

Jednočíselné vyjadrenie akustických veličín obvodového plášťa tvoreného stavebnými prvkami 1., 2. a 3. podľa STN EN ISO 717-1 [2]:

- vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w ($C; C_{tr}$) = 32 (-1; -3), a pre hluk z cestnej dopravy ($R'_w + C_{tr}$) = 29 dB,
- vážený normalizovaný rozdiel hladín $D_{2m,nT,w}(C_{tr})$ = 34 (-4) dB, a pre hluk z cestnej dopravy ($D_{2m,nT,w} + C_{tr}$) = 30 dB.

9 Záver

V štádiu projektovej prípravy budov na bývanie, požadované (normované) hodnoty veličín charakterizujúcich zvukovú izoláciu obvodového plášťa sa podľa STN EN ISO 12354-3 [1] môžu preukazovať dvoma modelmi.

Vstupné údaje o navrhovaných stavebných prvkoch alebo o konštrukčných častiach stavebných prvkov obvodových plášťov môžu byť prevzaté z laboratórnych meraní [8, 9], získané pomocou teoretických výpočtov [9] a empirických odhadov alebo aj z údajov získaných meraním in situ.

Uvedenými modelmi sa predikuje vážená stavebná nepriezvučnosť R'_w alebo vážený normalizovaný rozdiel hladín $D_{2m,nT,w}$ obvodových plášťov na základe nepriezvučnosti R stavebných prvkov, ktoré sú stanovené buď z laboratórnych meraní alebo vypočítané v tretinovo-oktávových pásmach alebo oktávových pásmach podľa STN EN ISO 10140-2 [7]. Jednočíselné vyjadrené akustických vlastností obvodových plášťov je podľa postupu uvedenom v STN EN ISO 717-1 [2] aj s adaptačnými činiteľmi spektra ($C; C_{tr}$).

Na predikciu akustických vlastností obvodových plášťov budov sú k dispozícii softvérové produkty (výpočtové modely), obsahujúce databázu stavebných prvkov s ich fyzikálno-materiálovými vlastnosťami [11].

V akustickom posudku (štúdií) predikcie veličín zvukovej izolácie obvodových plášťov budov, okrem uvedenia aplikovaného modelu predikcie musia byť uvedené podklady (zdroje) použitých vstupných údajov o stavebných prvkoch.

Zabezpečiť akustický komfort v chránených miestnostiach bytov pred zvukom prenikajúcim z vonkajšieho prostredia, znamená už v štádiu návrhu projektovej prípravy budov na bývanie aplikovať modely na predikciu zvukovej izolácie. Pri posudzovaní zhody vypočítaných hodnôt váženej stavebnej nepriezvučnosti R'_w alebo váženého normalizovaného rozdielu hladín $D_{2m,nT,w}$ s normovanými hodnotami $R'_{w,N}$ alebo $D_{nT,w,N}$, sa odporúča zohľadniť aj hodnoty vypočítaných adaptačných činiteľov spektra.

Literatúra

- [1] STN EN ISO 12354-3:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 3: Vzduchová nepriezvučnosť voči vonkajšiemu zvuku
- [2] STN EN ISO 717-1:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť
- [3] STN 73 0532:2013 Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky
- [4] Vyhláška MZ SR č. 549/2007 Z. z., ktorou sa ustanovujú podrobnosti o prípustných hodnotách hluku, infrazvuku a vibrácií a o požiadavkách na objektivizáciu hluku, infrazvuku a vibrácií v životnom prostredí v platnom znení
- [5] STN EN ISO 10140-1:2016 Akustika. Laboratórne meranie zvukoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 1: Aplikačné pravidla pre určité prvky
- [6] STN EN ISO 12354-1:2018 Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť medzi miestnosťami
- [7] STN EN ISO 10140-2: 2010 Akustika. Laboratórne meranie zvukovoizolačných vlastností stavebných konštrukcií. Časť 2: Meranie vzduchovej nepriezvučnosti
- [8] Tomašovič P. a spol.: Akustika budov II. Laboratórna nepriezvučnosť stavebných konštrukcií prvkov, STU Bratislava 2014. ISBN 978-80-227-4145-3
- [9] Zajac. J., Szabó D.: Akustické požiadavky na deliace konštrukcie, STU Bratislava 2009, ISBN 978-80-227-3113-3
- [10] Kaňka J.: Akustika stavebných objektu, Vydavatelství ERA Brno, 2009
- [11] NEPrůzvučnost 2010, Svoboda software 2010.

Kontaktná adresa

Richard DRAHOŠ, Ing., PhD.
Milan DRAHOŠ, Ing.
D2R engineering, s.r.o., Poprad
e-mail: d2r@d2r.sk



Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko
<http://www.acoustics.sk/>



ANALÝZA AKUSTICKÝCH SPEKTIER FOSFÁTOVÝCH IÓNOVO VODIVÝCH SKIEL PRED A PO DEHYDRATÁCIÍ

Peter Hockicko, Francisco Munoz

1 Úvod

Iónovo vodivé fosfátové sklá patria medzi perspektívne materiály, ktoré už dnes majú svoje bohaté využitie. Chemickú stabilitu fosfátových skiel je možné zlepšovať pridávaním oxidov kovov. Fosfátové sklá v porovnaní so silikátovými sklami vykazujú výbornú priepustnosť pre UV svetlo, v súčasnosti dominujú v aplikáciách vysokovýkonných laserových materiálov a čoraz viac sa používajú v optoelektronike, biomedicínskom výskume alebo na skladovanie rádioaktívneho odpadu. Ich ďalšou priemyselnou aplikáciou sú izolačné materiály v produktoch rádioaktívneho odpadu. Ďalšími aplikáciami fosfátových skiel sú pevné elektrolyty v zariadeniach, ako sú Li-ion batérie (Munoz, 2012).

Sklenené fosfátové vlákna sa využívajú aj vo svalových tkanivách, slúžia taktiež ako systém dodávania antibakteriálnych látok do ľudského tela.

V tomto príspevku sa zameriavame na štúdium akustického útlmu na vzorkách iónovo vodivých skiel pred a po dehydratácii.

2 Experimentálna časť

Ako sa už v minulosti preukázalo, akustické vlny sú vhodné nielen na výskum kompozitných materiálov (Daníhelová et al., 2013), ale možno ich využiť aj na štúdium materiálových vlastností magnetických tekutín (Kúdelčík et al., 2015), tekutých kryštálov (Veveričík et al., 2017) a amorfných skiel (Hockicko et al. 2015).

2.1 Príprava vyšetřovaných materiálov

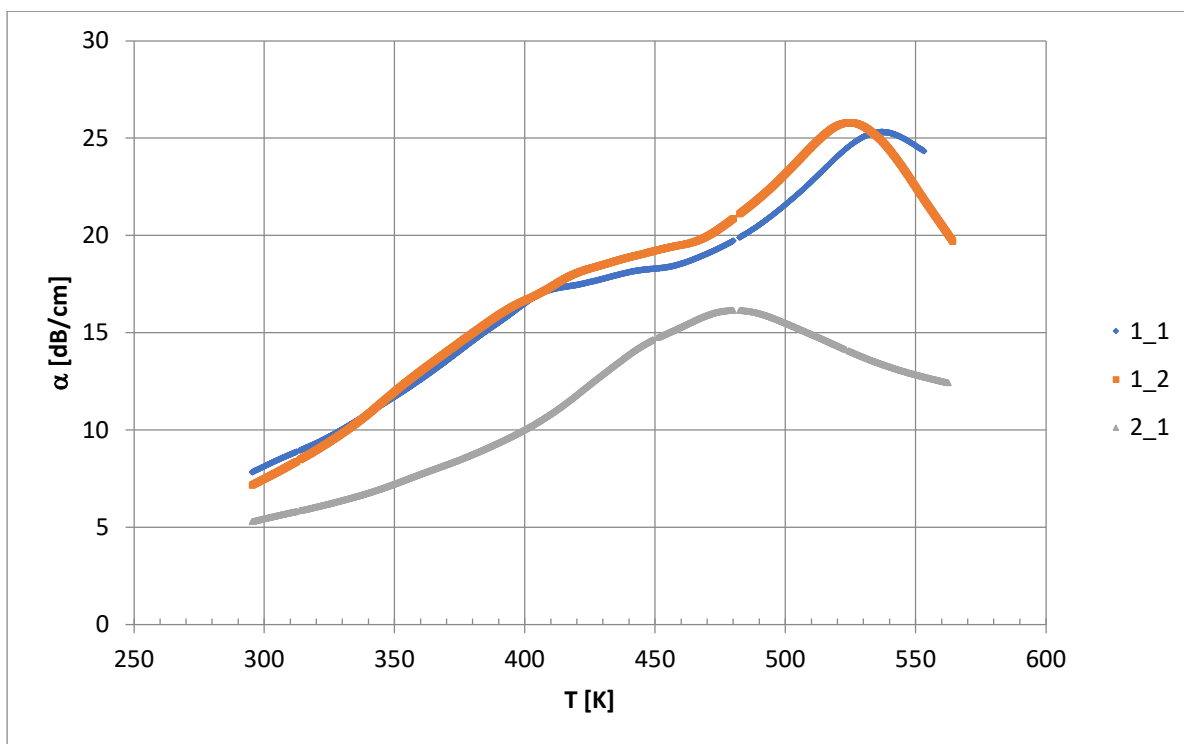
Pri príprave 100g skla zloženia $40\text{Li}_2\text{O}-10\text{BaO}-50\text{P}_2\text{O}_5$ (mol.%) boli použité jednotlivé komponenty Li_2CO_3 , BaCO_3 a $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Zmes sa kalcinovala v porcelánovom tégliku do $250\text{ }^\circ\text{C}$ cez noc, potom sa tavia pri $900\text{ }^\circ\text{C}$ 2 hodiny na vzduchu. Tavenina sa naliala na predhriatu mosadznú dosku a žihala v peci pomalým ochladzovaním taveniny pod $400\text{ }^\circ\text{C}$. Roztaveným sklom bola nedehydratovaná vzorka. Na získanie dehydratovaného skla sa uskutočnilo pretavenie pod prúdom N_2 predchádzajúceho cez sklo v grafitovej forme a podľa postupu opísaného v (Munoz et al, 2019). V tomto prípade sa pretavovanie uskutočňovalo pri $800\text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 6 hodín. Výsledné sklo bolo úplne žihané, homogénne a dobre brúsené. Z predchádzajúcich experimentov v uvedenej práci sa preukázalo, že obsah vody vo forme hydroxylových iónov drasticky klesá.

2.2 Akustické merania

Našou úlohou bolo zistiť, či sme schopní akustickými meraniami detegovať vplyv dehydratácie na vzorku skla, presnejšie na akustické útlmové spektrum.

Pozdĺžne akustické vlny s frekvenciou 13 MHz generované modulátorom a prijímačom MATEC 7700 a meničom LiNbO_3 akusticky spojeným priamo so vzorkou boli použité na vyšetřovanie jednotlivých vzoriek skiel. Akustické merania sa uskutočňovali pri teplotách v rozmedzí od 290 K do 560 K pri rýchlosti ohrevu 0,5 K/min. Pripravená vzorka bola valcová (hrúbka $h = 1,61\text{ mm}$). Konce plôch boli vyleštené, aby boli ploché a paralelné.

Obrázok 1. ukazuje namerané akustické spektrum skúmaných skiel. Z teplotných závislostí akustického útlmu a polôh pík boli stanovené hodnoty aktivačnej energie dominantných procesov.



Obrázok 1. Analýza akustických spektier vzoriek fosfátových iónovo vodivých skiel pred a po dehydratácií.

Ako možno z nameraného útlmového spektra na nedehydratovanej vzorke vidieť, na vzorke 1 (1_1: prvé meranie, 1_2: druhé meranie), hlavný útlmový pík pri vyšších teplotách sa nachádza v intervale 520 – 540 K. Taktiež ďalší zlom je pozorovaný pri teplote okolo 400 K.

Naproti tomu, meranie na dehydrovanej vzorke (2_1) poukazuje na posun hlavného útlmového píku k nižším teplotám, čo súvisí aj so znížením aktivačnej energie hoppingového procesu prenosu iónov. Taktiež aj výrazný pík pozorovaný pri prvej vzorke v oblasti 400 K už pri tejto dehydrovanej vzorke nie je pozorovaný.

Naše prvé akustické merania na vzorkách pred dehydratáciou a po dehydratácií naznačujú, že za pomoci teplotných závislostí akustického útlmu sme schopní detekovať zmeny, ktoré súvisia so znižovaním obsahu vody vo vzorke.

3 Závery

Prvé akustické merania pri frekvencii 13 MHz na vzorke skla zloženia $40\text{Li}_2\text{O}-10\text{BaO}-50\text{P}_2\text{O}_5$ (mol.%) bez hydratácie a s vykonanou následnou hydratáciou poukazujú na to, že akustické merania sú schopné detegovať štrukturálne zmeny, ku ktorým dochádza v dôsledku chemických procesov súvisiacich s dehydratáciou.

Vplyvom dehydratácie hlavný útlmový pík sa posunul k nižším teplotám, čo svedčí aj o znížení aktivačnej energie hoppingového prenosu iónov v štruktúre skla. Taktiež aj výrazný pík v strednoteplotnom intervale sa už pri hydratovanej vzorke nevyskytuje.

Predpokladáme, že merania na ďalších vzorkách a pri rôznych frekvenciách nám pomôžu preskúmať a lepšie spoznať procesy súvisiace s dehydratáciou vyšetovaných materiálov.

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore Slovenskej grantovej agentúry KEGA cez projekt č. 023ŽU-4/2021 a v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Nezávislý výskum a vývoj technologických zostáv na báze produktov nositeľnej elektroniky, ako nástrojov zvyšovania hygienických štandardov v spoločnosti vystavenej vírusu spôsobujúceho ochorenie COVID-19, kód ITMS2014+ 313011ASK8, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

DANIHELOVÁ, A., ČULÍK, M., DANIHELOVÁ, Z. 2013. Composite material made of spruce wood and carbon fibre and investigation of its properties via resonance dynamic method. In *Akustika*, ISSN 1801-9064, 2013, Studio D – Akustika s.r.o., České Budějovice, Volume 20, p. 2-5.

HOCKICKO, P., BÍREŠOVÁ, J. 2015. Acoustic investigation of phosphate-based glasses by means of theoretical models. In *Akustika*, 2015, Volume 23, (1), p. 18 – 21.

KÚDELČÍK, J., BURY, P., HARDOŇ, Š., KOPČANSKÝ, P., TIMKO, M. 2015. Influence of nanoparticles diameter on structural properties of magnetic fluid in magnetic field. In *Journal of Electrical Engineering*, 2015, Volume 66, Issue 4, 4 p. 231-234.

MUŇOZ, F. 2012. Comments on the structure of LiPON thin-film solid electrolytes. In *Journal of Power Sources*, ISSN: 0378-7753, 2012, Volume 198, p. 432-433.

MUŇOZ, F., BALDA, R., 2019. A highly efficient method of dehydroxylation and fining of Nd phosphate laser glasses. In *International Journal Applied Glass Science*, 2018, 1–5.

VEVERIČÍK, M., BURY, P., KOPČANSKÝ, P., et al. 2017. Effect of carbon nanotubes on liquid crystal behavior in electric and magnetic fields studied by SAW. In *12th International scientific conference of young scientists on sustainable modern and safe transport*, Book Series: PROCEDIA ENGINEERING, 2017, Volume 192, p. 935-940.

Summary

Analysis of Acoustic Spectra of Phosphate Ion Conductive Glasses before and after Dehydration. The first acoustic measurements at the frequency of 13 MHz on a glass sample of 40Li₂O-10BaO-50P₂O₅ (mol%) without hydration and with subsequent hydration indicate that the acoustic measurements are able to detect structural changes due to chemical processes related to dehydration. Due to dehydration, the main attenuation peak was shifted to lower temperatures, which also indicates a reduction of the activation energy of hopping ion transport in the glass structure. Also, a significant peak in the mid-temperature interval no longer occurs in the hydrated sample. We assume that measurements on other samples and at different frequencies will help us to investigate and better understand the processes related to the dehydration of the investigated ion conductive glasses.

Keywords

Ion conductive glasses; acoustic measurements; Li ions; dehydration.

Contact Address

doc. PaedDr. Peter Hockicko, PhD.
Department of Physics BB427,
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
University of Žilina
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovakia
Tel. +421 41 513 2364
peter.hockicko@feit.uniza.sk
<http://hockicko.uniza.sk>

Francisco Munoz
Institute of Ceramics and Glass (CSIC),
Madrid, Spain
fmunoz@icv.csic.es

TEPELNO-TECHNICKÉ VLASTNOSTI A VLNKOSTNÝ STAV DIFÚZNEJ STĽPIKOVEJ STENY S PAROBRZDOU NA BÁZE DREVA

Patrik Štompf, Stanislav Jochim, Dominik Hricko, Dominika Búryová, Michal Miklošovič

1 Úvod

Moderné trendy v stavebníctve idú ruka v ruke s novými inováciami a technológiami, ktoré ovplyvňujú celý proces navrhovania a výstavby. Trendom posledných rokov je výstavba budov s čo najväčšou úsporou energií. Výstavba ultranízkoenergetických budov sa po 1.1. 2021 na Slovensku stala bežnou stavebnou praxou. Rovnako sa v súčasnosti čoraz viac upriamuje pozornosť na ekologický pohľad pri navrhovaní a výstavbe nových budov a s tým súvisiacu voľbu materiálovej bázy a konštrukčného riešenia. Voľba drevenej konštrukcie a materiálov na báze dreva sa rovná voľbe úspory energie, energetickej hospodárnosti budovy a pozitívnym dopadom na životné prostredie.

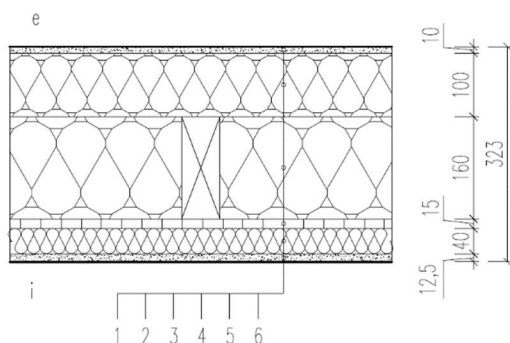
Pri ultranízkoenergetických budovách hrá významnú úlohu návrh skladieb konštrukcií obalového plášťa budovy, ktoré musia spĺňať prísne tepelno-technické požiadavky. Výber materiáloveho zloženia má významný vplyv na výsledné tepelno-technické vlastnosti a spoľahlivosť konštrukcie z hľadiska stavu vlhkosti a difúzie vodnej pary. Na vlhkostné vlastnosti konštrukcií na báze dreva majú vplyv druhy použitých materiálov vo funkcií parobrzdy, resp. parozábran, ich hrúbky a vzájomné poradie jednotlivých vrstiev. V drevených konštrukciách je z hľadiska kontroly stavu vlhkosti vhodnejšie použitie parobrzdy a izolácií na prírodnej báze, ktoré majú vzhľadom k vlhkosti dobré hygroskopické vlastnosti.

Pre skladbu obvodovej steny drevostavby je dôležité, aby splnila tepelno-technické požiadavky normy STN 73 0540-2. Vlhkostný stav materiálov, ako aj relatívnu vlhkosť vzduchu v konštrukcií obvodovej steny možno stanoviť teoreticky výpočtom, ale aj experimentálne v reálnych klimatických podmienkach. Tento príspevok je zameraný na:

- 1) Teoretickú analýzu tepelno-technických a vlhkostných vlastností stĺpikovej steny na báze dreva s prírodnými izoláciami a parobrzdou na báze dreva a následné posúdenie podľa STN.
- 2) Experimentálne overenie vlhkostného stavu materiálov obvodovej steny s parobrzdou na báze dreva počas zimného obdobia.
- 3) Konfrontáciu výsledkov stavu vlhkosti z teoretickej predikcie a experimentu.

2 Konštrukčná skladba stĺpikovej steny

Pre teoreticko-experimentálne overenie tepelno-technických a vlhkostných vlastností bol zhotovený fragment difúzne otvorenej konštrukcie MS1 s parobrzdou z OSB/4 dosky (Obrázok 1.).



Obrázok 1. Skladba stĺpkovej obvodovej steny MS1. Skladba v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/160 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 4 – vnútorné opláštenie: OSB/4 doska, 5 – inštalačný rošt: SM (profil: 60/40 mm) + tepelná izolácia KONOPE Flex, 6 – vnútorné opláštenie: SDK doska RigiStabil.

3 Metodika overovania tepelno-technických a vlhkosťných vlastností

3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností

Analýza tepelno-technických vlastností skladby stĺpkovej obvodovej steny pri použití okrajových podmienok podľa STN 73 0540-2 je realizovaná výpočtovým programom:

- ISOVER Fragment s princípom jednorozmerného šírenia tepla (stacionárne podmienky).
- AREA s princípom dvojrozmerného vedenia tepla a vlhkosti (stacionárne podmienky).

Posúdenie je spracované podľa STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019.

V Tabuľke 1. je prehľad materiálov použitých v konštrukcii steny a ich fyzikálne vlastnosti.

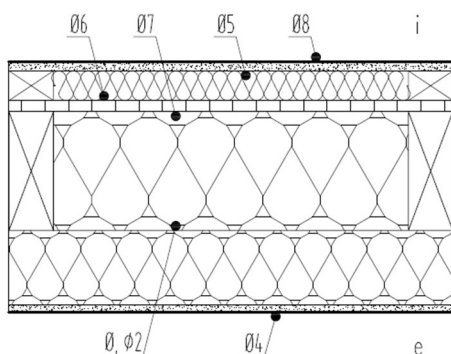
Tabuľka 1. Použité konštrukčné materiály – fyzikálne parametre.

P. č.	Materiál	Hustota ρ_d [kg/m ³]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W/m.K]		Merná tepelná kapacita c [J/kg.K]	Faktor difúzneho odporu μ [1]	Zdroj
			návrhový	deklarovaný			
1.	Mäkké drevo	500	0,13	0,12	1 600	50 (20)	STN EN 10456
2.	STEICO flex (drevovláknitá izolácia)	60	0,038	0,036	2 100	1-2	Technický list
3.	STEICO Protect dry (drevovláknitá izolácia)	110	0,041	0,039	2100	5	Technický list
4.	KONOPE Flex 35	30	0,041	0,039	1600	1,5	Technický list
5.	EGGER OSB/4	600	0,15	0,13	2100	200	Technický list
6.	SDK doska RIGISTABIL	840	0,15	0,142	960	> 12	Technický list
7.	Capatect Mínera Carbon Staubarm – tmel	1 350	0,49	0,46	890	≤ 55	Technický list
8.	Capatect SH Putz – silikónová omietka	1 600	0,73	0,7	900	50	Technický list

3.2 Experimentálne meranie vlhkosťného stavu a priebehov teplôt v konštrukciách

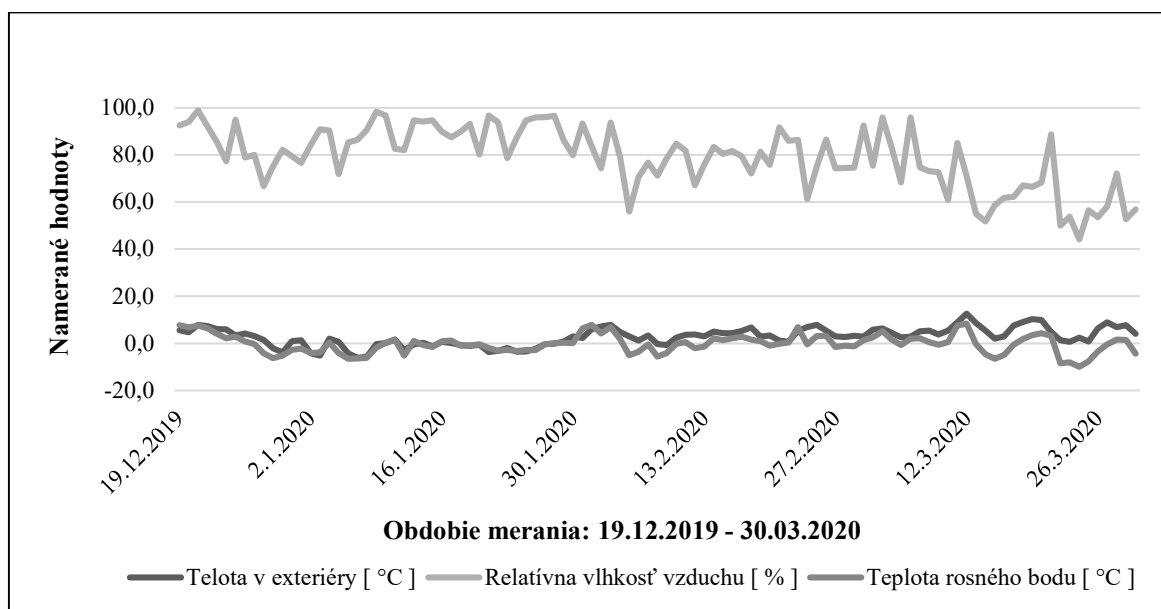
3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v období od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020 boli vykonávané v pravidelných časových intervaloch. Počas sledovaného obdobia sa prostredníctvom snímačov a meracieho prístroja (ALMEMO) vo výskumnom objekte zaznamenávali hodnoty interiérovej a exteriérovej teploty, relatívnej vlhkosti vzduchu, priebehy teplôt a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách. Testoval sa fragment stĺpkovej steny s rozmermi 1,2 x 1,2 m (Obrázok 2.).



Obrázok 2. Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie MS1. Snímače na meranie teploty: $\theta_4 - \theta_8$, snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu: θ_2 .

Fragment konštrukcie bol zabudovaný v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu (20 ± 1) °C a vlhkosťou vzduchu (50 ± 5) %. Z vonkajšej strany na konštrukciu pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



Graf 1. Exteriérová teplota, relatívna vlhkosť vzduchu a teplota rosného bodu (celé obdobie merania).

3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách

Jednotlivé merania prebiehali prostredníctvom nasledovných prístrojov a metód:

1. *Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T):* meranie vlhkosti drevených zabudovaných prvkov (v smere vlákien) – inštalačný rošt, stĺpik (KVH).
2. *Gravimetrická metóda:* všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote 103 ± 2 °C podľa STN EN 322.
3. *Snímače na súčasné meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu:* rozhranie vrstiev - stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.

3.3 Teoreticko-experimentálne overovanie tepelných a vlhkosťných vlastností

Pre konfrontáciu výsledkov experimentálnych meraní a teórie boli spracované výpočty tepelno-technických a vlhkosťných vlastností konštrukcií v programoch ISOVER Fragment a AREA s použitím najnepriaznivejších parametrov vonkajšieho vzduchu, ktoré boli namerané počas

sledovaného obdobia. Najnižšia nameraná exteriérová teplota bola $-10,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relatívna vlhkosť vzduchu pri tejto teplote sa pohybovala okolo 99,7 %.

4 Výsledky

4.1 Teoretická analýza tepelno-technických vlastností

Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností konštrukcie MS1 v programe ISOVER Fragment sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (ISOVER Fragment).

Konštrukcia	Súčiniteľ prechodu tepla U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]	Tepelný odpor R_o [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]	Povrchová teplota konštrukcie θ_{si} [$^{\circ}\text{C}$]	Vodná para [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{rok})$]		Fázový posun ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenzované množstvo g_k	Ročná bilancia $g_k - g_v$		
MS1	0,150 ⁽²⁾	6,486	19,433	0,2230 ⁽¹⁾	-3,4802	15,18	397,12

Poznámka: ⁽¹⁾ v skladbe dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie (pod fasádnou omietkou)
⁽²⁾ zohľadnený vplyv tepelných mostov: percentuálnym podielom rámu vo fragmente konštrukcie

Pre komplexné hodnotenie detailov navrhutej konštrukcie bola skladba analyzovaná programom AREA. V Tabuľke 3. sú vypočítané tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti konštrukcie MS1.

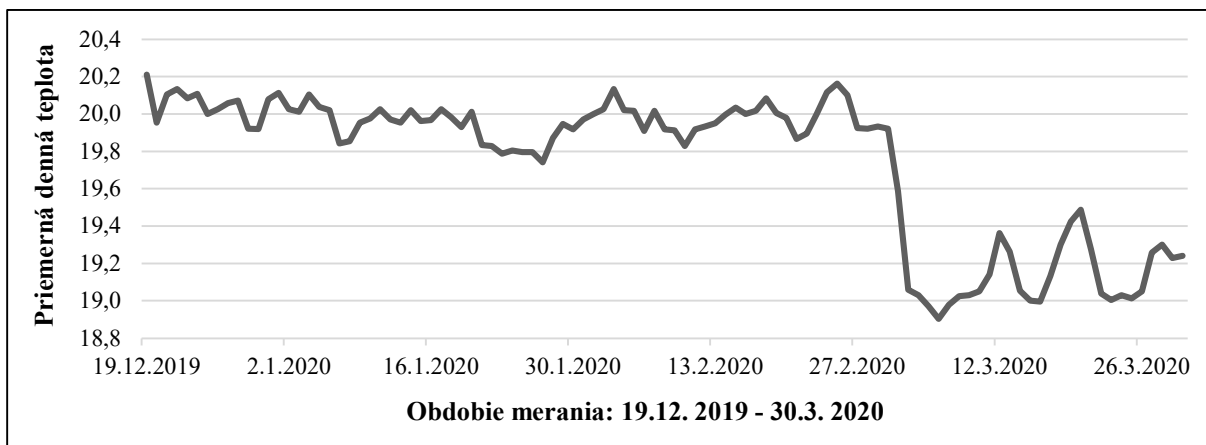
Tabuľka 3. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (AREA).

Prostredie	Teplota T [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota rosného bodu T_w [$^{\circ}\text{C}$]	Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]	Minimálna povrchová teplota $T_{s, \min}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Hustota tepelného toku z prostredia Q [W/m] ⁽¹⁾	Tepelná priepustnosť L [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] ⁽²⁾
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,21	6,1598	0,17599
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,1597	0,17599

Poznámka: ⁽¹⁾ Hustota tep. toku [Q]: hustota tepelného toku z daného prostredia (hodnota je vzťahnutá na 1 m dĺžky tep. mostu - strata je kladná, zisk záporný),
⁽²⁾ Tepelná priepustnosť [L]: tepelná priepustnosť (lineárna tepelná vodivosť) medzi daným prostredím a okolím určená pomocou dvojrozmerného výpočtu stavebného prvku oddeľujúceho dve prostredia

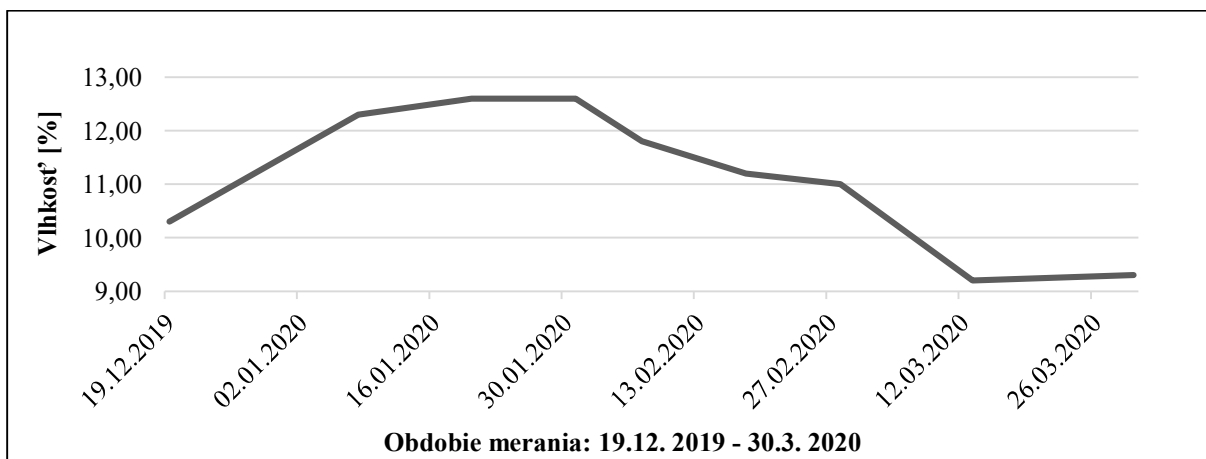
4.2 Experimentálne meranie vlhkosťného stavu materiálov a teplôt v konštrukcii

Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútorného povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach. Konštrukcia musí rovnako spĺňať aj hygienické kritérium – kritická minimálna teplota na vnútornom povrchu konštrukcie, pri ktorej dochádza k rozvoju plesní. Pribeh vnútornej povrchovej teploty konštrukcie za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.

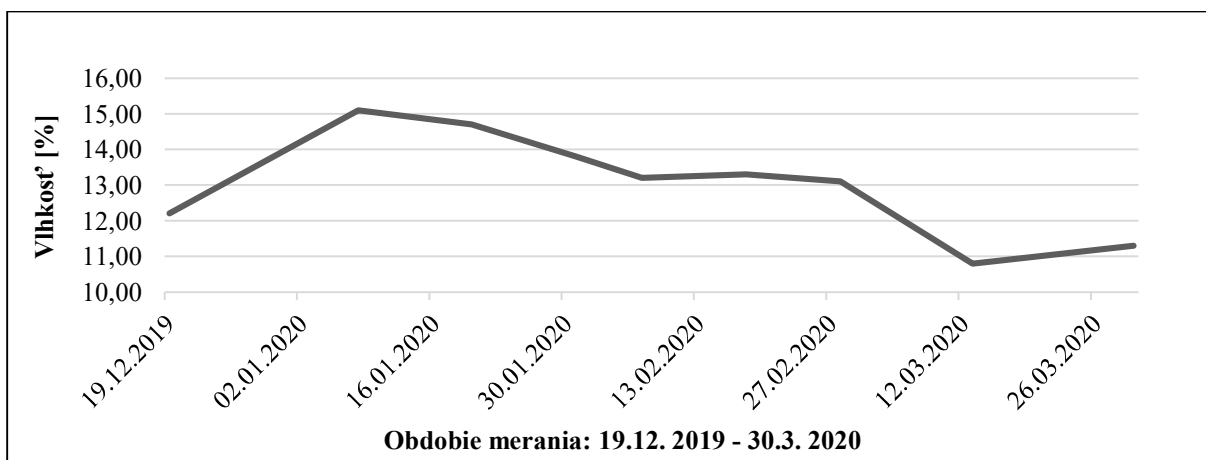


Graf 2. Pribeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcie MS1.

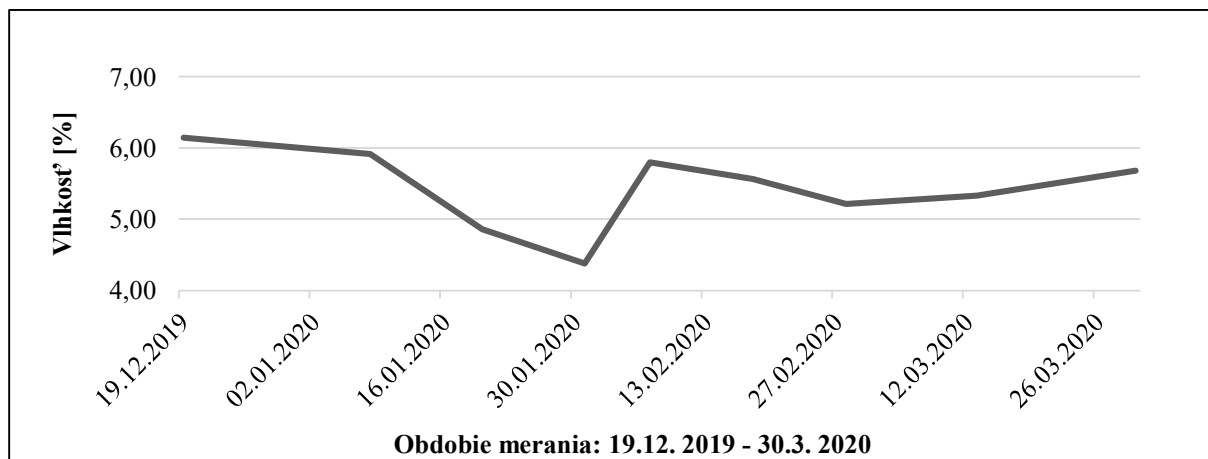
Grafy 3 – 5. zobrazujú priebehy vlhkostí nosnej konštrukcie (KVH stĺpiky), inštaláčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte (KONOPE Flex) počas celého obdobia meraní.



Graf 3. Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH stĺpiky [%].

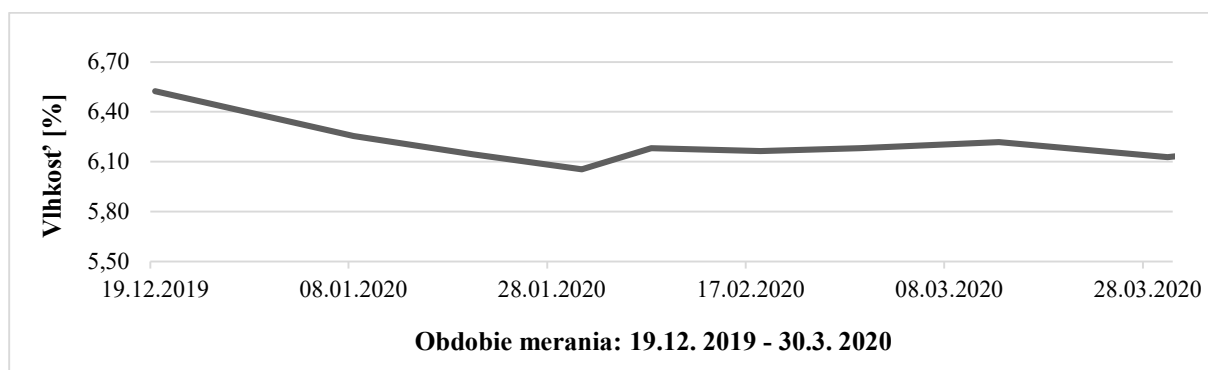


Graf 4. Vlhkosť inštaláčného roštu – SM [%].



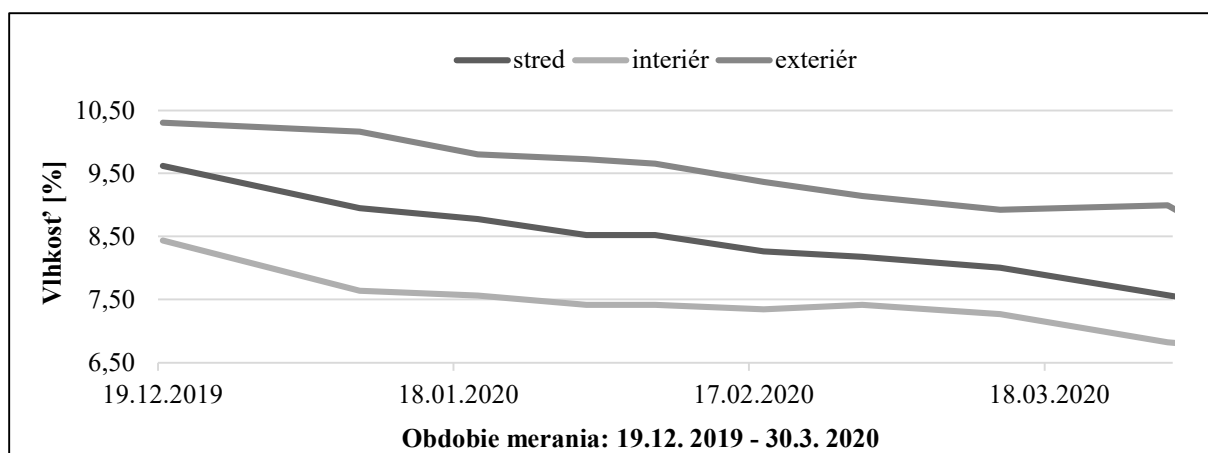
Graf 5. Vlhkosť tepelnej izolácie v rošte – KONOPE Flex [%].

Graf 6. zobrazuje priebeh vlhkosti opláštenia nosnej konštrukcie – OSB/4 dosky vo funkcii parobrzdnej roviny.



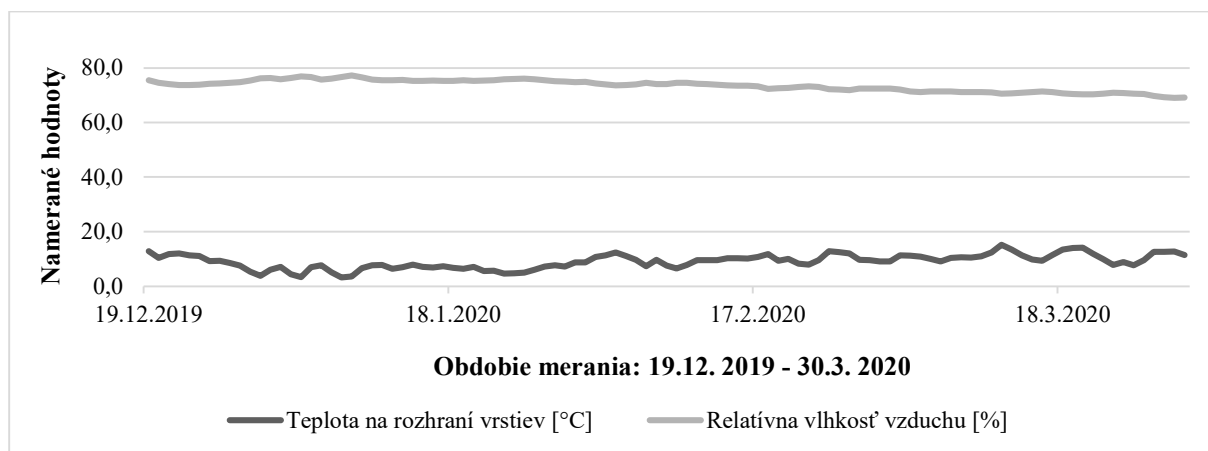
Graf 6. Vlhkosť OSB/4 dosky [%].

Na Grafe 7. je zobrazený priebeh vlhkosti tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmente konštrukcie MS1 za OSB/4 doskou (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave naprieč touto vrstvou rozdelená na tri rovnaké časti po hrúbke vrstvy.



Graf 7. Vlhkosť medzistúpkovej tepelnej izolácie STIECO flex [%].

Na Grafe 8. je zobrazený priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.



Graf 8. Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie.

5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností vyplýva nasledovné:

1. Skladba obvodovej steny stĺpikovej konštrukcie na báze dreva spĺňa všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti podľa STN 73 0540-2 (Tabuľka 2. a 3.).
2. Podľa výpočtu oboch programov dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepl'ovacieho systému (pod vrstvou fasádnej omietky) ale ročná bilancia skondenzovanej a odparenej vlhkosti je priaznivá a spĺňa požiadavku normy na maximálne ročné skondenzované množstvo vodnej pary v konštrukcií. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácie bezprostredne ohrozená. Teplota na vnútornom povrchu konštrukcie sa pohybuje bezpečne nad hranicou kritickej teploty pre vznik plesní, čím je splnené požadované hygienické kritérium. Výpočtová vnútorná povrchová teplota konštrukcie je bezpečne nad teplotou rosného bodu za daných okrajových podmienok.

Z experimentálnych meraní vlhkostného stavu materiálov vyplýva:

1. Vlhkosť drevených zabudovaných prvkov – KVH stĺpiky a SM rošt (Grafy 3 a 4.), je bezpečná z hľadiska vplyvu na pokles ich mechanických vlastností ($w < 18\%$). Vlhkosť výrazne neovplyvňuje ani pokles tepelno-technických vlastností a je bezpečne pod hranicou vlhkosti z hľadiska rizika vzniku a pôsobenia drevokazných húb ($w < 15$ až 18%).
2. Podľa priebehov vlhkostí tepelnej izolácie STEICO flex (Graf 7.) môžeme zhodnotiť, že vlhkostný stav sa za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktoré výrazne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti (λ , R) tepelnej izolácie a nevytvára priaznivé podmienky pre rozvoj a aktivitu drevokazných činiteľov, ktoré by mohli narušiť jej správnu funkčnosť.
3. Priemerná teplota na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie (Graf 8.), počas sledovaného obdobia je vyššia ako predikcia teoretickej analýzy oboch výpočtových programov (ISOVER Fragment, AREA) a v reálnych podmienkach znižuje riziko kondenzácie vodnej pary v oblasti nosnej konštrukcie.

6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie konštrukčnej skladby MS1 preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti. Rovnako je zabezpečená aj funkčná spoľahlivosť posudzovanej stĺpikovej konštrukcie s parobrzdou z OSB/4 dosky v reálnych podmienkach.

Z meraní a analýzy vlhkosťného stavu drevených zabudovaných prvkov a tepelných izolácií (Grafy 3 – 8.) vyplýva, že nie sú ohrozené rizikom kondenzácie vodnej pary v konštrukcii. V konštrukcii zároveň nie sú vytvorené vhodné podmienky pre aktivitu drevokazných činiteľov, ktoré by mohli ohroziť jej funkčnosť a životnosť.

Parobrzdza na báze dreva (OSB/4) plní svoju funkciu z vlhkosťného hľadiska spomalením procesu vnikania vlhkosti do konštrukcie. Rovnako obmedzuje riziko kondenzácie na vonkajšiu stranu konštrukcie do oblasti exteriérovej tepelnej izolácie.

Z hľadiska exaktnejšieho poznania stavu vlhkosti jednotlivých konštrukčných materiálov v skladbe a účinnosti vplyvu parobrzdzy je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najlepšie s čo najväčším a dlhodobým teplotným rozdielom vonkajších a vnútorných parametrov vzduchu počas zimného obdobia.

Podakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. APVV-17-0206 “Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva” a spolupráce katedry DF TU vo Zvolene s firmou M-house s.r.o.

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. VEGA 1/0729/18 “Hydro-termické, nanochemické a biologické modifikácie drevených materiálov s cieľenou zmenou štruktúry a vlastností”.

Literatúra

ALTAN DONBAYCI, Ö. 2006. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. In. Building and Environment. ELSEVIER Ltd. p. 3855 – 3859. ISSN 0360-1323

BRISCHKE, CH. – RAPP, O., A. 2008. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates. In. Wood Sci Technol. Springer – Verlag. p. 663 – 677. DOI 10.1007/s00226-008-0190-9

DELL' ISOLA, M. – d' AMBROSIO ALFANO, R., F. – GIOVINCO, G. – IANNIELLO, E. 2012. Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content. In. Thermophys. Springer Science + Business media. p. 1674 – 1685. DOI 10.1007/s10765-012-1215-z

HRICKO, D. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťný stav stĺpikových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 79 strán, 2 prílohy

CHMÚRNÝ, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7

JOCHIM, S - DUDAS, J. 2013. Konštrukčné drevené materiály: pre drevené stavebné konštrukcie a výrobky. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 2013. ISBN 978-80-228-1938-1

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

OSANYINTOLA, F., O. – SIMONSON, J., C. 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. In. Energy and Buildings. ELSEVIER Ltd. p. 1270 – 1282. ISSN 0378-7788

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

ŠTEFKO, J., SOYKA, R., JOCHIM, S., KLESKEŇ, P., OSVALD, A., REINPRECHT, L., SEDLÁK, P. Moderné drevodomý. 1. vyd. Bratislava: Antar, 2015. 140 s. Stavajte a bývajte s nami. ISBN 978-80-970739-1-6.

WANG, Y. – ZHAO, Z. – LIU, Y. – WANG, D. – MA, CH. – LIU, J. 2019. Comprehensive correction of thermal conductivity of moist porous building materials with static moisture distribution and moisture transfer. In. Energy. ELSEVIER Ltd. p. 103 – 118. ISSN: 0360-5442

ZACH, J.– HROUDOVÁ, J. – BROŽOVSKÝ, J. – KREJZA, Z. – GAILIUS, A. 2013. Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. In. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. p. 1288 – 1294.

Summary

Thermal – technical properties and moisture status of external diffuse timber frame wall with vapour-barrier based on wood. The paper is focused on verification of thermal-technical properties, diffusional properties and moisture status of the external timber frame wall using the natural insulations. The research parts deals with the theoretical analysis and experimental verification of the thermo-technical and diffusional characteristics one type of perimeter wall – with a wood-based vapour barrier (OSB). The goal was theoretical and experimental determination of proper function and its reliability in terms of humidity transport and moisture content of in-built wooden materials and other layers influenced by vapour barrier, under real climatic conditions.

Keywords

Wooden structures; wood-based perimeter walls; timber frame walls; thermo-technical properties; moisture status of materials.

Contact Address

Patrik Štompf, Stanislav Jochim, Dominik Hricko, Dominika Búryová
Department of Wooden Constructions (KDS)
Faculty of Wood Science and Technology
Technical University in Zvolen
T.G. Masaryka 24
960 01 Zvolen, Slovak Republic
patrik.stompf@gmail.com, jochim@tuzvo.sk, hricko.dominik@gmail.com,
buryova@tuzvo.sk

Michal Miklošovič
M-House, s.r.o.
Hraničná 18, 821 05 Bratislava
info@mhouse.sk

TEPELNO-TECHNICKÉ VLASTNOSTI A VLNKOSTNÝ STAV DIFÚZNEJ STĽPIKOVEJ STENY S PAROBRZDOU NA BÁZE PAPIERA

Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko, Pavol Sedlák, Michal Miklošovič

1 Úvod

Problematika tepelno-technických a vlhkostných vlastností drevených stavebných konštrukcií, pri súčasných trendoch vo výstavbe ultranízkoenergetických budov, predstavuje najvýznamnejší faktor súvisiaci s množstvom tepelných strát prechodom cez obálku budovy. Vlhkosť v stavebných konštrukciách výrazne ovplyvňuje výsledné tepelno-technické vlastnosti a pri drevených konštrukciách má rozhodujúci vplyv aj na mechanické vlastnosti a bio degradáciu spôsobenú drevokaznými činiteľmi. Vzhľadom na vlhkostné správanie a prechod vodnej pary sú pre konštrukcie na báze dreva vo všeobecnosti vhodnejšie materiály (parobrzdne fólie, tepelné izolácie a pod.) na prírodnej báze, ktoré majú popri vhodných fyzikálnych vlastnostiach aj priaznivé hygroskopické vlastnosti. Pre skladbu difúzne otvorenej konštrukcie obvodovej steny možno využiť viac typov drevovláknitých tepelných izolácií a ich vhodných kombinácií s inými materiálmi na prírodnej báze (konope, ovčia vlna, slama, a pod.). Izolačné materiály sú však prevažne vysoko paropriepustné a vzduchopriepustné.

Cieľom návrhu skladby konštrukcie obvodovej steny je, aby splnila požadované tepelno-technické požiadavky STN 73 0540-2 a bola spoľahlivo funkčná aj z hľadiska prípustného prevádzkového stavu vlhkosti z pohľadu kondenzácie na povrchu a vo vnútri konštrukcie.

Kondenzáciu vodnej pary a jej bilanciu, vlhkosť konštrukčných materiálov ako aj relatívnu vlhkosť vzduchu v konštrukcii obvodovej steny možno teoreticky stanoviť výpočtom, ale aj overiť experimentálne v reálnych klimatických podmienkach. Príspevok je zameraný na:

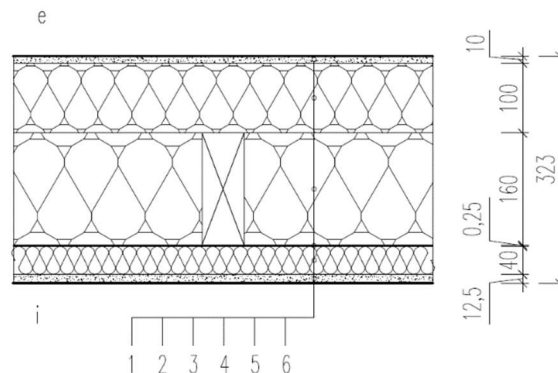
- 1) Teoretickú analýzu tepelno-technických a vlhkostných vlastností stĺpikovej steny na báze dreva s prírodnými izoláciami a parobrzdou fóliou na báze papiera a posúdenie podľa STN.
- 2) Experimentálne overenie vlhkostného stavu materiálov stĺpikovej steny s parobrzdou na báze papiera počas zimného obdobia.
- 3) Teoreticko-experimentálnu konfrontáciu výsledkov vlhkostného stavu konštrukcie.

2 Konštrukčná skladba stĺpikovej steny

Pre potreby merania a teoreticko-experimentálneho overenia tepelno-technických a vlhkostných vlastností bol na základe návrhu zhotovený fragment konštrukcie MS2 s parobrzdou fóliou ISOCELL ÖKO NATUR na báze papiera vystuženou vláknom (Obrázok 1.).

Obrázok 1. Skladba stĺpikovej obvodovej steny MS2. Skladba v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/160 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 4 – Parobrzdná fólia ISOCELL ÖKO NATUR, 5 – inštalačný rošt: SM (profil: 60/40 mm) + tepelná izolácia KONOPE Flex, 6 – vnútorné opláštenie: SDK doska RigiStabil.



3 Metodika overovania tepelno-technických a vlhkosťných vlastností

3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností

Analýza tepelno-technických vlastností skladby stĺpikovej obvodovej steny pri použití okrajových podmienok podľa STN 73 0540-2 je realizovaná výpočtovým programom:

- ISOVER Fragment s princípom jednorozmerného šírenia tepla (stacionárne podmienky)
- AREA s princípom dvojrozmerného vedenia tepla a vlhkosti (stacionárne podmienky).

Posúdenie je spracované podľa STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019.

V Tabuľke 1. je prehľad materiálov použitých v konštrukcii steny a ich fyzikálne vlastnosti.

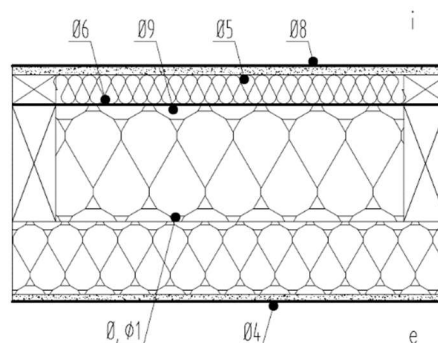
Tabuľka 1. Použité konštrukčné materiály – fyzikálne parametre.

P. č.	Materiál	Hustota ρ_d [kg/m ³]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W/m.K]		Merná tepelná kapacita c [J/kg.K]	Faktor difúzneho odporu μ [1]	Zdroj
			návrhový	deklarovaný			
1.	Mäkké drevo	500	0,13	0,12	1 600	50 (20)	STN EN 10456
2.	STEICO flex (drevovláknitá izolácia)	60	0,038	0,036	2 100	1-2	Technický list
3.	STEICO Protect dry (drevovláknitá izolácia)	110	0,041	0,039	2100	5	Technický list
4.	KONOPE Flex 35	35	0,041	0,039	1600	1,5	Technický list
5.	ISOCELL ÖKO NATUR (parobrzdá)	740	0,35	0,35	1500	25 800	Technický list
6.	SDK doska RIGISTABIL	840	0,15	0,142	960	> 12	Technický list
7.	Capatect Minera Carbon Staubarm – tmel	1 350	0,49	0,46	890	≤ 55	Technický list
8.	Capatect SH Putz – silikónová omietka	1 600	0,73	0,7	900	50	Technický list

3.2 Experimentálne meranie vlhkosného stavu a teplôt v konštrukcií

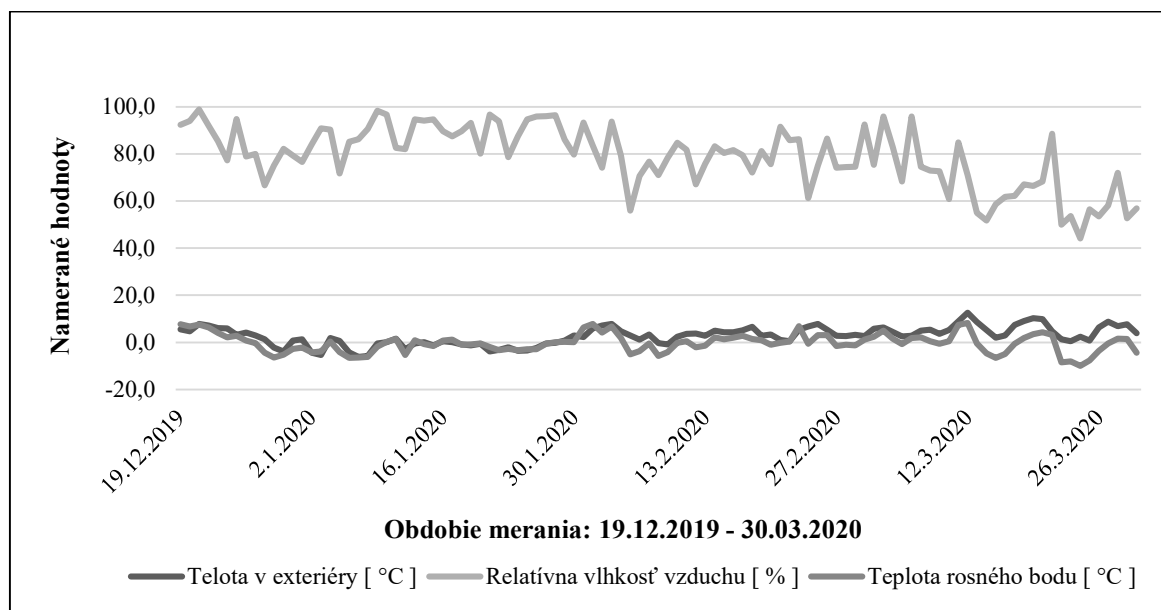
3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v období od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020 boli vykonávané v pravidelných časových intervaloch. Počas celého sledovaného obdobia sa prostredníctvom snímačov meracieho prístroja (ALMEMO) vo výskumnom objekte zaznamenávali hodnoty interiérovej a exteriérovej teploty, relatívnej vlhkosti vzduchu, teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu vo fragmente konštrukcie na rozhraní jednotlivých vrstiev. Testoval sa fragment steny s rozmermi 1,2 x 1,2 m (Obrázok 2.).



Obrázok 1. Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie MS2. Snímače na meranie teploty: $\theta_4 - \theta_9$, snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu: θ_1 .

Fragment konštrukcie bol zabudovaný v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu (20 ± 1) °C a vlhkosťou vzduchu (50 ± 5) %. Z vonkajšej strany na konštrukciu pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



Graf 1. Exteriérová teplota, relatívna vlhkosť vzduchu a teplota rosného bodu (celé obdobie merania).

3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukcií

Jednotlivé merania prebiehali prostredníctvom nasledovných prístrojov a metód:

1. *Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T):* meranie vlhkosti drevených zabudovaných prvkov (v smere vlákien) – inštalačný rošt, stĺpik (KVH).
2. *Gravimetrická metóda:* všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote (103 ± 2) °C podľa STN EN 322.

3. *Snímače na súčasné meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu: rozhranie vrstiev - stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.*

3.3 Teoreticko-experimentálne overovanie tepelných a vlhkosťných vlastností

Pre overenie a vyhodnotenie výsledkov meraní boli spracované teoretické výpočty tepelno-technických a vlhkosťných vlastností konštrukcie v programoch ISOVER Fragment a AREA s použitím najnepriaznivejších parametrov vonkajšieho vzduchu, ktoré boli namerané počas sledovaného obdobia. Najnižšia nameraná exteriérová teplota bola $-10,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relatívna vlhkosť vzduchu pri tejto teplote sa pohybovala okolo 99,7 %.

4 Výsledky

4.1 Teoretická analýza tepelno-technických vlastností

Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností konštrukcie MS2 v programe ISOVER Fragment sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (ISOVER Fragment).

Konštrukcia	Súčiniteľ prechodu tepla U [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$]	Tepelný odpor R_o [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]	Povrchová teplota konštrukcie θ_{si} [$^{\circ}\text{C}$]	Vodná para [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{rok})$]		Fázový posun ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenzované množstvo g_k	Ročná bilancia $g_k - g_v$		
MS2	0,153 ⁽²⁾	6,387	19,425	0,0828 ⁽¹⁾	-3,5612	14,188	554,404

Poznámka: ⁽¹⁾ v skladbe dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie (pod fasádnou omietkou)
⁽²⁾ zohľadnený vplyv tepelných mostov: percentuálnym podielom rámu vo fragmente konštrukcie

Pre komplexné hodnotenie detailov navrhutej konštrukcie (zahnutie tepelných mostov, väzieb) bola skladba analyzovaná programom AREA. V tabuľke 3 sú zobrazené vypočítané tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti konštrukcie MS2.

Tabuľka 3. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (AREA).

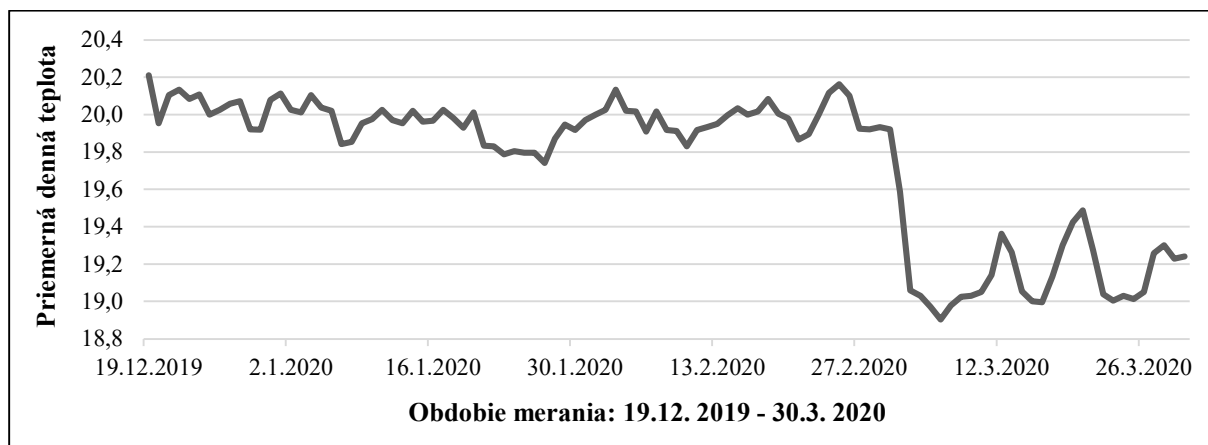
Prostredie	Teplota T [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota rosného bodu T_w [$^{\circ}\text{C}$]	Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]	Minimálna povrchová teplota $T_{s, \min}$ [$^{\circ}\text{C}$]	Hustota tepelného toku z prostredia Q [W/m] ⁽¹⁾	Tepelná priepustnosť L [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] ⁽²⁾
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,14	6,2513	0,1786
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,83	-6,2509	0,1786

Poznámka: ⁽¹⁾ Hustota tep. toku [Q]: hustota tepelného toku z daného prostredia (hodnota je vzťahovaná na 1 m dĺžky tep. mostu - strata je kladná, zisk záporný),
⁽²⁾ Tepelná priepustnosť [L]: tepelná priepustnosť (lineárna tepelná vodivosť) medzi daným prostredím a okolím určená pomocou dvojrozmerného výpočtu stavebného prvku oddeľujúceho dve prostredia

4.2 Experimentálne meranie vlhkosťného stavu materiálov a teplôt v konštrukcií

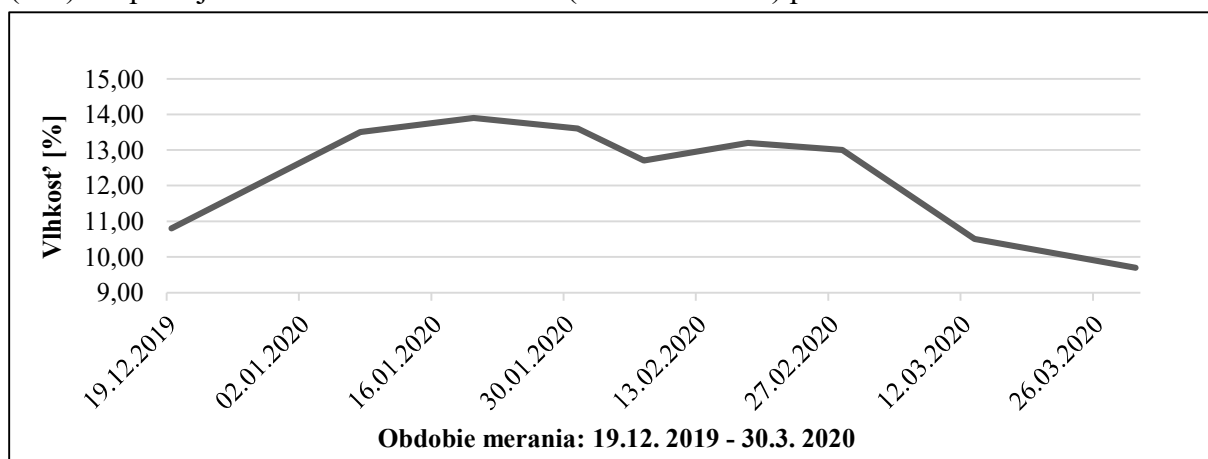
Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútorného povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach. Konštrukcia musí rovnako spĺňať aj hygienické kritérium – kritická minimálna teplota na vnútornom povrchu konštrukcie, pri

ktorej dochádza k rozvoju plesní. Priebeh vnútornej povrchovej teploty konštrukcie za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.

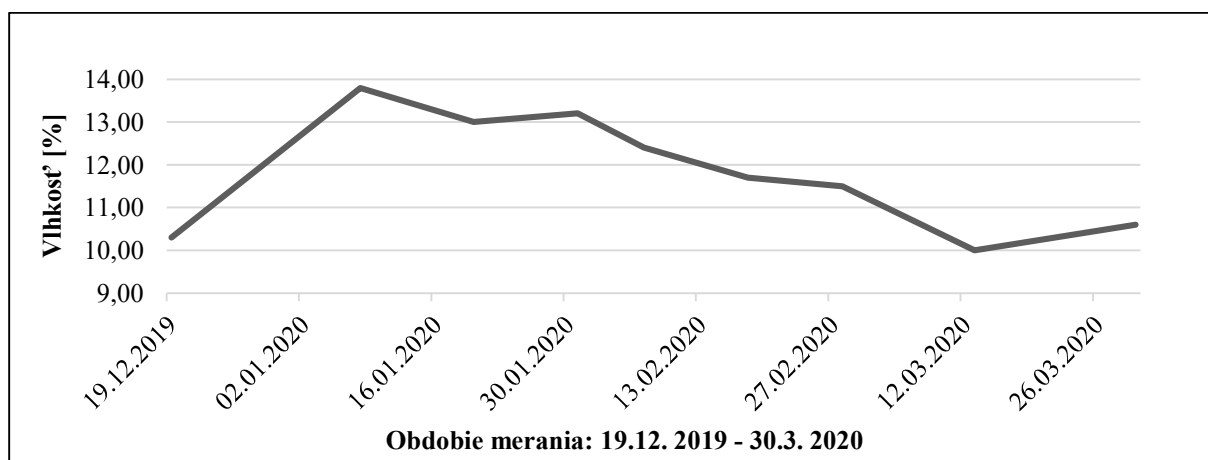


Graf 2. Priebeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcie MS2.

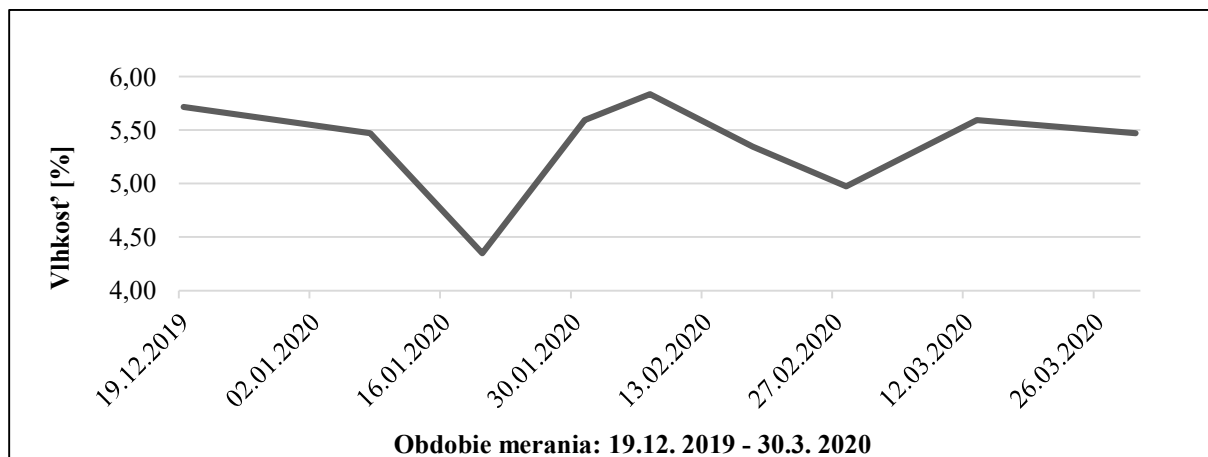
Grafy 3 – 5. zobrazujú priebehy vlhkostí nosnej konštrukcie (KVH slpiky), inštaláčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte (KONOPE Flex) počas celého obdobia meraní.



Graf 3. Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH slpiky [%].

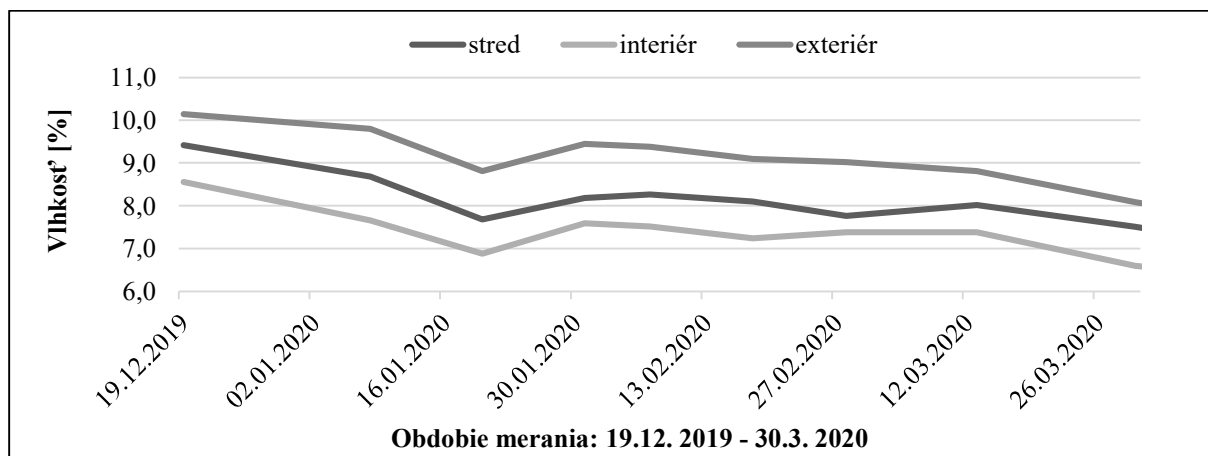


Graf 4. Vlhkosť inštaláčného roštu – SM [%].



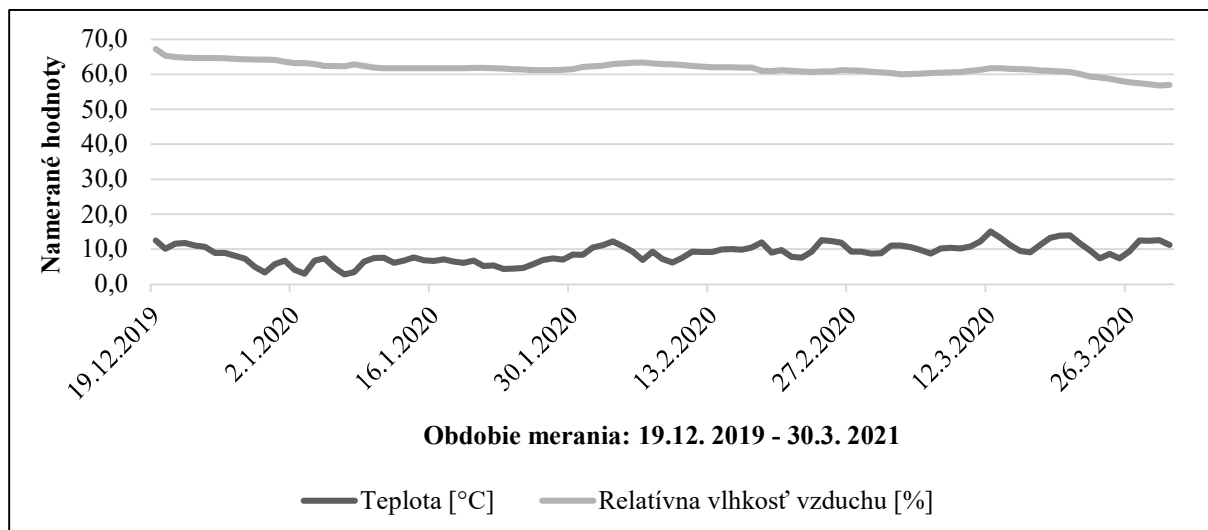
Graf 5. Vlhkosť tepelnej izolácie v rošte – KONOPE Flex [%].

Na Grafe 6. je zobrazený priebeh vlhkosti tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmente konštrukcie MS2 za parobrzdnu fóliou ISOCELL ÖKO NATUR (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave naprieč touto vrstvou rozdelená na tri rovnaké časti po hrúbke vrstvy.



Graf 6. Vlhkosť medzistĺpikovej tepelnej izolácie STIECO flex [%].

Na Grafe 7. je zobrazený priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.



Graf 7. Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev stĺpiky/vonkajšie opláštenie.

5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností v programoch ISOVER Fragment a AREA vyplýva nasledovné:

1. Skladba obvodovej steny stĺpikovej konštrukcie na báze dreva spĺňa všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťný stav podľa STN 73 0540-2 (Tabuľka 2. a 3.).
2. Podľa výpočtu programov dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepľovacieho systému, ale ročná bilancia skondenzovanej a odparenej vlhkosti je priaznivá. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácie v tejto vrstve bezprostredne ohrozená. Rovnako je splnené aj kritérium minimálnej povrchovej teploty z pohľadu posúdenia kondenzácie vodnej pary na vnútornom povrchu konštrukcie. Vnútorná povrchová teplota sa pohybuje bezpečne nad teplotou rosného bodu za daných výpočtových podmienok a rovnako je splnené hygienické kritérium (minimálna povrchová teplota určujúca vznik a rozvoj plesní).

Z experimentálnych meraní vlhkosťného stavu konštrukčných materiálov vyplýva:

1. Vlhkosť drevených zabudovaných prvkov (KVH stĺpikov a SM roštu) (Grafy 3. a 4.) je bezpečná z hľadiska vplyvu na pokles ich mechanických vlastností, neovplyvňuje pokles tepelno-technických vlastností ($w < 18 \%$) a je bezpečne pod hranicou vlhkosti z hľadiska rizika vzniku a pôsobenia drevokazných húb ($w < 15$ až 18%).
2. Podľa priebehov vlhkostí tepelnej izolácie STEICO flex (Graf 6.) sa vlhkosťný stav za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktoré výrazne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti (λ , R) izolácie a nevytvára priaznivé podmienky pre rozvoj a aktivitu drevokazných húb, plesní a škodcov, ktoré by mohli narušiť jej správne fungovanie.
3. Priemerná teplota na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie, nameraná počas sledovaného obdobia je vyššia ako predikcia teoretickej analýzy oboch výpočtových programov a v reálnych podmienkach znižuje riziko kondenzácie vodnej pary v tejto oblasti.

6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti a funkčnú spoľahlivosť posudzovanej konštrukcie s parobrzdou na báze papiera (ISOCELL ÖKO NATUR).

Z meraní a analýzy vlhkosťného stavu drevených zabudovaných prvkov a materiálov na báze dreva (Grafy 3 – 7.) vyplýva, že nie sú ohrozené rizikom kondenzácie vodnej pary v konštrukciách. V konštrukciách zároveň nie sú vytvorené vhodné podmienky pre aktivitu drevokazných činiteľov, ktoré by mohli ohroziť jej funkčnosť a životnosť. Parobrzdza ISOCELL plní svoju funkciu z vlhkosťného hľadiska spomalením procesu vnikania vzdušnej vlhkosti do konštrukcie. Parobrzdňacia fólia plní aj funkciu vzduchotesnej roviny a výrazne eliminuje šírenie vzdušnej vlhkosti do vnútra konštrukcie, čím významne znižuje riziko kondenzácie v oblasti nosnej konštrukcie.

Z priebehov teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu v konštrukciách na rozhraní vrstiev stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie (Graf 7.) je zrejmé, že nedochádza ku kondenzáciám na vnútornom povrchu vonkajšieho opláštenia (STEICO Protect Dry). Teplota na rozhraní týchto vrstiev sa pohybuje počas celého obdobia bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných podmienkach, čo korešponduje aj s predikciou oboch výpočtových programov.

Z hľadiska exaktnejšieho poznania stavu vlhkosti materiálov v skladbe a účinnosti vplyvu parobrzdzy je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najlepšie s čo najväčším a dlhodobým teplotným rozdielom vonkajších a vnútorných parametrov vzduchu počas zimného obdobia.

Podakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. APVV-17-0206 “Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva” a spolupráce katedry DF TU vo Zvolene s firmou M-House s.r.o.

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. VEGA 1/0729/18 “Hydro-termické, nanochemické a biologické modifikácie drevených materiálov s cieľenou zmenou štruktúry a vlastností”.

Literatúra

ALTAN DONBAYCI, Ö. 2006. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. In. *Building and Environment*. ELSEVIER Ltd. p. 3855 – 3859. ISSN 0360-1323

BRISCHKE, CH. – RAPP, O., A. 2008. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates. In. *Wood Sci Technol*. Springer – Verlag. p. 663 – 677. DOI 10.1007/s00226-008-0190-9

DELL' ISOLA, M. – d' AMBROSIO ALFANO, R., F. – GIOVINCO, G. – IANNIELLO, E. 2012. Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content. In. *Thermophys*. Springer Science + Business media. p. 1674 – 1685. DOI 10.1007/s10765-012-1215-z

HRICKO, D. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťný stav stĺpikových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 79 strán, 2 prílohy

CHMÚRNÝ, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7

JOCHIM, S. – DUDAS, J. 2013. Konštrukčné drevené materiály: pre drevené stavebné konštrukcie a výrobky. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 2013. ISBN 978-80-228-1938-1

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

OSANYINTOLA, F, O. – SIMONSON, J., C. 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. In. Energy and Buildings. ELSEVIER Ltd. p. 1270 – 1282. ISSN 0378-7788

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

ŠTEFKO, J., SOYKA, R., JOCHIM, S., KLESKEŇ, P., OSVALD, A., REINPRECHT, L., SEDLÁK, P. Moderné drevodomy. 1. vyd. Bratislava: Antar, 2015. 140 s. Stavajte a bývajte s nami. ISBN 978-80-970739-1-6.

WANG, Y. – ZHAO, Z. – LIU, Y. – WANG, D. – MA, CH. – LIU, J. 2019. Comprehensive correction of thermal conductivity of moist porous building materials with static moisture distribution and moisture transfer. In. Energy. ELSEVIER Ltd. p. 103 – 118. ISSN: 0360-5442

ZACH, J.– HROUDOVÁ, J. – BROŽOVSKÝ, J. – KREJZA, Z. – GAILIUS, A. 2013. Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. In. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. p. 1288 – 1294.

Summary

Thermal-technical properties and moisture status of external diffuse timber frame wall with paper-based vapour-barrier. The paper is focused on verification of thermal – diffusional properties and moisture conditions of the perimeter timber frame wall using the natural insulations. The main aims of research parts are the theoretical analysis and experimental verification of the thermo-technical and diffusional properties of the one type of perimeter timber frame wall – with vapour barrier ISOCELL ÖKO NATUR. The goal was theoretical and experimental determination of proper function of wood-based structure and its reliability in terms of humidity transport and moisture content of materials influenced by vapour barrier, under real climatic conditions.

Keywords

Wooden constructions; wood-based perimeter walls; timber frame walls; thermo-technical properties; moisture content of materials.

Contact Address

Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24

960 01 Zvolen, Slovak Republic

jochim@tuzvo.sk, patrik.stompf@gmail.com, hricko.dominik@gmail.com, sedlak@tuzvo.sk

Michal Miklošovič
M-House, s.r.o.
Hraničná 18, 821 05 Bratislava
info@mhouse.sk

TEPELNO-VLHKOSTNÉ VLASTNOSTI DIFÚZNYCH STĽPIKOVÝCH STIEN S RÔZNYMI DRUHMI PAROBŔZD

Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko, Jozef Štefko, Michal Miklošovič

1 Úvod

Téma ekológie a analýzy dopadov rôznych stavebných materiálov a konštrukcií ako celku na životné prostredie sa v súčasnosti stáva asi najdiskutovanejšou témou. Stavebníctvo sa rovnako prispôbuje novým trendom a čoraz viac sa v ňom presadzujú materiály na prírodnej báze, ktoré majú priaznivý vplyv na životné prostredie alebo ho aspoň vo výraznej miere nezaťažia.

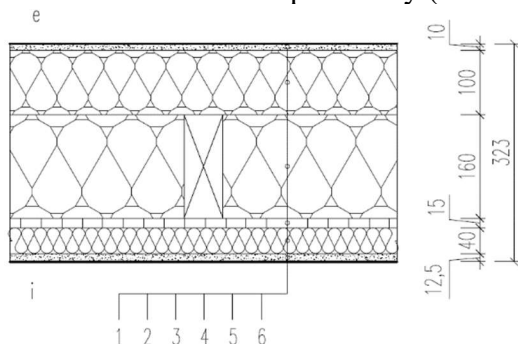
Pre použitie v drevených konštrukciách sú vo všeobecnosti aj z hľadiska vlhkostného stavu vhodnejšie materiály na prírodnej báze. Tepelné izolácie na báze drevných vlákien, ovčej vlny, konope a pod., majú komplexne výborné fyzikálne vlastnosti pre použitie v difúzne otvorených konštrukciách drevostavieb, kde sú optimálnou voľbou z hľadiska ich hygroskopických vlastností. Téma vlhkosti v drevených konštrukciách je veľmi dôležitým aspektom pri ich navrhovaní, realizácii a užívaní. Práve vlhkosť ovplyvňuje všetky fyzikálne a mechanické vlastnosti dreva a materiálov na báze dreva a tým aj konštrukcie ako celku.

Z hľadiska optimálneho vlhkostného stavu v konštrukciách je rozhodujúci ich návrh, pri ktorom hrá významnú úlohu voľba nosného systému a druhu konštrukcie. Pri správnom návrhu je dôležité poznať fyzikálne vlastnosti konštrukčných materiálov v súvislosti s ich správnym použitím a radením do jednotlivých vrstiev konštrukcie. Na rozdiel od minulosti sú súčasné požiadavky na tepelno-technické vlastnosti konštrukcií, stanovené v STN 73 0540 -2, podstatne prísnejšie. Vlhkosť konštrukčných materiálov rovnako, ako aj relatívnu vlhkosť vzduchu v jednotlivých vrstvách konštrukcie obvodovej steny možno teoreticky stanoviť výpočtom, ale aj experimentálne v reálnych klimatických podmienkach. Príspevok je zameraný na:

- 1) Teoretickú analýzu vlhkostných vlastností dvoch stĺpikových stien s prírodnými izoláciami s rôznymi materiálmi vo funkcií parobŕzd a posúdenie (podľa STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019) vo výpočtových programoch ISOVER Fragment a AREA.
- 2) Experimentálne overenie vlhkostného stavu vybraných materiálov obvodových stien na báze dreva s parobŕzdou ISOCELL a s OSB doskou počas zimného obdobia, posúdenie a porovnanie ich vplyvu na vlhkosť konštrukčných materiálov a relatívnu vlhkosť vzduchu v konštrukciách.

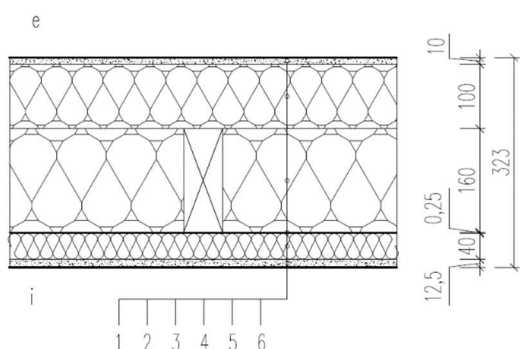
2 Konštrukčná skladba obvodových stien

Pre potreby teoreticko-experimentálneho overenia vlhkostných vlastností boli na základe návrhu zhotovené dva fragmenty konštrukcií na báze dreva: MS1 a MS2 s rozdielnymi materiálmi vo funkcií parobŕzdy (Obrázok 1. a 2.).



Obrázok 1. Skladba stĺpikovej obvodovej steny MS1. Skladba v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/160 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 4 – vnútorné opláštenie: OSB/4 doska, 5 – inštalčný rošt: SM (profil: 60/40 mm) + tepelná izolácia KONOPE Flex, 6 – vnútorné opláštenie: SDK doska RigiStabil.



Obrázok 2. Skladba stĺpikovej obvodovej steny MS2. Skladba v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/160 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 4 – Parobrzdná fólia ISOCELL ÖKO NATUR, 5 – inštalačný rošt: SM (profil: 60/40 mm) + tepelná izolácia KONOPE Flex, 6 – vnútorné opláštenie: SDK doska RigiStabil.

3 Metodika teoreticko-experimentálneho overovania vlhkosťných vlastností

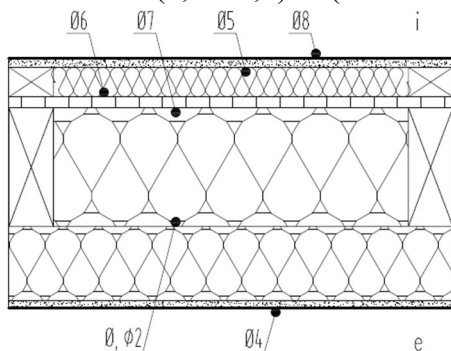
3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických a vlhkosťných vlastností

Teoretická analýza a vyhodnotenie tepelno-technických vlastností boli realizované vo výpočtovom programe ISOVER Fragment s metodikou jednorozmerného šírenia tepla. Analýza vlhkosťného stavu konštrukcií bola spracovaná v programe AREA, ktorý pracuje na princípe dvojrozmerného stacionárneho vedenia tepla a vlhkosti v konštrukciách. Posúdenie je spracované podľa STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 s použitím normových okrajových podmienok.

3.2 Experimentálne meranie vlhkosťného stavu a teplôt v konštrukciách

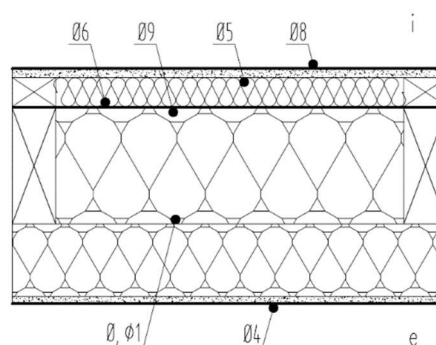
3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v období od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020 boli vykonávané v pravidelných časových intervaloch. Počas celého sledovaného obdobia sa prostredníctvom snímačov meracieho prístroja (ALMEMO) vo výskumnom objekte zaznamenávali hodnoty interiérovej a exteriérovej teploty, relatívnej vlhkosti vzduchu a teploty a vlhkosti vzduchu vo fragmentoch konštrukcií na rozhraní jednotlivých vrstiev. Testovali sa fragmenty stien s rozmermi (1,2 x 1,2) m (Obrázok 3. a 4.).

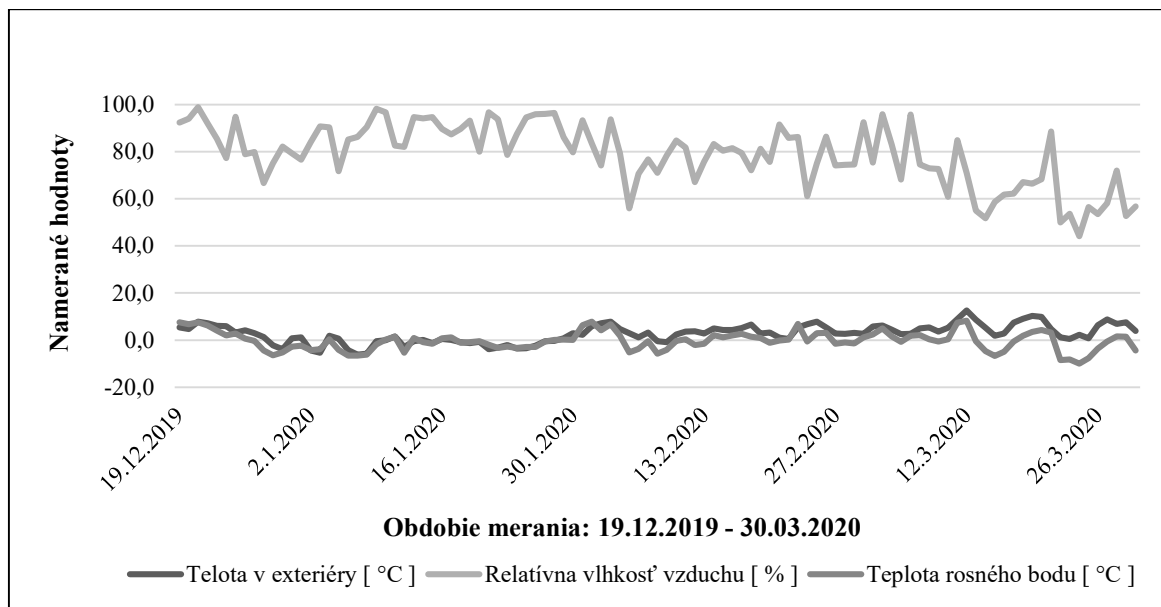


Obrázok 3. Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie MS1. Snímače na meranie teploty: $\theta_4 - \theta_8$, snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu: θ_2 .

Obrázok 4. Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie MS2. Snímače na meranie teploty: $\theta_4 - \theta_9$, snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu: θ_1 .



Fragmenty konštrukcií boli zabudované v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu (20 ± 1) °C a relatívnou vlhkosťou vzduchu (50 ± 5) %. Z vonkajšej strany na konštrukcie pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



Graf 1. Exteriérová teplota, relatívna vlhkosť vzduchu a teplota rosného bodu (celé obdobie merania).

3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách

Jednotlivé merania prebiehali prostredníctvom nasledovných prístrojov a metód:

1. *Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T):* meranie vlhkosti drevených zabudovaných prvkov (v smere vlákien) – inštalačný rošt, stĺpiky (KVH).
2. *Gravimetrická metóda:* všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote (103 ± 2) °C podľa STN EN 322.
3. *Snímače na súčasné meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu:* rozhranie vrstiev – stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.

3.3 Teoreticko-experimentálne overovanie tepelno-technických a vlhkosťných vlastností

Pre overenie a vyhodnotenie výsledkov meraní boli spracované teoretické výpočty tepelno-technických a vlhkosťných vlastností konštrukcií v programoch ISOVER Fragment a AREA s použitím najnepriaznivejších parametrov vonkajšieho vzduchu, ktoré boli počas sledovaného obdobia namerané. Najnižšia nameraná exteriérová teplota bola $-10,27$ °C a relatívna vlhkosť vzduchu pri tejto teplote sa pohybovala okolo 99,7 %.

4 Výsledky

4.1 Teoretická analýza tepelno-technických vlastností

V Tabuľke 1. sa nachádzajú výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností oboch konštrukcií v programe ISOVER Fragment.

Tabuľka 1. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcií (ISOVER Fragment).

Konštrukcia	Súčiniteľ prechodu tepla U [W/m ² .K]	Tepelný odpor R_o [m ² .K/W]	Povrchová teplota konštrukcie θ_{si} [°C]	Vodná para [kg/(m ² .rok)]		Fázový posun ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenované množstvo g_k	Ročná bilancia $g_k - g_v$		
MS1	0,150 ⁽²⁾	6,486	19,433	0,2230 ⁽¹⁾	-3,4802	15,18	397,12
MS2	0,153 ⁽²⁾	6,387	19,425	0,0828 ⁽¹⁾	-3,5612	14,188	554,404

Poznámka: ⁽¹⁾ v oboch skladbách dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie
⁽²⁾ zohľadnený vplyv tepelných mostov: percentuálnym podielom rámu vo fragmente konštrukcie

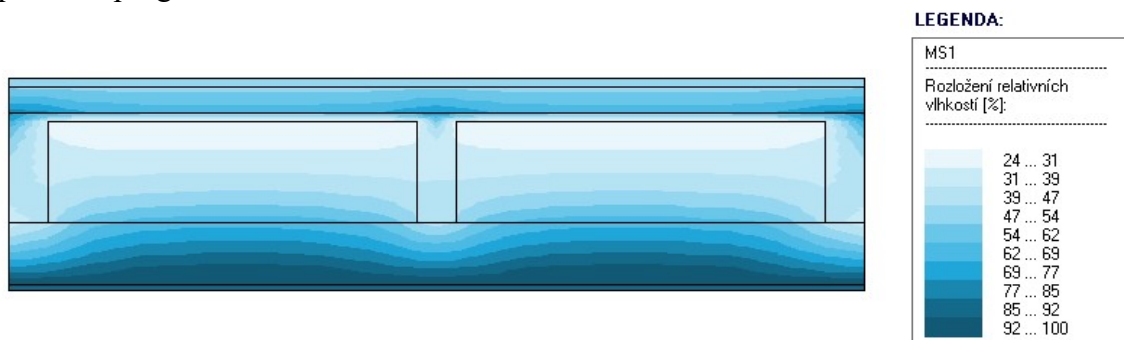
Pre komplexné hodnotenie detailov navrhnutých konštrukcií (tepelné mosty, väzby) boli jednotlivé skladby spracované programom AREA, kde boli hodnotené z hľadiska dvojrozmerného stacionárneho vedenia tepla a vodnej pary v konštrukcií. V Tabuľke 2. sú uvedené vypočítané tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti konštrukcií MS1 a MS2.

Tabuľka 2. Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcií (AREA).

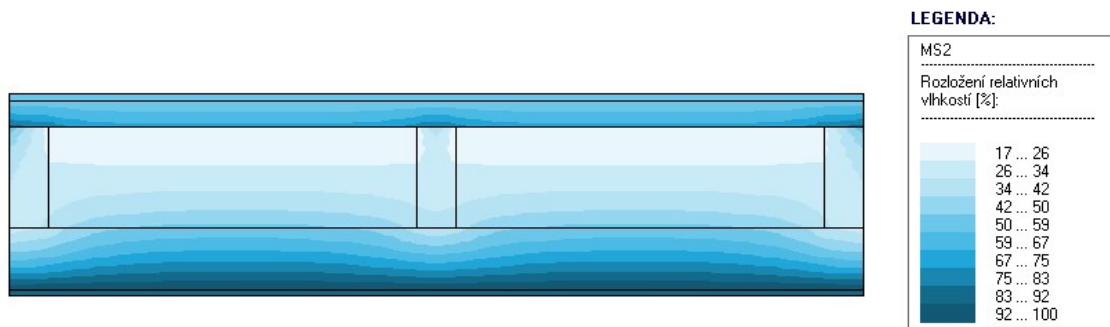
Prostredie	Teplota T [°C]	Teplota rosného bodu T_w [°C]	Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]	Minimálna povrchová teplota $T_{s, min}$ [°C]	Hustota tepelného toku z prostredia Q [W/m] ⁽¹⁾	Tepelná priepustnosť L [W/m.K] ⁽²⁾
MS1						
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,21	6,1598	0,1759
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,1597	0,1759
MS2						
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,14	6,2513	0,1786
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,83	-6,2509	0,1786

Poznámka: ⁽¹⁾ Hustota tep. toku [Q]: hustota tepelného toku z daného prostredia (hodnota je vzťahovaná na 1 m dĺžky tep. mostu - strata je kladná, zisk záporný),
⁽²⁾ Tepelná priepustnosť [L]: tepelná priepustnosť (lineárna tepelná vodivosť) medzi daným prostredím a okolím určená pomocou dvojrozmerného výpočtu stavebného prvku oddeľujúceho dve prostredia

Na Obrázkoch 5. a 6. sú zobrazené priebehy relatívnych vlhkostí vzduchu v konštrukciách vypočítané programom AREA.



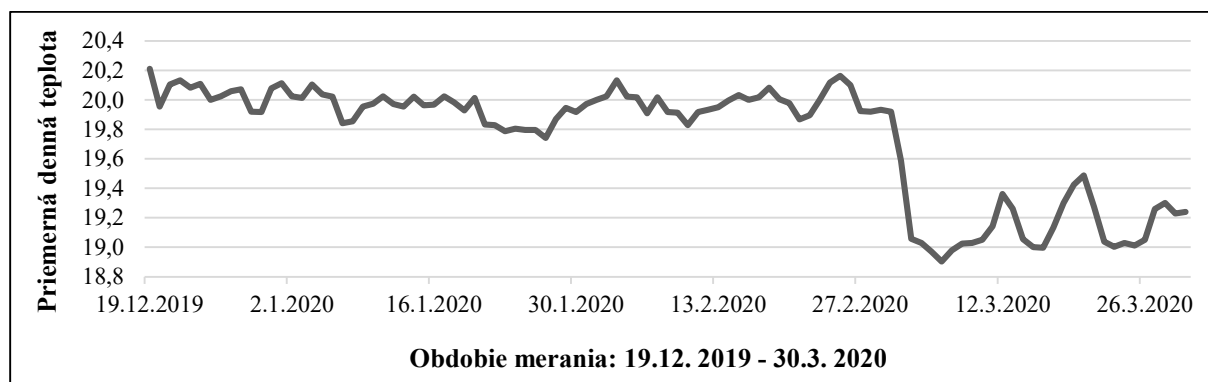
Obrázok 5. Rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu (%) v konštrukcií steny MS1 (AREA).



Obrázok 6. Rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu (%) v konštrukcii steny MS2 (AREA).

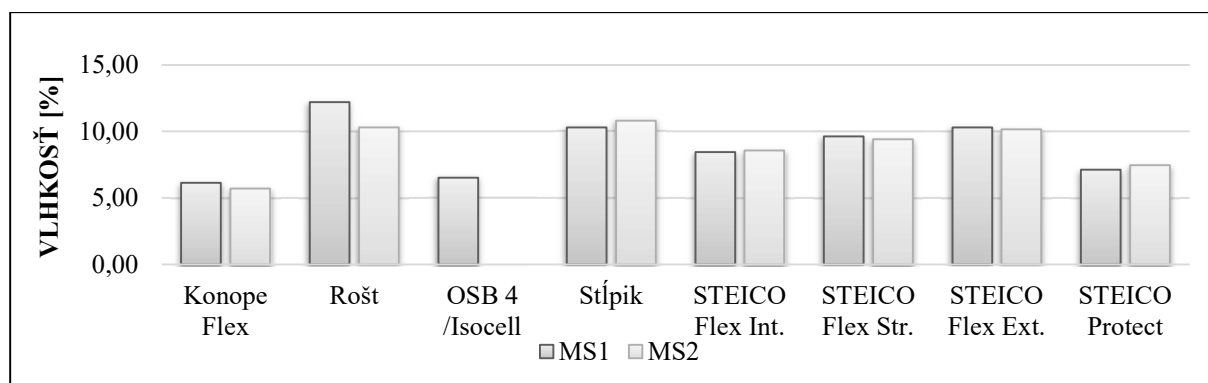
4.2 Experimentálne meranie vlhostného stavu materiálov a priebehov teplôt v konštrukciách

Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútorného povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach a konštrukcia musí rovnako spĺňať aj hygienické kritérium – kritická minimálna teplota, pri ktorej dochádza k rozvoju plesní. Priebeh vnútornej povrchovej teploty konštrukcií za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.



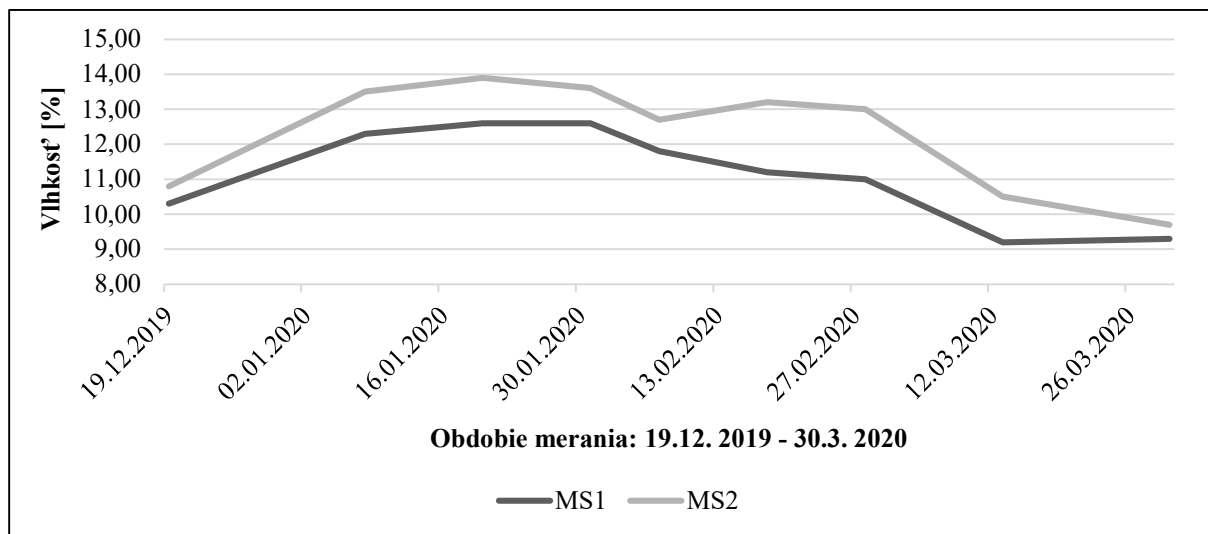
Graf 2. Priebeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcií MS1 a MS2.

Na Grafe 3. sú zobrazené počiatočné vlhkosti konštrukčných materiálov oboch fragmentov konštrukcií, zaznamenané na začiatku meraní (19.12. 2019).

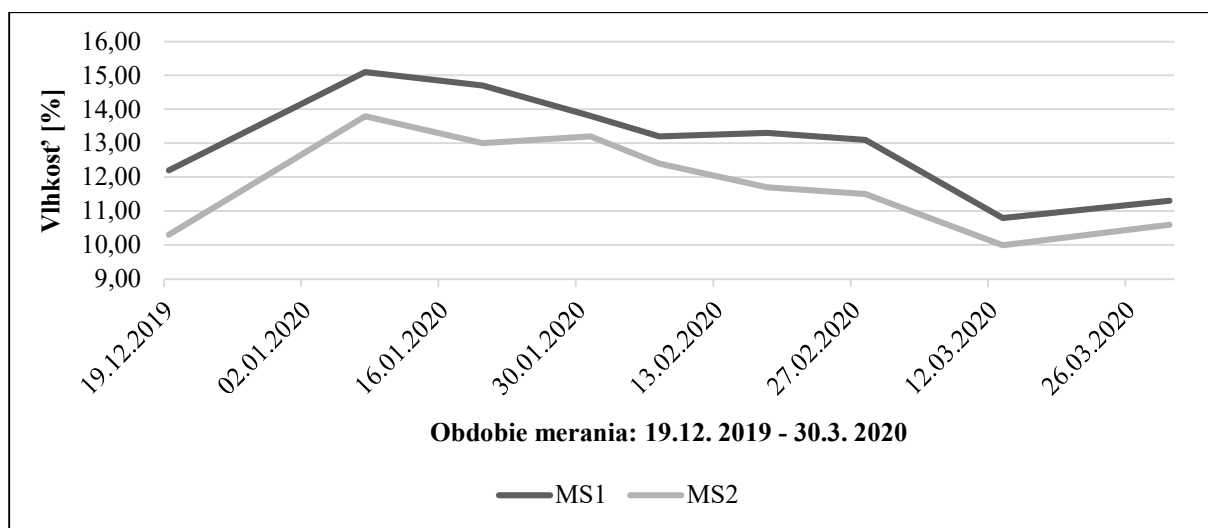


Graf 3. Počiatočný stav vlhkosti konštrukčných materiálov – MS1 a MS2.

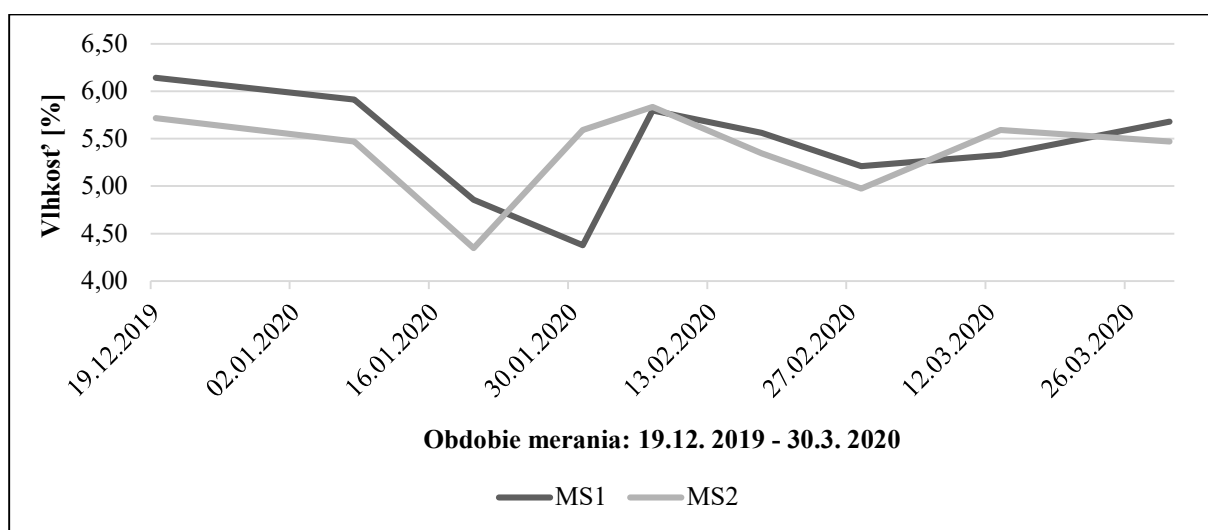
Grafy 4 – 6. zobrazujú priebehy vlhkostí nosnej konštrukcie (KVH stĺpiky), inštalčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštalčnom rošte (KONOPE Flex) počas celého obdobia meraní.



Graf 4. Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH stĺpiky [%].

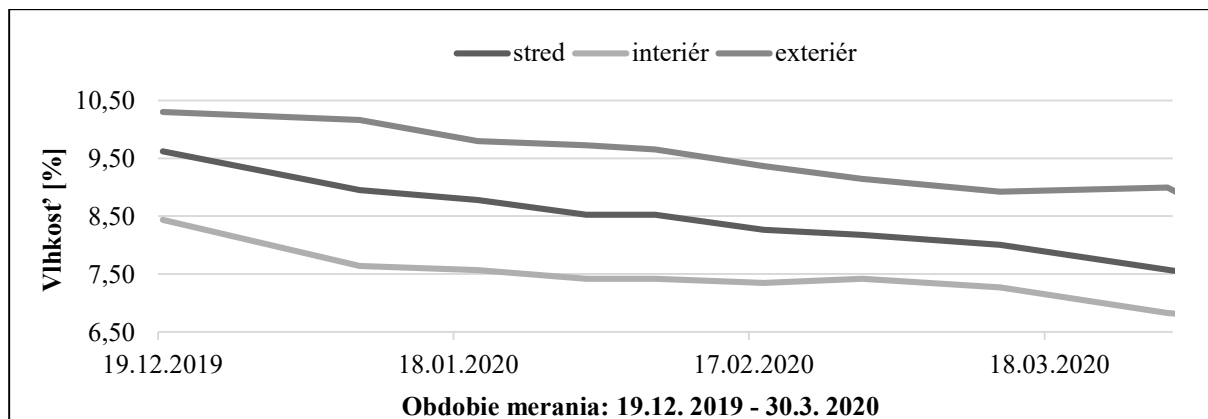


Graf 5. Vlhkosť inštaláčného roštu – SM [%].

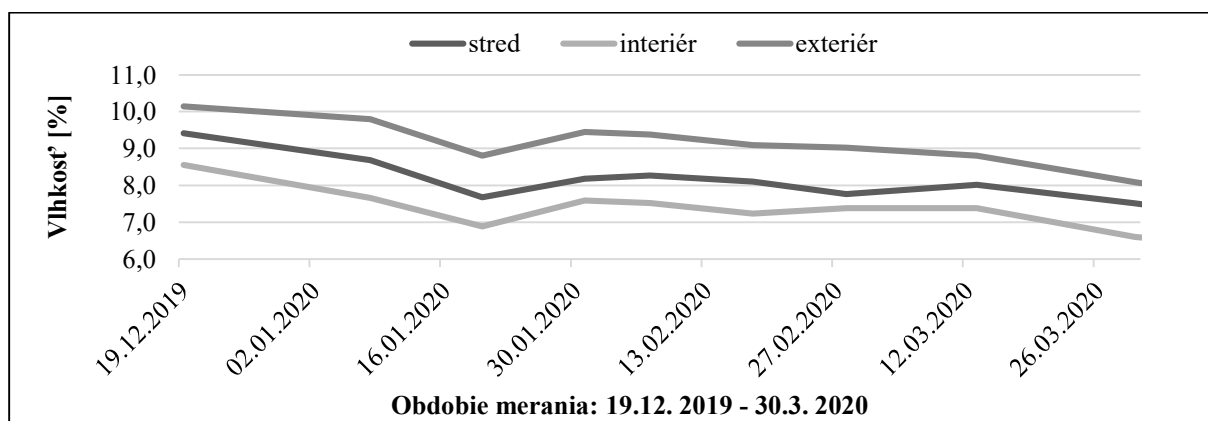


Graf 6. Vlhkosť tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte – KONOPE Flex [%].

Na Grafoch 7. a 8. sú zobrazené priebehy vlhkostí tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmentoch konštrukcií MS1 a MS2 za parobrzdňujúcou vrstvou (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave naprieč touto vrstvou rozdelená na tri rovnaké časti po hrúbke vrstvy v oboch fragmentoch.

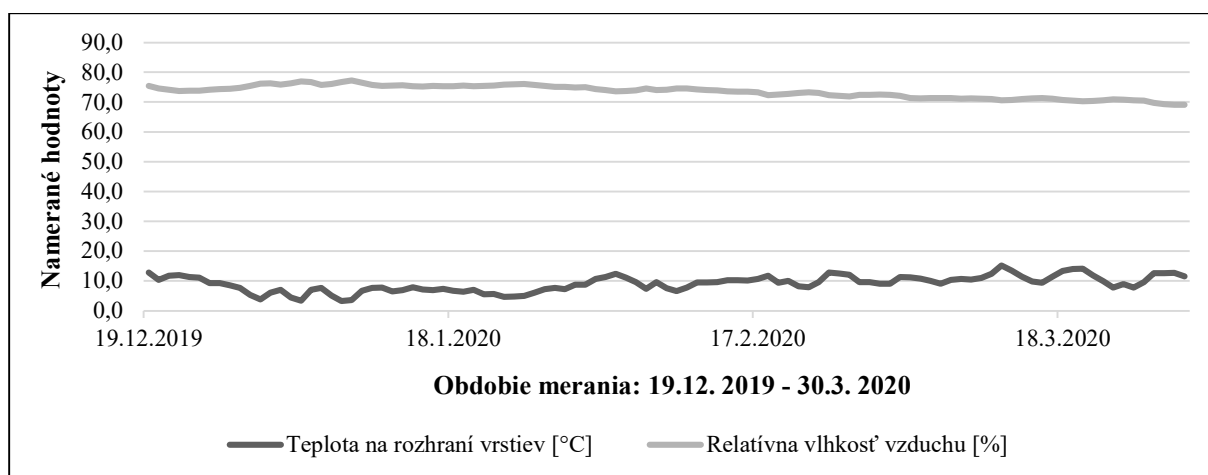


Graf 7. Vlhkosť medzistĺpikovej tepelnej izolácie STIECO flex [%] – MS1.

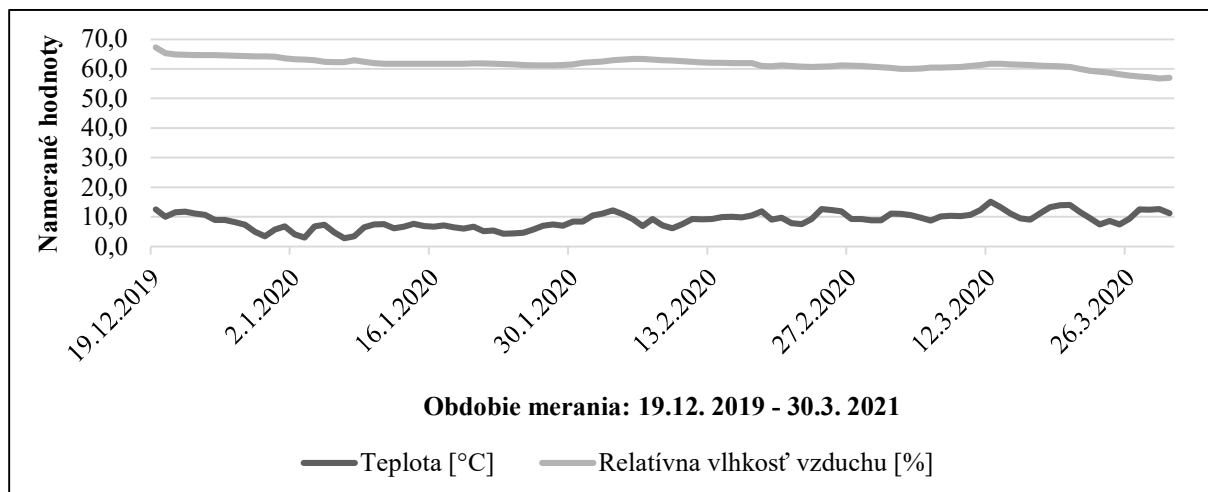


Graf 8. Vlhkosť medzistĺpikovej tepelnej izolácie STIECO flex [%] – MS2.

Na Grafoch 9. a 10. sú zobrazené priebehy teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu oboch fragmentov na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosných konštrukcií.



Graf 9. Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie – MS1.



Graf 10. Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie – MS2.

5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností v programoch ISOVER Fragment a AREA vyplýva nasledovné:

1. Skladby oboch obvodových stien na báze dreva (Tabuľka 1. a 2.) spĺňajú všetky požiadavky na tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti podľa STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019.
2. Podľa výpočtu dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepl'ovacieho systému (pod vrstvou fasádnej omietky) pri oboch konštrukciách, ale ročná bilancia skondenзованej a odparenej vlhkosti je priaznivá a spĺňa požiadavku normy na maximálne ročné skondenзованé množstvo vodnej pary v konštrukciách. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácie v tejto vrstve bezprostredne ohrozená (Obrázok 5. a 6.). Rovnako je splnené aj hygienické kritérium z pohľadu posúdenia kondenzácie vodnej pary na vnútornom povrchu konštrukcie, ku ktorému nedohádza a vnútorná povrchová teplota sa pohybuje bezpečne nad kritickou teplotou potrebnou pre vznik a rozvoj plesní.

Z experimentálnych meraní vlhkosťného stavu materiálov jednotlivých konštrukcií vyplýva:

1. Vlhkosť drevených zabudovaných prvkov (KVH stĺpikov a SM roštu) (Grafy 4 a 5.) je bezpečná z hľadiska vplyvu na pokles ich mechanických vlastností, neovplyvňuje pokles tepelno-technických vlastností (< 18 %) a je bezpečne pod hranicou vlhkosti z hľadiska rizika vzniku a pôsobenia drevokazných činiteľov (< 15 – 18 %).
2. Podľa údajov v Grafoch 9. a 10. sa priemerná relatívna vlhkosť vzduchu v tejto vrstve za merané obdobie pri konštrukciách MS1 pohybuje na úrovni 61,7 % a celkovo je o takmer 12 % nižšia ako priemerná vlhkosť vzduchu rovnakej vrstvy pri konštrukciách MS2. Na základe týchto výsledkov možno povedať, že parobrzda ISOCELL v konštrukciách MS2 zabraňuje prenikaniu väčšieho množstva vlhkosti do konštrukcie vplyvom infiltrácie vzduchu ako OSB/4 doska v skladbe MS1. To súvisí s ich difúznymi charakteristikami a prejavuje sa aj vo výsledkoch v podobe nižšej priemernej vlhkosti vzduchu v skúmanej vrstve konštrukcie.
3. Namerané hodnoty relatívnych vlhkostí vzduchu v konštrukciách MS1 (Graf 9.) korešpondujú s predikciou programu AREA, ktorá predpokladala podobné rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu v tejto vrstve. V konštrukciách MS2 (Graf 10.) sa rovnako namerané hodnoty významne nelíšia od teoretickej predikcie. Naopak, priemerné hodnoty teplôt na rozhraní týchto vrstiev, namerané počas sledovaného obdobia pri oboch konštrukciách, sú vyššie ako predikcia teoretickej analýzy oboch výpočtových programov a pri danom rozložení vlhkosti

v reálnych podmienkach znižujú riziko kondenzácie vodnej pary v oblasti nosnej konštrukcie.

4. Podľa priebehov vlhkostí tepelnej izolácie STEICO flex v oboch konštrukciách (Grafy 7 a 8) môžeme povedať, že vlhkostný stav sa za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktoré výrazne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti (λ , R) tepelnej izolácie a nevytvára priaznivé podmienky pre rozvoj a aktivitu drevokazných húb, plesní a škodcov, ktoré by mohli narušiť ich správne fungovanie.
5. Pri analýze vlhkostí materiálov za parobrzdnou vrstvou pri oboch konštrukciách sa pri ich porovnaní nepreukázal významný dlhodobý vplyv parobrzdnej fólie ISOCELL na vlhkostný stav materiálov umiestnených za touto vrstvou v smere tepelného a difúzneho toku cez konštrukciu vzhľadom na jej difúzne vlastnosti. Vlhkosti konštrukčných materiálov za touto vrstvou (STEICO flex) nezaznamenali pri konštrukciách výrazné rozdiely.
6. Z pohľadu použitia parobrzdnej fólie ISOCELL na vytvorenie vzduchotesnej roviny v konštrukciách je táto výhodnejšia ako OSB/4 doska, pretože zabráňuje prieniku väčšieho množstva vlhkého vzduchu do konštrukcie. To dokumentujú aj namerané hodnoty relatívnych vlhkostí vzduchu za touto vrstvou v rovine nosného systému (Grafy 9. a 10.). Fólia ISOCELL teda eliminuje šírenie vlhkosti vplyvom prúdenia vzduchu a jej použitie v konštrukciách má svoj praktický význam z pohľadu zníženia infiltrácie vzduchu do vnútra konštrukcie, čím znižuje riziko kondenzácie vodnej pary v oblasti nosnej konštrukcie, čo je žiaduce.

6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkostné vlastnosti a funkčnú spoľahlivosť posudzovaných stĺpkových konštrukcií s rôznymi materiálmi vo funkcii parobrzdy.

Z meraní a analýzy vlhkostného stavu drevených zabudovaných prvkov a priebehov teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu v daných vrstvách (Grafy 4 – 5.) vyplýva, že tieto nie sú ohrozené rizikom kondenzácie vodnej pary v konštrukciách. V týchto vrstvách neboli vytvorené vhodné podmienky pre aktivitu drevokazných činiteľov, ktoré by mohli ohroziť ich správne fungovanie.

Z priebehov teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu v konštrukciách na rozhraní vrstiev stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie (Grafy 9. a 10.) je zrejmé, že nedochádza ku kondenzáciám na vnútornom povrchu vonkajšieho opláštenia (STEICO Protect Dry). Teplota na rozhraní týchto vrstiev sa pohybuje počas celého obdobia bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných podmienkach, čo korešponduje aj s predikciou oboch výpočtových programov a v neprospech kondenzácie je aj vyššia nameraná teplota v daných vrstvách oproti výpočtovej. Výskum preukázal, že parobrzdná fólia ISOCELL na báze papiera nemá významný vplyv na vlhkosť materiálov za touto vrstvou (v smere tepelného toku) oproti OSB/4 doske, ale významne eliminuje infiltráciu vzduchu do konštrukcie a šírenie vlhkosti vplyvom prúdenia vzduchu.

Z hľadiska exaktnejšieho poznania stavu vlhkosti jednotlivých konštrukčných materiálov v skladbe a účinnosti vplyvu parobrzdnej fólie je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najlepšie s čo najväčším a dlhodobým teplotným rozdielom vonkajších a vnútorných parametrov v zimnom období.

Pod'akovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. APVV-17-0206 "Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva" a spolupráce katedry DF TU vo Zvolene s firmou M-House s.r.o.

Literatúra

ALTAN DONBAYCI, Ö. 2006. The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. In. Building and Environment. ELSEVIER Ltd. p. 3855 – 3859. ISSN 0360-1323

BRISCHKE, CH. – RAPP, O., A. 2008. Influence of wood moisture content and wood temperature on fungal decay in the field: observations in different micro-climates. In. Wood Sci Technol. Springer – Verlag. p. 663 – 677. DOI 10.1007/s00226-008-0190-9

DELL' ISOLA, M. – d' AMBROSIO ALFANO, R., F. – GIOVINCO, G. – IANNIELLO, E. 2012. Experimental Analysis of Thermal Conductivity for Building Materials Depending on Moisture Content. In. Thermophys. Springer Science + Business media. p. 1674 – 1685. DOI 10.1007/s10765-012-1215-z

HRICKO, D. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkostný stav stĺpikových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 79 strán, 2 prílohy

CHMÚRNY, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7

JOCHIM, S - DUDAS, J. 2013. Konštrukčné drevené materiály: pre drevené stavebné konštrukcie a výrobky. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 2013. ISBN 978-80-228-1938-1

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

OSANYINTOLA, F, O. – SIMONSON, J., C. 2006. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact. In. Energy and Buildings. ELSEVIER Ltd. p. 1270 – 1282. ISSN 0378-7788

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

ŠTEFKO, J., SOYKA, R., JOCHIM, S., KLESKEŇ, P., OSVALD, A., REINPRECHT, L., SEDLÁK, P. Moderné drevodomý. 1. vyd. Bratislava: Antar, 2015. 140 s. Stavajte a bývajte s nami. ISBN 978-80-970739-1-6.

WANG, Y. – ZHAO, Z. – LIU, Y. – WANG, D. – MA, CH. – LIU, J. 2019. Comprehensive correction of thermal conductivity of moist porous building materials with static moisture distribution and moisture transfer. In. Energy. ELSEVIER Ltd. p. 103 – 118. ISSN: 0360-5442

ZACH, J.– HROUDOVÁ, J. – BROŽOVSKÝ, J. – KREJZA, Z. – GAILIUS, A. 2013. Development of thermal insulating materials on natural base for thermal insulation systems. In. 11th International Conference on Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2013. p. 1288 – 1294.

Summary

Thermal and moisture properties of external diffuse timber frame walls with different types of vapour-barriers. The paper is focused on verification of thermal – diffusional

properties and moisture conditions of the external timber frame walls using the natural insulations. The aims of research are theoretical analysis and experimental verification of the moisture and diffusional characteristics of two types of perimeter walls – with a paper-based vapour barrier and vapour barrier based on wood. The goal was theoretical and experimental determination of proper function and its reliability in terms of moisture transport/content influenced by different vapour barriers, under real climatic conditions.

Keywords

Wooden constructions; wood-based perimeter walls, timber frame structures, thermal-technical properties, moisture content of materials, diffusional properties.

Contact Address

Stanislav Jochim, Patrik Štompf, Dominik Hricko, Jozef Štefko

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24

960 01 Zvolen, Slovak Republic

jochim@tuzvo.sk, patrik.stompf@gmail.com, hricko.dominik@gmail.com, stefko@tuzvo.sk

Michal Miklošovič

M-House, s.r.o.

Hraničná 18

821 05 Bratislava

info@mhouse.sk



Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko
<http://www.acoustics.sk/>



ANALÝZA TENKÝCH VRSTIEV

Jozef Kúdelčík, Peter Hockicko

1 Úvod

Tenké vrstvy sa vytvárajú na substráte (podložke) a majú hrúbku od niekoľko desiatok nanometrov až po pár mikrometrov. Už dlhé roky sa používajú k povrchovým úpravám základného materiálu kvôli zlepšeniu i zmene povrchových vlastností (napr. lom svetla, tvrdosť, ...). V súčasnosti teda poznáme široké možnosti využitia tenkých vrstiev v strojárstve, energetike, dekoračnej technike či v elektrotechnickom priemysle. Napríklad veľmi tvrdé diamantové vrstvy sa nanášajú na rezné nástroje (napr. frézy, píly, vrtáky), ktoré potom zvyšujú až niekoľkonásobne ich životnosť. Optické vrstvy sa využívajú ako antireflexné vrstvy na šošovkách či sklách. V elektrotechnickom priemysle sa využívajú ako pasívne štruktúry, kontakty na polovodičových čipoch, či funkčné vrstvy – senzory, displeje, magnetické vrstvy,...[Ateam].

V rámci kurzu Numerické simulácie vo fotonike študenti riešia okrem iného aj problematiku tenkého filmu [Pedrotti, Wartak, Topasna, Kúdelčík] využitím interferencie (konštruktívnej a deštruktívnej), antireflexný povlak, Fabry-Perotov interferometer a Bragovo zrkadlo. Kurz absolvujú študenti inžinierskeho štúdia v letnom semestri prvého ročníka, pričom má 2 hodiny prednášok a 2 hodiny numerických cvičení. Keďže tenké filmy sú neoddeliteľnou súčasťou nášho každodenného života, účelom tejto časti kurzu je poskytnúť študentom lepšie pochopenie dizajnu a aplikácií tenkých filmov v súvislosti s optickými filtrami. Štúdium tenkých vrstiev má svoje využitie i analýze signálov z fotopletyzografických senzorov.

Tento článok poukazuje na využitie MATLABu pri lepšom pochopení naučenej teórie a analýze tenkých filmov. Napriek tomu, že existujú sofistikovanejšie softvérové balíky pre analýzu tenkých filmov [web], účelom týchto cvičení je povzbudiť študentov k základnej simulácii a tak skombinovať svoje novonadobudnuté znalosti so schopnosťami MATLABu, aby pochopili dôležitosť „teórie a praxe“. Vďaka tomu získajú i väčšiu zručnosť a rýchlosť v programovaní MATLABu a veríme, že ocenia jednoduchosť, s akou môže MATLAB zjednodušiť únavné násobenie matic.

2 Prenosová matica

Na jednoduchší popis a charakterizáciu tenkej vrstvy sa používa prenosová matica. Jej vysvetlenie a následná teória uvedená nižšie vyplýva z informácií v učebniciach fotoniky a nadväzuje na učebné texty [Pedrotti, Wartak, Topasna]. Výpočet matice alebo súčinu matic je riešený v MATLABe na základe elektromagnetického poľa na jednej a druhej hranici vrstvy, či vrstiev. Na Obrázku 1 je zobrazená jedna vrstva na substráte spolu so zložkami elektrického a magnetického poľa dopadajúcej, odrazenej a prenášanej vlny.

Predpokladajme homogénnu, izotropnú vrstvu s indexom lomu n_1 nanesenú na substrát s indexom lomu n_s a umiestnenú do média s n_0 . Dopadajúci lúč sa odráža na vonkajšom rozhraní (na prvom rozhraní) (a), nastáva lom na prechode, predchádza danou vrstvou a nakoniec prechádza cez druhé rozhranie (b) do substrátu. Podľa okrajových podmienok sú tangenciálne zložky výsledných elektrických a magnetických polí spojité na rozhraniach a spĺňajú podmienky:

$$\begin{aligned} E_a &= E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \\ E_b &= E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \end{aligned} \quad (1)$$

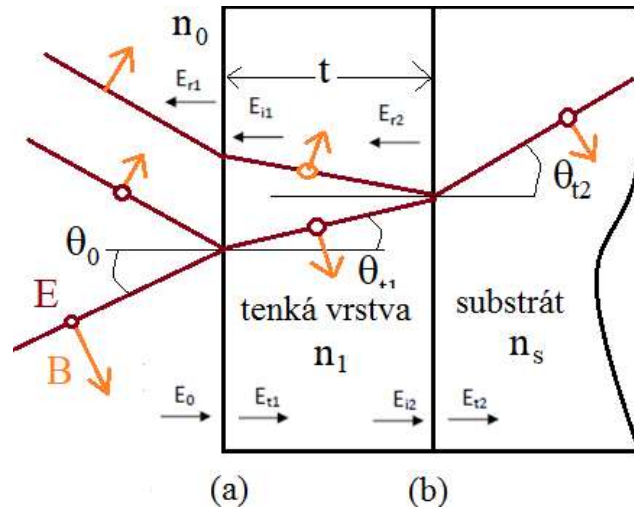
a

$$\begin{aligned} B_a &= B_0 \cos(\theta_0) - B_{r1} \cos(\theta_0) = B_{t1} \cos(\theta_{t1}) - B_{i1} \cos(\theta_{t1}) \\ B_b &= B_{i2} \cos(\theta_{t1}) + B_{r2} \cos(\theta_{t1}) = B_{t2} \cos(\theta_{t2}) \end{aligned} \quad (2)$$

pričom magnetické pole má tangenciálne kolmé zložky a značenie jednotlivých veličín vyplýva z Obrázku 1. Pomocou vzťahu $B = n \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} E$ možno okrajové podmienky (2) pre magnetické pole zapísať ako funkciu elektrického poľa:

$$\begin{aligned} B_a &= \gamma_0 (E_0 - E_{r1}) = \gamma_1 (E_{t1} - E_{i1}) \\ B_b &= \gamma_1 (E_{i2} - E_{r2}) = \gamma_s E_{t2} \end{aligned} \quad (3)$$

kde $\gamma_0 = n_0 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos(\theta_0)$, $\gamma_1 = n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos(\theta_{t1})$ a $\gamma_s = n_s \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos(\theta_{t2})$.



Obrázok 1. Tenká vrstva s hrúbkou t a indexom lomu n_1 na substráte s indexom n_s .

Ďalej pri prechode vlnenie danou vrstvou nastáva fázový posun δ medzi E_{i2} a E_{t1} , kde $\delta = k_0 \Delta = (2 \pi / \lambda_0) n_1 t \cos(\theta_{t1})$. Elektrické pole po prechode danou vrstvou má hodnotu: $E_{i2} = E_{t1} e^{-i \delta}$ a $E_{i1} = E_{r2} e^{-i \delta}$ a so zahrnutím okrajových podmienok dostávame

$$\begin{aligned} E_b &= E_{t1} e^{-i \delta} + E_{i1} e^{i \delta} = E_{t2} \\ B_b &= \gamma_1 (E_{t1} e^{-i \delta} - E_{i1} e^{i \delta}) = \gamma_s E_{t2} \end{aligned} \quad (4)$$

E_{t1} a E_{i1} sa dajú vyjadriť pomocou zložiek elektrického E_b a magnetického B_b poľa:

$$\begin{aligned} E_{t1} &= (\gamma_1 E_b + B_b) \frac{e^{i \delta}}{2 \gamma_1} \\ E_{i1} &= (\gamma_1 E_b - B_b) \frac{e^{-i \delta}}{2 \gamma_1} \end{aligned} \quad (5)$$

a nakoniec nahradením vyššie uvedených výrazov v počiatočných zložkách poľa získame

$$E_a = E_b \cos \delta + \frac{i \sin \delta}{\gamma_1} B_1 \quad (6)$$

$$B_a = E_b (i \gamma_1 \sin \delta) + B_1 \cos \delta$$

Tieto výrazy sa týkajú zložiek poľa na prvej hranici s prvkami na ďalšej hranici a môžu byť zapísané v maticovej forme, kde číselné indexy teraz označujú hranicu, s ktorou sa vlna stretáva pri prechode systémom.

$$\begin{pmatrix} E_a \\ B_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{\gamma_1} \\ i \gamma_1 \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ B_1 \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E_1 \\ B_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Každá vrstva viacvrstvého povlaku má svoju vlastnú prenosovú maticu a celková prenosová matica systému je súčinom jednotlivých prenosových matic v poradí, v akom sa svetlo šíri danými vrstvami:

$$M = \prod_{i=1}^N M_i \quad (8)$$

Pomocou okrajových podmienok sa výsledná prenosová matica môže zapísať v tvare:

$$\begin{pmatrix} E_0 + E_{r1} \\ \gamma_0 (E_0 - E_{r1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{t2} \\ \gamma_s E_{t2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Koeficienty odrazu a prenosu sú definované ako: $r = E_{r1}/E_0$ a $t = E_{t2}/E_0$. Po prepísaní z hľadiska zložiek prenosovej matice (9), sa dajú vypočítať nasledovne

$$t = \frac{2 \gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (10)$$

$$r = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} - m_{21} - \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}}$$

Tieto výrazy je možné použiť pre ľubovoľný počet vrstiev na určenie koeficientov odrazu a prenosu, z ktorých sa da vypočítať priepustnosť $T = |t|^2$ a odrazivosť $R = |r|^2$.

3 Výsledky

Táto časť predstavuje výsledky založené na teórii v časti 2 s použitím programu MATLAB pre rôzne typy a počet vrstiev. Zdrojový kód v MATLABe pre tenký jednovrstvový film je v Tabuľke 1.

3.1 Jedna vrstva

Príklad č. 1: Na sklo ($n_s = 1.50$) je naparený $t = 200$ nm hrubý film TiO_2 ($n_1 = 2.40$). Aká je normálna odrazivosť a priepustnosť pre rozsah vlnových dĺžok 350 - 850 nm, pokiaľ je umiestnený vo vzduchu ($n_0 = 1.0$) [Topasna]?

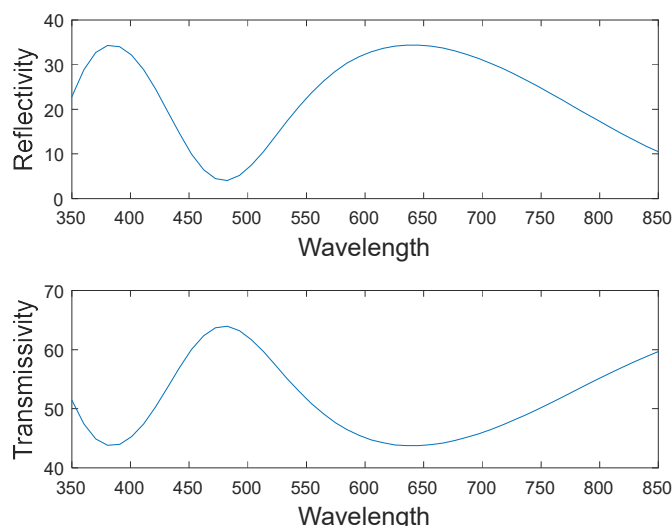
Pripravený program v MATLABe dáva flexibilitu meniť jednotlivé parametre úlohy a tak zistiť odrazivosť alebo priepustnosť. Na začiatku sú definované potrebné konštanty, ako je rozsah vlnových dĺžok, indexy lomu prostredia, filmu a substrátu a hrúbka vrstvy. Po spustení programu je počítaný fázový posun (δ), prenosová matica (M), odrazivosť (tr) a priepustnosť

(rr) pre danú vrstvu v stanovenom rozsahu vlnových dĺžok (Obrázok 2.). V ďalšom kroku je už len vykreslenie celkovej odrazivosti (R) a priepustnosti (T).

Tabuľka 1. Zdrojový kód v MATLABe pre tenký jednovrstvový film.

```
N=50; lam = linspace(350,850,N); %(Wavelength range in nm)
eps0 = 8.85*1E-12; %(Permittivity of free space) ni0 = 4*pi*1E-7; %(Permeability of free space)
n0 = 1.0; %(Index of refraction - air) n1 = 2.40; %(Index of refraction - coating 1)
ns = 1.5; %(Index of refraction - substrate) t = 200; %(Thickness of coating 1 in nm)
tr=linspace(1,100,N); rr=linspace(1,100,N);
for i=1:N
    delta1 = (2*pi/lam(i))*n1*t;
    M = [ cos(delta1) 1i*sin(delta1)/n1; 1i*n1*sin(delta1) cos(delta1) ]; %(Definition of transfer matrix)
    tr(i) = (2*n0)/(-M(2,1)+n0*M(1,1)+ns*M(2,2)-n0*ns*M(1,2));
    rr(i) = (M(2,1)+n0*M(1,1)-ns*M(2,2)-n0*ns*M(1,2))/(-M(2,1)+n0*M(1,1)+ns*M(2,2)-n0*ns*M(1,2));
end

T=100*(abs(tr)).^2; R=100*(abs(rr)).^2;
subplot(2,1,1) plot(lam,R)
ylabel('Reflectivity','FontSize',14) xlabel('Wavelength','FontSize',14)
subplot(2,1,2) plot(lam,T)
ylabel('Transmissivity','FontSize',14) xlabel('Wavelength','FontSize',14)
```



Obrázok 2. Tenká vrstva s hrúbkou t a indexom lomu n_1 na substráte s indexom n_s .

3.2 Dvoj vrstvé antireflexné pokrytie

Vzhľadom na obmedzený výber materiálov pre rôzne indexy lomu poskytuje dvojvrstvový povlak možnosť štvrt'-vlnových ($\lambda/4$) doštičiek s takmer nulovou odrazivosťou na jednej vlnovej dĺžke. Pre normálny výskyt je prenosová matica daná súčinom dvoch matíc, ktoré charakterizujú každú jednotlivú vrstvu:

$$M = M_1 M_2 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i \gamma_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & i \\ i \gamma_2 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\gamma_2}{\gamma_1} & 0 \\ 0 & -\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Koeficient odrazu je potom $r = \frac{\gamma_2^2 \gamma_0 - \gamma_S \gamma_1^2}{\gamma_2^2 \gamma_0 + \gamma_S \gamma_1^2}$ a odrazivosť pri normálnom dopade pre hrúbku štvrt' vlny je $R = \left(\frac{n_2^2 n_0 - n_S n_1^2}{n_2^2 n_0 + n_S n_1^2} \right)^2$, čo dáva podmienku $\frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{n_S}{n_0}}$ keď nastane nulová odrazivosť. Preto pri navrhovaní antireflexného dvojvrstvého systému by mali študenti vedieť hľadať materiály s indexmi lomu, ktoré spĺňajú vyššie uvedené podmienky pri špecifickej vlnovej dĺžke.

V optike sa často používa aj pol-vlnová ($\lambda/2$) doštička, ktorej prenosová matica má tvar:

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Príklad č. 2: Na sklenený substrát ($n_s = 1,52$) je nanosené antireflexná štruktúra skladajúca sa z dvoch vrstiev štvrt'-vlnových vrstiev CeF_3 ($n_1 = 1,65$) a ZrO_2 ($n_2 = 2,0$). Vrstva ZrO_2 je v priamom kontakte so skleneným substrátom. Určte normálnu odrazivosť pre svetlo na vlnovej dĺžke 550 nm a v širšom rozsahu vlnových dĺžok.

Výpočtom pomocou predošlých vzťahov zistíme, že odrazivosť je 550 nm je 0.03%. Použitím kódu v programe Matlab v Tabuľke 1. sa však môže ľahko analyzovať odrazivosť a priepustnosť v celom rozsahu viditeľnej vlnovej dĺžky a určiť, kde sa vyskytuje minimálna odrazivosť a maximálna priepustnosť. V predchádzajúcom programe sa len doplnia konštanty súvisiace s druhou vrstvou (hrúbka, index lomu a prenosová matica) a vykoná výpočet. Ďalšími prípadmi, ktoré by bolo možné študovať, sú dvojvrstvé filmy vyrobené kombináciou $\lambda/4$ a $\lambda/2$, ktoré rozširujú rozsah vlnových dĺžok s nízkou odrazivosťou.

3.3 Vrstvy s vysokou odrazivosťou

Pokiaľ už vieme vypočítať odrazivosť pre dve vrstvy, bez problémov môžeme prejsť na vyšší počet dvojvrstiev za vzniku vysokej odrazivosti (dielektrické zrkadlá). V tomto prípade je poradie štvrt'-vlnových filmov nasledovný: nízky index - vysoký index s opakovaním K-krát. Prenosová matica v tomto prípade má tvar:

$$M = (M_L M_H)^K = \left[\begin{pmatrix} \cos \delta_L & \frac{i \sin \delta_L}{\gamma_L} \\ i \gamma_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta_H & \frac{i \sin \delta_H}{\gamma_H} \\ i \gamma_H \sin \delta_H & \cos \delta_H \end{pmatrix} \right]^K \quad (13)$$

a na jej výpočet sa použije tiež MATLAB (Tabuľke 2.).

Príklad č. 3: Slot s vysokou odrazivosťou obsahuje sedem dvojitéch vrstiev filmov ($n_L = 1,45$) a ($n_H = 2,35$) na sklenenom ($n_S = 1,50$) substráte. Aká je odrazivosť a priepustnosť svetla v rozsahu vlnových dĺžok (1000 – 2200) nm pri normálnom dopade [Wartak]?

V tomto prípade sa analyzuje slot s vysokou odrazivosťou (dielektrická vrstva), v ktorom K-substrát má poradie filmov so štvrtou vlnovou dĺžkou nasledovné: nízky index - vysoký index. Pomocou MATLABu sa však teraz dá jednoducho meniť počet slotov a rýchlo analyzovať zmenu odrazivosti a priepustnosti, keď sa k zmení z 1 na 7 (Obrázok 3). Vychádzajúc z predchádzajúceho programu MATLABe pre dvojvrstvé vrstvy, sa zmení iba počet dvojvrstiev (nízky index - vysoký index).

Tabuľka 2. Zdrojový kód v MATLABe Bragovho zrkadla.

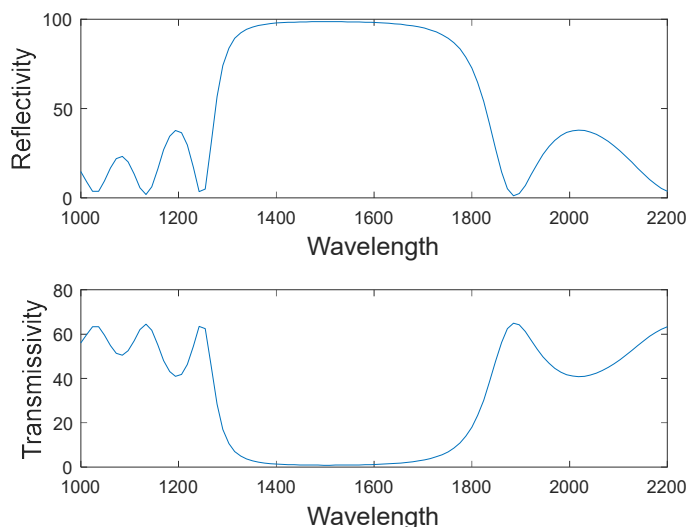
```

N=100; lam = linspace(1000,2200,N); %(Wavelength range in nm)
eps0 = 8.85*1E-12; %(Permittivity of free space) ni0 = 4*pi*1E-7; %(Permeability of free space)
n0 = 1.0; %(Index of refraction - air) ns = 1.52; %(Index of refraction - substrate)
nL = 1.45; %(Index of refraction - coating 1) tL = 259; %(Thickness of coating 1 in nm)
nH = 2.25; %(Index of refraction - coating 2) tH = 167; %(Thickness of coating 2 in nm)

gamma0 = n0*sqrt(eps0*ni0); gammas = ns*sqrt(eps0*ni0);
gammaL = nL*sqrt(eps0*ni0); gammaH = nH*sqrt(eps0*ni0);
tr=linspace(1,100,N); rr=linspace(1,100,N);

for i=1:N
    deltaL = (2*pi/lam(i))*nL*tL;
    deltaH = (2*pi/lam(i))*nH*tH;
    ML = [ cos(deltaL) 1i*sin(deltaL)/gammaL; 1i*gammaL*sin(deltaL) cos(deltaL) ];
    MH = [ cos(deltaH) 1i*sin(deltaH)/gammaH; 1i*gammaH*sin(deltaH) cos(deltaH) ];
    M = ML * MH;
    M = M ^ 7; %(K number of layers)
    tr(i) = (2*gamma0)/(gamma0*M(1,1)+ gamma0*gammas*M(1,2)+ M(2,1) + gammas*M(2,2));
    rr(i) = (gamma0*M(1,1)+ gamma0*gammas*M(1,2)- M(2,1) - gammas*M(2,2))/(gamma0*M(1,1)+
gamma0*gammas*M(1,2)+ M(2,1) + gammas*M(2,2));
end

T=100*(abs(tr)).^2; R=100*(abs(rr)).^2;
subplot(2,1,1) plot(lam,R)
ylabel('Reflectivity','FontSize',14) xlabel('Wavelength','FontSize',14)
subplot(2,1,2) plot(lam,T)
ylabel('Transmissivity','FontSize',14) xlabel('Wavelength','FontSize',14)
    
```



Obrázok 3. Vysoko odrazivá vrstva s 7 násobným opakovaním vrstvy s nízkym (n_L) a vysokým indexom (n_H) lomu na substráte s indexom n_s .

4 Záver

Optická charakteristika tenkých vrstiev má široké využitie vo optike, fotonike a ďalších odvetviach. Analýza tenkých vrstiev má svoje využitie i pri zlepšení parametrov PPG senzorov. V príspevku sú predstavené modelové výpočty v MATLABe, ktorých cieľom je pomôcť lepšie porozumieť vzťahu medzi tenkými filmami a prenosom, odrazom, interferenciou a ich

aplikáciami vo vzťahu k optickým filtrom. Výpočty navyše umožňujú zmysluplné precvičenie zručností študentov fotoniky v MATLAbE.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore Slovenskej grantovej agentúry KE GA cez projekt No. 023ŽU-4/2021, projektu Erasmus+: Agreement n° 2020-1-PL01-KA226-SCH-096354 a v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Nezávislý výskum a vývoj technologických zostáv na báze produktov nositeľnej elektroniky, ako nástrojov zvyšovania hygienických štandardov v spoločnosti vystavenej vírusu spôsobujúceho ochorenie COVID-19, kód ITMS2014+ 313011ASK8, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

ATEAM. Tenké vrstvy [online]. Plzeň[citováno 6.2.2014]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf. Učební text. Západočeská univerzita Plzeň.

PEDROTTI, F.L., PEDROTTI, L.M., PEDROTTI, L.S. 2006. *Introduction to Optics Third Edition*, Addison-Wesley, 2006, 622 s. ISBN-13: 978-0131499331.

WARTAK, M.S. 2013. *Computational Photonics An Introduction with MATLAB*, Cambridge University Press, 2013, 468 s, ISBN 978-1-107-00552-5

TOPASNA, D.M., TOPASNA, G.A. 2009. Numerical modeling of thin film optical filters, In: *Proceedings Volume 9666, 11th Education and Training in Optics and Photonics Conference*; 96661P, 2009. [cit. 2021-09-10]. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1117/12.2208081>

KÚDELČÍK, J. 2017. Numeric methods in photonics and applications of one dimensional FDTD, In: *PTEE 2017 = Physics teaching in engineering education : proceedings of the 9th international conference Slovakia*. - Žilina: University of Žilina, 2017. ISBN 978-80-554-1322-8, s. 119-124.

<http://www.sci-soft.com>

<https://www.comsol.com/>

<https://www.synopsys.com/photonic-solutions/rsoft-photonic-device-tools/rsoft-products.html>

<https://www.rp-photonics.com/> <https://optiwave.com/>

Summary

Numerical modelling of thin films. The thin layers are created on the substrate with a thickness ranging from a ten of nanometers to a few micrometers. They are used many years for surface treatment of the base material to improve and change its surface properties. Thin films are an important and essential part of many optical and electrical devices. Students in lecture of Numerical simulation in Photonics solve various tasks, so they gain basic knowledge about the propagation of light in various configurations. One such structures is thin films of various configurations. The article contains a detailed derivation of transmission and reflection of light at crossing of one layer. Calculating the transmission and reflection of light of different wavelengths through thin layers of film is a basic training that students should have. We present the whole program for numerical solutions of these problems in MATLAB. By varying the number of layers and their optical parameters, students learn how to adjust the transmission curves in order to tune particular filters to suit needed applications. This information can be also used at improvement parameters of PPG sensor's.

Keywords

Think layer; electric and magnetic field; MATLAB.

Contact Address

doc. RNDr. Jozef Kúdelčík, PhD.
Department of Physics BB417,
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
University of Žilina
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovakia
Tel. +421 41 513 2334
jozef.kudelcik@feit.uniza.sk

doc. PaedDr. Peter Hockicko, PhD.
Department of Physics BB427,
Faculty of Electrical Engineering and Information Technology
University of Žilina
Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovakia
Tel. +421 41 513 2364
peter.hockicko@feit.uniza.sk
<http://hockicko.uniza.sk>

VPLYV KVALITY VÝROBY LOŽÍSK NA OBŤAŽUJÚCI HLUK

Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš

1 Úvod

Doterajšie vibroakustické analýzy jednoznačne potvrdzujú, že ložiská výrazne ovplyvňujú dynamické správanie sa rotujúcich komponentov strojov, strojných zariadení a mechanických sústav, a to nielen z hľadiska hluku a kmitania (dynamické zaťaženie), ale aj z hľadiska spoľahlivosti a životnosti samotného stroja či mechanickej sústavy [4, 7]. Nežiaduce vôle ložiska a/alebo jeho poškodenie zvyšuje amplitúdu nevyváženosti rotujúcich komponentov pri frekvencii otáčania a tým aj nežiaduci nízko-frekvenčný hluk a kmitanie. Nízko-frekvenčné kmitanie narúša okolité stavebné konštrukcie, v obytnom prostredí spôsobuje kmitanie rôznych komponentov stavebných konštrukcií a voľne položených vecí a tým ovplyvňuje aj životné prostredie človeka a znižuje spoľahlivosť a životnosť mechanických sústav [2, 7]. Nízko-frekvenčné kmitanie generuje nízko-frekvenčný hluk, ktorý v uzatvorenom priestore môže pri určitej polohe zdroja hluku spôsobiť stojaté vlnenie prejavujúce sa ako dunivý hluk obťažujúci človeka [7]. Aj preto je žiaduce sledovať kvalitu výroby ložísk a ich montáž s využitím objektívnej metodiky, ktorá sa podrobnejšie uvádza v [8].

Vibroakustické vlnenie vznikajúce počas skúšok kvality či prevádzky komponentov strojných zariadení obsahuje mnoho užitočných informácií o ich technickom stave a tiež odráža charakter pracovných procesov a intenzitu zaťaženia daného komponentu či samotného stroja. Oproti iným diagnostickým metódam vibroakustická diagnostika umožňuje stanoviť nielen konštrukčný nedostatok alebo poškodenie, ale aj ich príčiny (napr. oválnosť, nadmerná vôľa, poškodenie komponentov ložiska, nedostatočná a neodborná montáž a pod.).

Znižovanie dynamického zaťaženia strojov, strojových zariadení, mechanických sústav a ich častí sa vzhľadom na okolité prostredie a človeka prejavuje zníženými emisiami a imisiami hluku a mechanického kmitania, teda zlepšovaním pracovného a životného prostredia [1, 2]. Článok sa zaoberá vibroakustickou analýzou kvality nových ložísk aplikovaných v mechanických sústavách, ako sú napríklad vodné čerpadlá a práčky a dopĺňa už publikovaný článok [8]. A práve v mechanických sústavách pracujúcich v blízkosti človeka sa vyžadujú kvalitné ložiská generujúce čo najnižšiu hladinu hluku. Redukcia kmitania a hluku sa musí sústrediť predovšetkým na primárne znižovanie ich hladín, čiže priamo na odstraňovanie príčin nežiaducej vibroakustickej energie technického zariadenia a do tejto oblasti prioritne patria ložiská [5, 6, 10].

2 Cieľ, metodika vibroakustických meraní a meracia technika

Cieľ experimentálnych skúšok na skúšobnom zariadení (nové ložiská pre vodné čerpadlá) a priamo na výrobku (elektromotor a bubon práčky) bol identifikovať príčiny vzniku nadmerného dynamického zaťaženia (kmitania a hluku) a na základe parametrov kmitania stanoviť postupy hodnotenia kvality ložísk predovšetkým z hľadiska ich hlučnosti a overiť ich objektívnosť tak z hľadiska opakovateľnosti, ako aj reprodukovateľnosti meraní pri určovaní prípustných hraníc hlučnosti pre ložiská používané vo vybraných mechanických sústavách. Postup stanovenia kritérií kvality ložísk uvedený v tomto článku je možné zovšeobecniť pre rôzne druhy ložísk rešpektujúc reprezentatívny štatistický výber skúmaného typu ložiska.

Postup hodnotenia kvality ložísk z hľadiska ich hlučnosti vychádza z dynamického správania sa ložísk, teda z hodnotenia parametrov veličín mechanického kmitania. Cieľom merania

zrýchlenia a mohutnosti periodického dynamického zaťaženia (kmitania) bolo analyzovať veľkosť kinematických veličín (zrýchlenia a rýchlosti) pôsobiacich na prírubu ložiska, resp. jeho uloženie v mechanickej sústave. Veličiny kmitania nie sú ovplyvnené okolitým kmitaním tak, ako pri snímaní zvukového signálu, ktorý je viac alebo menej ovplyvnený reziduálnym hlukom (hluk pozadia) [5, 9]. V metodikách sa teda využíva jednoznačná súvislosť medzi mechanickým a akustickým kmitaním. Vykonali sme frekvenčnú analýzu, ktorej cieľ bol zistiť frekvenčné rozloženie výrazného nežiaduceho dynamického zaťaženia a jeho príčiny. Ako sa už konštatovalo metodika hodnotenia kvality vyrobených a už namontovaných ložísk rotačných komponentov mechanickej sústavy musí jednoznačne s opakovateľnosťou a/alebo reprodukovateľnosťou spoľahlivo vyhodnotiť vyhovujúce a nevyhovujúce ložiská.

Pri meraní mechanickeho a akustického kmitania sa použila najmodernejšia meracia technika od renomovanej firmy Bruel & Kjaer (B&K), a to 12 kanálová meracia karta B&K PULSE; akcelerometre s využiteľnými frekvenčnými rozsahmi 0,2 Hz – 12 800 Hz; integrujúci vibromer merania zrýchlenia s výstupom mohutnosti kmitania, ktoré je kvantitatívnym aj kvalitatívnym ukazovateľom dynamiky strojových zariadení s otáčajúcimi a vratnými hmotami, ako aj rázového zaťaženia v zhode s normami súboru STN ISO 10816 a STN ISO 2954; zvukový analyzátor s využiteľným frekvenčným rozsahom do 25 600 Hz pre kontrolný záznam meraných signálov vrátane reziduálneho hluku, ktorý reprezentuje otvorený systém poskytujúci nové možnosti a viac informácií a spoľahlivosti v procese merania, analýzy, vyhodnotenia a expertízy; rázové kladívko B&K s maximálnou rázovou silou 35 584 N na vybudenie vlastných tvarov kmitania konštrukcie pri overovaní meracieho reťazca a iná doplnujúca technika podporujúca meranie.

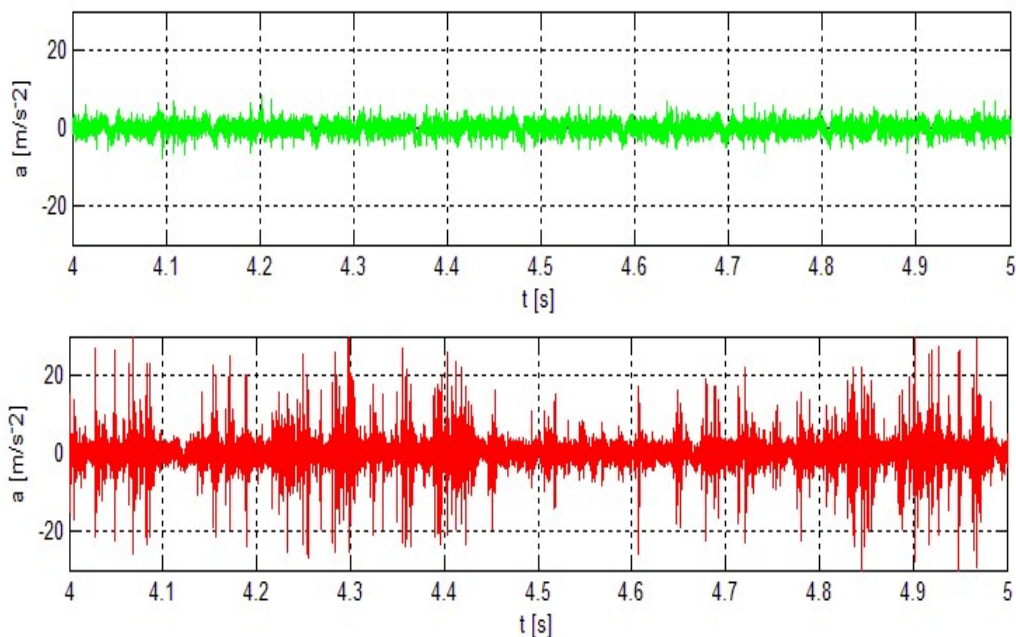
3 Dynamické zaťaženie ložísk

Stroje a strojové zariadenia a teda aj ložiská pracujú pri konštantnom a/alebo premenlivom dynamickom zaťažení, ktoré má vplyv na priebeh generovania hladín veličín kmitania a hluku. Pre skúšobné zariadenie daného typu ložísk, zaťaženie nového ložiska a jeho frekvencia otáčania boli konštantné. Pri nových ložiskách namontovaných do elektromotora práčky, zaťaženie a ich frekvencia otáčania boli premenlivé.

3.1 Konštantné dynamické zaťaženie ložísk

Obrázok 1. reprezentuje výber z dostatočne reprezentatívnej štatistickej vzorky (30 ložísk) časových priebehov nameraných zrýchlení kmitania od dynamického zaťaženia generovaného vyhovujúcim (hore) a nevyhovujúcim (dole) ložiskom skúmaného typu. Priebeh zrýchlenia kmitania je pri kvalitných ložiskách približne konštantný s malou amplitúdou, než pri nevyhovujúcich ložiskách, kde amplitúda zrýchlenia kmitania je v priemere niekoľkonásobne väčšia s výraznejšími pravidelnými a nepravidelnými maximálnymi amplitúdami dosahujúcich vysokých hodnôt zrýchlenia kmitania charakterizujúce napríklad pulzné zadrhávajúce. Tieto deterministické alebo náhodné maximálne amplitúdy signálu sú prejavom poškodenia obežných dráh ložiska, či jeho komponent, spôsobeného výrobou a/alebo technológiou montáže ložiska. Bližšia špecifikácia je možná s využitím frekvenčnej analýzy, ktorá umožňuje detegovať príčiny a druhy poškodenia ložiska.

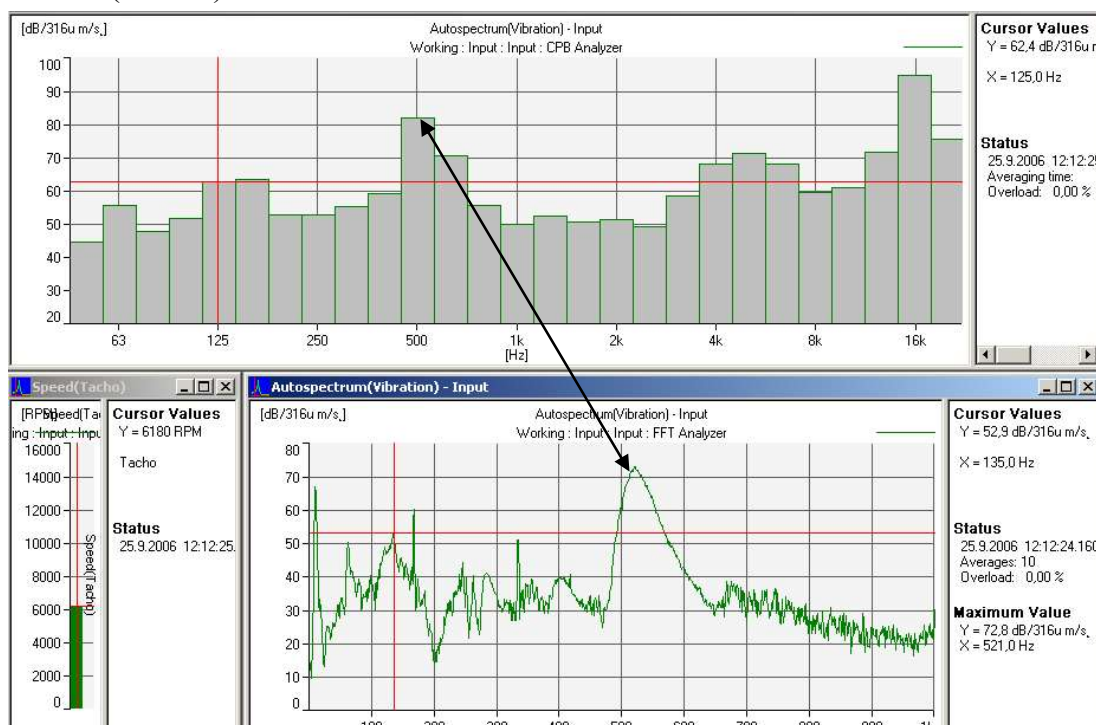
Abnormálny časový dynamický prejav ložiska prostredníctvom maximálnej hodnoty zrýchlenia kmitania je jedným z kritérií objektívneho hodnotenia kvality ložísk [8]. Bližšia špecifikácia je možná s využitím frekvenčnej analýzy, ktorá umožňuje detegovať príčiny a druhy poškodenia ložiska a na základe druhu poškodenia vo výrobe detegovať druh výrobných operácií, kde k poškodeniu dochádza. Toto však nie je cieľ tohto článku.



Obrázok 1. Časový záznam dynamického zaťaženia ložísk: hore vyhovujúce a dole nevyhovujúce.

3.2 Premennivé dynamické zaťaženie

V skúmanom prípade zisťovania kvality už namontovaných ložísk sa dynamické zaťaženie mení v dôsledku nárastu alebo poklesu frekvencie otáčania, ktoré je typické pre práčky pri praní a žmýkaní, keď sa frekvencia otáčania približne zdvojnásobí. Frekvenčné spektrá pri brzdení a frekvencii otáčania (5 810 – 6 330) r/min – (97 – 106) Hz – (podľa photoelectric tachometer probe MM 0024) a podľa sledovania maximálnej výchylky frekvencie otáčania v spektre FFT 8 100 r/min (135 Hz) sú na Obrázku 2.



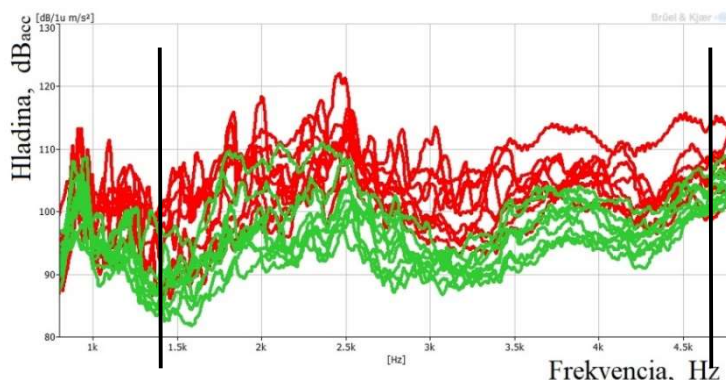
Obrázok 2. Frekvenčné spektrum pri brzdení súvisiace so zmenou frekvencie otáčania.

Z Obrázku 2. je zrejmé, že elektromotor práčky prechádza niekoľkými kritickými frekvenciami, ktoré pri pomalom prechode cez tieto frekvencie generujú zvýšenú hladinu hluku práčky, čo podrobnejšie analyzuje tento článok v 4.2. Experimenty ukázali, že veľkosť amplitúdy zrýchlenia kmitania výrazne závisí od kvality ložiska.

4 Postup stanovenia kvality ložísk

4.1 Frekvenčná analýza samotného ložiska

Z uvedených časových priebehov (Obrázok 1.) sa vykonala frekvenčná analýza reprezentatívnej štatistickej vzorky ložísk s cieľom stanoviť frekvenčný interval vhodný pri určovaní kvality ložísk (Obrázok 3.). Z frekvenčného rozloženia zrýchlenia kmitania, vyjadreného v decibeloch, je vidieť výrazné amplitúdy vo frekvenčnom intervale od 1,5 kHz do 4,5 kHz, kde je sluchový orgán človeka najcitlivejší. Treba zdôrazniť, že pre každý typ ložiska sa bude tento interval meniť. Tento frekvenčný interval s ekvivalentnou hladinou zrýchlenia kmitania v tomto intervale pre vyhovujúce ložisko v súčinnosti s časovým priebehom zrýchlenia kmitania sú overené kritériá pre hraničnú hodnotu kvality ložiska daného typu [8].

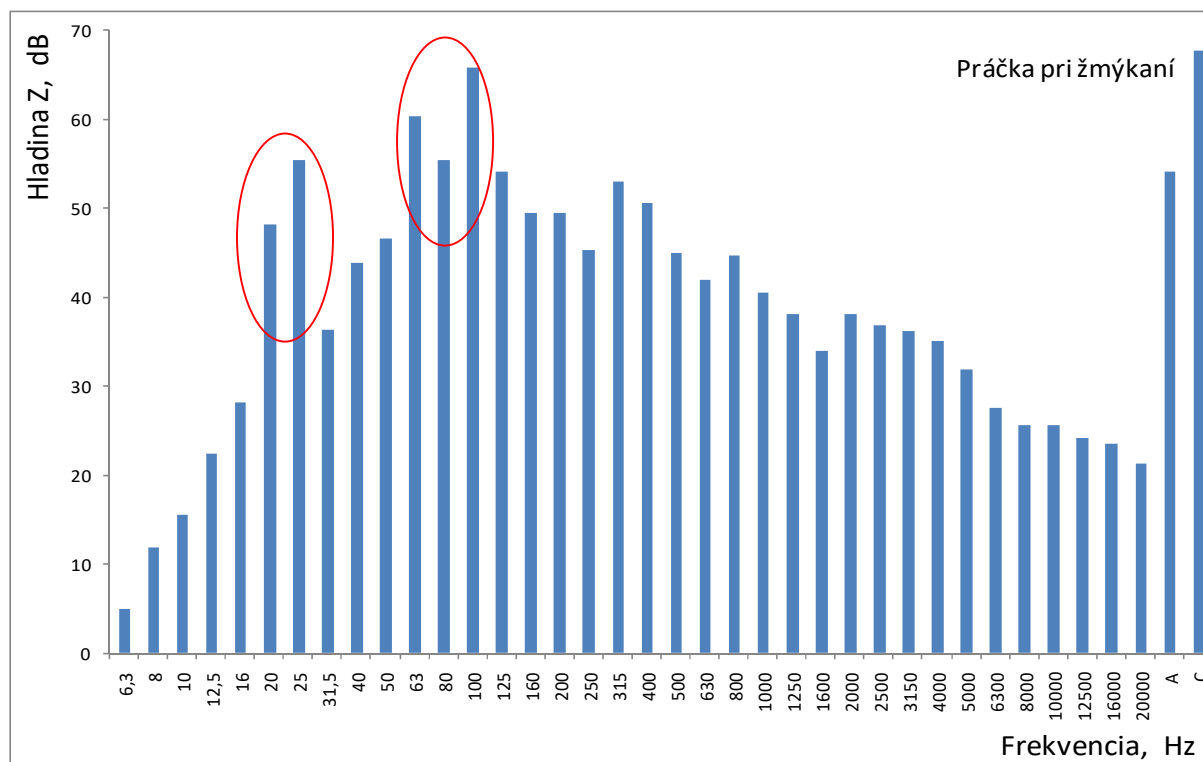


Obrázok 3. Frekvenčné spektrá ložísk s rôznym dynamickou emisiou; spektrá zobrazené červenou farbou (č.b. tmavšie) reprezentujú nevyhovujúce ložiská a zelenou farbou (č.b. bledšie) vyhovujúce ložiská.

4.2 Frekvenčná analýza ložísk elektromotora práčky

Nízkofrekvenčný zvuk (hluk) exponujúci obytné priestory generujú aj domáce spotrebiče a sanitárne vybavenie bytu. Samotné hodnoty hladín hluku však nie sú vždy rozhodujúce. Spoluúčasť na negatívnom pôsobení zdroja hluku alebo činnosti, ako zdroja hluku na blízke okolie, má predovšetkým frekvenčné rozloženie hluku (zvuku), prítomnosť tónových zložiek, premenlivosť, impulznosť a prerušovanosť hluku. Väčšina domácich spotrebičov a sanitárnej techniky pri ich používaní vyžaruje akustické vlnenie stredných a vyšších frekvencií. Typický príklad výnimky je automatická práčka v prevádzkovom režime žmýkanie, keď sa generuje veľmi výrazné nízkofrekvenčné vlnenie tónového charakteru, ktoré spôsobuje nepríjemný tlak na ušný bubienok aj napriek tomu, že sa spravidla nachádza v uzatvorenom priestore. Frekvenčné spektrum práčky pri žmýkaní bielizne získané meraním nad dvoma vzájomne kolmými zvuk odrážajúcimi rovinami (podlaha, stena) do voľného priestoru je na Obrázku 4.

Elektromotor práčky, vrátane bubna, v rozsahu pracovných otáčok vybudzuje periodické kmitanie, relatívne vysokej intenzity, a to od nevyváženosti rotujúcich komponentov, ktorého amplitúda kmitania je závislá aj od kvality ložísk (najmä od vôle v ložisku). Veľkosť amplitúdy veličín kmitania pri frekvencii otáčania je závislá od presnosti vyváženosti a kvality ložísk. Zvýšená vôľa v ložiskách zvyšuje najmä momentovú nevyváženosť.

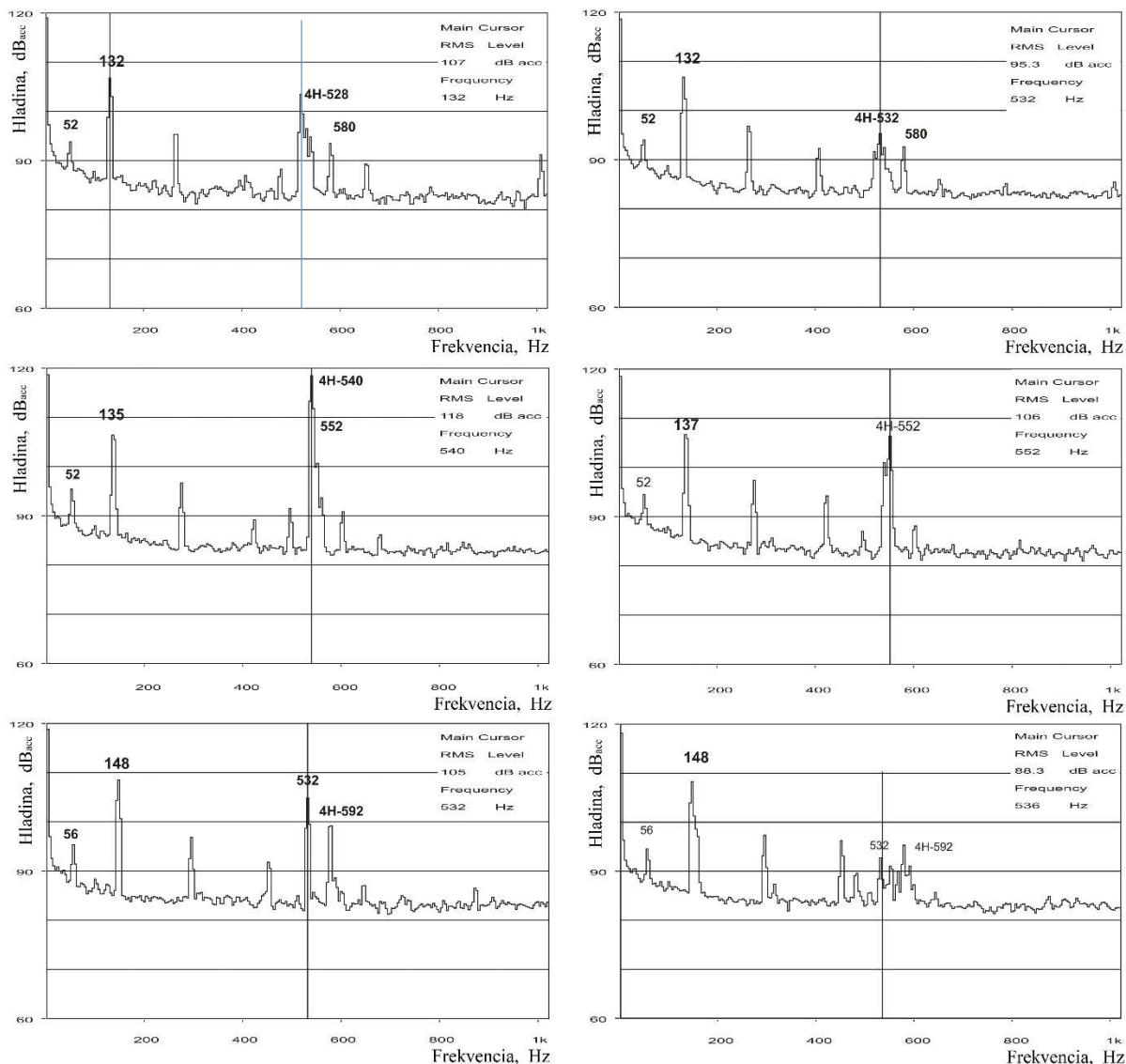


Obrázok 4. Nevážené tretinovo-oktávové spektrum práčky pri žmýkaní.

Vychádzajúc z doterajších skúseností amplitúda veličín kmitania od nevyváženosti je relatívne veľká a môže byť jednou z príčin vybudenia rezonančných javov elektromotora. Stupeň vyváženia spravidla stanovuje výrobca, čo nie vždy môže zodpovedať vyžadovanému dynamickému zaťaženiu elektromotora a okolitých konštrukcií. Amplitúda kmitania od nevyváženosti sa so zvyšovaním otáčok zvyšovala a pri frekvencii 250 Hz dosahovala až 117 dB_{acc}. Amplitúda od nevyváženosti pri diagnostikovaných motoroch bola pri zodpovedajúcich otáčkach približne rovnaká. Vo väčšine prípadoch nepresiahla hodnotu 1 dB. Môže to indikovať vyššiu kvalitu stupňa vyváženosti a použitie kvalitnejších ložísk.

Na základe frekvenčnej analýzy vykonanej pri rôznych frekvenciách v prevádzkovom intervale sa zistilo, že k zvýšenému dynamickému zaťaženiu dochádza pri frekvencii v okolí 135 Hz, čo zodpovedá prevádzkovej frekvencii otáčania 8 100 ot/min (Obrázok 5.). Vo frekvenčnom spektre sa to prejavuje významnou amplitúdou kmitania štvrtej harmonickej (4H) v okolí frekvencie 540 Hz, čo potvrdili aj predchádzajúce merania [11]. Z frekvenčných spektier možno konštatovať, že amplitúda veličín kmitania pri frekvencii (približne 540 Hz) so znižovaním a zvyšovaním otáčok postupne klesá, čo je charakteristické pri rezonančnom jave, resp. kritických otáčkach hriadeľa elektromotora, ich násobkoch – harmonických alebo zlomkových násobkoch – subharmonických.

V prípade, že sa harmonické alebo subharmonické kritickej frekvencie otáčania hriadeľa zhodujú s budiacou frekvenciou alebo jej harmonickými frekvenciami, dochádza k rezonančnému stavu rotora elektromotora a/alebo bubna, ktorý sa pri určitých konštrukčných a technologických nedostatkoch (chybách) môže prejavovať nadmerným dynamickým zaťažením aj napriek tomu, že samotný rotor je veľmi tuhý (vlastná frekvencia 683 Hz [11]). Pod konštrukčnými a technologickými chybami treba v danom prípade rozumieť predovšetkým zvýšenú nevyváženosť, väčšie vôle v ložiskách alebo nekvalitné (nevyhovujúce) ložiská. Môže to byť aj nepresná a nedôsledná montáž.



Obrázok 5. Frekvenčné spektrá elektromotora č. 1 a č. 2 v oblasti zvýšeného dynamického zaťaženia (vľavo – nevyhovujúce; vpravo – vyhovujúce).

Z frekvenčných spektier na Obrázku 5. zreteľne vidieť rozdiel vo veľkosti amplitúdy kmitania v oblasti štvrtej harmonickkej (4H) frekvencii otáčania. V predpokladanej rezonančnej oblasti sú v tabuľke 1 pre tri vybrané frekvencie a dva motory uvedené amplitúdy kmitania pri 4H alebo v jej blízkosti. Jeden z motorov práčky nevyhovel stanoveným požiadavkám na dynamické zaťaženie v rozsahu jeho pracovných frekvencií otáčania. Amplitúdy zrýchlenia kmitania u tohto elektromotora sú podstatne vyššie ako u elektromotora, ktorý vyhovuje stanovenému kritériu, teda stanovenej hladine zrýchlenia kmitania, ktorá zodpovedá limitnej emisnej hladine hluku [11].

Tabuľka 1. Amplitúdy kmitania v rezonančnej oblasti alebo v jej blízkosti.

Frekvencia, Hz	Elektromotor práčky (CIM WH9)	
	Nevyhovel, dB _{acc}	Vyhovel, dB _{acc}
132	103,5	95,3
135, resp. 137	118	106
148	105	88,3

5 Diskusia a záver

Článok naznačuje dve metodiky stanovenia kvality vyrobených ložísk, ktoré však majú spoločného menovateľa, a to je energia kmitania vyjadrená prostredníctvom merania zrýchlenia kmitania a tým aj nežiaduce zvýšenie hlučnosti strojovej sústavy. Stanovené kritériá sa overili a dosiahla sa 100 % zhoda v určení kvality ložísk vzhľadom na ich dynamickú expozičiu, a to kmitanie a hluk. Nežiaduce hlukové emisie ložísk možno sledovať cez maximálnu hodnotu zrýchlenia určenú z časového priebehu, frekvenčného rozloženia kmitania a jeho ekvivalentnú hladinu vo vybranom frekvenčnom intervale a pri namontovaných ložiskách v rotačnom stroji pomocou hladiny zrýchlenia zodpovedajúcej limitnej emisnej hladine vyžarovaného hluku. Zvýšenie kvality ložísk, a teda zníženie počtu nevyhovujúcich ložísk, možno vykonať diagnostikovaním príčin a poškodení ložísk. Príčinou nekvalitných (nevyhovujúcich) ložísk, okrem konštrukčných nedostatkov, je aj nedostatočná a neodborná montáž. Toto konštatovanie vyplýva z vykonanej frekvenčnej analýzy.

K zisteniu príčiny nadmerného kmitania rotačných komponentov práčky pri dobehu, resp. zmene frekvencie otáčania z 15 000 r/min (žmýkanie v práčke) na 5 100 r/min (pranie) bolo nevyhnutné vypočítať všetky frekvencie možného poškodenia jednotlivých komponentov [11]. Išlo predovšetkým o frekvencie vybudené nevyváženosťou, nesúosovosťou ložísk, neprímeranými vôľami, poškodením ložísk, elektrickým poškodením rotora a statora ako aj vypočítaním kritických frekvencií otáčania rotora elektromotora. Bolo teda nevyhnutné vykonať úplnú vibrodiagnostiku elektromotora a postupne vylučovať jeho možné chyby. Treba mať na zreteli, že zvýšená nevyváženosť podporená nevyhovujúcou kvalitou ložísk môže ovplyvňovať celkové dynamické správanie sa rotujúcich komponentov práčky predovšetkým pri prechodových stavoch ako sú rozbeh a dobeh.

Na základe frekvenčnej analýzy možno konštatovať, že amplitúdy veličín kmitania v okolí frekvencie 540 Hz výrazne menia svoju hodnotu, čo je charakteristické pre rezonančné javy, resp. pre kritické frekvencie otáčania rotujúcich komponentov a ich násobky. Pravdepodobnou príčinou nežiaduceho dynamického zaťaženia motora je práve subrezonančný stav, ktorý spôsobuje určitá vôľa v uložení rotora motora, teda aj v ložiskách. Z uvedeného vyplýva, že príčinou zvýšeného dynamického zaťaženia pri dobehu elektromotora je s veľkou pravdepodobnosťou kombinácia väčšej nevyváženosti rotora a väčších vôľ v ložiskách.

Acknowledgements

The research presented in this paper is an outcome of the project No. APVV-19-0538 “Progressive hybrid high-speed spinning actuator” funded by the Slovak Research and Development Agency.

References

- [1] BALAZIKOVA, M., SINAY, J. Implementation of Auditory and Non-auditory Effects of Noise in the Risk Assessment Process in Mechanical Engineering. *Procedia Engineering*, No. 48, 621-628, 2012.
- [2] ČULÍK, M., JOCHIM, S., ONDREJKA, V. Sound Insulation of Partition Wall and Ceiling in Panel Timber Frame Structure. *Akustika*. Volume 31, 145-152, 2019, ISSN 1801-9064.
- [3] FLIMEL, M. Possibilities of Active Reduction of Noise in the Workplace. *Akustika*, Volume 28, 27-31, 2017.
- [4] CHLEBO, O., ŠOOŠ, L., ŽIARAN, S., MUSIL, M. Application of Vibroacoustics in Subjective and Objective Assessment of Bearing Quality. *Proceedings of the International Conference Acoustics 2019 High Tatras 2019* p. 203-208, ISBN 978-80-228-3157-4.
- [5] ŽIARAN, S., MUSIL, M., CHLEBO, O., ŠOOŠ, L. Návrh metodiky kontroly hladiny

- kmitania a hlučnosti pre dvojradové ložiská K982 AS vodných čerpadiel automobilov. Výskumná správa SjF STU, Bratislava 2015 str. 20.
- [6] ZIARAN, S., MUSIL, M., CHLEBO, O. Determination of the Bearing Quality by Means of Vibroacoustic Response. *Proceedings of Internoise/ASME NCAD Noise control and acoustics division conference*, 2015, Article number: V001T01A004-1.
- [7] ŽIARAN, S. Nízkofrekvenčný hluk a kmitanie. *Vedecká monografia*. Nakladateľstvo STU Bratislava 2016, str. 316, ISBN 978-80-227-4536-9.
- [8] ŽIARAN, S., CHLEBO, O., ŠOOŠ, L. Methodology of Objective Evaluation of Quality Bearings by Vibro-Acoustics and Its Comparison with a Subjective Method. *Akustika*. Volume 37, 58-66, 2020, ISSN 1801-9064.
- [9] ZIARAN, S., CHLEBO, O., CEKAN, M., TUMA, J. Transmission of Vibrations through Vibration Isolators, Theory and Application. *The 15th IFToMM World Congress*, Krakow, Poland, Springer Nature Switzerland AG 2019, pp. 3995-4004.
- [10] ŽIARAN, S., ŠOOŠ, L., CHLEBO, O. Primary Noise Control in the Work Environment by Increasing the Quality of Bearings and Effective Mounting of Machines. *ARCHIVES OF ACOUSTICS*, Vol. 45, No. 2, 2020, pp. 253–262.
- [11] ŽIARAN, S. Analýza príčin dynamického zaťaženia elektromotora CIM WH9 pri brzdení s návrhom opatrení na odstránenie príčin. *Výskumná správa*, Bratislava 2006. str. 33 – EMERSON Nové Mesto nad Váhom.

Summary

Influence of Bearing Production Quality on Annoying Noise. The article suggests two methodologies for determining the quality of produced bearings, which, however, have a common denominator, and that is the vibration energy expressed by measuring the vibration acceleration. The determined criteria were verified and 100 % agreement was reached in determining the quality of the bearings with respect to their dynamic exposure, namely vibration and noise. Unwanted bearing noise emissions can be monitored over the maximum acceleration value determined from the time response, the frequency distribution of the vibration and its equivalent level in the selected frequency range and with the bearings mounted in the rotary machine using the acceleration level corresponding to the emission limit level. Improving the quality of bearings, and thus reducing the number of non-compliant bearings, can be done by diagnosing the causes and damage of the bearings. The cause of poor quality bearings, in addition to structural deficiencies, is also insufficient and unprofessional technological assembly. This statement follows from the performed frequency analysis.

Keywords

Bearing; quality; measurement; frequency analysis; vibration.

Contact Address

Stanislav Žiaran (correspondent author), Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš
Institute of Production Systems, Environmental Engineering and Quality Management
Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava,
Nám. slobody 17, 81231 Bratislava, Slovak Republic.
stanislav.ziaran@stuba.sk; ondrej.chlebo@stuba.sk; lubomir.soos@stuba.sk

DIAGNOSTIKA DREVENÝCH ORGANOVÝCH PÍŠŤAL METÓDAMI AKUSTIKY

Andrej Štafura, Martin Čulík, Štefan Nagy, Ondrej Chlebo

1 Úvod

Drevené organové registre sú súčasťou historických organov, pričom ich percentuálne zastúpenie je rôzne. Pri veľkých nástrojoch ide vo väčšine prípadov len o minimálne, alebo malé množstvo, pričom sa nájdu výnimky ako organ z roku cca 1610 od Esaiasa Compenia v zámočkej kaplnke vo Frederiksborg, ktorý má 27 drevených registrov pre dva manuály s pedálom [1]. Z druhej strany nemožno zabudnúť ani na nástroje tzv. organo di legno, čiže organy, ktoré majú registre len z dreva [2]. Išlo o organy talianskej renesancie, pričom máme zachovaných niekoľko nástrojov [2]. Z pozície Slovenska síce nemáme nástroje typu organo di legno, avšak máme niekoľko stovák organových pozitívov, ktoré majú vysoký podiel drevených registrov. Ako je všeobecne známe, každý materiál a teda aj drevo podlieha degradácii, pričom pri historickom dreve ide o jav, ktorý je síce prirodzený, ale potrebujeme ho zvrátiť z dôvodu zachovania jeho historickej hodnoty. Medzi najvýznamnejšie degradačné vplyvy drevených organových píšťal patrí drevokazný hmyz, ktorý až deštruuje zvukové vlastnosti týchto nástrojov. Jeho aktivita je však priamo naviazaná najmä na rovnovážnu vlhkosť dreva a teplotu v priestore v akom je nástroj uložený. Primárne tak vlhkosť nespôsobuje len aktivitu drevokazného hmyzu, ale aj rozmerovú nestabilitu dreva použitého na stavbu historických organových drevených píšťal. Z toho dôvodu je nevyhnutné vedecký pohľad upriamiť na zachovanie a ochranu tohto hmotného hudobného kultúrneho dedičstva [3]. Bez adekvátnych poznatkov je už dnes veľmi komplikované hodnotiť drevený píšťalový fond priamo in situ a odpovedať na otázku kvality, respektíve výberu reštaurátorskej techniky, či kombináciu rôznych techník [3].

2 Exaktné metódy akustiky využívané v organológii

Exaktné metódy hodnotenia vlastností dreva, ale aj kvality zvuku píšťal sú dnes, ako aj smerom do budúcnosti, nevyhnutnou a pevnou súčasťou organológie hudobných nástrojov. Spojenie metód „klasickej“ organológie a rôznych akustických metód merania vlastností materiálu, prináša významnú pridanú hodnotu k problematike skúmania a poznania vlastností hudobných nástrojov. Experimentálne metódy sa využívajú či už pri meraní na experimentálnych telesách, ako aj v reálnej praxi. Pri jednotlivých experimentoch je nevyhnutné sledovať a zachovávať počiatočné podmienky meraní.

Posudzovanie ukazovateľa kvality materiálu použitého na stavbu historických organov, ako aj na stavbu nových nástrojov, na základe skúmania fyzikálno-akustických charakteristík (FACH), sa uskutočňuje v súčasnosti najmä pomocou dvoch metód: rezonančnou dynamickou metódou a metódou modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov.

Ďalšou dôležitou súčasťou hodnotenia organových píšťal je snímanie ich frekvenčného spektra zvuku. Na základe jeho kvality sa zatriedujú jednotlivé registre do skupín, určujú kvalitu organologicky inak nepoškodenej píšťaly. Určovať výšku ladenia, či odlišovať pôvodné a sekundárne osadené píšťaly, respektíve hodnotiť a nastavovať intonačné parametre. Problémom tejto metódy zostáva otázka, ako správne definovať a hodnotiť získané

merané údaje, ak ide o poškodenú píšťalu do tej miery, že buď nedokáže generovať zvuk, alebo je zvuk ovplyvnený presne nezistenou príčinou.

K hodnoteniu kvality materiálu sa ďalej môže využiť modálna analýza na základe budenia vlastných tvarov kmitania a zisťovať tak charakteristické vlastnosti jednotlivých organových dielni a určiť tak istú kvalitu respektíve úmysel zjednocovať vlastné kmity píšťal s budenými frekvenciami, respektíve nastavením ladenia.

2.1 Metóda modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov – aparátúra VIBROVIZER

Meranie FACH pri posudzovaní kvality materiálu použitého na stavbu historických organov, prípadne na stavbu nových nástrojov, sa uskutočňuje pomocou nedeštruktívnej metódy modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov na telesách tvaru tenkej pravouhlej dosky. Uskutočňuje sa najmä meranie módu kmitania (2,0).

2.2 Metóda analýzy frekvenčného spektra zvuku organových píšťal

Analýza frekvenčného spektra zvuku organových píšťal sa uskutočňuje nedeštruktívne využitím prístrojového vybavenia, pričom podmienka je píšťala schopná generovať zvuk.

2.3 Modálna analýza – metóda budenia vlastných tvarov kmitania

Analýza prebieha nedeštruktívne, avšak je potrebná píšťala, ktorá je schopná generovať zvuk, aby sa dokázali komparovať vlastné tvary kmitania a frekvencie získané pri budení píšťal.

3 Výsledky

3.1 Meranie vlastností poškodenej časti dosky organovej píšťaly

Poškodenie črvotočom vplyva hlavne na fyzikálne a mechanické vlastnosti dreva historických organov. Takto poškodené drevo (Obrázok 1. vľavo) má zaznamenaný výrazný pokles fyzikálno-akustických charakteristík (Tabuľka 1.), pričom to závisí od rozsahu poškodenia dreva, respektíve kompletných drevených organových píšťal.



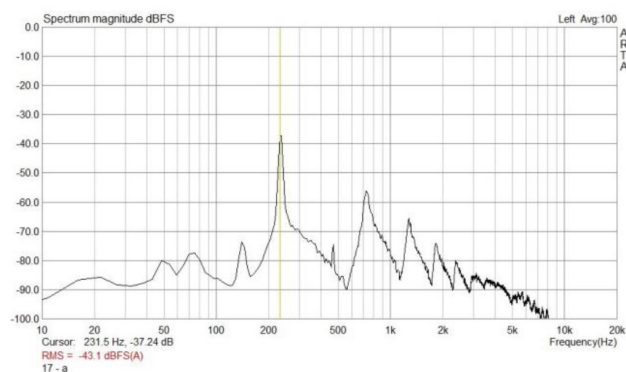
Obrázok 1. Doštička poškodená drevokazným hmyzom (smrek atakovaný črvotočom) a smreková doštička bez poškodenia a bez povrchovej úpravy.

Tabuľka 1. Hodnoty FACH smrekovej doštičky poškodenej drevokazným hmyzom a zdravého smreka.

Doštičky (VIBROVIZER)	$\rho / \text{kg.m}^{-3}$	E_L / GPa	$A / \text{m}^4.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$c_L / \text{m.s}^{-1}$
Smrek atakovaný črvotočom	431	6.86	9.26	3990
Smrek (<i>Picea abies</i> , L.)	487	15.8	11.7	5681

3.2 Meranie frekvenčného spektra zvuku organovej píšťaly

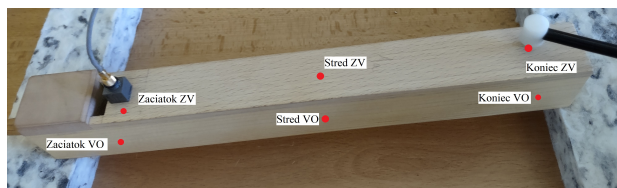
Poškodená drevená uzavretá píšťala drevokazným hmyzom vykazuje vo frekvenčnom spektre síce dominanciu základnej harmonickej zložky, avšak vo výrazne nižšej hladine. Ostatné harmonické zložky zanikajú (Obrázok 2.).



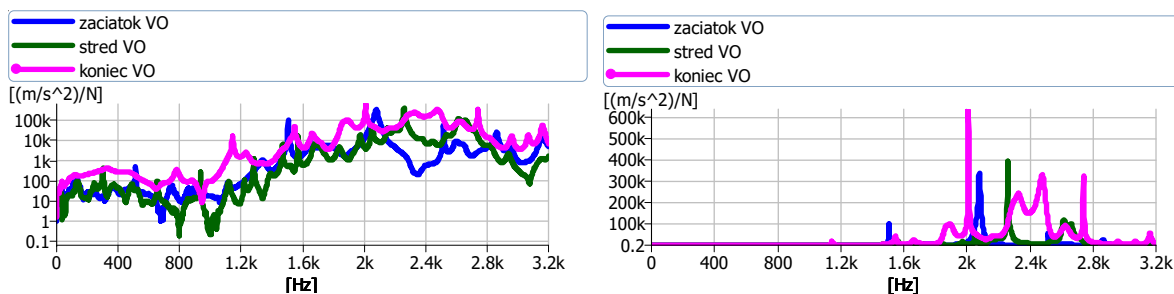
Obrázok 2. Výsledok merania frekvenčného spektra zvuku poškodenej organovej píšťaly.

3.3 Meranie vlastných tvarov kmitania drevenej organovej píšťaly

Na meranie sa použila experimentálna píšťala, ktorá je kópiou dobovej drevenej organovej píšťaly z polovica 19. storočia. Na meranie frekvencií vlastných tvarov bol použitý Akcelerometer B&K 4508-B-002 a kladivko B&K 8204 karta B&K 3053-B-120. Metodika bola postavená na priemerovaní 6 údermi (Obrázok 3.), pričom na výsledky z akcelerometra bolo použité exponenciálne váhové okno a na kladivko tranzientné váhové okno. Výsledky poukazujú na dominantnú oblasť frekvencií vlastných tvarov kmitov v oblasti 2 kHz (Obrázok 4.).



Obrázok 3. Meranie frekvencií vlastných tvarov organovej píšťaly.



Obrázok 4. Výsledok merania vlastných tvarov kmitania drevenej organovej píšťaly.

4 Záver

Na základe nedeštruktívnych metód akustiky sa môžu komplexne hodnotiť jednotlivé časti organovej píšťaly, čím sa významne prispieva k novým poznatkom a následne ochrane tohto vzácneho hmotného hudobného kultúrneho dedičstva. Zároveň je dôležité, aby došlo k prepájaniu jednotlivých metód, čo povedie k interdisciplinárnemu prepojeniu jednotlivých získaných poznatkov.

Pod'akovanie

Príspevok je výstupom grantového projektu VEGA č. 2/0106/19 „Drevený píšťalový fond historických organových pozitívov na Slovensku“. Článok je publikovaný s podporou

Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV APVV-19-0538 “Progresívny hybridný vysokootáčkový spriadací aktuátor”.

Literatúra

[1] Zdroj: <http://mypipeorganhobby.blogspot.com/2009/01/compenius-organ-denmark.html>

[2] Zdroj: <https://www.projektstudio31.com/blog/organi-di-legno>

[3] Zdroj: <https://organy.hc.sk/>

[4] ŠTAFURA, Andrej, Štefan NAGY a Martin ČULÍK. Základné determinanty organologického výskumu historických organov. Drevené organové registre = The Basic Determinants of Organological Research of Historical Pipe Organs. Wooden organ stops. Revúca : Quirinus, 2018. 102 s. ISBN 978-80-972541-1-7.

Summary

Diagnostics of Wooden Organ Pipes by Method of Acoustics. Exact methods of evaluating the properties of wood, but also the sound quality of organ pipes are at the present, as well as towards the future, a necessary and solid part of the organology of musical instruments. Based on non-destructive methods of acoustics, individual parts of the organ pipe can be comprehensively evaluated, which significantly contributes to new knowledge and consequently the protection of this rare material musical cultural heritage. At the same time, it is important that the individual methods are interconnected, which will lead to an interdisciplinary interconnection of the individual acquired knowledge.

Keywords

Wooden pipe; organ; acoustics; wood.

Contact Address

Andrej Štafura

Institute of Materials and Machine Mechanics, Slovak Academy of Sciences

Dúbravská cesta 9/6319, 845 13 Bratislava, Slovak Republic

www.sas.sk, a.stafura@gmail.com, andrej.stafura@savba.sk

Martin Čulík

Department of Wooden Constructions (KDS), Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, Slovak Republic

culik@acoustics.sk, www.acoustics.sk

Štefan Nagy

Institute of Musicology, Slovak Academy of Sciences

Dúbravská cesta 9, 841 04 Bratislava 4, Slovak Republic

www.sas.sk, pitonagy@gmail.com

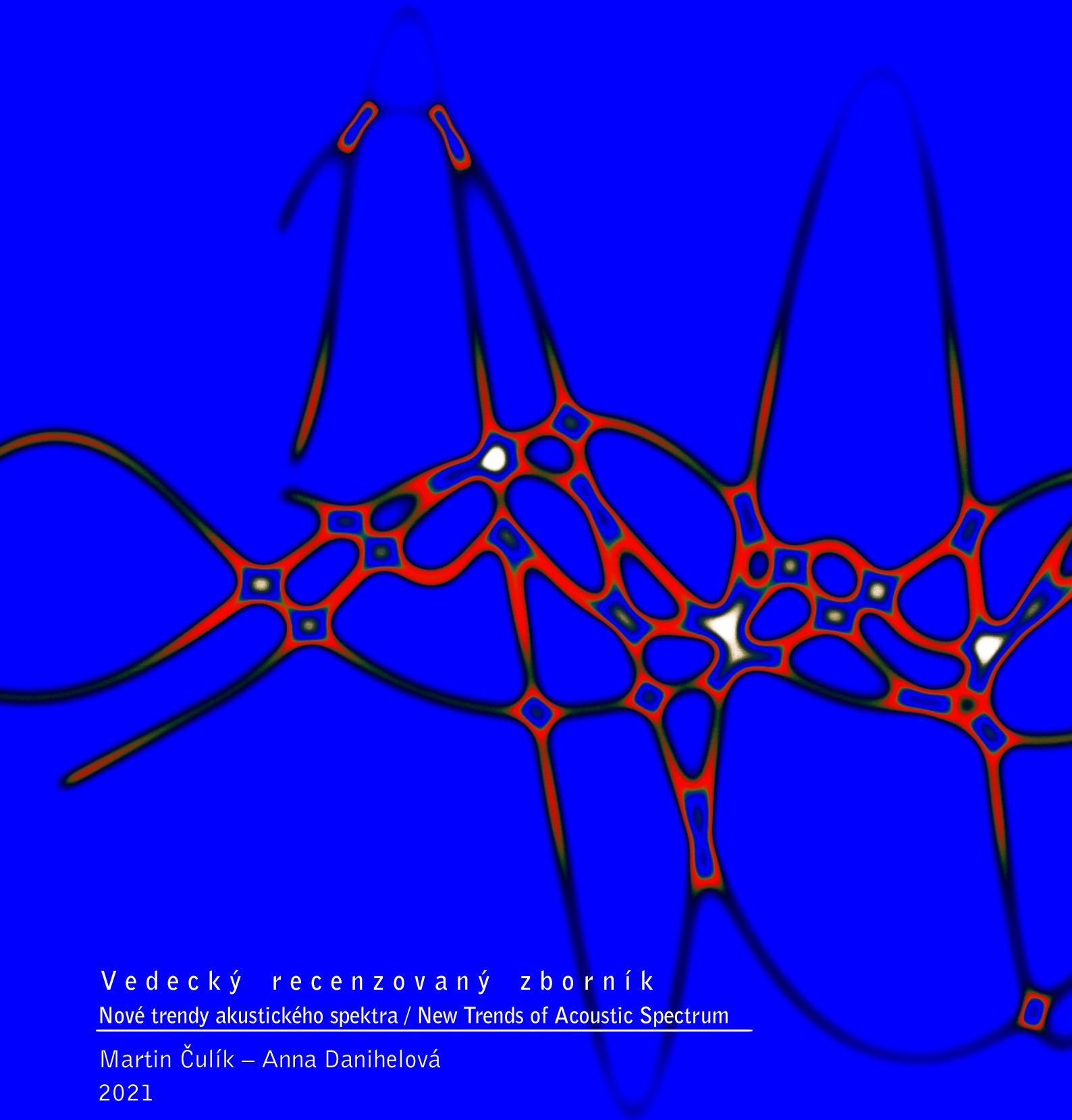
Ondrej Chlebo

Institute of Production Systems, Environmental Engineering and Quality Management

Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava

Nám. slobody 17, 81231 Bratislava, Slovak Republic

ondrej.chlebo@stuba.sk



V e d e c k ý r e c e n z o v a n ý z b o r n í k
Nové trendy akustického spektra / New Trends of Acoustic Spectrum

Martin Čulík – Anna Danihelová
2021

ISBN 978-80-228-3267-0



9 788022 832670