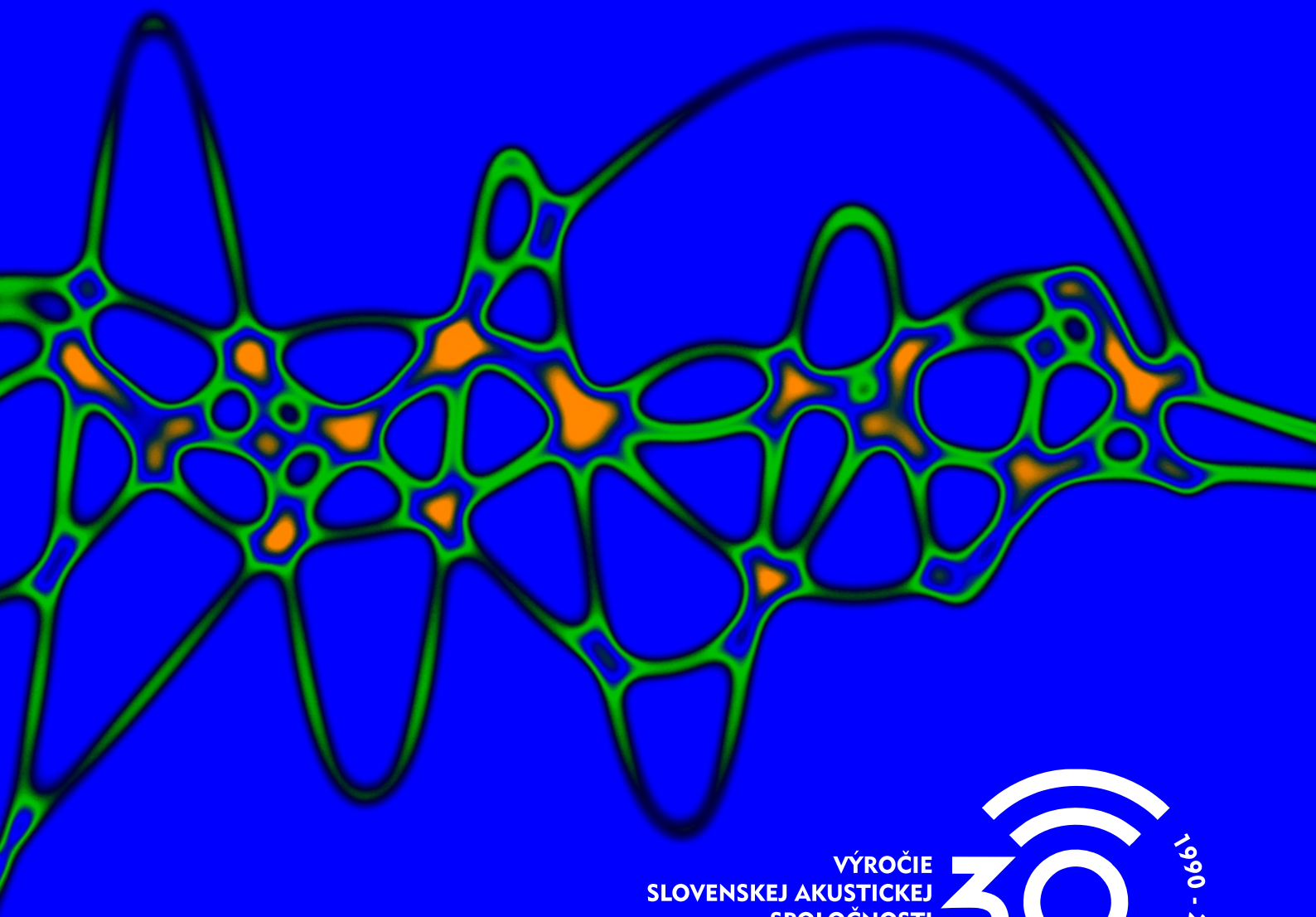


Vedecký recenzovaný zborník  
Peer-reviewed Proceedings

# Nové trendy akustického spektra

## New Trends of Acoustic Spectrum



Martin Čulík – Anna Danihelová

Special 30<sup>th</sup> SKAS Anniversary Issue of Proceedings / 2020

Technická univerzita vo Zvolene  
Drevárska fakulta

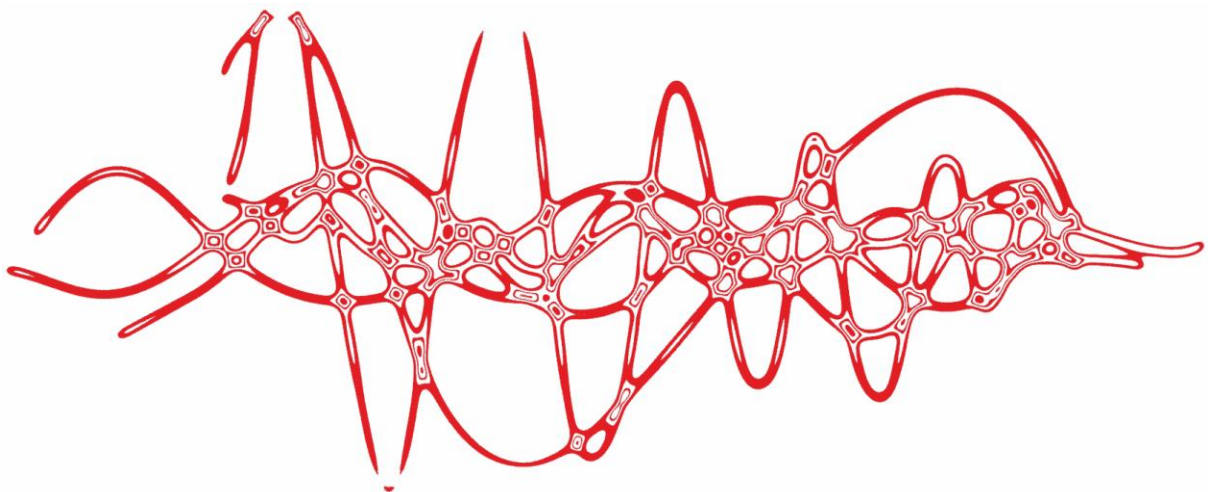
*Editori / Editors:*  
Martin Čulík, Anna Danihelová

## **NOVÉ TRENDY AKUSTICKÉHO SPEKTRA**

*Vedecký recenzovaný zborník*

## **NEW TRENDS OF ACOUSTIC SPECTRUM**

*Peer-reviewed Proceedings*



*Mimoriadne vydanie zborníka pri príležitosti 30. výročia SKAS*

*Special 30<sup>th</sup> SKAS Anniversary Issue of Proceedings*

2020

*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 2020

Počet strán 153, 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. Nižaká časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autora alebo zostavovateľa zborníka.

**ISBN 978-80-228-3224-3**

## OBSAH / CONTENTS

---

Predhovor (Preface)	5
Vznik a poslanie SKAS	6
Fyzikálno-Akustické Charakteristiky Vybraných Druhov Drevín “Figured Wood” Používaných vo Výrobe Moderných Elektrických Gitár <b>Martin Čulík, Anna Danihelová, Henrik Sivčák</b> ( <i>Dominik Spišiak, Peter Kičák</i> )	9
Meranie Nepriezvučnosti Stropných Konštrukcií <b>Richard Drahoš, Milan Drahoš</b> ( <i>Martin Jedovnický, Vojtech Chmelík</i> )	29
Riziká pri Spracovaní Hlukovej Štúdie pre Územné Rozhodnutie <b>Marián Flimel</b> ( <i>Peter Hockicko, Miroslav Němec</i> )	39
Tepelno-Vlhkostné Vlastnosti Difúznej Panelovej Steny s Parobrzdou na Báze Papiera <b>Stanislav Jochim, Patrik Štompf</b> ( <i>Jozef Štefko, Alena Rohanová</i> )	45
Tepelno-Vlhkostné Vlastnosti Difúznej Panelovej Steny s Parobrzdou na Báze Dreva <b>Stanislav Jochim, Patrik Štompf</b> ( <i>Jozef Štefko, Alena Rohanová</i> )	53
Vlhkostné Vlastnosti Difúznych Panelových Stien s Rôznymi Druhmi Parobrdz <b>Stanislav Jochim, Patrik Štompf</b> ( <i>Jozef Štefko, Alena Rohanová</i> )	61
Vplyv Tepelno-technických Vlastností Panelových Stien na Báze Dreva na Mernú Potrebu Tepla na Vykurovanie <b>Patrik Štompf, Stanislav Jochim</b> ( <i>Alena Rohanová, Jozef Štefko</i> )	73
Analýza Energetickej Hospodárnosti Rodinného Domu Panelovej Konštrukcie na Báze Dreva <b>Patrik Štompf, Stanislav Jochim</b> ( <i>Alena Rohanová, Jozef Štefko</i> )	79
Prehľad Separačných Technik pre Hudobné Signály <b>Peter Kasák, Michal Chmulík, Roman Jarina</b> ( <i>Peter Hockicko, Miroslav Němec</i> )	87
Proposal for Reversible Intervention to Historical Monument, by means of Room Acoustic Simulations <b>Magdaléna Kaššáková, Léopold Kritly, Lukáš Zelem, Monika Rychtáriková</b> ( <i>Daniel Urbán, Vojtech Chmelík</i> )	107

Analýza Materiálov Pomocou Vysokofrekvenčných Akustických Meraní <b>Josef Kúdelčík, Peter Hockicko, Štefan Hardoň, Marek Veveričík</b> ( <i>Luboš Krišťák, Miroslav Němec</i> )	115
Možnosti Použití Moderních Technologíí Skenování pro Speciální Výřezy Dřeva <b>Vojtěch Ondrejka, Tomáš Gergel, Tomáš Bucha</b> ( <i>Miloš Gejdoš, Miroslav Dado</i> )	127
Interakcia Rýchlosti Šírenia Zvuku a Hustoty Bukového Konštrukčného Dreva <b>Alena Rohanová</b> ( <i>Jozef Štefko, Stanislav Jochim</i> )	135
Frekvenčné Rozloženie Hluku Cisternových Železničných Vozňov <b>Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš, Juraj Úradníček, Peter Petrák, Ladislav Mačák, Marián Moravčík</b> ( <i>Peter Hockicko, Miroslav Němec</i> )	141

## **PREDHOVOR / PREFACE**

---

Publikovanie pôvodných vedeckých prác zameraním na akustiku a materiálové inžinierstvo pokračuje aj v roku 2020. Vedecký recenzovaný zborník „Nové trendy akustického spektra“ je už ôsmy 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 2020. Scientific peer-review proceedings "New Trends of Acoustic Spectrum" is the eighth in this series.

The proceedings of genuine scientific papers present 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*

## VZNIK A POSLANIE SKAS

---

Slovenská akustická spoločnosť, ako dobrovoľné neziskového združenie odborníkov v akustike (vibroakustike) bola založená podľa zákona č. 83/1990 Zb. a na MV SR bola registrovaná pod č. spisu VVS/1-900/90-3771 dňa 15.04.1991.

Uznesením Predsedníctva SAV č. 191 dňa 29.11.1990, bola spoločnosť pridružená do štruktúry vedecko-technických (neziskových) spoločnosti SAV. Od tohto dátumu sa dá oficiálne deklarovať činnosť spoločnosti pri SAV.

Dňa 24.04.1993 bola na MV SR vzatá na vedomie zmena názvu spoločnosti na „**Slovenská akustická spoločnosť pri SAV**“ (skratka **SKAS**) vrátane zmeny stanov SKAS. Dodatkom č. 1 k stanovám zo dňa 12.02.2004 sa zmenilo len sídlo spoločnosti – Bratislava (bez adresy) na Dúbravská cesta 9, 845 07 Bratislava.

Dňa 15.01.2013 boli Valným zhromaždením členov schválené nové stanovy SKAS a zaregistrované na MV SR dňa 22.3.2013 pod č. spisu VVS/1-900/90-3771-3.

SKAS je dlhoročným členom European Acoustics Association (EAA) a International Institute of Noise Control Engineering (I-INCE), je taktiež riadnym členom International Commission for Acoustics (ICA).

Činnosť v SKAS koordinuje v širšom zložení Rada spoločnosti a v užšom zložení Predsedníctvo rady. Odborná činnosť spoločnosti je koordinovaná odbornými sekciami, ktoré po schválení Valným zhromaždením v roku 2013 sú ustanovené takto:

- Urbanistická akustika
- Stavebná a priestorová akustika
- Fyzikálna akustika
- Akustika hudobných nástrojov
- Technika merania hluku a vibrácií v prostredí
- Technika znižovania hluku a kmitania.

Prípadné rozšírenie odborných sekcií schvaľuje Valné zhromaždenie na základe návrhu Rady spoločnosti.

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.

Od roku 1993 spoločnosť v súčinnosti s STU SF Bratislava odborne garantuje akustický seminár „Hluk a vibrácie v technickej praxi“, ktorý od roku 1995 sa organizuje ako medzinárodný akustický seminár v školiacom stredisku Stavebnej fakulty STU Bratislava v Kočovciach pod názvom „Hluk a kmitanie v praxi“.

Spoločnosť v roku 1995 zorganizovala 30. medzinárodnú akustickú konferenciu a v roku 2006 v súčinnosti s European Acoustics Association a Ústavom informatiky SAV sa zorganizovala 33. medzinárodná akustická konferencia – EAA Symposium vo Vysokých Tatrách – Štrbské pleso. V roku 2009 v súčinnosti s TU Zvolen sa zorganizovala 34. medzinárodná akustická konferencia ACOUSTICS vo Vysokých Tatrách – Starý Smokovec.

V roku 2010 a 2011 Strojnícka fakulta TU v Košiciach, Katedra environmentalistiky v súčinnosti so SKAS zorganizovala odborný seminár Ochrana životného prostredia pred hlukom. V roku 2012 sa odborný seminár začlenil do konferencie Hodnotenie kvality prostredia 2012.

Od roku 2005 spoločnosť každoročne spoluorganizuje na Drevárskej fakulte Technickej univerzity vo Zvolene medzinárodnú konferenciu „Material – Acoustics – Place“.

V roku 2019 spoločnosť ako hlavný organizátor usporiadala medzinárodnú konferenciu „ACOUSTICS 2019 High Tatras“ na Štrbskom Plese vo Vysokých Tatrách ako spojenú konferenciu MAP, Zvolen (SK) a ATF, Leuven (BE).

Členovia spoločnosti z prostredia technických univerzít za obdobie činnosti spoločnosti vydali celý rad vedeckých publikácií, odbornej literatúry a vysokoškolských skript. Členovia spoločnosti z odbornej praxe publikovali celý rad odborných článkov zameraných na techniku merania a znižovanie hluku a kmitania v životnom a pracovnom prostredí a vplyvu hluku a kmitania na verejné zdravie.

Okrem organizovania odborných podujatí a publikačnej činnosti, cieľom spoločnosti je pokračovanie spolupráce:

- a) s Úradom pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR a Slovenským ústavom technickej normalizácie pri tvorbe a preberaní noriem v odbore akustiky a mechanického kmitania,
- b) so Slovenskou národnou akreditačnou službou pri zabezpečovaní procesov manažérstva kvality v oblasti technických meraní hluku a kmitania ako aj meraní hluku a vibrácií na účely posúdenia ich možného vplyvu na verejné zdravie,
- c) s technicky zameranými univerzitami, vysokými školami a výskumnými ústavmi, ktoré sú významnými pracoviskami vedecko-technického rozvoja pri propagácii vedy a výsledkov aplikovaného výskumu interdisciplinárneho odboru akustika,
- d) a nadviazanie spolupráce s ministerstvami a ostatnými ústrednými orgánmi štátnej správy, orgánmi verejného zdravotníctva pri tvorbe legislatívy na ochranu životného prostredia a na ochranu verejného zdravia pred hlukom a vibráciami.

Medzi ciele spoločnosti patrí aj poskytovanie poradenstva orgánom štátnej správy a samosprávy pri ochrane životného a pracovného prostredia vrátane ochrany verejného zdravia pred hlukom a vibráciami.

Poslaním vydávania Spravodajcu je priebežne informovať členov spoločnosti o aktivitách Rady pri plnení plánov činnosti, o organizovaní medzinárodných a národných podujatí, vrátane rozširovania poznatkov získaných na poli výskumu a aplikačnej praxe v jednotlivých odboroch akustiky.

Plnenie uvedených cieľov spoločnosti vyžaduje aktívnu činnosť členov spoločnosti v odborných sekciách a ekonomickú podporu zo strany SAV, Technických univerzít a podnikateľských subjektov aktívnych v interdisciplinárnom odbore akustiky.





**Slovenská akustická spoločnosť pri SAV**

**Slovak Acoustical Society (SKAS)**

[www.skas.sk](http://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 SLOVENSKEJ  
VEDECKOTECHNICKÝCH  
SPOLOČNOSTÍ**

# FYZIKÁLNO-AKUSTICKÉ CHARAKTERISTIKY VYBRANÝCH DRUHOV DREVÍN „FIGURED WOOD“ POUŽÍVANÝCH VO VÝROBE MODERNÝCH ELEKTRICKÝCH GITÁR

Martin Čulík, Anna Danihelová, Henrik Sivčák

## 1 Úvod

Elektrická gitara, akustická gitara a basová gitara patria medzi najpoužívanejšie a veľmi populárne hudobné nástroje v súčasnej dobe. Elektrická gitara navyše dokáže s pomocou pridaných efektov skrášliť zvukové tóny na zvuk, ktorý požaduje samotný hudobník. Preto sa gitary využívajú takmer vo všetkých žánroch hudby. Základným konštrukčným materiálom skoro každej gitary je drevo, ktoré sa stáva pre svoj krásny prírodný vzhľad, fyzikálno-akustické a mechanické vlastnosti najpoužívanejším materiálom pri výrobe týchto hudobných nástrojov.

Na základný výskum fyzikálno-akustických vlastností dreva sa použili vybrané druhy drevín, ktoré sú štandardne vyhľadávané a najčastejšie používané vo výrobe kvalitných elektrických gitár. Dreviny so špeciálnou kresbou dreva sú vo svete vyhľadávané pod pojmom „Figured wood“. Každá z takýchto drevín s unikátnou kresbou má aj svoj originálny názov, ktorý je v angličtine známy a používaný pri obchode s týmito drevinami. V slovenčine sa tieto pojmy musia ešte ustáliť.

## 2 „Figured wood“ – Zvláštnosti textúry dreva

Experimentálne telesá v tvare doštičiek dreva „Figured wood“ boli poskytnuté slovenskou firmou SIVCAK Guitars, ktorá už viac ako 25 rokov vyrába elektrické gitary a basgitary. Taktiež obchoduje s drevom a súčiastkami pre gitary všetkých druhov. Počas svojho vývoja firma získavala viaceré kontakty na dodávateľov z rôznych krajín sveta a tým mala možnosť poskytnúť cenné doštičky vzácného dreva v najväčšom možnom počte. Na experimentálny výskum vlastností dreva boli použité vybrané prezentačne viaceré vzácne druhy európskych a exotických drevín.

### 2.1 Zvláštnosti textúry dreva – charakteristika

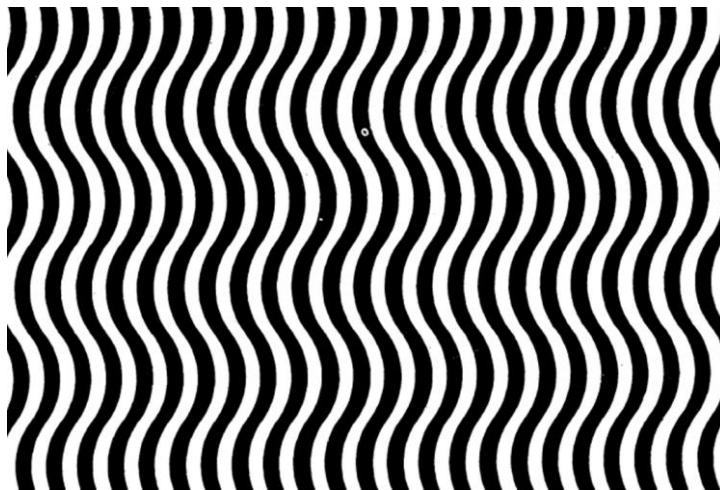
Vplyvom nepriaznivých podmienok rastu stromu sa v dreve môžu vytvárať určité javy, ktoré zapríčiňujú tvorenie nehomogénnej štruktúry dreva, čo sa v niektorých prípadoch považuje za jeho anomáliu. Avšak takéto drevo, vhodným jeho spracovaním, vytvára na povrchu veľmi krásnu a estetickú kresbu. Toto drevo vytvára veľmi dekoratívny materiál, ktorý je žiadaný vo viacerých odvetviach drevospracujúceho priemyslu a naberá čoraz viac na popularite.

Pri výrobe gitár sa najčastejšie využívajú nasledujúce kresby dreva (THE GUILD OF VERMONT FURNITURE MAKERS, 2020; THE WOOD DATABASE, 2020):

- **Vlnitosť**

Tzv. kučeravé vlákna sa vyskytujú, keď pozdĺžne drevné bunky rastú vo vlnách. Toto sa vyskytuje u mnohých druhov drevín, ale obzvlášť sú pozoruhodne znateľné u javora. Ak strom rastie rovno, výsledné vlákna budú rovné a konzistentné. Niektoré stromy však rastú na miestach alebo v podmienkach, ktoré spôsobujú, že výsledný rast vlákien nie je rovný. Extrémnym príkladom je kučeravý (vlnitý) javor (Obrázok 2.). Vo vlnitom javore sú vlákna zvlnené po celej dĺžke dosky. Výsledkom je, že v dreve sú zvlnené vlákna, ktoré vytvárajú

veľmi peknú estetickú vlnitú štruktúru. Vďaka okrajom bunkových stien, ktoré absorbujú svetlo odlišne od stredných častí bunkovej steny, kučeravá postava môže tiež vytvárať tzv. „chatoyanciu“ (Obrázok 1.). Chatoyancy je efekt, ktorý sa nachádza tiež v niektorých druhoch drahokamov a vytvára optickú ilúziu.



Obrázok 1. Chatoyancy efekt (THE GUILD OF VERMONT FURNITURE MAKERS, 2020).

Drevo s vlnitou kresbou má široké uplatnenie vo výrobe gitár. Pri rozmerovo veľkých formátoch dosiek sa drevo využíva na výrobu vrchných dosiek elektrických gitár. Pri dlhých formátoch sa materiál využíva na výrobu krkov gitary, avšak musí byť dodržaná základná podmienka, a to že materiál javorového dreva musí byť tvrdý a jeho hustota musí byť vyššia. Táto podmienka sa musí dodržať v dôsledku veľkého mechanického namáhania krku pri napnutých strunách. Najmenšie formáty tohto materiálu sú využívané pre výrobu hmatníkových dosiek alebo na výrobu krytov a pickguardov.



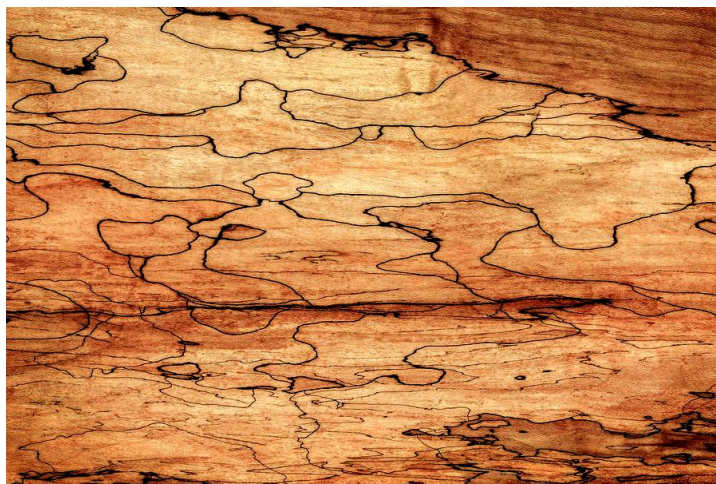
Obrázok 2. Vlnitá kresba javora (ROYAL CRAFT GUITARS, 2018).

- **„Spalted“ (sfarbené, vzorované) drevo**

„Spalting“ je začiatková fáza hniloby. Sfarbovanie a vzorovanie dreva je spôsobené hubami. Huba sa šíri cez vlákna dreva, ale skôr ako ovplyvní štruktúrnú integritu dreva, sa drevo vysuší v sušiarňach a tým sa zahubí huba, ktorá je zakorenená v štruktúre dreva. „Spalted“ drevo môže vyzeráť ako abstraktný atramentový nákras tenkých čiernych čiar alebo môže zahŕňať aj oblasti dreva, ktoré zmenili farbu na svetlú alebo tmavošedú, bledo oranžovú a iné

pohľadné farby (Obrázok 3.). Čiary predstavujú zónu, kde sa stretli dva rôzne druhy húb, pričom každý druh zanechal svoju vlastnú zreteľnú farbu. Spaltové dosky môžu vyzeráť naozaj veľkolepo, keď sú zladené a uložené do tzv. „knihy“. Je to proces pílenia dosiek a ich spárovania, ktoré vedie k vláknam, ktoré sa zrkadlia od jedného k druhému plátu dosky.

Spaltové drevo sa kvôli svojim zníženým pevnostným vlastnostiam využíva na výrobu vrchných dosiek elektrických gitár a basgitár, kde pre svoju nádhernú kresbu vytvára vysoko dekoratívny vzhľad tela gitary.



Obrázok 3. Spalted kresba (FINEARTAMERICA, 2020).

- **„Quilted“ (textúra podobná patchworku) drevo**

Táto kresba je výsledkom podobného zvlnenia vlákien, ktoré sa vyskytujú aj vo vlnitej kresbe dreva. V závislosti od rezu dreva sa dajú vidieť buď zvlnené vlákna s chatoyanciou, ktorá vyzerá ako „pokrčený hodváb“ alebo kruhový vzor, ktorý sa môže v závislosti od osvetlenia javiť ako pľuzgiere alebo podobné vrúbky (Obrázok 4.). Quiltové drevo má špecifickú a estetickú kresbu, preto sa využíva vo výrobe gitár na vrchné dosky, ktoré sú po ich namorení vizuálne veľmi výrazné. Napríklad po namorení na modro, vrchná doska veľmi pripomína vlny vody v oceáne. Taktiež sa „quilted“ používa na hmatníkové dosky, kryty a pickquardy.

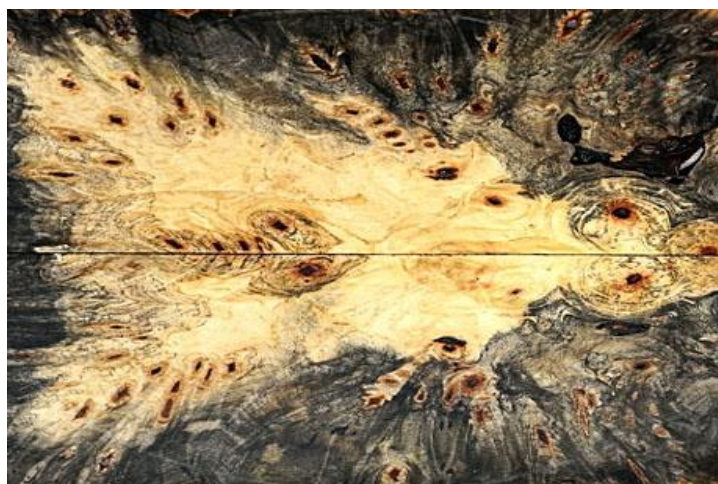


Obrázok 4. Quilted kresba (READ VENEERS, 2015).

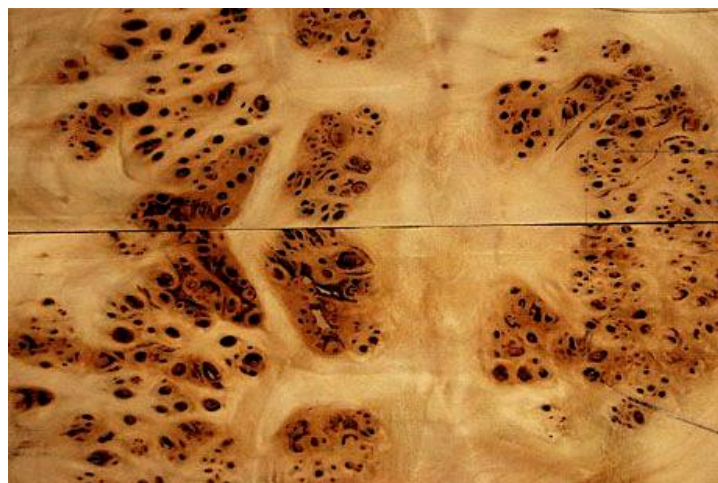
- **„Burl“ (mozoľovité) drevo**

Burl predstavuje deformitu, ktorá sa dá nájsť kdekoľvek na strome vrátane koreňov. Vo vnútri sa nepredvídateľne rastúce drevo krúti a otáča. Mozoľovité drevo sa formuje na poranenom alebo prerezanom povrchu pri hojení poškodenia. Drevo s kresbou „burl“ je známe, že je veľmi zložitá štruktúra vlákien, ale hlavne je známe svojou krásou a jedinečnosťou v každom kuse (Obrázok 5. a 6.).

Drevo s burl kresbou sa najčastejšie využíva na vrchné dosky elektrických gitár a basgitár. Do Burl sekcie patrí aj meraná vzorka Buckeye burl, vďaka ktorej má gitara nádherný a luxusný vzhľad. Takáto gitara sa väčšinou predáva za vysoké ceny, pretože Buckeye burl patrí medzi najdrahšie drevné materiály.



Obrázok 5. Buckeye burl kresba (ROYAL CRAFT GUITARS, 2018).



Obrázok 6. Burl kresba (ROYAL CRAFT GUITARS, 2018).

- **„Birdseye“ (s očkovou textúrou) drevo**

Názov je vytvorený vďaka drobným hrčiam v dreve, ktoré pripomínajú malé vtáčie oči a sú spôsobené malými jamkami vo vrstvách buniek (Obrázok 7.). Predpokladá sa, že sú spôsobené plesňou, ktorá ovplyvňuje rast pozdĺžnych buniek alebo nepriaznivými podmienkami pestovania pri raste stromu. Strom sa pokúša vypúšťať množstvo nových púčikov, aby získal viac slnečného svetla, ktorý sa následne snaží pri zlých podmienkach

pestovania vypustiť nové výhonky, ktoré sa prerušia a potom zostane v dreve niekoľko drobných uzlov.

Očková kresba sa najviac objavuje na Kanadskom tvrdom javore, ktorý sa najčastejšie používa na výrobu krkov strunových hudobných nástrojov. Javor s očkovou kresbou ponúka všetky dôležité vlastnosti na výrobu krkov gitár, obohatené o vysoko dekoratívnu kresbu v podobe očiek. Ďalej sa drevo využíva na hmatníkové dosky na krkoch. Vrchné dosky z očkového javora sú taktiež veľmi príťažlivé a žiadané. Drevo sa využíva aj pri výrobe akustickej gitary ako zadná časť rezonančnej skrinky.

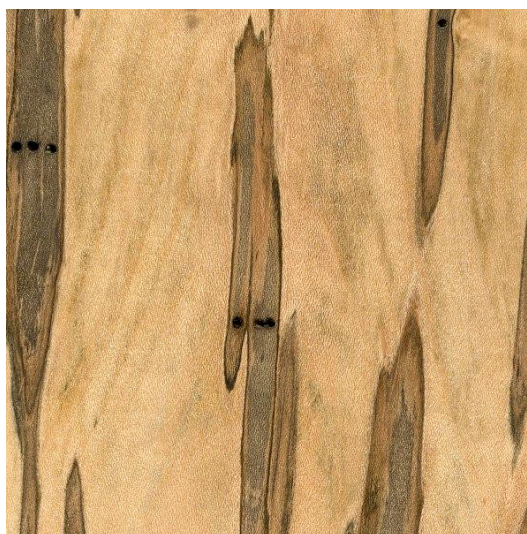


Obrázok 7. Očková kresba (ROYAL CRAFT GUITARS, 2018).

- **"Ambrosia" (s farebnými pruhmi podlhovastého tvaru) drevo**

Kresba Ambrosia pochádza z napadnutia chrobáka ambrosie, ktorý zanecháva vstupnú a výstupnú dieru v čiernom pruhu dreva. Huba Ambrosia spolupracuje s útokmi chrobákov a v beľovom dreve zanechávajú tmavé škvrny pri vstupných a výstupných otvoroch (Obrázok 8.).

Drevo s kresbou Ambrosia sa vo výrobe hudobných nástrojov používa vďaka svojej výnimočnej a vysoko dekoratívnej kresbe. Najčastejšie sa toto drevo používa na výrobu vrchných dosiek elektrických gitár a basgitár. Drevo sa tiež využíva na veľmi pekné pickquardy.



Obrázok 8. Ambrosia kresba (THE WOOD DATABASE, 2020).

- **"Bear Claw" (textúra medvedia stopa) drevo**

Medvedia stopa sa objavuje na smrekových doskách. Táto kresba je vyhľadávané výrobcami najmä akustických gitár pre svoju estetiku a vizuálnu vzácnosť u smrekového dreva. Názov sa vytvoril zo špeciálneho vzoru vlákna, ktorý nejasne pripomína škrabance od medvedích pazúrov (Obrázok 9.). Takéto akustické smrekové dosky sú vysoko oceňované. U nás je drevo smreka s takouto štruktúrou vlákien vyhľadávané pod pojmom „lieskovcové drevo“.

Smrekové akustické dosky s kresbou „medvedia stopa“, sa výlučne používajú na výrobu rezonančnej vrchnej dosky akustických gitár.



Obrázok 9. Medvedia stopa kresba (ALIBABA, 2020).

## 2.2 Základné typy porezov Figured wood

Porez dreva je dôležitá technologická operácia prvostupňového spracovania dreva a výber vhodnej schémy porezu je základná podstata využitia materiálu pri dosiahnutí čo najvyššej výťažnosti dreva z celého spracovávaného výrezu.

Vo svete sú známe viaceré schémy porezov dreva a najzákladnejšie, ktoré sa využívajú aj na pozdĺžne delenie výrezov pri spracovaní reziva „Figured wood“ sú nasledovné, ich stručná charakteristika (THE GUILD OF VERMONT FURNITURE MAKERS, 2020):

- **Porez na ostro**

Princíp tohto porezu spočíva v tom, že jedným prechodom hlavným strojom sa rozdelí výrez na rezivo požadovaných hrúbok. Použitie porezu na ostro pri tvrdých drevinách vedie k zaobleniu vlákien reziva, pretože rez prechádza pod uhlom proti ročným kruhom. Rôzne časti dreva sa tak nerovnomerne sušia či napučia. Predpoklad je, že tvarovo najstabilnejšie kusy dreva pochádzajú z rezu kolmého na ročné kruhy dreva, kedy sú drevné vlákna na rezive čo najrovnomernejšie. Výsledkom je, že väčšina listnatého reziva s porezom na ostro je náchyľnejšia na deformácie. Avšak porez na ostro je najbežnejší a najrýchlejší spôsob rezania výrezov z guľatiny a jej výsledkom je najmenšie množstvo odpadu.

- **Rift perez**

Riftový perez znamená, že každá doska je rezaná kolmo na ročné kruhy. To zvyčajne vytvára najpriamejšie (rovnobežné) vlákna na každej doske. V dôsledku toho sú tieto kusy obvykle v procese pracovania dreva tvarovo najstabilnejšie. Môžu odolávať deformácii a šúvereniu sa, viac ako pri tangenciálnych rezoch. Riftový perez je však veľmi vzácny druh perez, pretože vedie k množstvu premrhaného odpadového dreva a tým sa znižuje jeho výťažnosť.

- **Štvrťkový perez**

Tento spôsob perez sa blíži k teoretickému rezaniu v smere radiálnom a dáva maximálny počet radiálneho reziva. Niektoré zo stredných rezov dreva budú kolmé na vlákna ako pri rezaní pri riftovom perez, ale keď sa dosky nachádzajú viac od stredu výrezu, vlákna sa postupne zošikmujú. Táto metóda poskytuje dobrú kombináciu účinnosti, rýchlosti a kvalitného dreva s dobrou orientáciou vlákien. Vyžaduje si špeciálne upínacie zariadenie pri konečnom spracovaní na prírezy, keďže na konci vznikajú straty.

### 2.3 Ukážka hotových el. basgitár s využitím vzácneho dreva Figured wood

Vrchné dosky z dreva Figured wood môžu pri správnom spracovaní vytvárať dominantný vzhľad gitary, ktorý zaujme zákazníka natoľko, že začne mať o nástroj záujem. Na Obrázkoch 10. – 12. sú znázornené hotové nástroje s použitím spomenutých drev s nezvyčajnou kresbou.



Obrázok 10. Ukážka elektrickej basgitary s Buckeye burl vrchnou doskou (SIVCAK GUITARS, 2020).



Obrázok 11. Ukážka elektrickej basgitary s vlnitou vrchnou doskou (SIVCAK GUITARS, 2020).





Obrázok 12. Ukážka elektrickej basgitary s spaltovou vrchnou doskou (SIVCAK GUITARS, 2020).

### 3 Metodika experimentu

Pri experimentálnom meraní špeciálne vybraného vzácneho dreva na výrobu elektrických gitár sa použila aparátúra, ktorá je súčasťou vybavenia Pracoviska fyzikálnej a hudobnej akustiky na DF TU vo Zvolene:

- VIBROVIZER – nedeštruktívna metóda akustiky merania fyzikálno-akustických charakteristík materiálu pomocou vizualizácie Chladniho obrazcov.

#### 3.1 Metóda modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov – meracia aparátúra VIBROVIZER

Zviditeľnenie módov v doskách s dostatočne malou hrúbkou vzhľadom k celkovým rozmerom a tuhosti materiálu je možné uskutočniť metódou Chladniho obrazcov. Pomocou tejto nedeštruktívnej metódy akustiky je možné zisťovať elastické vlastnosti dreva priemerne z viac skúšobných telies alebo lokálne na tvare dosky takých rozmerov, aké sú potrebné pre výrobu hudobného nástroja. Sledovanie šírenia stacionárnych akustických vln v drevených doskách a zisťovanie rezonančných frekvencií jednotlivých módov kmitania umožňuje meracie zariadenie VIBROVIZER. Ide o optoelektronické zariadenie, ktoré bolo zostavené za účelom zviditeľňovania akustických ohybových vln najmä v doskách. Metóda Chladniho obrazcov umožňuje na základe známej hustoty  $\rho$ , zistených rezonančných frekvencií základných módov dosiek alebo klinov, vypočítať hodnoty relevantných a doplnkových charakteristík.

Na výpočet modulu pružnosti pri metóde Chladniho obrazcov sa používajú empiricky overené vzťahy. V prípade 4. módu (2,0) pri použití modálnej analýzy s harmonickým budením na skúšobných telesách tvaru *pravouhlých radiálne rezaných tenkých dosiek* sa modul pružnosti pozdĺž vlákien dreva –  $E_L$  (6) vypočíta pomocou nasledovných vzťahov:

$$D_1 \approx 0,0789 \frac{f_4^2 \rho a^4}{h^2} \quad (1)$$

$$E_L = D_1 \times 12\eta \quad (2)$$

kde  $f_2$  a  $f_4$  sú vlastné rezonančné frekvencie 2. a 4. módu v Hz,  $a$  je dĺžkový rozmer,  $b$  je šírkový rozmer dosky a  $h$  je hrúbka dosky v metroch (MCINTYRE, WOODHOUSE, 1984),  $\eta = 1 - \mu_{LR} \times \mu_{RL}$  a  $\mu_{LR}$ ,  $\mu_{RL}$  sú Poissonove čísla (-) charakterizujúce priečnu pomernú deformáciu.

Merací systém je znázornený na Obrázku 13. Meracia aparatúra je zložená z tónového generátora, ako zdroja harmonického signálu a zosilňovača, ktorý zosilňuje signál idúci do reproduktora. Na generátor umožňuje plynule meniť budiacu frekvenciu, pokiaľ sa na doske posypanej práškom neobjaví tvar príslušného módu. Výsledný tvar obrazcov závisí od symetrie dosky, orientácie vlákien dreva, od jej celkovej homogénosti a rozmerov. Symetrické dosky prevažne ukazujú symetrické rozloženie uzlových čiar (symetrické Chladniho obrazce). Nehomogénna štruktúra dosky, existujúce napätia v doske ako aj určitý pomer strán, vysoká tuhosť materiálu, môže spôsobiť vytvorenie nesymetrických obrazov, poprípade nevytvorenie obrazca, teda nenájdenie príslušného módu. Na vytvorenie požadovaného módu kmitania jednotlivých dosiek je potrebné nastaviť vhodnú hladinu akustického tlaku budenej frekvencie, tak aby Chladniho obrazec vynikol, ale zároveň aby nedošlo k jeho prebudeniu.



Obrázok 13. Bloková schéma a snímka aparatúry na meranie Chladniho obrazcov – VIBROVIZER.

### 3.2 Relevantné fyzikálno-akustické charakteristiky (FACH)

Medzi relevantné fyzikálno-akustické charakteristiky pri posudzovaní vlastností a kvality dreva na hudobné nástroje metódami akustiky sú okrem hustoty  $\rho$  (3) aj modul pružnosti  $E_L$  vypočítaný podľa vzťahov (1) – (2), akustická konštanta  $A$  (4), rýchlosť šírenia zvuku  $c$  (5) a poprípade akustická impedancia  $Z$  (6).

- **Hustota dreva**

Hustota dreva  $\rho_w$  v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  udáva hmotnosť jednotkového objemu dreva pri určitej vlhkosti. Vypočíta sa z podielu hmotnosti  $m_w$  v kg a objemu dreva  $V_w$  v  $\text{m}^3$ , pričom hmotnosť aj objem dreva je pri tej istej vlhkosti  $w$ . Počíta sa podľa nasledovného vzťahu (POŽGAJ A KOL. 1997):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (3)$$

- **Akustická konštanta (Koefficient vyžarovania)**

Akustická konštanta je ukazovateľom rezonančnej schopnosti dreva. Aby sa odovzdalo efektívne čo najviac akustickej energie do prostredia, musia byť straty na vnútornom trení čo najmenšie a koeficient vyžarovania čo najväčší. Na základe hustoty materiálu  $\rho$  v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a známeho modulu pružnosti  $E$  v Pa, vypočítaného podľa vzťahu (6) alebo (10) možno následne vypočítať akustickú konstantu  $A$  v  $\text{m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  podľa vzťahu:

$$A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} = \frac{c}{\rho} \quad (4)$$

kde  $c$  je rýchlosť šírenia sa zvuku v skúmanom materiáli (dreve) v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

- **Rýchlosť šírenia zvuku**

Rýchlosť šírenia zvuku v dreve závisí od smeru šírenia ( $c_L$  – rýchlosť šírenia zvuku pozdĺž vlákien dreva) a od okamžitých podmienok – tlaku, teploty a vlhkosti prostredia. Rýchlosť šírenia sa zvuku v dreve  $c$  v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  sa vypočíta pri známom module pružnosti v danom anatomickom smere dreva  $E$  v Pa a hustoty dreva  $\rho$  v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  podľa vzťahu:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

- **Akustický vlnový odpor (Akustická impedancia)**

Odpor proti rovinnej zvukovej vlne sa nazýva akustickým vlnovým odporom a môže sa vypočítať so súčinu hustoty dreva a rýchlosti šírenia zvukových vln podľa vzťahu (POŽGAJ A KOL. 1997):

$$Z = c \cdot \rho = \sqrt{E \cdot \rho} \quad (6)$$

Jednotkou  $Z$  je  $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot 10^{-5}$ .

### 3.3 Skúšobné telesá

Na prípravu skúšobných telies pri meraní nedeštruktívnou metódou akustiky bolo použité drevo z porezu na štvrtky (v prípade akustických dosák a krkov gitary) a z porezu na ostro (pri získaní tangenciálnych fošní na telo a vrchných dosiek tela gitary so vzácnou kresbou dreva). Po vysušení dreva je snaha získať požadovaný formát s patričnou nadmieranou na opracovanie pomocou zrovnávacej frézy, pásovej alebo kotúčovej píly. Tento spôsob je známy pri príprave materiálu pre nábytok, ale aj pre strunové hudobné nástroje. Z vybraných dosiek a fošní sa zhotovili aj skúšobné telesá v tvare pravouhlej tenkej doštičky s požadovanými rozmermi, ktoré sú podmienkou na meranie metódou vizualizácie Chladniho obrazcov. Prakticky sa pre svoju vzácnosť takto získané doštičky s kresbou dreva „Figured wood“ môžu využiť na vrchné dyhy pre hlavy krkov elektrických gitár a basgitár.

Drevo, ktoré bude použité na výrobu hudobného nástroja, resp. na experimentálne účely, musí byť prirodzene sušené po dobu minimálne 2 – 3 rokov. Avšak exotické a špeciálne dreva majú špecifické podmienky na sušenie, ktoré sa realizujú v sušiarňach s danými režimami sušenia. Všetky druhy drevín, ktoré boli poskytnuté firmou Sivcak Guitars boli zakúpené od viacerých dodávateľov z celého sveta, garantujú vysušený materiál na požadovanú vlhkosť.

Skúmané boli vybrané druhy drevín, s ich zaužívaným pomenovaním, často používané pri výrobe jednotlivých konštrukčných častí elektrickej gitary: Smrek obyčajný (*Picea abies*); Bahenný jaseň (*Fraxinus spp.*); Jelša lepkavá (*Alnus glutinosa*); Jelša americká (*Alnus rubra*); Smrek sitka (*Picea sitchensis*); Javor kanadský (*Acer saccharum* Marsh); Jaseň štíhly (*Fraxinus excelsior*); Purpleheart (*Peltogyne pubescens*); Santos Rosewood (*Machaerium scleroxylon*); Cocobolo (*Dalbergia retusa*); Vlnitý javor (*Acer saccharum* Marsh); Javor horský (*Acer Pseudoplatanus* L.); Birdseye (očkový) javor (*Acer saccharum* Marsh); Javor Ambrosia (*Acer spp.*); Mahagón Sapeli (*Entandrophragma cylindricum*); Žlté Meranti (*Shorea spp.*); Čierny orech (*Juglans nigra*); Madagaskarský palisander (*Dalbergia baronii*); Čierna limba (*Terminalia superba*); Africký eben (*Diospyros crassiflora*); Wenge (*Millettia laurentii*); Ovangol (*Guibourtia ehie*); Teak (*Tectona grandis*); Čierny topol (*Populus nigra*); Bubinga (*Guibourtia demeusii*); Pagaštan (*Aesculus flava*) Buckeye Burl; Kompozit.

Priemerná vlhkosť skúšobných telies v tvare pravouhlých tenkých dosák použitých v experimente bola nameraná v hodnote  $w_a = (8 \pm 1) \%$ .

Na Obrázkoch 14. až 16. sú znázornené fotografické záznamy ukážok zaznamenaného základného módu (2,0) vybraných skúšobných telies tvaru tenkej pravouhlej dosky.



Obrázok 14. Santos : Radiálny rez – mód (2,0),  $f_4 = 439$  Hz.



Obrázok 15. Cocobolo : Tangenciálny rez – mód (2,0),  $f_4 = 557$  Hz.



Obrázok 16. Kompozit z viacero drevín : Tangenciálno-radiálny rez – mód (2,0),  $f_4 = 405$  Hz.

#### 4 Výsledky merania a diskusia

Metódou modálnej analýzy pri harmonickom budení s využitím Chladniho obrazcov boli namerané rezonančné frekvencie základného módu (2,0) kmitania tenkých pravouhlých dosiek skúmaného materiálu a následne vypočítané hodnoty relevantných fyzikálno-akustických charakteristík.

V Tabuľke 1. sú uvedené hodnoty lokálnych FACH dreva pre európske a exotické dreviny, ktoré mali čisto radiálny rez. V Tabuľke 2. sú hodnoty FACH iba pre exotické dreviny tangenciálneho rezu a v Tabuľke 3. sú hodnoty FACH dreva radiálno-tangenciálneho rezu pre európske aj exotické dreviny. Tabuľka 3. tiež obsahuje hodnoty FACH dreviny so špeciálnou kresbou dreva – pagaštan Buckeye burl (špeciál), ktorá sa využíva vo výrobe el. gitár dokonca v priečnom reze práve vďaka svojej unikátnej textúre.

Spomedzi všetkých meraných vzoriek európskych drevín má najnižšiu hustotu topol (s jemnou Burl kresbou) s hodnotou  $414 \text{ kg/m}^3$  pri nízkej hodnote modulu pružnosti 2,41 GPa. Najvyššia hodnota hustoty z európskych drevín bola nameraná u javora horského a to  $724 \text{ kg/m}^3$  pri relatívne vysokej hodnote modulu pružnosti 16,51 GPa. Pri exotických drevinách bola najnižšia hustota zaznamenaná u ihličnatej dreviny amerického smreku sitka, ktorý má hustotu  $318 \text{ kg/m}^3$  s pomerne nízkym modulom pružnosti pozdĺž vlákien dreva 5,88 GPa, a najvyššia hustota bola zaznamenaná pri exotickej drevine Cocobolo s hodnotou  $1127 \text{ kg/m}^3$  s najvyšším modulom pružnosti pozdĺž vlákien dreva 29,06 GPa.

Na Obrázkoch 17. až 22. je zaznamenaná interakcia medzi vybranými FACH (modul pružnosti a akustická konštanta) a hustotou dreva skúmaných európskych a exotických drevín a dreva Figured wood využívaného na určité časti nástroja a používaných rezov dreva vo výrobe el. gitár.

Pri porovnaní FACH dreva v interakcii modul pružnosti pozdĺž vlákien a hustota dreva sa nachádzajú určité exotické dreviny dosahujúce značne vysokú hustotu a zároveň vysoký modul pružnosti a tým v celkovom porovnaní dosahujú vyššie hodnoty ako európske dreviny. Z interakcie akustickej konštanty a hustoty dreva je zrejmé, že exotické dreviny s vyššou hustotou dosahujú podstatne nižšiu akustickú konštantu.

Z experimentálnych meraní vlastností dreva určeného na určité časti elektrických gitár a basgitár, dosahovali v interakcii relevantných FACH a hustoty najnižšie hodnoty modulu pružnosti pri porovnateľnej nízkej hodnote akustickej konštanty s drevinami na hmatník, práve dreviny určené pre vrchné dosky tela nástroja, ktoré slúžia najmä ako dekoratívny prvok elektrickej gitary. Najväčšie hodnoty modulu pružnosti pri vysokej hodnote hustoty dreva dosahovali najmä dreviny používané na výrobu hmatníka. Pre relatívne nízku hodnotu hustoty dreva, porovnateľnú hodnotu modulu pružnosti pozdĺž vlákien pri porovnaní s listnatými drevinami, sú vo väčšej miere ihličnaté mäkké dreviny využívané ako rezonančné dosky pri výrobe akustických gitár, pre vysoké hodnoty akustickej konštanty. V interakcii medzi modulom pružnosti pozdĺž vlákien a hustotou rôznych rezov dreva využívaných na výrobu el. gitár bola zaznamenaná viac menej zhoda a prekrytie hodnôt porovnávaných súborov, avšak pri drevine pagaštan – Buckeye burl je zaznamenaná veľmi nízka hodnota modulu pružnosti v smere pozdĺž dosky pri relatívne nízkej hodnote hustoty dreva, čo môže mať za následok práve priečny rez dreva. Pri skúmaní interakcie hodnôt FACH podľa rezov dreva najvyššie hodnoty dosahuje drevina označená ako Cocobolo (doštička s tangenciálnym rezom), kedy je zaznamenaná výrazne vysoká hodnota hustoty a modul pružnosti pozdĺž vlákien dreva oproti ostatným drevinám.

V praxi bolo dokázané, že faktor drevo má vysoký vplyv na zvuk elektrickej gitary. Tento poznatok sa potvrdil aj vo firme SIVCAK Guitars viacerými dlhoročnými hudobníkmi, ktorí si po svojich skúsenostiach vyberajú, aké druhy drevín sú pre nich vyhovujúce farbou zvuku a estetikou.

Paradoxne, napriek všetkým výskumom čo sa vykonali, najdôležitejší materiál pre výrobu elektrických gitár a basgitár je ten, na akom sa dohodnú zákazník s výrobcom. Výrobca, po viacerých skúsenostiach a študovaní viacerých materiáloch, vie aká drevena je vhodná na určitú časť gitary. V praxi sa drevo vyberá z viacerých kritérií, ktoré odporučí väčšina výrobcov gitár. Hlavné kritéria pre výrobu kvalitnej elektrickej gitary a basgitary sú v prvom rade: prvotriedny materiál, estetika a vzhľad, dobrá rezonancia, nízka hmotnosť, stredná hustota tela avšak vysoká hustota dreva pre hmatníka, čo najhustejšie prírastky ročných kruhov a hlavne čo je podstatné pre zákazníka – cena.

Drevo používané na hmatníkové dosky trpí najviac opotrebením v dôsledku trenia strún a rúk gitaristov, a taktiež musia odolávať opotrebovaniu a napätiu spôsobenú krkom. Pre túto dominantnú vlastnosť sa väčšinou vyrábajú hmatníky z hustého a tvrdého materiálu, avšak niekedy sa používa aj drevena s veľmi estetickou kresbou.

Podľa výrobcov, drevo používané pre krk musí mať dostatočne vysokú hustotu, tvrdosť, dobrú rezonančnú odozvu a šírenie zvuku, čo sa prejavuje najmä pri ladení strún. Keby drevo na krk nebolo dostatočne husté a kvalitné, tak struny majú takú silu, že by mohli celý krk vyhnúť a poškodiť ho. Drevena javor sa pre tieto vlastnosti stala prvoradým materiálom – štandardom na výrobu krku gitár. Dominantným javorom je však javor kanadský, ktorý sa osvedčil ako najspoľahlivejší zo všetkých kritérií na výrobu krku. Drevo na výrobu krku gitár sa skúma aj akustickou metódou v podobe rýchlej analýzy zvuku pomocou rezonančnej vidličky a sluchového vnímania odozvy. Avšak vďaka svojej kresbe sa v krkoch využíva aj javor s očkovou alebo vláknitou kresbou.

V praxi sa na telo gitary berie najväčší ohľad na estetiku, nízku hmotnosť, strednú hustotu, husto rastené ročné kruhy a cenu. Hmotnosť tela zabezpečuje prevažnú časť celkovej hmotnosti gitary. Keby bola hmotnosť tela gitary menšia ako krk, gitara by sa nakláňala od hráča a z hľadiska hudobníka by bola nekomfortná a zle hrateľná. Keby však bola moc ťažká hudobník by musel vynaložiť veľké úsilie na používanie danej gitary. Z hľadiska hmotnosti sa využíva rovnováha medzi telom a krkom, kde telo musí byť o niečo ťažšie. Ročné kruhy majú byť čo najhustejšie pre zabezpečenie pevnosti celej gitary. Akonáhle je vysoká hustota materiálu, tón sa v dreve akoby rýchlejšie vytratí a to spôsobuje vznik piskľavejšieho tónu. Pri nízkej hustote je telo gitary zase veľmi krehké, preto sa využívajú materiály so strednou hustotou ako sú bahenný jaseň alebo jelša, ktoré sa najviac používajú a sú štandardne vyhľadávané pri výrobe tiel el. gitár.

Využitie dreva *Figured wood* kladie pozornosť a dominanciu estetike a výzoru celého hudobného nástroja. Kvôli svojim nehomogénnym, a občas aj nízkym pevnostným vlastnostiam, sa dreveniny so špecifickou kresbou využívajú iba ako dekoračné prvky. A najčastejšie sú preto využívané na vrchné dosky, kde pôsobia pre záujemcu o gitaru svojím luxusným vzhľadom. Niektoré druhy ako *quilt*, *vlnitosť* a *očková kresba* nenarušujú štruktúru a pevnosť dreva, ale kvôli svojej vysokej cene sa využívajú takéto dosky len v podobe vrchných dosiek v kompozite s inými drevinami tela vo výrobe elektrickej gitary a basgitary. K zvýšeniu profesionality a zvýšeniu rezonancie v tele sa v podkladovej doske tela môžu vyfrézovať akustické drážky, ktoré znižujú hmotnosť a pri správnom uložení zvyšujú rezonanciu tela elektrickej gitary.

V Tabuľkách 1. až 3. sú znázornené prehľadné výsledky experimentálnych meraní fyzikálno-akustických vlastností vzácneho dreva „Figured wood“ podľa typu rezu dreva skúšobných telies tvaru pravouhlých tenkých dosiek.

**Tabuľka 1.** Lokálne FACH európskych a exotických drevín Figured wood – radiálny rez doštičiek.

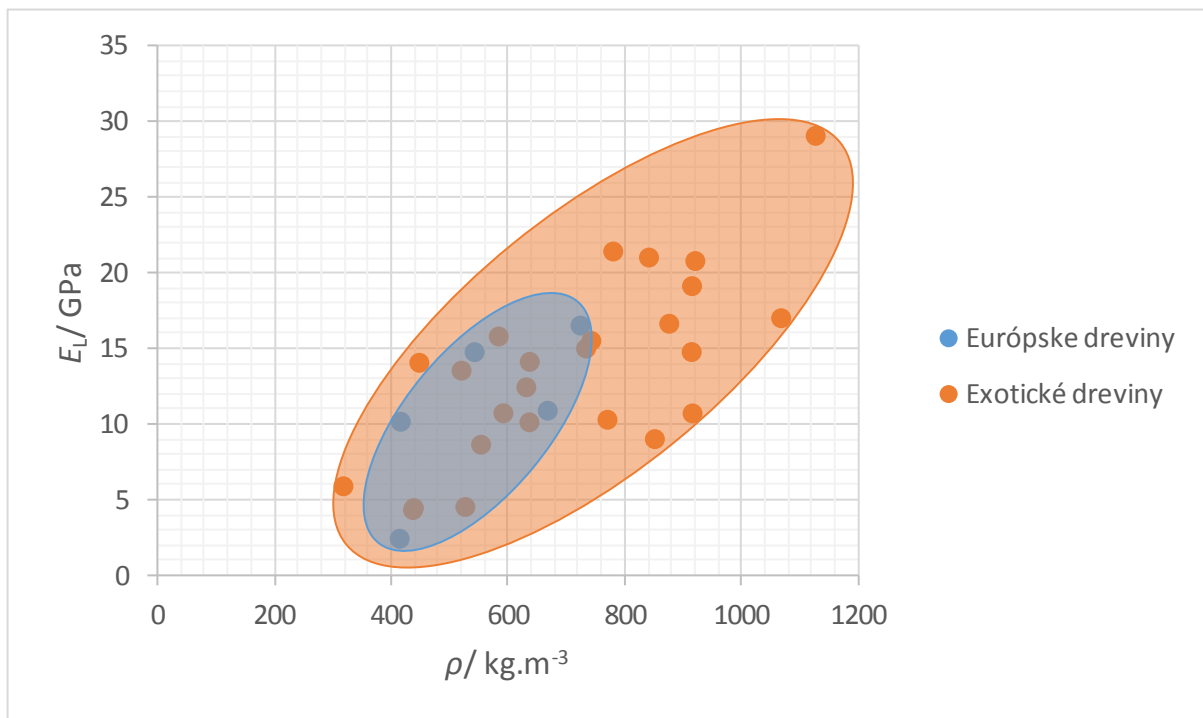
Región	Drevina	$\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$E_L$ / GPa	$A$ / $\text{m}^4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_L$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Z$ / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot 10^{-5}$
Európske dreviny	Smrek obyčajný	416	10,15	11,88	4940	20,55
	Javor horský	724	16,51	6,6	4776	34,57
	Topoľ	414	2,41	5,83	2413	9,99
Exotické dreviny	Santos	914	14,76	4,4	4018	36,73
	Purpleheart - svetlejší	841	21,01	5,94	4998	42,03
	Bahenný jaseň	437	4,31	7,19	3141	13,72
	Teak	637	14,11	7,39	4707	29,97
	Smrek sitka	318	5,88	13,55	4303	13,67
	Javor ambrosia	526	4,51	5,56	2927	15,41
	Masagaskar palisander	920	20,78	5,16	4752	43,73
	Čierna limba	584	15,79	8,91	5202	30,36
	Bubinga TJA bel'	851	9	3,82	3252	27,68
	Mahagón sapeli	636	10,11	6,27	3986	25,36
	Eben	1067	17	3,74	3991	42,60
	Ovangol	780	21,41	6,72	5240	40,86
Mahagón Meranti	448	14,05	12,51	5602	25,08	

**Tabuľka 2.** Lokálne FACH exotických drevín Figured wood – tangenciálny rez doštičiek.

Región	Drevina	$\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$E_L$ / GPa	$A$ / $\text{m}^4\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_L$ / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Z$ / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})\cdot 10^{-5}$
Exotické dreviny	Bahenný jaseň	438	4,44	7,26	3183	13,95
	Jelša americká	520	13,53	9,81	5101	26,52
	Cocobolo	1127	29,06	4,51	5079	57,22
	Orech kráľovský	770	10,28	4,75	3654	28,13
	Hard maple – očkový	742	15,5	6,16	4570	33,92
	Wenge	553	8,63	7,14	3949	21,85
	Bubinga BG (quilt)	916	10,7	3,73	3418	31,30
	Bubinga TJA (kresba špeciál trieda)	876	16,63	4,98	4358	38,16

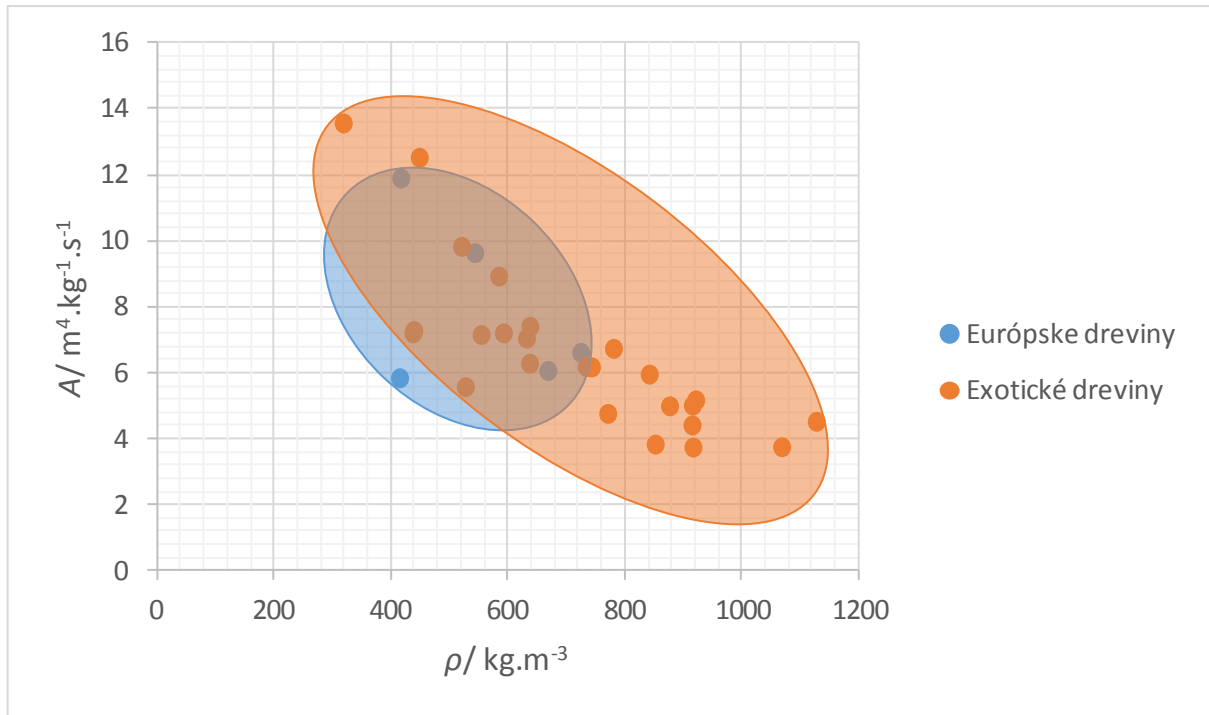
Tabuľka 3. Lokálne FACH európskych a exotických drevín Figured wood – radiálno-tangenciálny a špeciálny rez doštičiek.

Región	Drevina	$\rho$ / $\text{kg.m}^{-3}$	$E_L (E_x)$ / GPa	$A$ / $\text{m}^4.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$c_L (c_x)$ / $\text{m.s}^{-1}$	$Z$ / $(\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}).10^{-5}$
Európske dreviny	Jelša európska	542	14,75	9,62	5215	28,28
	Jaseň európsky	668	10,88	6,05	4037	26,95
Exotické dreviny	Purpleheart – tmavší	915	19,12	5	4572	41,82
	Javor – vlnitý	592	10,71	7,19	4255	25,17
	Javor kanadský	733	14,99	6,17	4521	33,15
	Kompozit jaseň-mahagón-javor-wenge	631	12,43	7,03	4439	28,00
	Buckeye burl (špeciál)	410	1,25	4,26	1746	7,16

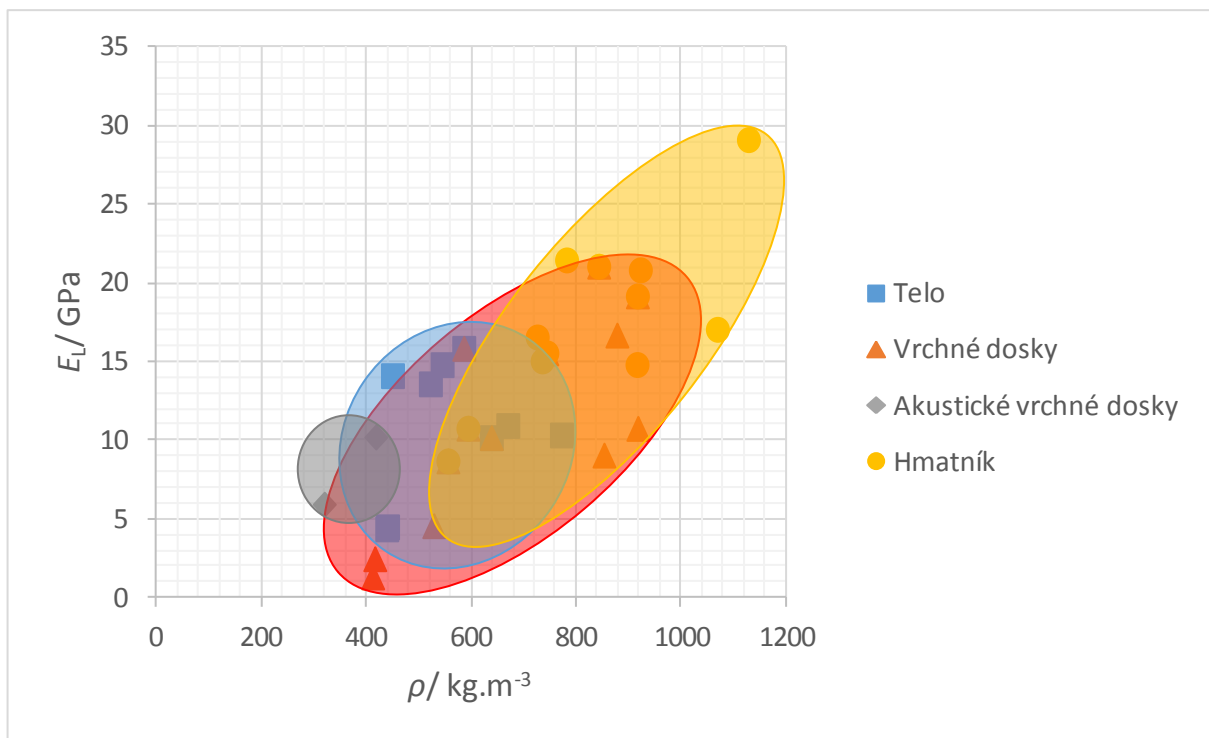


Obrázok 17. Interakcia medzi modulom pružnosti pozdĺž vlákien a hustotou drevín európskych a exotických drevín využívaných vo výrobe elektrických gitár.

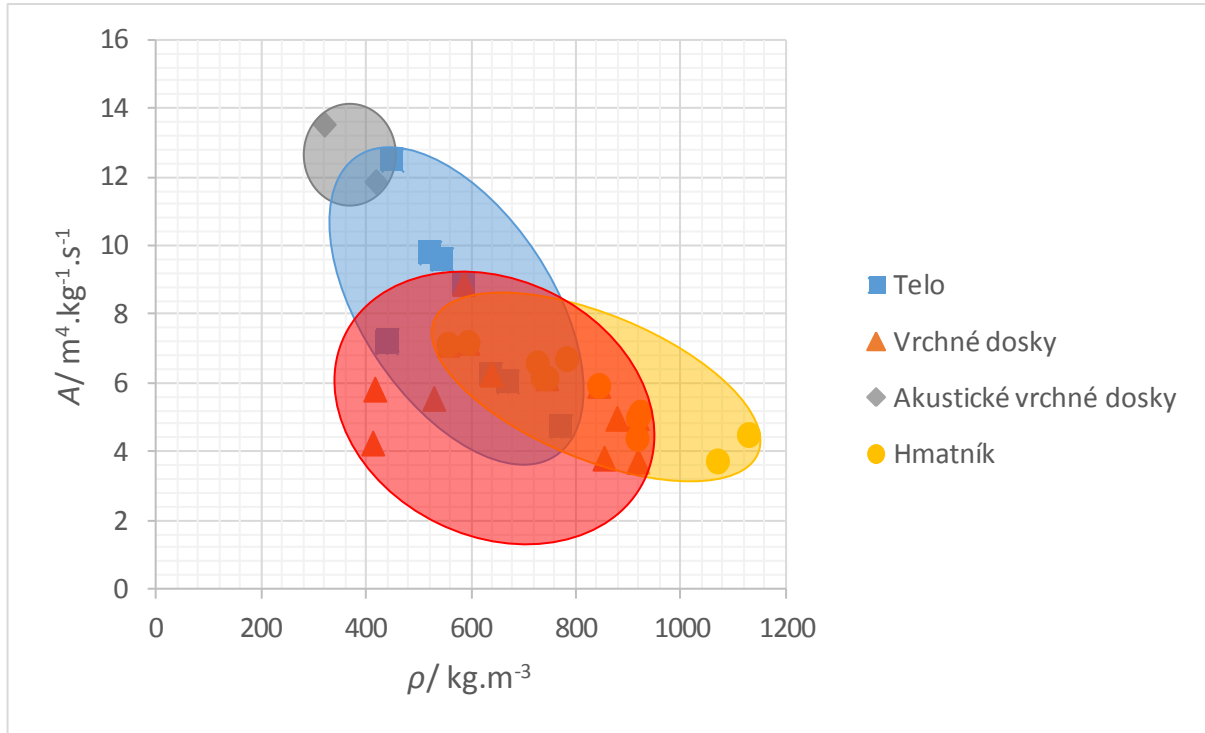




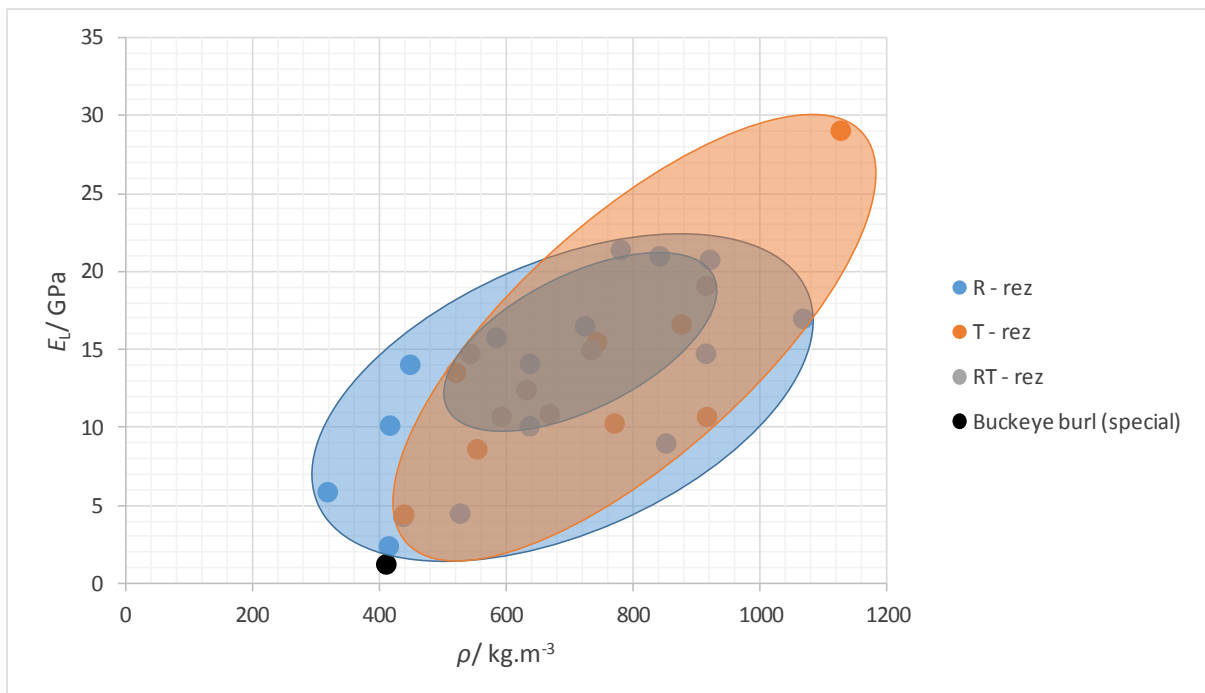
**Obrázok 18.** Interakcia medzi akustickou konštantou a hustotou dreva európskych a exotických drevín využívaných vo výrobe elektrických gitár.



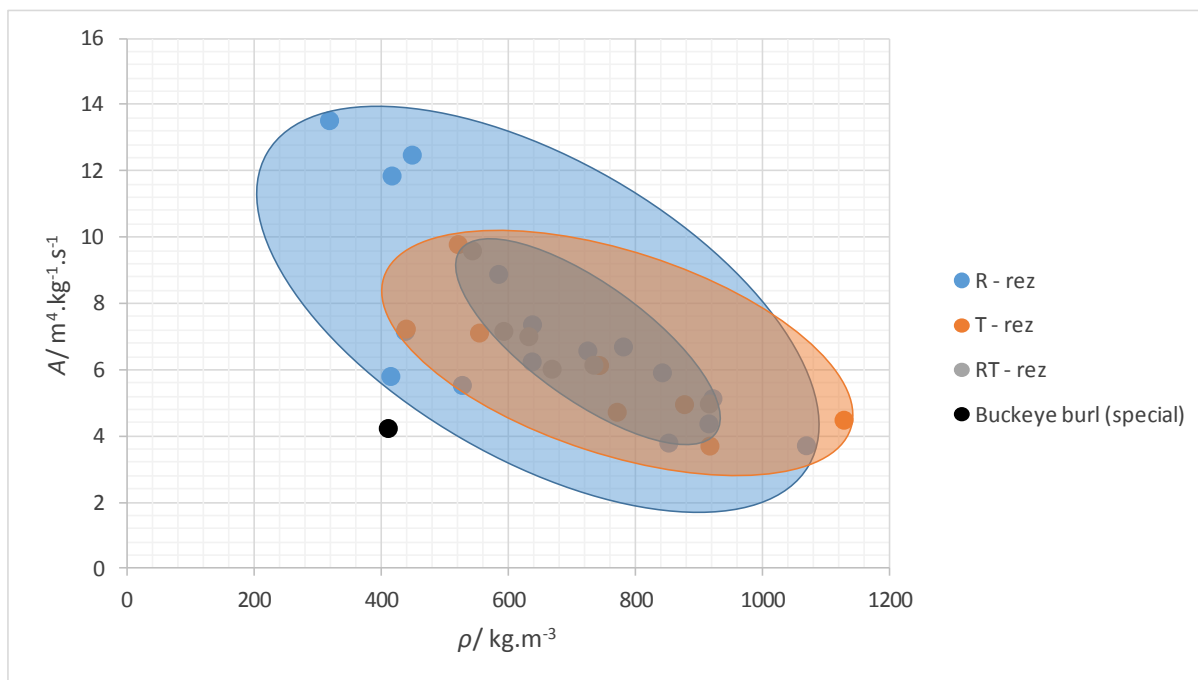
**Obrázok 19.** Interakcia medzi modulom pružnosti pozdĺž vlákien a hustotou dreva Figured wood využívaného na určité časti elektrickej gitary.



**Obrázok 20.** Interakcia medzi akustickou konštantou a hustotou dreva Figured wood využívaného na určité časti elektrickej gitary.



**Obrázok 21.** Interakcia medzi modulom pružnosti pozdĺž vlákien a hustotou rôznych druhov rezu dreva využívaných na výrobu elektrických gitár.



**Obrázok 22.** Interakcia medzi akustickou konštantou a hustotou rôznych druhov rezu dreva využívaných na výrobu elektrických gitár.

## 5 Záver

Drevina so špeciálnou kresbou dreva – pagaštan Buckeye burl (špeciál), ktorá sa využíva vo výrobe el. gitár dokonca v priečnom reze, nameranými hodnotami FACH samostatne vykazovala nižšie hodnoty oproti ostatným skúmaným drevinám. Spomedzi všetkých meraných vzoriek európskych drevín má najnižšiu hustotu topol pri nízkej hodnote modulu pružnosti. Najvyššiu hodnotu hustoty z európskych drevín zaznamenal javor horský pri relatívne vysokej hodnote modulu pružnosti. Pri exotických drevinách je najnižšia hustota zaznamenaná u ihličnatej dreviny amerického smreku sitka s pomerne nízkym modulom pružnosti pozdĺž vlákien dreva, a najvyššia hustota bola zaznamenaná pri exotickej drevine Cocobolo s najvyšším modulom pružnosti pozdĺž vlákien dreva. Pri porovnaní vlastností dreva podľa regiónu je možnosť pozorovať, že exotické dreviny vo väčšej miere, okrem rýchlosti šírenia zvuku v dreve, prevyšujú hodnoty FACH európskych drevín. Pri porovnaní vlastností dreva podľa časti použitia na el. gitaru dosiahli najnižšie hodnoty modulu pružnosti pozdĺž vlákien pri nízkej hustote dreviny určené na výrobu vrchných dosiek používaných na telá gitár, hodnoty vysokej hustoty a modulu pružnosti pozdĺž vlákien dosahovali dreviny určené na hmatník el. gitary. Pri porovnaní vlastností dreva podľa zvoleného porezu skúmanej dosky neboli zaznamenané výrazne rozdiely v hodnotách vybraných FACH.

Jednou z hlavných vlastností a rozhodujúcich faktorov výberu dreva pre výrobu tela a hmatníka elektrických gitár a basgitár z pohľadu výrobcu je druh dreviny, štruktúra, hustota, cena a celková kresba daného materiálu. Pri výrobe krkov sa ako najefektívnejší a najlepší materiál osvedčil Kanadský javor s presným radiálnym rezom. Často sa však používa na krky javorové drevo s očkovanou alebo vlnitou kresbou vďaka svojmu dekoratívne vzhľadu.

Pri výrobe tiel gitár sa dbá ohľad na viacero faktorov, ktoré pravdepodobne ovplyvňujú aj výsledný zvuk gitary. Najdôležitejšie faktory z pohľadu výrobcu nástroja sú pritom nízka hmotnosť, stredná hustota avšak husto rastené ročné kruhy, celkový vzhľad a cena. Nízka

hmotnosť zabezpečuje pohodlie hráča, ktorý nemusí vynaložiť veľkú silu pri hraní a držaní hudobného nástroja. Ročné kruhy by mali byť čo najhustejšie kvôli pevnosti celej gitary. Pri vysokej hustote materiálu sa tón v dreve rýchlejšie vytratí a spôsobuje piskľavejší tón a pri nízkej hustote je telo gitary veľmi krehké, preto sa využívajú materiály so strednou hustotou ako sú bahenný jaseň alebo jelša, ktoré sa najviac používajú pri výrobe tiel el. gitár. Vzhľad udáva dominantnú časť pri estetike a výzore celého hudobného nástroja – elektrickej gitary. Použitie vrchných dosiek z „Figured wood“ predstavuje určitý luxus hudobného nástroja. Pre svoju výnimočnú kresbu a estetiku sa vrchné dosky často využívajú vo výrobe a sú vyhľadávaným prvkom zákazníkov, ktorý si potrpia na vzhľade svojho nástroja.

Figured wood, ktorého vlastnosti dreva sa experimentálne zisťovali, vykazovalo celkovo široké spektrum hodnôt relevantných fyzikálno-akustických charakteristík dreva pri porovnaní podľa regiónu (európske a exotické dreviny), rezov dreva (radiálny, tangenciálny, radiálno-tangenciálny rez, priečny rez) a častí gitary (vrchné dosky, akustické vrchné dosky, telo a hmatník gitary). Treba pripomenúť podstatné kritérium rozhodovania výberu dreva na el. gitaru a to je subjektívny názor zákazníka a hlavne výrobcu podľa ich stanovených kritérií. Dosiahnuté výsledky meraní by však mohli byť súčasťou celkového poznania materiálov vzácneho druhu dreva európskych a exotických drevín využívaných na výrobu špeciálnych výrobkov z dreva, akým je aj elektrická gitara a basgitara.

## Literatúra

Alibaba, 2020 [online] [cit. 2020-12-05]. Dostupné na: <[https://www.alibaba.com/product-detail/Hazel-Spruce-Bear-claw-spruce-\\_146843818.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Hazel-Spruce-Bear-claw-spruce-_146843818.html)>

FineArtAmerica.com [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na: <<https://fineartamerica.com/featured/sugar-maple-spalted-wood-grain-pattern-phil-cardamone.html>>

McINTYRE, M. E., WOODHOUSE, J. 1984. On measuring wood properties. Part 1. In *Journal of the Catgut Acoustical Society*. ISSN 0882-2212, 1984, issue 42, p. 11-15.

POŽGAJ, A. et al. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda 485 s. ISBN 80-07-00960-4.

Royal Craft Guitars [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na: <<http://royalcraft.de/tonewood.php#flamedmaple>>

SIVCAK Guitars, [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na internete: <[https://www.sollerguitars.com/index.php?option=com\\_flexicontent&view=category&cid=29&Itemid=101&lang=sk](https://www.sollerguitars.com/index.php?option=com_flexicontent&view=category&cid=29&Itemid=101&lang=sk)>

SIVCAK Guitars, [online]. 2020. Gitarové dreva. [cit. 2020-12-05]. Dostupné na internete: <[https://www.sollerguitars.com/index.php?option=com\\_flexicontent&view=item&cid=20:galeria&id=193:gitarove-dreva&Itemid=101&lang=sk](https://www.sollerguitars.com/index.php?option=com_flexicontent&view=item&cid=20:galeria&id=193:gitarove-dreva&Itemid=101&lang=sk)>

The Guild of Vermont Furniture Makers [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na: <<https://www.vermontfurnituremakers.com/2016/06/wood-figured.html>>

The Guild of Vermont Furniture Makers [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na: <<https://www.vermontfurnituremakers.com/2016/06/grain-figure-wood-furniture.html>>

The Wood Database, [online]. 2020, [cit. 2020-12-05]. Dostupné na internete: <[https://www.wood-database.com/wood-finder/?fwp\\_paged=7](https://www.wood-database.com/wood-finder/?fwp_paged=7)>

## Summary

**Physical and Acoustical Characteristics of Selected Types of "Figured Wood" Used in the Production of Modern Electric Guitars.** Electric guitar is one of the most used musical instrument in the world. Its production is closely linked to well-known wood processing technologies used in the wood industry. In the wood engineering, the production of electric guitar represents the top of the knowledge for woodworking with several types of wood. The paper focuses on the examination of the physical and acoustical properties of wood, named as "Figured wood" which is characteristic with its specific and aesthetical interesting texture. Its grains are creating the non-traditional patterns in the wood surface. These patterns are created by the native properties of wood and by using an appropriate wood cut scheme of the valuable material for production of musical instrument, especially as the electric guitar is. The physical and acoustical characteristics of domestic and exotic wood species was determined and compared by experimental measuring with non-destructive method of acoustic – method of modal analysis for harmonic excitation using the Chladni patterns (apparatus VIBROVIZER). The Figured wood which characteristics were experimentally observed, showed the wide range of values of relevant physical-acoustical characteristics of wood according to regions, wood cut and also according to part of guitar. It is important to remind that the subjective opinion of the customer and the opinion of the guitar producer based on the determining factors are still the essential criteria in the choice of the wood for electric guitar.

## Keywords

Figured wood; electric guitars; Chladni patterns; physical-acoustical characteristics of wood.

## Kontaktné adresy

Martin Čulík

Department of Wooden Constructions (KDS)

Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

culik@acoustics.sk

<http://www.acoustics.sk>

Anna Danihelová

Department of Fire Protection (KPO)

Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic

danihelova@acoustics.sk

<http://www.acoustics.sk>

Henrik Sivčák

Soller&Sivcak Guitars

<http://www.sollerguitars.com>

## MERANIE NEPRIEZVUČNOSTI STROPNÝCH KONŠTRUKCIÍ

Richard Drahoš, Milan Drahoš

### 1 Úvod

Vlastníci bytov vo viacpodlažných obytných budovách sa často sťažujú na hluk spojený s bežným užívaním bytu (chôdza po podlahe, pád predmetov na podlahu a pod.), ktorý je charakterizovaný ako krokový hluk (zvuk), ako aj na hluk prenikajúci z technologických priestorov v polyfunkčných budovách, napr. pri prevádzke centrálnych zdrojov chladu, odovzdávacích staníc tepla, domových plynových kotolní a podobne.

Zvuková izolácia horizontálnych nosných stavebných konštrukcií (ďalej len „stropných konštrukcií“) medzi susediacimi bytmi nad sebou alebo medzi bytmi a technologickými priestormi budov má zabezpečiť pre vlastníkov bytov akustický komfort. Pri vertikálnom alebo diagonálnom šírení zvuku stropnými konštrukciami vzduchom, zvukovú izoláciu charakterizuje vzduchová nepriezvučnosť a pri prenose krokového zvuku, zvukovú izoláciu charakterizuje kroková nepriezvučnosť. Vzduchovú a krokovú nepriezvučnosť charakterizujú frekvenčné závislé veličiny spravidla v tretinovo-oktávových pásmach vo zvukovoizolačnej oblasti 100 Hz až 3 125 Hz.

Požiadavky na vzduchovú a krokovú nepriezvučnosť stropných konštrukcií v obytných budovách sú uvedené v norme STN 73 0532 [1] a sú vyjadrené jednočíselnými hodnotami príslušných veličín. Hodnoty týchto veličín majú zabezpečiť aj dodržanie hygienických limitov hluku v chránených vnútorných priestoroch budov, ktoré sú ustanovené v prílohe k vyhláške MZ SR č. 549/2007 Z. z. [2] pre hluk prenikajúci z rôznych vnútorných zdrojov stavebnými konštrukciami.

V § 1 ods. 2 vyhlášky MZ SR č. 549/2007 Z. z. [2] je uvedené, že vyhláška sa vzťahuje na hluk, infrazvuk a vibrácie, ktoré sa vyskytujú trvale alebo prerušovane vo vonkajšom prostredí alebo vo vnútornom prostredí budov v súvislosti s aktivitami ľudí alebo činnosťou zariadení. Aktivitami ľudí v bytoch vzniká hluk, ktorý je spôsobený hlasovými prejavmi ľudí a zvierat a činnosťou spojenou s bežným užívaním bytu (chôdza po podlahe, pád predmetov na podlahu a pod.).

V stavbách (budovách) sa meranie vzduchovej nepriezvučnosti stropnej konštrukcie s podlahou realizuje podľa normy EN ISO 104-4 [3] a meranie krokovej nepriezvučnosti sa realizuje podľa normy EN ISO 140-7 [4].

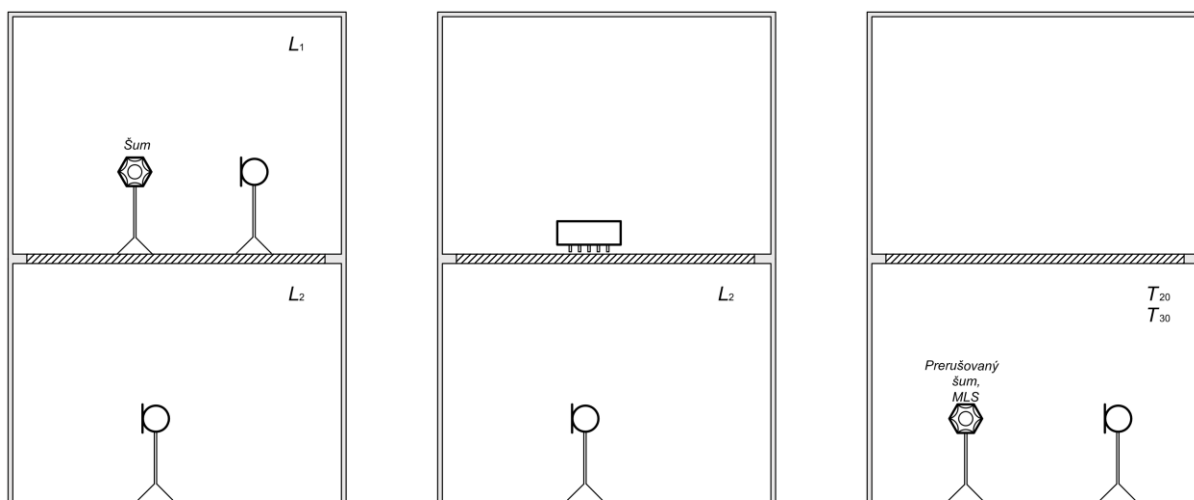
### 2 Metódy merania nepriezvučnosti stropných konštrukcií

Základný rozdiel pri meraní vzduchovej nepriezvučnosti a krokovej nepriezvučnosti je v polohe (umiestnenia) normalizovaného zdroja zvuku (obrázok 1). V prípade vzduchovej nepriezvučnosti je normalizovaný zdroj zvuku situovaný v miestnosti (vysielacej miestnosti) mimo posudzovanej horizontálne deliacej stavebnej konštrukcie a pri krokovej nepriezvučnosti je normalizovaný zdroj krokového zvuku v priamom kontakte s horizontálnou deliacou stavebnou konštrukciou.

#### 2.1 Metóda merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti

Metóda a podmienky pri meraní stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti vertikálnych alebo horizontálnych deliacich stavebných konštrukcií sú uvedené v norme EN ISO 104-4 [3]. Jednou zo základných podmienok je zabezpečenie dostatočného odstupu hladiny akustického

tlaku pozadia (hľuku pozadia) od meraného signálu generovaného normalizovaným zdrojom zvuku.



**Obrázok 1.** Všeobecná schéma miestností a zdrojov normalizovaného zvuku pri meraní stavebnej a krokovej nepriezvučnosti.

Normalizovaný zdroj zvuku pozostáva z generátora širokopásmových šumových signálov (ružového šumu – spektrum č. 1, bieleho šumu – spektrum č. 2), výkonového zosilňovača a z viacsmerového reproduktora s izotropným vyžarovaním zvuku.

Meranie stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti je spravidla rozdelené do dvoch fáz. Prvá fáza je súbežné meranie hladín akustického tlaku vo vysielacej a v prijímacej miestnosti (priestore) a druhá fáza je meranie času dozvuku v prijímacej miestnosti (priestore). Z dôvodu, že difúznosť zvukového poľa vo vysielacej a prijímacej miestnosti nie je dokonalá, meranie hladín akustického tlaku z jedného zdroja zvuku sa vykonáva vo viacerých pevných polohách mikrofónu (najmenej 10 polôh) a do výpočtu sa berú energetický priemerné hodnoty. Čas dozvuku v prijímacej miestnosti sa meria podľa EN ISO 3382-2: 2009 [5] a to najmenej v 6-tich pevných polohách mikrofónu a do výpočtu sa berú aritmeticky priemerné hodnoty.

Hodnota stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_i$  deliacej stavebnej konštrukcie s vedľajšími cestami prenosu zvuku v  $i$ -tom tretinovo-oktávom pásme zvukovoizolačnej oblasti 100 Hz až 3150 Hz, resp. 50 Hz až 5 000 Hz sa vypočíta podľa vzťahu:

$$R'_i = L_{1,i} - L_{2,i} + 10 \log \frac{S}{A_{2,i}} = L_{1,i} - L_{2,i} + 10 \log \frac{6,13 \cdot S \cdot T_{2,i}}{V_{2,i}} \quad (1)$$

kde  $L_{1,i}$  je priemerná hladina akustického tlaku vo vysielacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB,

$L_{2,i}$  je priemerná hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB,

$S$  je plocha deliacej konštrukcie v  $m^2$ ,

$V_2$  je objem prijímacej miestnosti v  $m^3$ ,

$T_{2,i}$  je priemerný čas dozvuku v prijímacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v sekundách.

Poznámka 1: Vzťah (1) sa použije vtedy, ak deliacu konštrukciu tvorí celá plocha stropu (steny).

Poznámka 2: V tretinovo-oktávových pásmach pod 100 Hz je obtiažne predpokladať difúzne pole v miestnostiach s objemom  $V = 50 \text{ m}^3$  a menej.

Poznámka 3: Ekvivalentná pohltivá plocha  $A_2$  v prijímacej miestnosti v  $\text{m}^2$  je daná vzťahom:

$$A_{2,i} = 0,16V_2 / T_2 \quad (2)$$

### 2.1.1 Stanovenie váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti $R'_w$

V normalizovanom diagrame, hodnota váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_w$  sa stanovuje posúvaním smernej krivky (lomenej čiary) vzduchovej nepriezvučnosti  $SK(R)$  k spektrálnemu priebehu vypočítaných hodnôt stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_i$  v tretinovo-oktávových pásmach [6].

Posúvaním smernej krivky vzduchovej nepriezvučnosti  $SK(R)$  vo zvislom smere po 1 dB krokoch sa stanoví súčet nepriaznivých odchýlok od smernej krivky (odchýlok pod smernou krivkou), ktorý sa má čo najviac priblížiť, ale neprevýšiť hodnotu 32,0 dB. Hodnota posunutej smernej krivky pri str. frekvencii 500 Hz zodpovedá hodnote váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_w$  v dB. Čím sú hodnoty váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_w$  vyššie, tým je konštrukcia kvalitnejšia z hľadiska vzduchovej nepriezvučnosti.

### 2.1.2 Stanovenie adaptačného činiteľa spektra $C$

Adaptačný činiteľ spektra  $C$  k hodnote váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_w$  sa vypočíta podľa vzťahu:

$$C = -10 \log \left( \sum_i 10^{0,1(L_{2,i} - R_i)} \right) - R'_w \quad (3)$$

kde  $L_{2,i}$  je priemerná hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme pri generovaní ružového šumu (spektrum č. 1) v dB,

$R_i$  je hodnota stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB,

$R'_w$  je hodnota váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti s presnosťou 0,1 dB,

$i$  je počet tretinovo-oktávových pásiem.

Hodnota adaptačného činiteľa spektra  $C$  sa uvádza za hodnotou váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti v zátvorkách  $R'_w$  ( $C$ ) a to so zaokrúhlením na celé číslo. Ak je v budovách požadovaná zvýšená ochrana pred hlukom, pri posudzovaní zhody hodnoty váženej stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti s požadovanou hodnotou v norme sa hodnota adaptačného činiteľa  $C$  pripočíta k hodnote  $R'_w$ .

Stropné konštrukcie s podlahou spravidla vyhovujú požiadavkám normy STN 73 0532 [1] z dôvodu, že vzduchová nepriezvučnosť závisí hlavne na plošnej hmotnosti stropnej konštrukcie ( $m' = \rho \cdot h$  v  $\text{kg/m}^2$ ), ktorá je pomerne vysoká.

## 2.2 Metóda merania stavebnej krokovej nepriezvučnosti

Metóda a podmienky pri meraní stavebnej krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií sú uvedené v norme EN ISO 140-7 [4]. Jednou zo základných podmienok je zabezpečenie dostatočného odstupu hladiny akustického tlaku pozadia (hluku pozadia) v prijímacej miestnosti od meranej hladiny akustického tlaku generovaného zdrojom krokového zvuku.



Krokový zvuk sa generuje normalizovaným zdrojom krokového zvuku, ktorý vytvára normalizované impulzy prenášané do stropnej konštrukcie s podlahou v priamom kontakte.

Normalizovaný zdroj krokového zvuku pozostáva z piatich kovových závaží o hmotnosti  $(500 \pm 12)$  g, ktorých vzdialenosť od seba je  $(100 \pm 3)$  mm, ktoré dopadajú v intervale 0,1 s na povrch skúšanej konštrukcie stropu a to z výšky 40 mm s toleranciou  $\pm 5\%$ .

Meranie stavebnej krokovej nepriezvučnosti je rozdelené do dvoch fáz. Prvá fáza je meranie hladín akustického tlaku v prijímacej miestnosti (priestore) a druhá fáza je meranie času dozvuku v prijímacej miestnosti. Normalizovaný zdroj krokového zvuku sa postupne premiestňuje min. do 4 rôznych miest na stropnej konštrukcii.

Hodnota normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku  $L_{n,i}$  stavebnej konštrukcie s podlahou v  $i$ -tom tretinovo-oktávom pásme zvukovoizolačnej oblasti 100 Hz až 3 125 Hz, resp. 50 Hz až 3 125 Hz sa vypočíta podľa vzťahu

$$L_{n,i} = L_{2,i} + 10 \log \frac{A_2}{A_0} = L_{2,i} + 10 \log \left( \frac{V_2}{6,31 T_{2,i}} \right) \quad (4)$$

kde  $L_{2,i}$  je priemerná hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB,

$V_2$  je objem prijímacej miestnosti v  $m^3$ ,

$T_{2,i}$  je priemerný čas dozvuku v prijímacej miestnosti v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v sekundách.

Poznámka 1: Vzťah (4) sa použije vtedy, ak deliacu konštrukciu tvorí celá plocha stropu.

Poznámka 2: V tretinovo-oktávových pásmach pod 100 Hz je obtiažne predpokladať difúzne pole v miestnostiach s objemom  $V = 50 m^3$  a menej.

Poznámka 3: Ekvivalentná pohltivá plocha  $A_2$  v prijímacej miestnosti v  $m^2$  je daná vzťahom (2) a  $A_0$  je normalizovaná pohltivosť  $A_0 = 10 m^2$ .

### 2.2.1 Stanovenie normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku $L'_{n,w}$

V normalizovanom diagrame, hodnota váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku  $L'_{n,w}$  sa stanovuje posúvaním smernej krivky (lomenej čiary) krokovej nepriezvučnosti  $SK(L_n)$  k spektrálnemu priebehu vypočítaných hodnôt normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku  $L_{n,i}$  v tretinovo-oktávových pásmach [7].

Posúvaním smernej krivky  $SK(L_n)$  vo zvislom smere po 1 dB krokoch sa stanoví súčet nepriaznivých odchýlok (odchýlok nad smernou krivkou), ktorý sa má čo najviac priblížiť, ale neprevýšiť hodnotu 32,0 dB. Hodnota posunutej smernej krivky pri str. frekvencii 500 Hz zodpovedá hodnote váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku  $L'_{n,w}$  v dB. Čím je hodnota  $L'_{n,w}$  nižšia, tým je stropná konštrukcia s podlahou kvalitnejšia z hľadiska krokovej nepriezvučnosti.

### 2.2.2 Stanovenie adaptačného činiteľa spektra $C_1$

Adaptačný činiteľ spektra  $C_1$  charakterizuje typické spektrum zvuku chôdze a sa vypočíta podľa vzťahu

$$C_1 = 10 \log \left( \sum_i 10^{0,1(L'_{n,i})} \right) - 15 - L'_{n,w} \quad (5)$$

kde  $L'_{n,i}$  je priemerná hodnota normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku v  $i$ -tom tretinovo-oktávovom pásme v dB,

$L'_{n,w}$  je vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku v dB,  $i$  je počet tretinovo-oktávových pásiem.

Hodnota adaptačného činiteľa spektra  $C_1$  sa uvádza za hodnotou váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku v zátvorkách  $L_{n,w}(C_1)$  a to so zaokrúhľením na celé číslo. Pri posudzovaní zhody hodnoty váženej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku s požadovanou hodnotou v norme, hodnota adaptačného činiteľa  $C_1$  sa pripočíta k hodnote  $L'_{n,w}$ .

Samotné nosné stropné konštrukcie zabezpečujú malú ochranu pred krokovým zvukom (hlukom). Podstatnú úlohu pri obmedzovaní krokového zvuku majú konštrukcie podláh, ktoré sa z hľadiska funkcie delia na podlahy plávajúce a povlakové [8].

Plávajúce podlahy sa skladajú z dvoch až troch funkčne významných vrstiev a spolu s nosnou stropnou konštrukciou vytvárajú akusticky viacvrstvovú násobnú konštrukciu.

Lahká plávajúca podlaha je spravidla dvojvrstvová. Dynamická tuhosť pružnej izolačnej podložky je v rozsahu  $300 < s' < 500 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$ , na ktorú je uložená nášľapná vrstva (laminátová podlaha, PVC, guma, koberec).

Charakteristickým znakom ťažkých plávajúcich podláh je, že na pružnej izolačnej podložke s dynamickou tuhosťou  $s' \leq 40 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$  (II. kategória) je uložená hmotná roznášacia betónová vrstva (obyčajne vystužená oceľovou sieťkou). Povrch roznášacej vrstvy je chránený nášľapnou vrstvou (parkety, keramická dlažba, laminátová podlaha, PVC, guma, koberec).

Z hľadiska krokovej nepriezvučnosti, kritickým prvkom plávajúcich podláh je riešenie detailu styku steny alebo inej zvislej konštrukcie s nášľapnou vrstvou. Riešením je ich najpružnejšie oddelenie, tzn. odizolovanie stien pružnou vložkou alebo pomocou špeciálnych dilatačných líšt [9].

Povlakové (nulové) podlahy sú podlahy, kde nášľapná vrstva je z podlahoviny napr. z PVC, gumy alebo textílií.

### 3 Príklad posúdenia sťažnosti na rušenie hlukom z aktivít osôb

Na základe sťažnosti obyvateľov bytu situovanom na 1. NP bytového domu na rušenie chôdzou po podlahe obyvateľmi bytu situovanom na 2.NP nad ich bytom bolo realizované meranie krokovej nepriezvučnosti stropnej konštrukcie podľa EN ISO 140-7 [4], ale aj meranie imisií (výskyt) hluku v miestnosti v byte na 1. NP pri chôdzi (s dupaním) v byte na 2. NP [10].

#### 3.1 Meranie stavebnej krokovej nepriezvučnosti

Na základe výsledkov merania podľa EN ISO 140-7 [4] uvedených v tabuľke a v normalizovanom diagrame (obrázok 2), vážená normalizovaná hladina akustického tlaku krokového zvuku stopu s podlahou  $L'_{n,w} = 49 \text{ dB}$  a adaptačný činiteľ spektra  $C_1 = -4 \text{ dB}$  [10].

Požadovaná vážená normalizovaná hladina akustického tlaku pre všetky miestnosti druhých bytov podľa normy [1] je  $L'_{n,w} = 55$  dB. Z posúdenia zhody výsledkov merania vyplýva, že kroková nepriezvučnosť stropnej konštrukcie s podlahou medzi miestnosťami bytov na 1.NP a 2.NP spĺňa požiadavku normy.

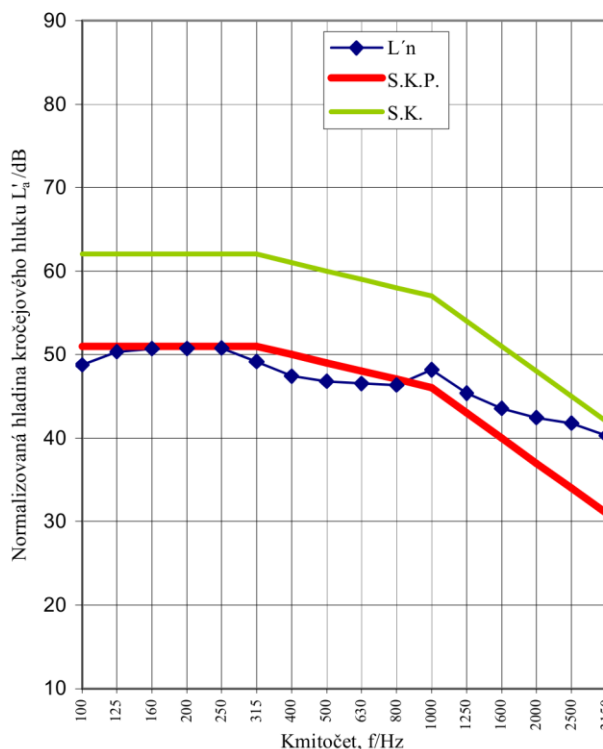
$f$	$T$	$L'_i$	$L'_n$	S.K.P.
Hz	s	dB	dB	dB
50				
63				
80				
100	0,38	48,7	48,8	51
125	0,22	47,9	50,3	51
160	0,35	50,3	50,7	51
200	0,35	50,4	50,7	51
250	0,3	49,7	50,8	51
315	0,28	47,8	49,2	51
400	0,32	46,6	47,4	50
500	0,28	45,4	46,8	49
630	0,27	45,0	46,5	48
800	0,27	44,8	46,3	47
1000	0,27	46,7	48,2	46
1250	0,27	43,8	45,3	43
1600	0,28	42,2	43,5	40
2000	0,27	40,9	42,5	37
2500	0,26	40,1	41,8	34
3150	0,26	38,6	40,3	31
4000				
5000				

$X$  korigované hodnoty

$f$  kmitočet

$T$  doba dozvuku

$L'_i$  hladina akustického tlaku kročejového zvuku



$L'_n$  normalizovaná hladina ak. tlaku kročejového zvuku

$L'_{n,w}$  vážená normalizovaná hladina ak. tlaku kročejového zvuku

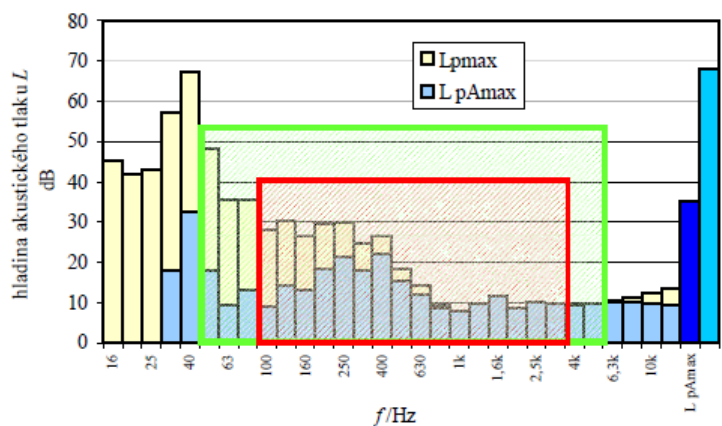
Obrázok 2. Výsledky merania krokovej nepriezvučnosti stropnej konštrukcie s podlahou [10].

### 3.2 Meranie imisii hluku prenikajúceho stropnou konštrukciou pri chôdzi

Z rozdielu nameraných vážených hladín akustického tlaku ( $L_{Cmax} - L_{Amax} \geq 20$  dB) v obytnej miestnosti bytu na 1. NP vyplýva, že hlučnosť pri chôdzi s dupaním má nízkofrekvenčný charakter. Z tretinovo-oktávovej analýzy hluku (obrázok 3) vyplýva, že spektrum kročejového zvuku (hluku) je sústredené v oblasti nízkych frekvencií 31,5 Hz až 40 Hz a nameraná max. hladina akustického tlaku  $L_{pmax} = 67,4$  dB pri str. frekvencii 40 Hz [10].

Z porovnania s hladinou prahu počuteľnosti  $L_{PS}$  v oblasti nízkych frekvencií (10 Hz až 160 Hz), napr. podľa nariadenia vlády ČR č. 272/2011 Sb. [11], vyplýva, že krokový hlučnosť je počuteľný z dôvodu prekročenia hladiny prahu počuteľnosti na frekvencii 40 Hz, kde  $L_{PS} = 49$  dB. Prekročenie prahu počuteľnosti znamená, že krokový hlučnosť môže byť obyvateľmi bytu na 1. NP "subjektívne" vnímaný ako obťažujúci a vo večernom čase (po 22:00) môže rušiť spánok.

$f$	$L_{pmax}$	$L_{pAmax}$	$U_{pmax}$
Hz	dB	dB	dB
16	45,3	-	4,3
20	42,0	-	6,9
25	43,0	-	5,4
31,5	57,4	18,0	1,9
40	67,4	32,8	1,0
50	48,2	18,0	2,1
63	35,8	9,6	1,4
80	35,8	13,3	1,0
100	28,3	9,2	3,3
125	30,4	14,3	1,1
160	26,7	13,3	2,3
200	29,5	18,6	1,8
250	30,0	21,4	1,1
315	24,8	18,2	1,0
400	26,7	21,9	3,7
500	18,5	15,3	1,3
630	14,1	12,2	1,3
800	9,6	8,8	1,1
1k	8,0	8,0	1,1
1,25k	9,3	9,9	1,9
1,6k	10,7	11,7	1,2
2k	7,6	8,8	1,0
2,5k	8,8	10,1	1,0
3,15k	8,6	9,8	1,0
4k	8,4	9,4	1,0
5k	9,3	9,8	1,0
6,3k	10,5	10,4	1,0
8k	11,3	10,2	1,0
10k	12,4	9,9	1,0
12,5k	13,6	9,3	1,0
$L_{pAmax}$	35,2		1,4
$L_{pCmax}$	68,1		1,8



- oblasť hodnotení stavebných konštrukcií
- oblasť rozšíreného kmitočtového rozsahu

$$L_{pCmax} - L_{pAmax} \geq 20 \text{ dB} \Rightarrow \text{jedná sa o nízkofrekvenčný hluk}$$

Obrázok 3. Tretino-oktávová analýza hluku [10].

V prílohe č. 1 k nariadeniu vlády ČR č. 272/2011 Sb. [11] je však uvedené, že na hluk spôsobený používaním obytných miestností sa nevzťahujú hygienické limity pre chránené vnútorné priestory.

Vo vyhláske MZ SR č. 549/2007 Z. z. [2], hluk prenikajúci z aktivity ľudí do susediacich bytov alebo hluk prenikajúci z prevádzky technických zariadení je charakterizovaný ako „hluk z vnútorných zdrojov“. Určujúcou veličinou hluku z vnútorných zdrojov, tzn. aj aktivity ľudí je maximálna hladina A akustického tlaku  $L_{Amax}$  a prípustné hodnoty sú stanovené pre deň, večer a noc.

#### 4 Záver

Pri posudzovaní krokovej nepriezvučnosti v budovách na bývanie je nutné prihliadať aj na skutočnosť, že krokový hluk spôsobený aktivitami ľudí – chôdzou po podlahe, pádom predmetov na podlahu, posúvaním predmetov po podlahe je náhodný s impulzným charakterom a jeho akustické spektrum je najmä v oblasti nízkych frekvencií (pod 50 Hz).

Preto, zabezpečiť akustickú pohodu medzi priestormi (miestnosťami) bytov vo viacpodlažných budovách s nosnými betónovými konštrukciami znamená, už v štádiu prípravy projektovej dokumentácie alebo rekonštrukcie podláh venovať pozornosť najmä vrstvám podlahy a ich materiálovej skladbe, pretože rozhodujú o hodnote vázenej normalizovanej hladiny akustického tlaku krokového zvuku  $L'_{n,w}$ .

Uvedené metódy merania nepriezvučnosti stropných konštrukcií v podmienkach „in situ“ sú náročné na spracovanie veľkého objemu údajov a na zabezpečenie dostatočného odstupu meraného signálu od hluku pozadia.

V súčasnosti sa na meranie vzduchovej nepriezvučnosti a času dozvuku aplikuje MLS (Maximum-Legth-Sequence) metóda [12]. Táto metóda je založená na binárnych pseudostochastických signáloch s autokorelačnou funkciou a tým umožňuje realizovať meranie pri vyššom hluku pozadia a s nižším budením (nižšom výkone zosilňovača) aj v prípade stavebných konštrukcií s veľmi vysokými hodnotami  $R'_w$ .

V niektorých krajinách EÚ prebieha aj diskusia o modifikácii tvaru smernej krivky krokovej nepriezvučnosti a o úprave pravidla o súčet nepriaznivých odchýlok [13].

## Odkazy

- [1] STN 73 0532: 2013 *Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky*
- [2] 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 znení vyhlášky MZ SR č. 237/2009 Z. z.*
- [3] EN ISO 104-4: 2001 *Akustika. Meranie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 4: Meranie vzduchovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami v budovách*
- [4] EN ISO 140-7: 2001 *Akustika. Meranie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 7: Meranie krokovej nepriezvučnosti stropných konštrukcií v budovách*
- [5] EN ISO 3382-2: 2009 *Akustika. Meranie akustických vlastností. Časť 2: Čas dozvuku v typických miestnostiach*
- [6] EN ISO 717-1: 2013 *Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť*
- [7] EN ISO 717-2: 2013 *Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 2: Kroková nepriezvučnosť*
- [8] KAŇKA J.: *Akustika stavebných objektů*, Vydavatelství ERA Brno, 2009
- [9] FIŠAROVÁ Z. a kol.: *Řešení detailu ukončení nášlapné vrstvy podlahy u soklu z pohledu historie i současnosti*. AKUSTIKA, Volume 35, Masch 2020.
- [10] BERKOVÁ P: *Predikce zvukoizolačních vlastností dělicích stavebních konstrukcí a zabezpečení akustické pohody v interiéru budov*. Disertační práce. Brno 2012
- [11] Nařízení vlády ČR č. 272/2011 Sb. o ochrane zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací v znení nařízení vlády ČR č. 217/2016 Sb.
- [12] [online] [http://www.nvo.com/winmls/nss-folder/training/Swept1 sineAndMLS\\_Lar-sMorset.doc](http://www.nvo.com/winmls/nss-folder/training/Swept1 sineAndMLS_Lar-sMorset.doc)

[13] HAGBERG, *Evaluation Field Measurements of Impact Sound*, Journal of BUILDING ACOUSTICS. Volume 17. Numer 2. 2010. Department of Engineering Acoustics, Lund University. strany 105 – 128.

### Summary

**Sound insulation measurement of ceiling structures.** This paper presents methods for the measurement of airborne sound insulation and impact sound insulation including determination of single-digit quantities that characterize the sound isolation of ceiling structures in residential buildings according to the relevant technical standards. The article also presents an example of impact sound measurement caused by human activities and a method of assessing the conformity of measurement results according to regulations for the health protection from the noise in the Czech Republic and the Slovak Republic.

### Keywords

Horizontal constructions sound insulation; airborne sound insulation; impact sound insulation; standardized noise source.

### Adresa autorov

Richard Drahoš  
D2R engineering, s.r.o.  
Na letisko 42  
058 01 Poprad  
richard.drahos@d2r.sk  
<https://www.d2r.sk>

Milan Drahoš  
D2R engineering, s.r.o.  
Na letisko 42  
058 01 Poprad  
milan.drahos@d2r.sk  
<https://www.d2r.sk>

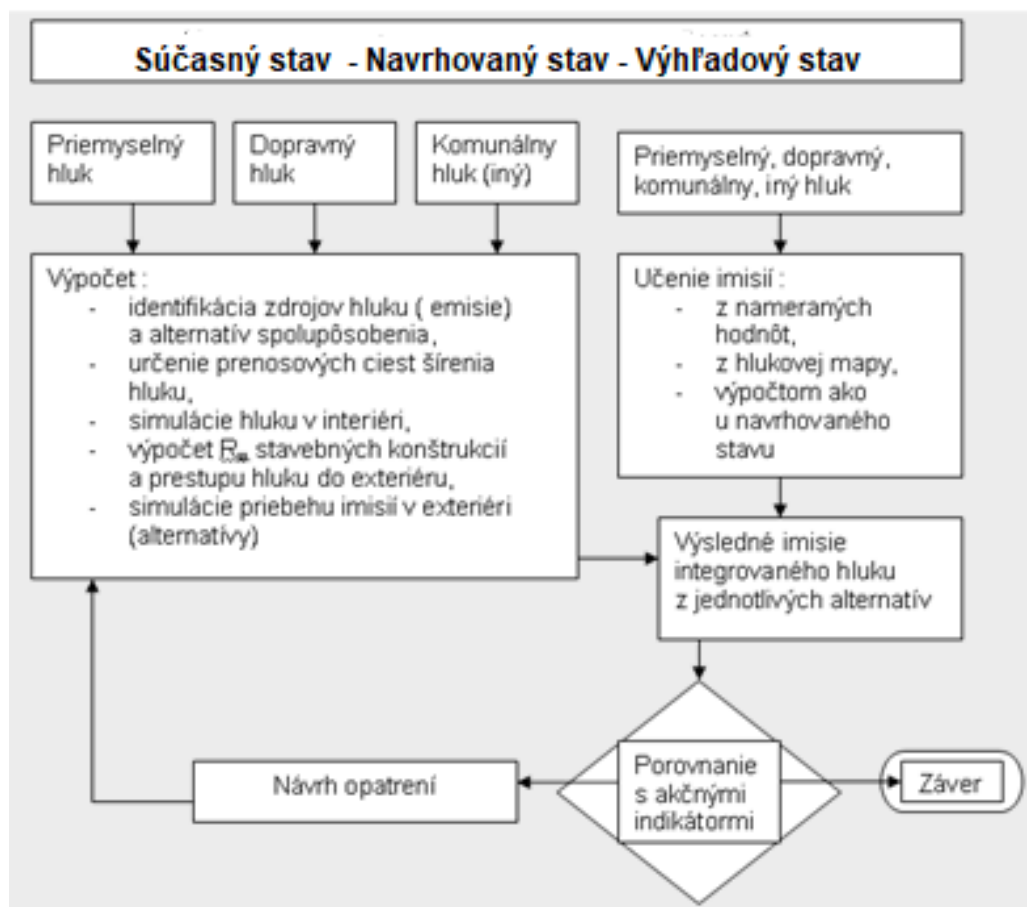


## RIZIKÁ PRI SPRACOVANÍ HLUKOVEJ ŠTÚDIE PRE ÚZEMNÉ ROZHODNUTIE

Marián Flimel

### 1 Úvod

Povoľovanie stavieb v rámci stavebného zákona si vyžaduje splnenie viacerých požiadaviek. Patrí medzi nich aj hodnotenie vplyvov stavby na okolie. Z hľadiska environmentálnej politiky je potrebné spracovanie i hlukových štúdií. Hluková štúdia slúži na predikciu hluku v životnom prostredí a je súčasťou EIA – posudzovania vplyvov na životné prostredie, alebo súčasťou projektovej dokumentácie stavby k územnému rozhodnutiu, či k stavebnému povoleniu. Riešenie projektovej dokumentácie musí zohľadniť územno – plánovaciu dokumentáciu lokality a preto spracovanie hlučkovej štúdie je v predprojektovej príprave alebo pre projekt na územné rozhodnutie. Riešenie hmoty stavby a jej architektúry v súlade s požiadavkami investora (developer) a verejnoprávnych inštitúcií býva v tomto štádiu v hrubých rysoch, bez detailov prevádzky budovy a jej zdrojov hluku, ktoré by usmerňovali optimálne riešenie hlučkovej štúdie. Takto vznikajú pri spracovaní hlučkovej štúdie riziká, ktoré budú analyzované v ďalšej časti.



Obrázok 1. Postup spracovania hlučkovej štúdie pre územné rozhodnutie.



## 2 Prehľad možných rizík pri spracovaní hlukovej štúdie

Hluková štúdia je vypracovávaná pre rôzne časové etapy: súčasný stav, navrhovaný a výhľadový stav a z týchto alternatív sú ďalšie variácie výpočtov pre jednotlivé referenčné časy deň, večer a noc. Pre tento druh dokumentácie sa posudzujú vonkajšie zdroje hluku, či už dopravný alebo iný hluk (priemyselný), ktorého zdroje môžu byť i na fasáde či streche budovy. Riziká vznikajúce pri spracovaní hlukovej štúdie v štádiu PD na územné konanie môžu byť nasledujúceho charakteru:

- 1) obsahové,
- 2) formálne,
- 3) časové,
- 4) realizačné,
- 5) verifikačné.

Obsahové riziká spočívajú v neznalosti jednotlivých vstupov potrebných pre spracovanie hlukovej štúdie. Príkladom môže byť:

- neznalosť intenzity dopravy na komunikáciách, resp. nepresné meranie intenzity, ak nie sú údaje z celoštátneho sčítania dopravy resp. iné relevantné údaje,
- neznalosť zdrojov hluku z technického vybavenia budovy, nakoľko v tomto stupni ešte nie sú presne špecifikované nové zdroje hluku, napr. tepelné čerpadlá, klimatizačné jednotky, výstupy na fasáde atď., a ich miesto osadenia sa len predpokladá. U zdrojov priemyselného hluku nie sú známe spektrálne charakteristiky pre možnú penalizáciu na tónovú zložku hluku. Ak aj údaje o zdrojoch hluku sú, často sú to len hladiny akustického tlaku a nie hladiny akustického výkonu. Často nie je známa aj expozičná doba pôsobenia týchto zdrojov hluku,
- problémom býva aj hodnotenie blízkych jestvujúcich zdrojov hluku, ktorých emisie sa môžu podieľať na celkových hodnotách imisií,
- často je problematický aj nesprávny výklad legislatívnych nariadení potrebných k posúdeniu výsledkov hlukovej štúdie,
- po spracovaní hlukovej štúdie sa môžu vyskytnúť otázky a pripomienky odberateľa či regionálneho úradu verejného zdravotníctva.

Formálne riziká sú charakterizované nedostatkom podkladov potrebných k spracovaniu hlukovej štúdie, ktoré si musí spracovateľ zamerať a zadovážiť, napr. mapové podklady, rozmery okolitej zástavby. Rizikom je aj práca na zastaraných softvéroch, resp. nedokonalé ovládanie manuálu.

Časové riziká určuje nedostatok času pre získavanie potrebných podkladov a času na spracovanie hlukovej štúdie z dôvodu požadovaných skorých termínov dodania.

Riziká realizačného charakteru spočívajú v tom, že realizácia ďalších stupňov projektu sa od pôvodného projektu pre územné rozhodnutie môže líšiť/líši a nie je požiadavka na spracovanie novej hlukovej štúdie.

Riziká verifikačné – po ukončení stavby, ak dôjde k meraniam imisií hladín hluku a veľkým rozdielom medzi hodnotami uverejnenými v hlukovej štúdiu, môže to byť spôsobené rôznymi príčinami: nesprávnou predikciou, zmenou prevádzkových podmienok voči predpokladom v štúdiu, zmenou pôvodnej projektovej dokumentácie a faktorom času.

Poistkou spracovateľa pre dané riziká by mohla byť tzv. výpočtová rezerva, ktorá je súčasťou sčítanca  $\Delta$  vo vzťahu (1). Pri zohľadnení horeuvedených rizík v skupinách 1 - 5 je výpočtová

rezerva určená pre hodnotenú hladinu hluku  $L_{Aeq,p}$ , alebo prepočítanú expozičnú hodnotu  $L_{EX,8h}$ .

$$L_{Aeq,p} \geq L_{Aeq,x} + \Delta \quad [dB] \quad (1)$$

$$\Delta = k_I + k_T + k_S + U_M + k_{REZ} \quad (2)$$

$L_{Aeq,p}$  je prípustná hodnota určujúcej veličiny hluku v prostredí,

$L_{Aeq,x}$  je vypočítaná hodnota v posudzovanom bode,

$k_I$  je korekcia (penalizácia) na impulzovosť hluku,

$k_T$  je korekcia (penalizácia) na tónový a informatívny obsah spektra hluku,

$k_S$  je korekcia (pozitívna alebo negatívna) pre určité zdroje a situácie,

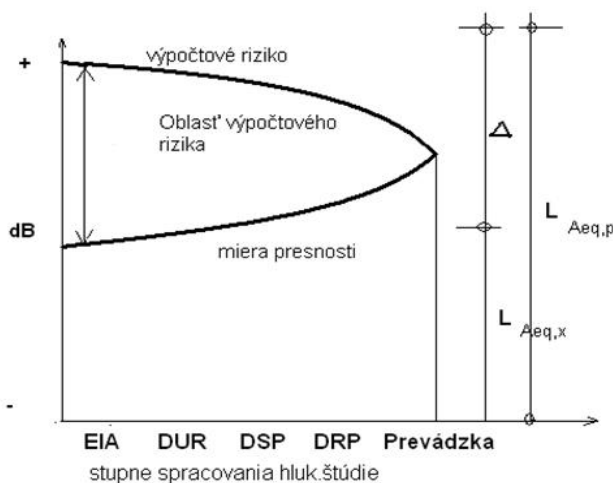
$U_M$  je neistota merania stanovená v súlade s metrologickou praxou,

$k_{REZ}$  je hodnota výpočtovej rezervy pre daný stupeň spracovania hlukovej štúdie,

$\Delta$  je súčet korekcií a neistoty merania.

Životný cyklus budovy a okolitého prostredia od jej návrhu cez realizáciu a prevádzkovanie prebieha v jednotlivých fázach uvedených v legende k obrázku 2. Medzi dvoma susednými stupňami môžu nastať rôzne výsledné hodnoty v hodnotených bodoch  $L_{Aeq,x}$  a tieto rozdiely medzi nimi môžu byť:

- rovnomerné – rovnaké prírastky resp. úbytky vo výpočtovej hodnote,
- nerovnomerné – nerovnaké prírastky resp. úbytky, alebo sa hodnota nezmení.



**Obrázok 2.** Oblasť výpočtového rizika pri spracovaní hlukovej štúdie.

Legenda k obrázku 2 pre stupne spracovania hlukovej štúdie:

EIA – posudzovanie vplyvov na životné prostredie

DUR – dokumentácia na územné rozhodnutie

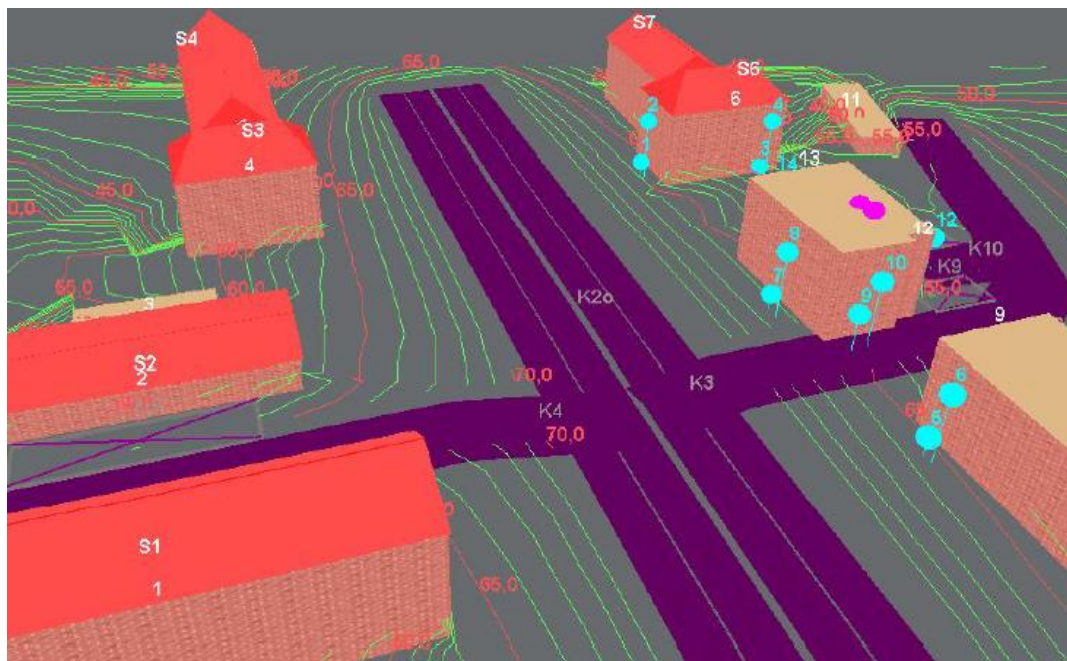
DSP – dokumentácia na stavebné povolenie

DRP – dokumentácia realizačného projektu

Prevádzka – prevádzkovanie, skutočná stav imisií hluku v životnom prostredí

Predložený spôsob identifikácie rizika pri projektovom posudzovaní z hľadiska optimálnej voľby výpočtovej rezervy závisí od konkrétneho spracovateľa hlukovej štúdie. Spracovateľ si volí mieru výpočtovej tolerancie zohľadňujúcej veľkosť rizika -  $k_{REZ}$ . Platia nasledujúce závislosti:

- Čím je nižší stupeň spracovania hlukovej štúdie, tým vyššiu hodnotu sumárnej výpočtovej rezervy je potrebné zvoliť.
- Vyššia výpočtová rezerva však vyžaduje viac opatrení na zníženie hladín hluku (napr. zvýšenú vzduchovú nepriezvučnosť obvodových plášťov vo vzťahu k požiadavkám v chránených priestoroch v exteriéri, či riešenie pohltivého podhľadu na pracoviskách atď.), čo sa prejaví vo zvýšených investičných nákladoch.
- Čím menej stupňov spracovania hlukovej štúdie je možné predpokladať, tým vyššiu hodnotu výpočtovej rezervy je potrebné zvoliť, ak je spracovanie v predprojektových stupňoch (EIA, DUR) a nižšiu hodnotu pri projektových stupňoch (DSP, DRP).



Obrázok 3. Príklad grafického výstupu z hlukovej štúdie.

### 3 Záver

Riziká pri posudzovaní vonkajšieho hluku pri hlukovej štúdii pre územné rozhodnutie sú ďalej závislé aj od spôsobu výstavby a to či sa jedná o novostavby, rekonštrukcie v zastavanom území resp. etapovitost' výstavby.

Cesty vedúce k eliminácii rizík pri predikcii hluku spočívajú na samotnom tvorcovi hlukovej štúdie a prostriedkoch, s akými pracuje. Tieto možno zhrnúť do nasledovných bodov:

- presne špecifikovať vstupy (zdroje hluku, konštrukcie, lokalizácia) a v hlukovej štúdii uviesť podklady, z ktorých výpočet vychádzal,
- presne špecifikovať podmienky a výpočet realizovať na najhoršie okrajové podmienky (noc, súčasnosť pôsobenia zdrojov hluku, maximálna vyťažiteľnosť zdrojov a pod.),
- využívať osvedčené výpočtové postupy STN, ISO a softvérov,
- oboznámiť členov spracovateľského kolektívu projektu ako do ďalších stupňov projektu implementovať technické podmienky, na základe ktorých je kladný výstup hlukovej štúdie. Tieto podmienky je potrebné uviesť v závere práce aj ako výstup pre investora.

Často sa stáva, že projektant – akustik nie je prizvaný na realizáciu ďalšieho stupňa projektovej dokumentácie resp. k účasti na autorskom dozore pri realizácii stavby, čím môže

dôjsť k rizikám spomínaným v tomto príspevku. Dlho pripravovaný nový stavebný zákon možno tieto riziká odstráni.

### **Literatúra**

DRAHOŠ,R., DRAHOŠ,M.: The reference method for assesing audibility of tonal components in noise spectrum,, in. Akustika, March 2019

FLIMEL, M.: Hodnotenie hlukovej záťaže v životnom prostredí, TU v Košiciach, 2014

FLIMEL, M.: Manažment hluku v pracovnom prostredí, TU v Košiciach, 2013

FLIMEL, M.: komerčné zákazky

CHLEBO, O., ŽIARAN, S.: Reduction of tonal noise in residential buildings, in. Akustika, March 2019

### **Summary**

The paper deals with the risks that occur during the preparation of a noise study for a zoning decision. It points out the individual risks and recommends the application of the so-called calculation reserve. Finally, recommendations for risk elimination are given.

### **Keywords**

Hluková štúdia; riziká; územné rozhodnutie.

### **Contact Address**

Marián Flimel

Fakulta výrobných technológií TUKE so sídlom v Prešove

Katedra procesnej techniky

Štúrova 31

080 01 Prešov

marian.flimel@tuke.sk



## TEPELNO-VLHKOSTNÉ VLASTNOSTI DIFÚZNEJ PANELOVEJ STENY S PAROBRZDOU NA BÁZE PAPIERA

Stanislav Jochim, Patrik Štompf

### 1 Úvod

Stavebníctvo sa v súčasnej dobe čoraz viac uberá smerom k čo najväčším úsporám energií a teda k výstavbe nízkoenergetických a pasívnych budov, resp. budov s takmer nulovou potrebou energie. Voľba drevenej konštrukcie sa rovná voľbe úspory energie a energetickej hospodárnosti budovy (KOLB, 2011).

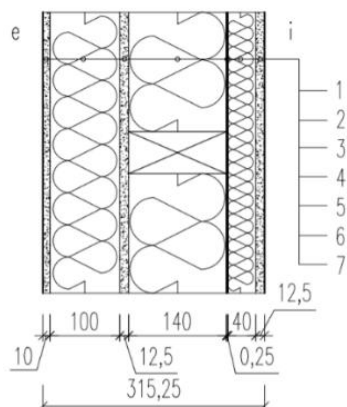
Popri voľbe drevenej nosnej konštrukcie je rozhodujúci aj návrh skladby obvodového plášťa budovy – výber materiálového zloženia a vplyv na tepelno-technické vlastnosti konštrukcie a spoľahlivosť z hľadiska stavu vlhkosti na povrchu a vo vnútri konštrukcie. Na vlhkostné vlastnosti konštrukcií na báze dreva majú vplyv aj druhy použitých materiálov, ich hrúbky a poradie jednotlivých vrstiev. Kontrolu stavu vlhkosti v konštrukcií zabezpečujú parozábranné alebo parobrzdne vrstvy z interiérovej strany. V drevených konštrukciách je z hľadiska kontroly stavu vlhkosti vhodnejšie použitie parobrdz a izolácií na prírodnej báze, ktoré majú vzhľadom k vlhkosti dobré hygroskopické redistribučné vlastnosti. V difúzne otvorených konštrukciách sú vhodné napr. parobrzdny na báze papiera, drevovláknité izolácie rôzneho typu a ich vhodné kombinácie s inými materiálmi na prírodnej báze.

Pre celú skladbu obvodovej steny drevostavby je dôležité, aby splnila tepelno-technické požiadavky platnej 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. Príspevok je zameraný na:

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

### 2 Skladba panelovej steny na báze dreva

Pre teoreticko-experimentálne overenie tepelno-technických a vlhkostných vlastností bol zhotovený fragment konštrukcie WHC ultra D1\_R s parobrzdou na báze papiera (Obrázok 1.)



**Obrázok 1.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_R. Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – opláštenie: RigiStabil, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – parobrzdna fólia ISOCELL ÖKO NATUR, 6 – inštalčný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: RigiStabil.

### 3 Metodika overovania tepelno-technických a vlhkostných vlastností

#### 3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností

Analýza tepelno-technických vlastností skladby panelovej 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 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.

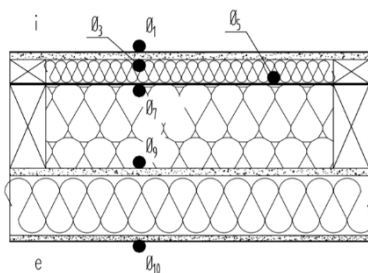
P. č.	Materiál	Objemová hmotnosť $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]		Merná tepelná kapacita $c$ [J/(kg.K)]	Faktor difúzneho odporu $\mu$ [1]	Zdroj
			návrhový	deklarovaný			
1.	Mäkké drevo	500	0,13	0,12	1 600	50 (20)	STN EN 10456
2.	STEICO flex (drevovláknitá 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.	ISOVER UNIROL PLUS (sklená vlna)	20	0,038	0,036	840	1	Technický list
5.	RIGISTABIL	840	0,15	0,142	960	> 12	Technický list
6.	ISOCEL ÖKO NATUR (na báze papiera)	740	0,35	0,35	1 500	25 800 <sup>(1)</sup>	Technický list
7.	Capatect Minera Carbon Staubarm – tmel <sup>(2)</sup>	1 350	0,53	0,50 <sup>(3)</sup>	890	≤ 55	Technický list
8.	Capatect SH Putz – silikónová omietka	1 600	0,73	0,7	900	50	Technický list

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> faktor difúzneho odporu ( $\mu$ ) pre ISOCELL ÖKO NATUR je vypočítaný (podľa  $S_d = 6,45$  m)  
<sup>(2)</sup> minerálny tmel Capatect Minera Carbon je použitý ako podklad pod minerálnu omietku (lepidlo)  
<sup>(3)</sup> hodnota je navýšená o 10 % oproti hodnote, ktorú udáva výrobca

#### 3.2 Experimentálne meranie vlhkostného stavu a teplôt v konštrukcii

##### 3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v rámci sledovaného obdobia, ktoré trvalo od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020, boli vykonávané v pravidelných časových intervaloch. Počas celého sledovaného obdobia sa prostredníctvom snímačov a 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. Testoval sa fragment panelovej steny s rozmermi 1,2 x 1,2 m (Obrázok 2.), zabudovaný v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu  $20 \pm 1$  °C a relatívnou vlhkosťou vzduchu  $50 \pm 5$  %. Z vonkajšej strany na fragment konštrukcie pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



**Obrázok 2.** Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie WHC ultra D1 R. Snímače na meranie teploty:  $\theta_1 - \theta_{10}$ , snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu:  $\theta_9$ .



**Graf 1.** Exteriérová teplota a relatívna vlhkosť vzduchu (celé obdobie merania).

### 3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách

- Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T): meranie vlhkosti v smere vlákien – rošt, stĺpik.
- Gravimetrická metóda: všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote  $103 \pm 2$  °C podľa STN EN 322.
- 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 z 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 exteriérová teplota bola  $-10,27$  °C a relatívna vlhkosť vzduchu sa pohybovala okolo 99,7 %.

## 4 Výsledky

### 4.1 Teoretická analýza tepelno-technických vlastností

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



**Tabuľka 1.** Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (ISOVER fragment)

Konštrukcia	Súčiniteľ prechodu tepla U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Tepelný odpor R <sub>o</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Povrchová teplota konštrukcie θ <sub>si</sub> [° C]	Vodná para [kg/(m <sup>2</sup> .rok)]		Fázový posun Ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenzované množstvo g <sub>k</sub>	Ročná bilancia g <sub>k</sub> - g <sub>v</sub>		
WHC ultra D1_R	0,151 <sup>(2)</sup>	6,467	19,396	0,06660 <sup>(1)</sup>	-3,92388	13,626	208,888

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> v skladbe dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie (pod fasádnu omietku)  
<sup>(2)</sup> zohľadnený vplyv tepelných mostov: percentuálnym podielom rámu vzhľadom k charakteristickému fragmentu konštrukcie

Pre komplexné hodnotenie detailov navrhnutých konštrukcií (aj s tepelnými mostami) boli jednotlivé skladby analyzované programom AREA. V Tabuľke 3. sú vypočítané tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti konštrukcie WHC ultra D1\_R.

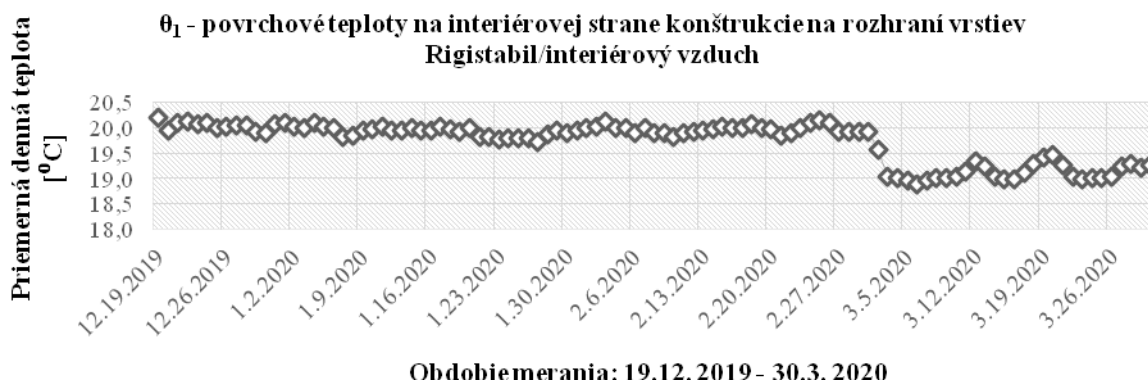
**Tabuľka 2.** Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (AREA)

Prostredie	Teplota T [° C]	Teplota rosného bodu T <sub>w</sub> [° C]	Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]	Minimálna povrchová teplota T <sub>s, min</sub> [° C]	Hustota tepelného toku z prostredia Q [W/m] <sup>(1)</sup>	Tepelná priepustnosť L [W/m.K] <sup>(2)</sup>
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,21	6,41595	0,18331
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,41612	0,18332

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> Hustota tep. toku [Q]: hustota tepelného toku z daného prostredia (hodnota je vztiahnutá na 1 m dĺžky tep. mostu - strata je kladná, zisk záporný),  
<sup>(2)</sup> 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

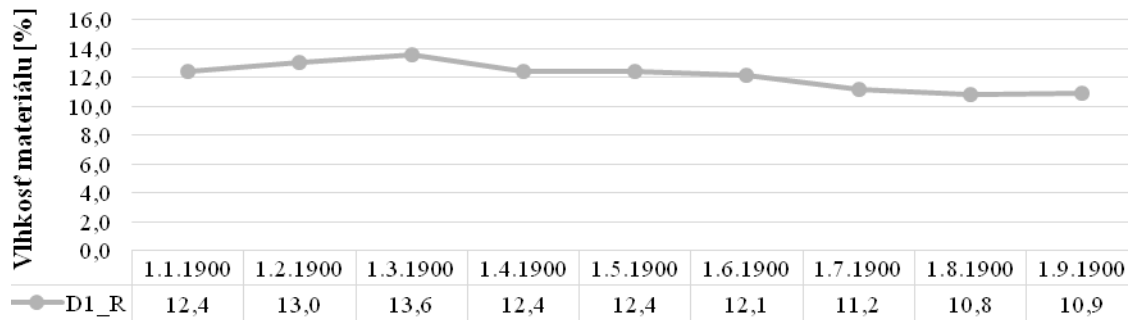
Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútornej povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach. Pribeh vnútornej povrchovej teploty konštrukcie za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.



**Graf 2.** Pribeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcie WHC ultra D1\_R.

Grafy 3. – 5. zobrazujú priebehy vlhkosť nosnej konštrukcie panelu (KVH), inštaláčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte (ISOVER UNIROL) počas celého obdobia.

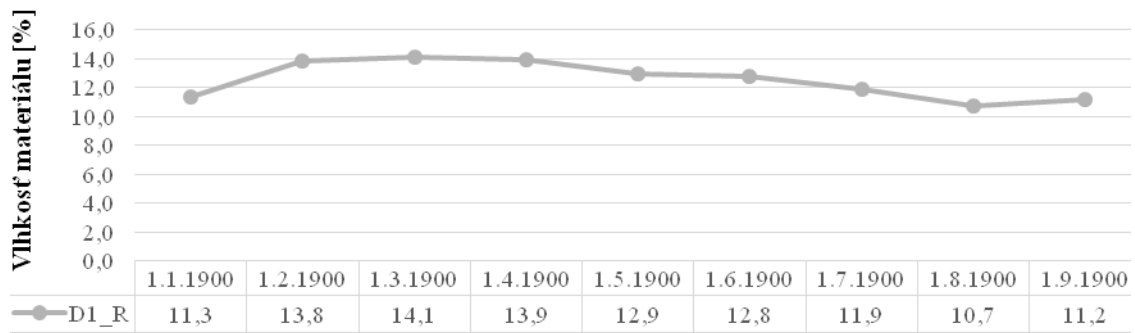
Vlhkosť nosnej konštrukcie- KVH



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

Graf 3. Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH (%).

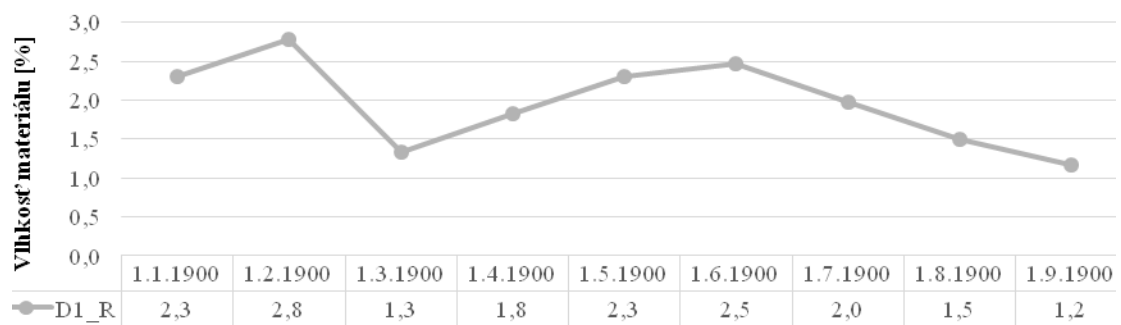
Vlhkosť inštaláčného roštu - SM



Obdobie merania: 19.12.2019 - 20.3.2020

Graf 4. Vlhkosť inštaláčného roštu – SM (%).

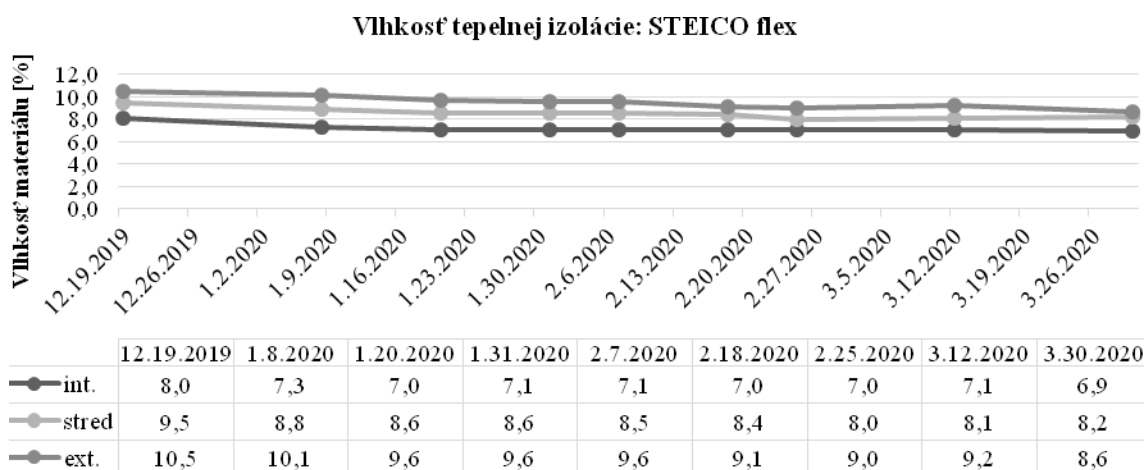
Vlhkosť tepelnej izolácie: ISOVER UNIROL



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

Graf 5. Vlhkosť tepelnej izolácie v rošte – ISOVER UNIROL (%).

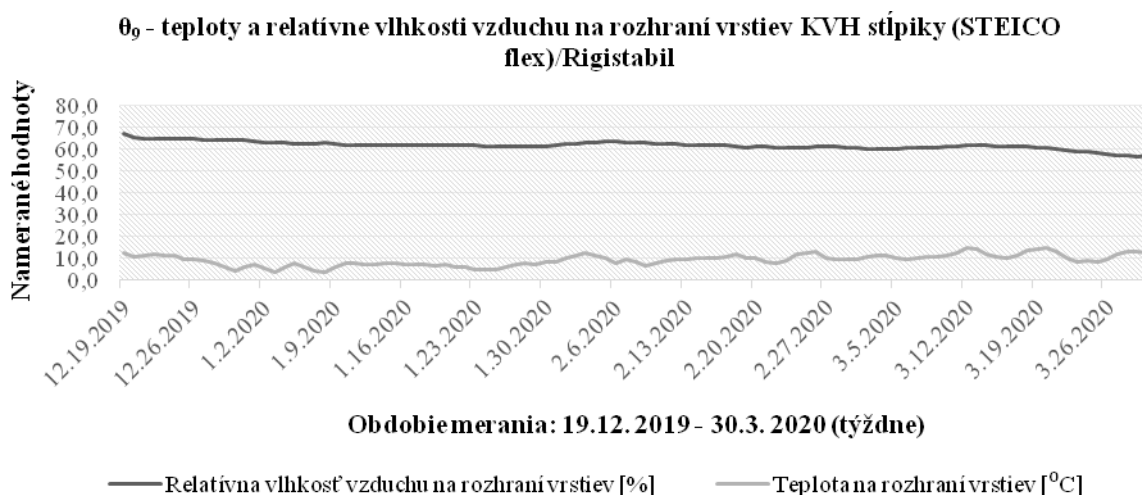
Na Grafe 6. je zobrazený priebeh vlhkosti tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmente konštrukcie WHC ultra D1\_R za parobrzdnu fóliou (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave naprieč touto vrstvou rozdelená na tri rovnaké časti po hrúbke vrstvy.



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

**Graf 6.** Vlhkosť medzistúpkovej tepelnej izolácie STIECO flex (%)

Na Grafe 7. je zobrazený priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stúpkiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.



**Graf 7.** Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu na rozhraní vrstiev: stúpkiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie.

## 5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností vyplýva nasledovné:

1. Skladba panelovej obvodovej steny na báze dreva (Tabuľka 1.) spĺňa všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti podľa STN 73 0540-2.
2. Podľa výpočtu oboch programov dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepl'ovacieho systému (pod vrstvou fasádnej omietky) ale ročná bilancia skondenзованej a odparenej vlhkosti je priaznivá a spĺňa požiadavku normy na maximálne ročné skondenзованé množstvo vodnej pary v konštrukcii. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácie v tejto vrstve bezprostredne ohrozená. 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 teplotou rosného bodu za daných výpočtových podmienok.

Z experimentálnych meraní vlhkosti 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 taktiež 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.) môžeme zhodnotiť, že vlhkosťný stav sa za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktoré výrazne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti ( $\lambda$ , R) tepelnej izolácie a nevytvára priaznivé podmienky pre rozvoj a aktivitu drevokazných húb, plesní a škodcov, ktoré by mohli narušiť jej správnu funkčnosť.
3. Priemerná teplota na rozhraní vrstiev: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie, nameraná 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 preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti a funkčnú spoľahlivosť posudzovanej panelovej konštrukcie s parobrzdou na báze papiera.

Parobrzda ISOCELL na báze papiera z interiérovej strany konštrukcie okrem spomalenia procesu vnikania vlhkosti do konštrukcie plní aj funkciu vzduchotesnej roviny.

Z hľadiska exaktnejšieho poznania stavu vlhkosti jednotlivých konštrukčných materiálov v skladbe a účinnosti vplyvu parobrzdy je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najlepšie s čo najväčším a dlhodobým teplotným rozdielom vonkajších a vnútorných parametrov vzduchu počas zimného obdobia.

## 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 firmami WHC s.r.o. a Inardex s.r.o.

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. VEGA 1/0729/18. "Hydro-termické, nano-chemické a biologické modifikácie drevených materiálov s cieľovou zmenou ich štruktúry a vlastností".

## Literatúra

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

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

CHMÚRNÝ, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7

ŠTOMPF, P. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosť stav panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 91 strán, 2 prílohy

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

VIDHOLDOVÁ, Z. – REINPRECHT, L. – KROKOŠOVÁ, J. 2015.: Náchylnosť dreva na mikrobiálnu kontamináciu baktériami a plesňami. In Zborník príspevkov z konferencie CSTI 2015 Conservation science, technology and industry: vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou. 2016. s. 307--314. ISBN 978-80-8060-377-9.

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.

## Summary

**Thermal – diffusional properties of external diffuse wood-based prefabricated panel walls with vapour-barrier based on paper.** The paper is focused on verification of thermal – diffusional properties and moisture conditions of the external prefabricated panel walls using natural insulation. The research part deals with the theoretical analysis and experimental verification of the thermo-mechanical and diffusional characteristics one type of perimeter wall – with a paper-based vapour barrier. The goal was theoretical and experimental determination of proper function and its reliability in terms of moisture transport/content influenced by vapour barrier, under real climatic conditions.

## Keywords

Wooden constructions; wood-based perimeter walls; thermo-mechanical properties; moisture content of materials.

## Contact Address

Stanislav Jochim, Patrik Štompf  
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, xstompf@is.tuzvo.sk

## TEPELNO-VLHKOSTNÉ VLASTNOSTI DIFÚZNEJ PANELOVEJ STENY S PAROBRZDOU NA BÁZE DREVA

Stanislav Jochim, Patrik Štompf

### 1 Úvod

Pre aplikáciu vrstiev skladieb v konštrukciách na báze dreva sú vo všeobecnosti vhodnejšie parobrzdzy, tepelné izolácie a vetrové prekážky na prírodnej báze, ktoré majú popri vhodných fyzikálnych vlastnostiach aj hygroskopické a redistribučné vlastnosti vzhľadom na prechod vodnej pary. Pre skladbu difúzne otvorenej panelovej konštrukcie obvodovej steny možno napr. využiť viac typov drevovláknitých izolácií a ich vhodných kombinácií s inými materiálmi na prírodnej báze (konope, ovčia vlna, slama, hlinené omietky a pod.). Izolačné materiály sú však prevažne vysoko paro a vzducho priepustné.

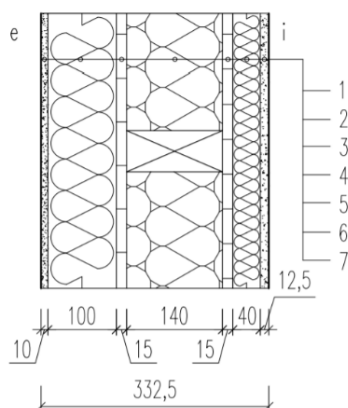
Cieľom návrhu skladby obvodovej steny je, aby splnila požadované tepelné požiadavky platnej normy ( $U$ -hodnota a pod.) a spoľahlivo bola funkčná aj z hľadiska prípustného prevádzkového stavu vlhkosti na povrchu a vo vnútri konštrukcie vplyvom kondenzácie vodných pár. Kontrolu stavu vlhkosti pri difúzne otvorených skladbách plnia aj parobrzdzy na báze dreva, napr. doska OSB3 a OSB4.

Kondenzáciu a jej bilanciu, vlhkosť materiálov ako aj relatívnu vlhkosť vzduchu v konštrukciách obvodovej steny možno teoreticky stanoviť výpočtom, ale aj overiť experimentálne v reálnych klimatických podmienkach. Príspevok je zameraný na:

- 1) Teoretickú analýzu tepelno-technických a vlhkosťových vlastností panelovej steny na báze dreva s prírodnými izoláciami a parobrzdou na báze dreva a posúdenie podľa STN 73 0540-2.
- 2) Experimentálne overenie vlhkosťového stavu materiálov panelovej steny s parobrzdou na báze dreva počas zimného obdobia.
- 3) Konfrontáciu výsledkov stavu vlhkosti z teoretickej predikcie a experimentu.

### 2 Skladba panelovej steny na báze dreva

Pre potreby merania a teoreticko-experimentálneho overenia tepelno-technických a vlhkosťových vlastností bol na základe návrhu zhotovený fragment konštrukcie WHC ultra D1\_D s OSB/3 doskou vo funkcii parobrzdzy. Skladba konštrukcie je na Obrázku 1.



**Obrázok 1.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_D. Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – opláštenie: DHF doska EGGER, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – OSB/3 doska, 6 – inštalčný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: SDK doska GKF.

### 3 Metodika overovania tepelno-technických a vlhkostných vlastností

#### 3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností

Analýza tepelno-technických vlastností skladby panelovej 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 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.

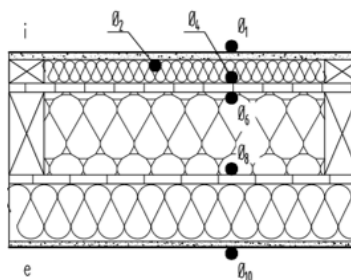
P. č.	Materiál	Objemová hmotnosť $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Súčiniteľ tepelnej vodivosti $\lambda$ [W/(m.K)]		Merná tepelná kapacita $c$ [J/(kg.K)]	Faktor difúzneho odporu $\mu$ [1]	Zdroj
			návrhový	deklarovaný			
1.	Mäkké drevo	500	0,13	0,12	1 600	50 (20)	STN EN 10456
2.	STEICO flex (drevovláknitá 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.	ISOVER UNIROL PLUS (sklená vlna)	20	0,038	0,036	840	1	Technický list
5.	SDK doska Knauf GKF	750	0,25	0,23	850	8	Technický list
6.	OSB doska EGGER (typ: OSB/3)	600	0,15	0,13	2 100	200	Technický list
7.	Capatect Minerá Carbon Staubarm - tmel <sup>(1)</sup>	1 350	0,53	0,50 <sup>(2)</sup>	890	≤ 55	Technický list
8.	Capatect SH Putz – silikónová omietka	1 600	0,73	0,7	900	50	Technický list

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> minerálny tmel Capatect Minerá Carbon je použitý ako podklad pod minerálnu omietku (lepidlo)  
<sup>(2)</sup> hodnota deklarovaného súčiniteľa tepelnej vodivosti je navýšená o 10 % oproti hodnote, ktorú udáva výrobca

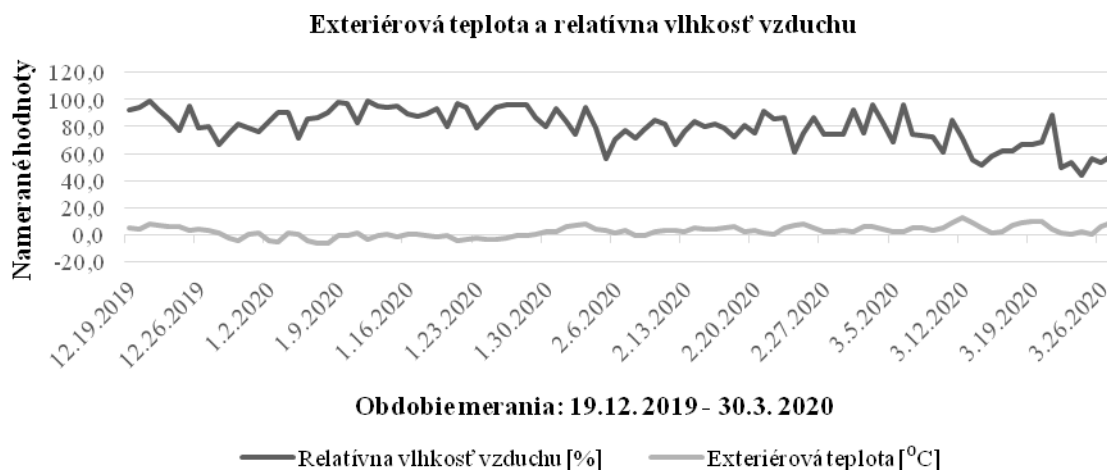
### 3.2 Experimentálne meranie vlhkostného stavu a teplôt v konštrukcii

#### 3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v rámci sledovaného obdobia, ktoré trvalo od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020, boli vykonávané v rôznych 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. Testoval sa fragment panelovej steny s rozmermi 1,2 x 1,2 m (Obrázok 2.), zabudovaný v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu  $20 \pm 1$  °C a vlhkosťou vzduchu  $50 \pm 5$  %. Z vonkajšej strany na fragment konštrukcie pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



**Obrázok 1.** Rozmiestnenie snímačov v skladbe konštrukcie WHC ultra D1\_D. Snímače na meranie teploty:  $\theta_1 - \theta_{10}$ , snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu:  $\theta_8$ .



**Graf 1.** Exteriérová teplota a relatívna vlhkosť vzduchu (celé obdobie merania).

### 3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách

1. *Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T):* meranie vlhkosti v smere vlákien – rošt, stĺpik.
2. *Gravimetrická metóda:* všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote  $103 \pm 2$  °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 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

Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností 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 [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Tepelný odpor R <sub>o</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Povrchová teplota konštrukcie θ <sub>si</sub> [° C]	Vodná para [kg/(m <sup>2</sup> .rok)]		Fázový posun Ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenzované množstvo g <sub>k</sub>	Ročná bilancia g <sub>k</sub> - g <sub>v</sub>		
WHC ultra D1_D	0,148 <sup>(2)</sup>	6,574	19,404	0,22784 <sup>(1)</sup>	-4,26991	14,888	506,701

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> v skladbe dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie (pod fasádnu omietku)  
<sup>(2)</sup> zohľadnený vplyv tepelných mostov: percentuálnym podielom rámu vzhľadom k charakteristickému fragmentu konštrukcie

Pre komplexné hodnotenie detailov navrhnutých konštrukcií (aj s tepelnými mostami) boli jednotlivé skladby analyzované programom AREA. V Tabuľke 3. sú zobrazené vypočítané tepelno-technické a vlhkosťové vlastnosti konštrukcie WHC ultra D1\_D.

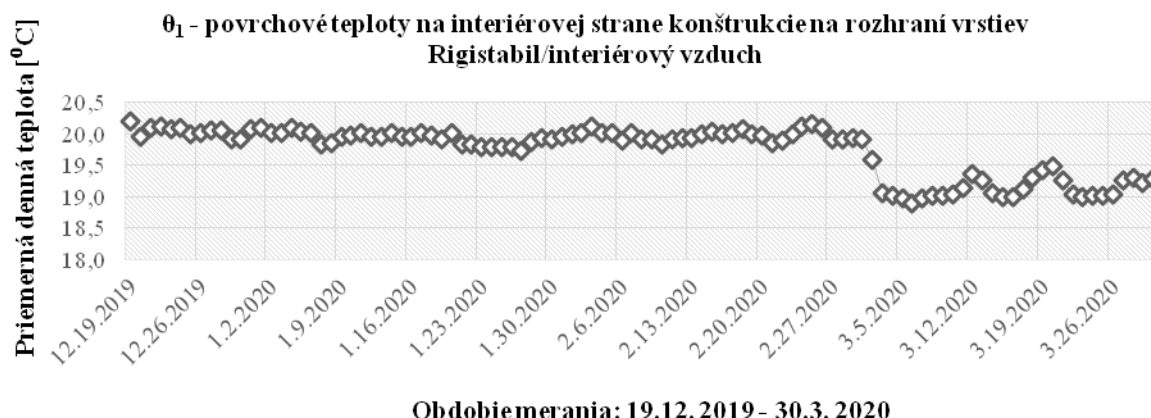
**Tabuľka 3.** Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcie (AREA).

Prostredie	Teplota T [° C]	Teplota rosného bodu T <sub>w</sub> [° C]	Relatívna vlhkosť vzduchu φ [%]	Minimálna povrchová teplota T <sub>s, min</sub> [° C]	Hustota tepelného toku z prostredia Q [W/m] <sup>(1)</sup>	Tepelná priepustnosť L [W/m.K] <sup>(2)</sup>
Vnútorne	20,0	10,18	50,0	19,52	6,42425	0,17846
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,42446	0,17845

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

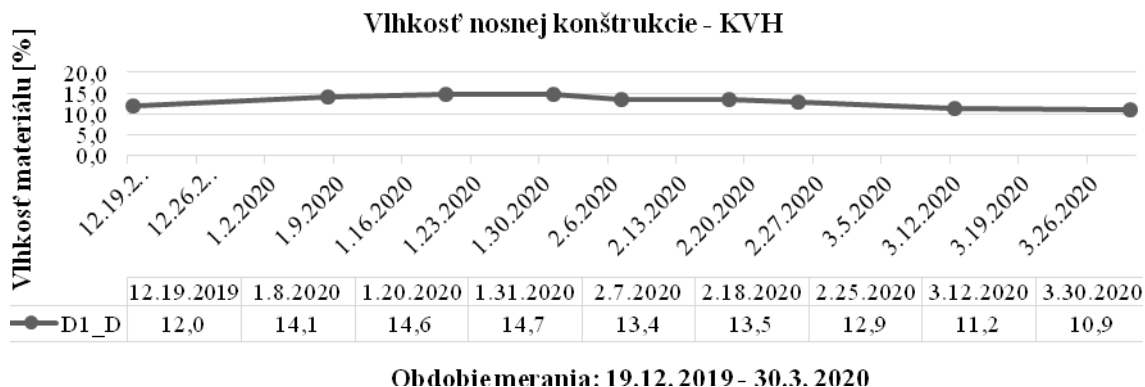
#### 4.2 Experimentálne meranie vlhkosťového stavu materiálov a teplôt v konštrukcii

Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútornej povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach. Priebeh vnútornej povrchovej teploty konštrukcie za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.

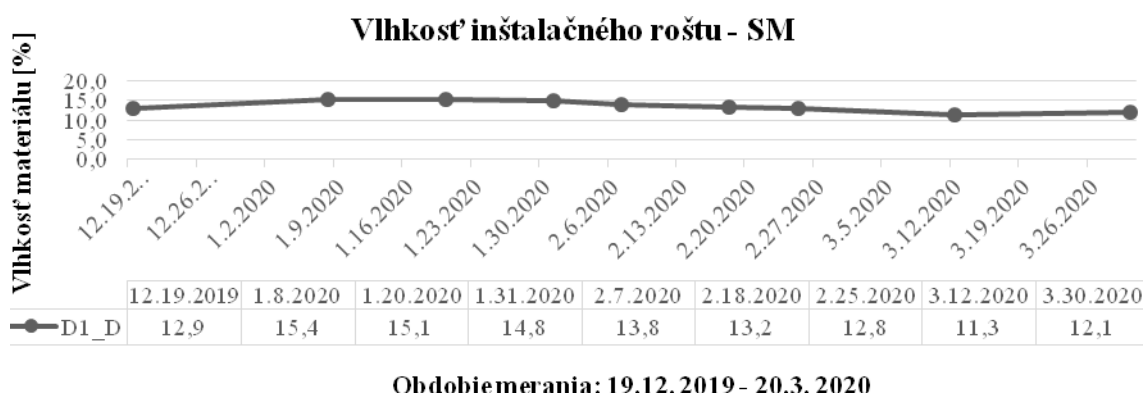


**Graf 2.** Priebeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcie WHC ultra D1\_D.

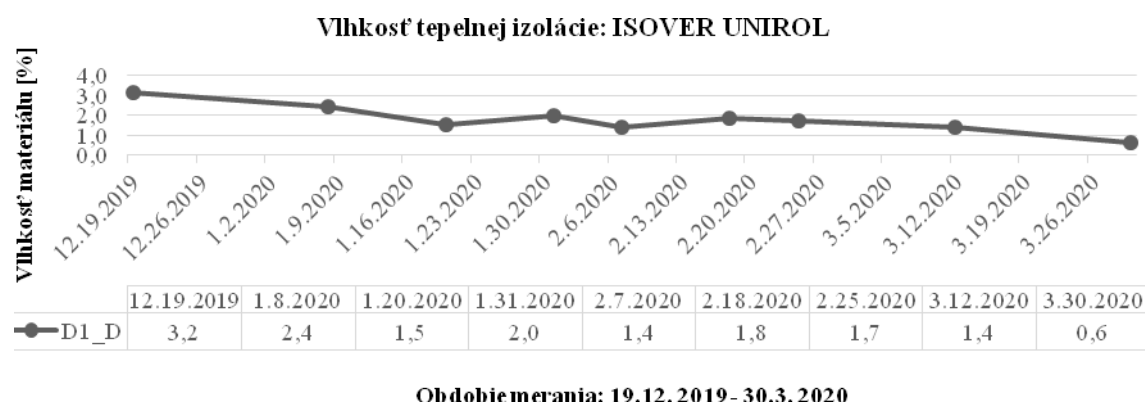
Grafy 3 – 5 zobrazujú priebehy vlhkostí nosnej konštrukcie panelu (KVH), inštaláčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte (ISOVER UNIROL) počas celého obdobia.



**Graf 3.** Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH (%).

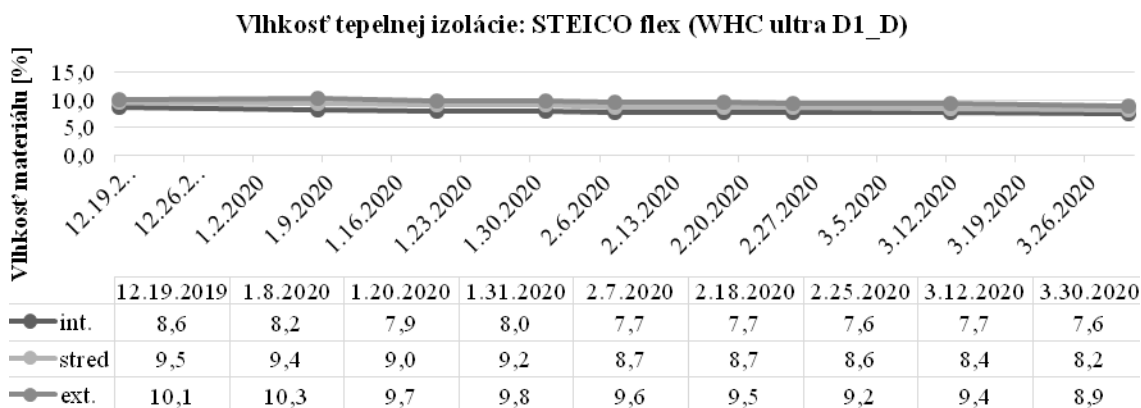


**Graf 4.** Vlhkosť inštaláčného roštu – SM (%).



**Graf 5.** Vlhkosť tepelnej izolácie v rošte – ISOVER UNIROL (%).

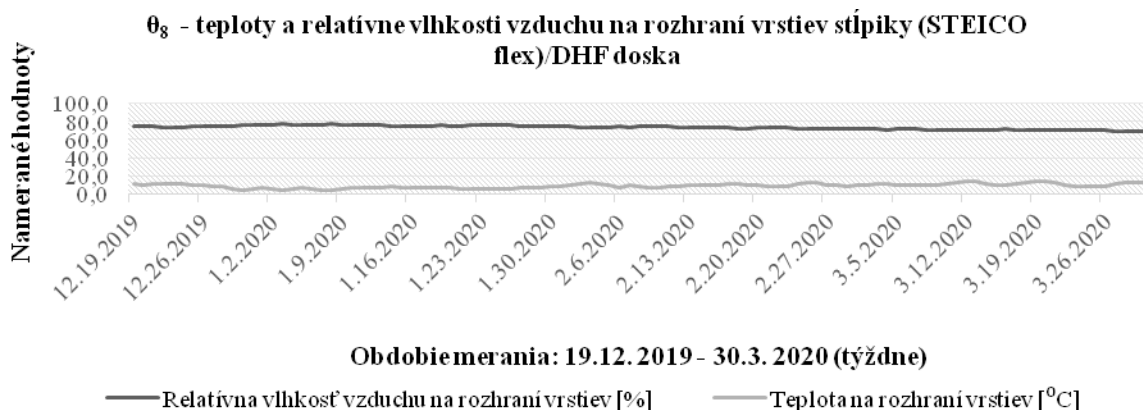
Na Grafе 6. je zobrazený priebeh vlhkosti tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmente konštrukcie WHC ultra D1\_D za parobrzdou: OSB/3 (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave naprieč touto vrstvou rozdelená na tri rovnaké časti po hrúbke vrstvy.



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

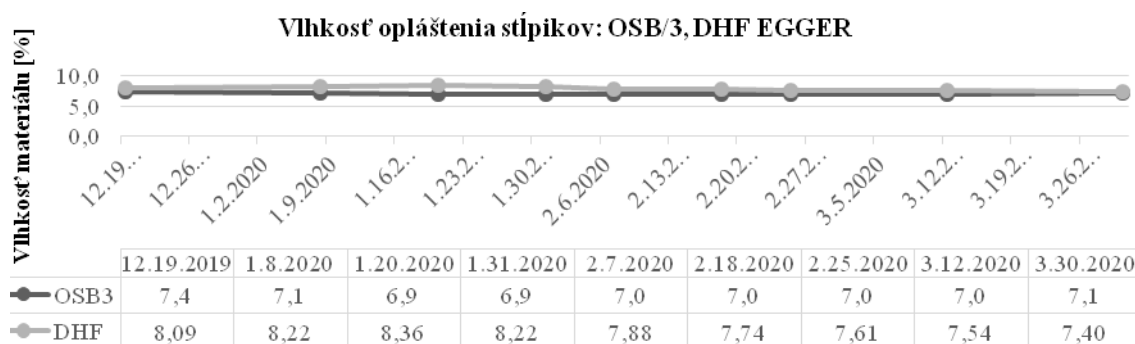
**Graf 6.** Vlhkosť medzistĺpkovej tepelnej izolácie STIECO flex (%)

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 (vrstva: stĺpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie).

Na Grafe 8. je zobrazený priebeh relatívnej vlhkosti opláštení nosnej konštrukcie: OSB/3 dosky a DHF dosky EGGER počas celého obdobia merania.



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

**Graf 8.** Vlhkosť parobrzd (OSB/3) a DHF dosky EGGER (%)

## 5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických vôastností v programoch ISOVER fragment a AREA vyplýva nasledovné:

1. Skladba panelovej obvodovej steny na báze dreva (Tabuľka 1.) spĺňa všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti podľa STN 73 0540-2.
2. Podľa výpočtu programov dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepľovacieho systému, ale ročná bilancia skondezovanej a odparenej vlhkosti je priaznivá a spĺňa požiadavku normy. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácií tejto vrstve bezprostredne ohrozená. 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 teplotou rosného bodu za daných výpočtových podmienok.

Z experimentálnych meraní vlhkosti 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 vlhkosť stav za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktoré výrazne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti ( $\lambda$ , 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 (ISOVER fragment, AREA) a v reálnych podmienkach znižuje riziko kondenzácie vodnej pary v oblasti nosnej konštrukcie.

## 6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkosťné vlastnosti a funkčnú spoľahlivosť posudzovanej panelovej konštrukcie s parobrzdou na báze dreva.

Z meraní a analýzy vlhkosťného stavu drevených prvkov a materiálov vrstiev vyplýva (Grafy 3. – 8.), 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. Parobrzda na báze dreva plní svoju funkciu z vlhkosťného hľadiska spomalením procesu vnikania vlhkosti a prúdenia tepla do 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 (DHF doska). 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 parobrzdy je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najlepšie s čo najväčším a dlhodobým teplotným rozdielom vonkajších a vnútorných parametrov vzduchu počas zimného obdobia.

## 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 firmami WHC s.r.o. a Inardex s.r.o.

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. VEGA 1/0729/18. “Hydro-termické, nanochemické a biologické modifikácie drevných materiálov s cieľovou zmenou ich štruktúry a vlastností”.

## Literatúra

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

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

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.

ŠTOMPF, P. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťový stav panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 91 strán, 2 prílohy

VIDHOLDOVÁ, Z. – SLABEJOVÁ, G.: Environmental valuation of selected transparent wood coatings from the view of fungal resistance. In Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Forestry and Wood Technology. 103 (2018), p. 164-168. ISSN 1898-5912

## Summary

**Thermal – diffusional properties of external diffuse wood-based prefabricated panel walls with vapour-barrier based on wood.** The paper is focused on verification of thermal – diffusional properties and moisture conditions of the external prefabricated panel walls using natural insulation. The research part deals with the theoretical analysis and experimental verification of the thermo-mechanical and diffusional characteristics one type of perimeter wall – with a wood-based vapour barrier. The goal was theoretical and experimental determination of proper function and its reliability in terms of moisture transport/content influenced by vapour barrier, under real climatic conditions.

## Keywords

Wooden constructions; wood-based perimeter walls; thermo-mechanical properties; moisture content of materials.

## Contact Address

Stanislav Jochim, Patrik Štompf  
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, xstompf@is.tuzvo.sk

## VLHKOSTNÉ VLASTNOSTI DIFÚZNYCH PANELOVÝCH STIEN S RÔZNYMI DRUHMI PAROBŔZD

Stanislav Jochim, Patrik Štompf

### 1 Úvod

Problematika 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 funkčnosť a životnosť konštrukcie ako celku. Na rozdiel od minulosti sú súčasné požiadavky na tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťový stav konštrukcií a budov podstatne prísnejšie a stanovuje ich STN 73 0540 -2.

Z hľadiska bezpečného vlhkosťového stavu v konštrukciách je popri voľbe druhu samotnej nosnej konštrukcie rozhodujúci návrh celkovej skladby obvodových konštrukcií. Na tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťový stav konštrukcií na báze dreva má vplyv skladba konštrukcie, druhy použitých materiálov, ich hrúbky a poradia jednotlivých vrstiev a pod. Pre správny návrh je dôležité poznať nie len základné fyzikálne vlastnosti jednotlivých konštrukčných materiálov v súvislosti s ich správnym použitím a radením do jednotlivých vrstiev konštrukcie, ale aj ďalšie vlastnosti pre prenos vodnej pary, vody a vzduchu.

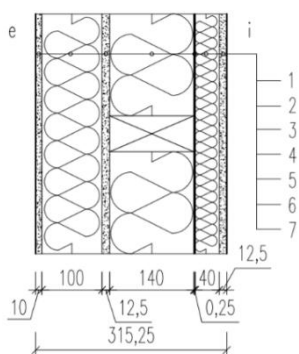
V drevených obalových konštrukciách z hľadiska autointeligentnej kontroly vlhkosťového stavu sú vhodnejšie izolácie na prírodnej báze, ktoré majú prirodzené hygroskopické a redistribučné vlastnosti vlhkosti vzhľadom na relatívnu vlhkosť vzduchu. Napr. drevovláknité izolácie rôzneho typu majú komplexne výborné základné fyzikálne vlastnosti pre použitie v difúzne otvorených konštrukciách drevostavieb a sú optimálnou voľbou aj z hľadiska prenosu a redistribúcie vlhkosti.

Vlhkosť konštrukčných materiálov rovnako, ako aj relatívnu vlhkosť vzduchu v jednotlivých vrstvách konštrukcie obvodovej steny môžeme teoreticky stanoviť výpočtom, avšak presnejšie experimentálne v reálnych klimatických podmienkach. Príspevok je zameraný na:

- 1) Teoretickú analýzu tepelno-technických vlastností dvoch panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami a s dvomi druhmi parobŕzd. Následné posúdenie podľa STN.
- 2) Experimentálne overenie vlhkosťového stavu materiálov v konštrukcii panelovej steny s parobŕzdou na báze papiera a s parobŕzdou z OSB/3 dosky počas zimného obdobia.
- 3) Konfrontáciu vplyvu dvoch rôznych parobŕzd prírodnej bázy na vlhkosť materiálov a relatívnu vlhkosť vzduchu za týmito vrstvami.

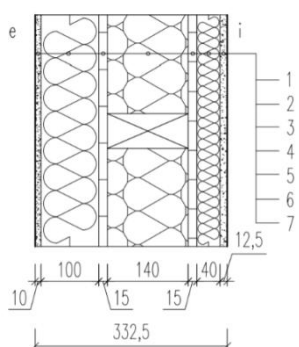
### 2 Skladba panelových obvodových stien

Pre teoretické a experimentálne overenie tepelno-technických a vlhkosťových vlastností boli zhotovené dva fragmenty konštrukcií: WHC ultra D1\_D a WHC ultra D1\_R s rozdielnymi materiálmi vo funkcií parobŕzdy. Skladby konštrukcií sú na Obrázkoch 1. a 2.



**Obrázok 1.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_R. Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – vonkajšie opláštenie: RigiStabil, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – parobrzdná fólia ISOCELL ÖKO NATUR, 6 – inštalčný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: RigiStabil.



**Obrázok 2.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_D. Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

1 – omietkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – vonkajšie opláštenie: DHF doska EGGER, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – OSB/3 doska, 6 – inštalčný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: SDK doska GKF.

### 3 Metodika overovania tepelno-technických a vlhkostných vlastností

#### 3.1 Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických a vlhkostných vlastností

Analýza tepelno-technických vlastností skladiel panelových obvodových stien pri použití okrajových podmienok podľa platnej 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).

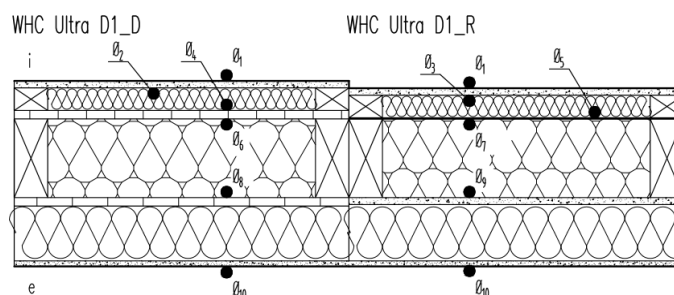
Posúdenie je podľa STN 73 0540-2.

#### 3.2 Experimentálne meranie vlhkostného stavu a teplôt v konštrukciách

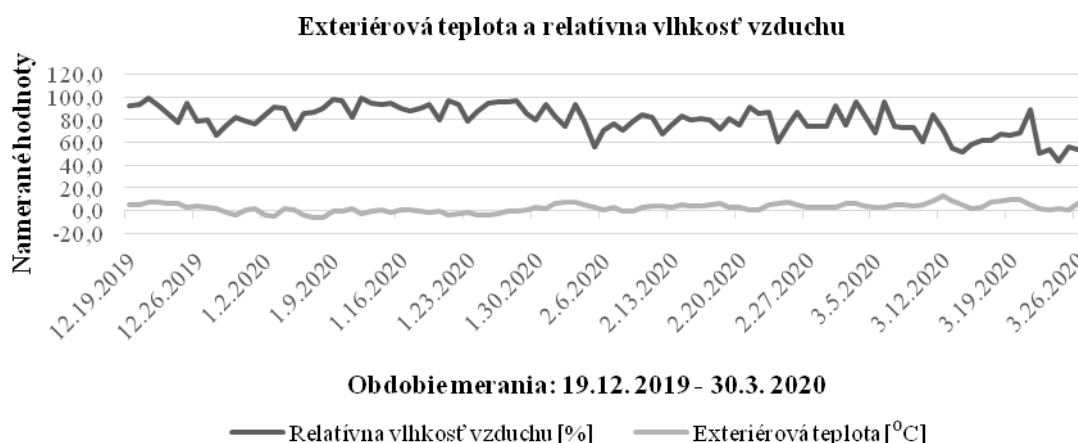
##### 3.2.1 Merané obdobie a klimatické podmienky

Experimentálne merania v rámci sledovaného obdobia, ktoré prebiehalo od 19. decembra 2019 do 30. marca 2020, boli vykonávané v pravidelných intervaloch. Počas celého sledovaného obdobia sa prostredníctvom snímačov a 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 panelových stien s rozmermi 1,2 x 1,2 m (Obrázok 3.), zabudované v referenčnom výskumnom objekte simulujúcom vytváranie obytnej klímy s teplotou vzduchu  $20 \pm 1$  °C a vlhkosťou vzduchu  $50 \pm 5$  %. Z vonkajšej strany na konštrukcie pôsobili reálne exteriérové klimatické podmienky v danom období (Graf 1.).



**Obrázok 3.** Rozmiestnenie snímačov v skladbách zabudovaných konštrukcií WHC ultra D1\_D a D1\_R. Snímače na meranie teploty:  $\theta_1 - \theta_{10}$ , snímač na meranie teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu:  $\theta_8$  a  $\theta_9$ .



**Graf 1.** Exteriérová teplota a relatívna vlhkosť vzduchu (celé obdobie merania).

### 3.2.2 Meranie vlhkosti materiálov a relatívnej vlhkosti vzduchu v konštrukciách

1. *Elektrický odporový vlhkomer (GANN HYDROMETTE HT 85 T):* meranie vlhkosti v smere vlákien – rošt, stĺpik.
2. *Gravimetrická metóda:* všetky doskové a izolačné materiály. Sušenie vzoriek pri teplote  $103 \pm 2$  °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 vlhkostných vlastností

Pre konfrontáciu výsledkov z experimentálnych meraní a teórie boli spracované výpočty tepelno-technických a vlhkostných vlastností konštrukcií v programoch ISOVER fragment a AREA s použitím najnepriaznivejších parametrov vonkajšieho vzduchu, ktoré boli namerané počas sledovaného obdobia. Najnižšia 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

Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkostných vlastností v programe ISOVER fragment sú uvedené v Tabuľke 1.



**Tabuľka 1.** Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcií (ISOVER Fragment).

Konštrukcia	Súčiniteľ prechodu tepla $U$ [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Tepelný odpor $R_o$ [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Povrchová teplota konštrukcie $\theta_{si}$ [° C]	Vodná para [kg/(m <sup>2</sup> .rok)]		Fázový posun $\Psi$ [h]	Teplotný útlm $v$ [-]
				Ročné skondenované množstvo $g_k$	Ročná bilancia $g_k - g_v$		
WHC ultra D1_D	0,148	6,574	19,404	0,22784 <sup>(1)</sup>	-4,26991	14,888	506,701
WHC ultra D1_R	0,151	6,467	19,396	0,06660 <sup>(1)</sup>	-3,92388	13,626	208,888

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> v oboch skladbách dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie

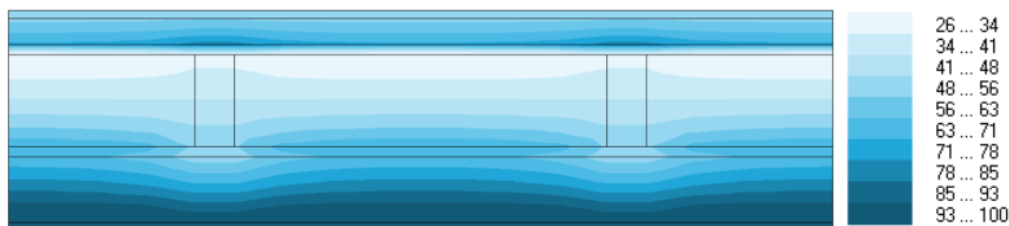
Pre komplexné hodnotenie detailov navrhnutých konštrukcií (aj s tepelnými mostami) boli jednotlivé skladby analyzované programom AREA. V Tabuľke 2. sú zobrazené vypočítané tepelno-technické a vlhkosťové vlastnosti konštrukcií WHC ultra D1\_D a D1\_R.

**Tabuľka 2.** Výsledky teoretickej analýzy tepelno-technických vlastností konštrukcií (AREA).

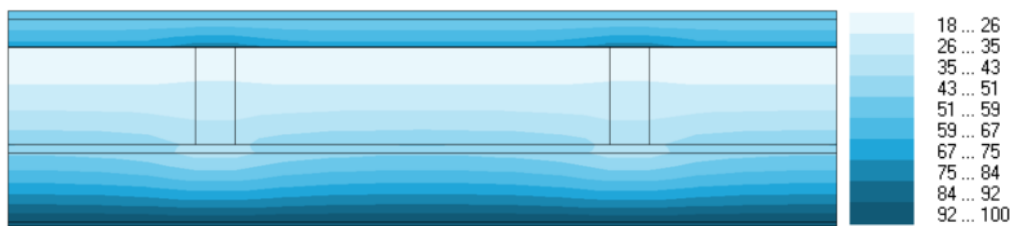
Prostredie	Teplota $T$ [° C]	Teplota rosného bodu $T_w$ [° C]	Relatívna vlhkosť vzduchu $\phi$ [%]	Minimálna povrchová teplota $T_{s, min}$ [° C]	Hustota tepelného toku z prostredia $Q$ [W/m] <sup>(1)</sup>	Tepelná priepustnosť $L$ [W/m.K] <sup>(2)</sup>
<b>WHC ultra D1_D</b>						
Vnútorne	20,0	10,18	50,0	19,52	6,42425	0,17846
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,42446	0,17845
<b>WHC ultra D1_R</b>						
Vnútorne	20,0	9,26	50,0	19,21	6,41595	0,18331
Vonkajšie	-15,0	-16,87	84,0	-14,81	-6,41612	0,18332

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

Na Obrázkoch 4. a 5. sú zobrazené priebehy vlhkostí v konštrukciách vypočítané programom AREA.



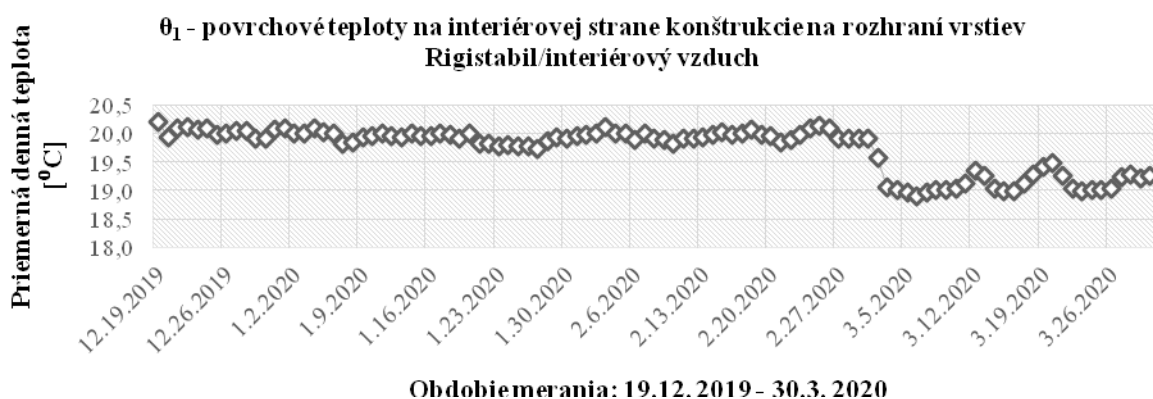
**Obrázok 4.** Rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu [%] v konštrukcii steny WHC ultra D1\_D (AREA).



Obrázok 5. Rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu [%] v konštrukcii steny WHC ultra D1\_R (AREA).

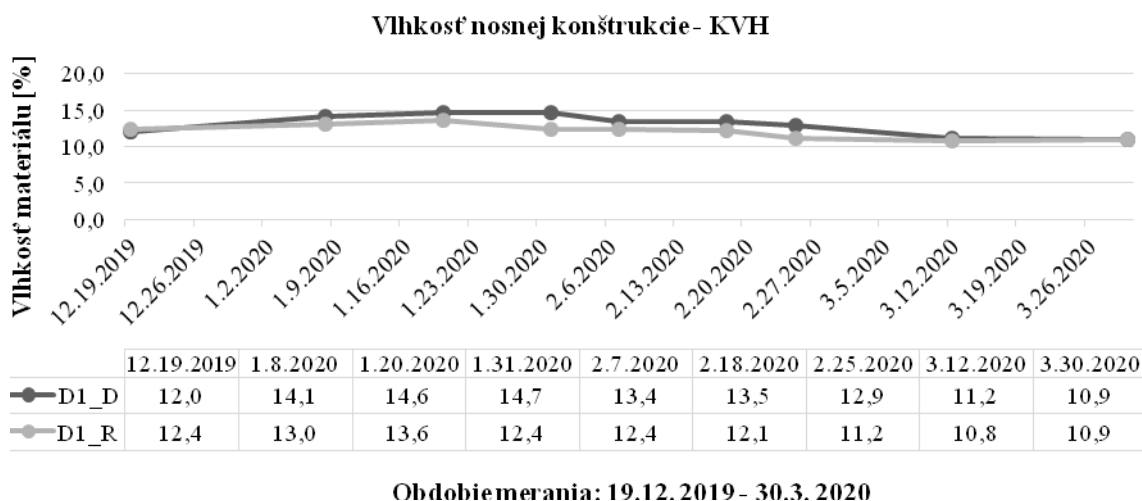
#### 4.2 Experimentálne meranie vlhkosti materiálov a teplôt v konštrukciách

Podľa normových požiadaviek musí byť teplota vnútorného povrchu konštrukcie bezpečne nad teplotou rosného bodu pri daných okrajových podmienkach. Priebeh vnútornej povrchovej teploty oboch konštrukcií za celé sledované obdobie zobrazuje Graf 2.

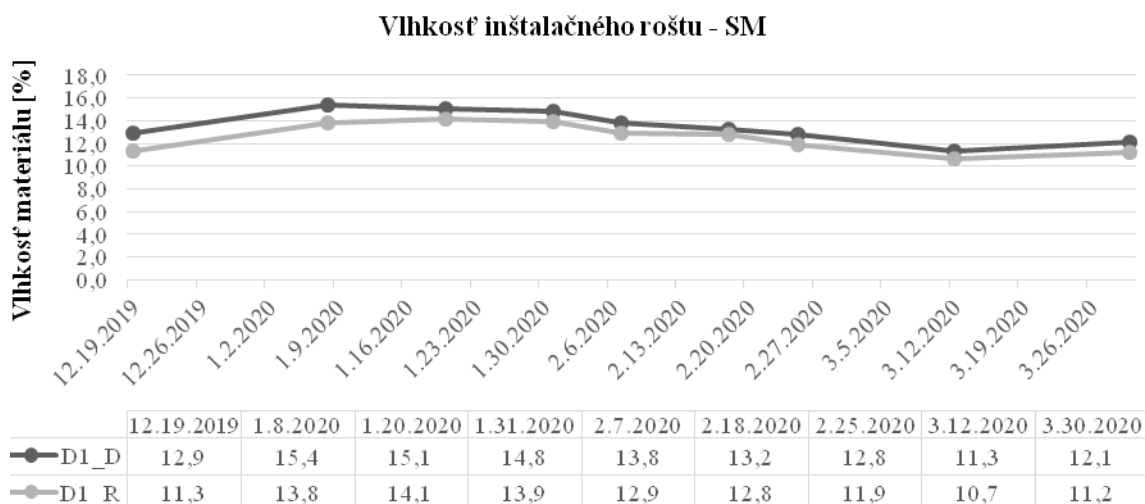


Graf 2. Priebeh povrchových teplôt na vnútornej strane konštrukcie WHC ultra D1\_D.

Grafy 3. – 5. zobrazujú priebehy vlhkostí nosnej konštrukcie panelu (KVH), inštaláčného roštu (SM) a tepelnej izolácie v inštaláčnom rošte (ISOVER UNIROL) počas celého obdobia.

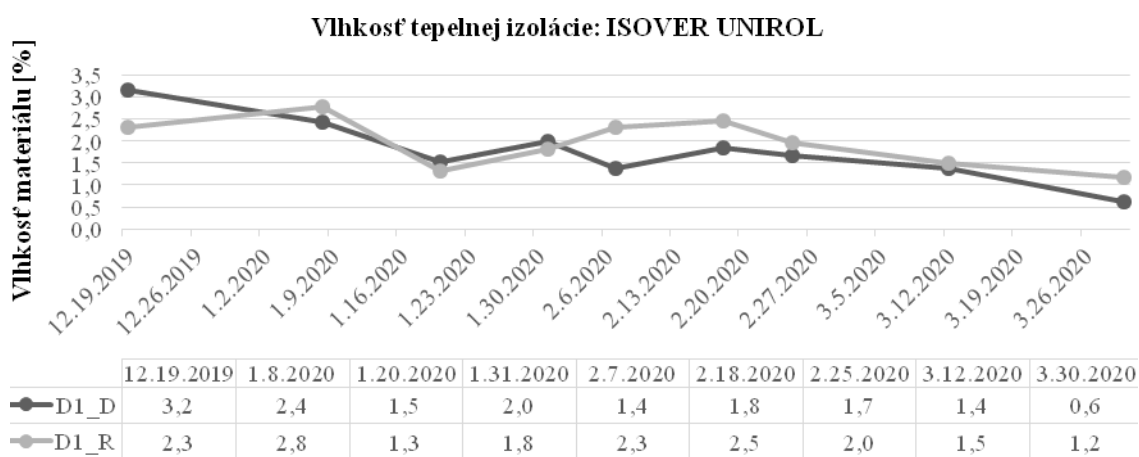


Graf 3. Vlhkosť nosnej konštrukcie – KVH [%].



**Obdobie merania: 19.12.2019 - 20.3.2020**

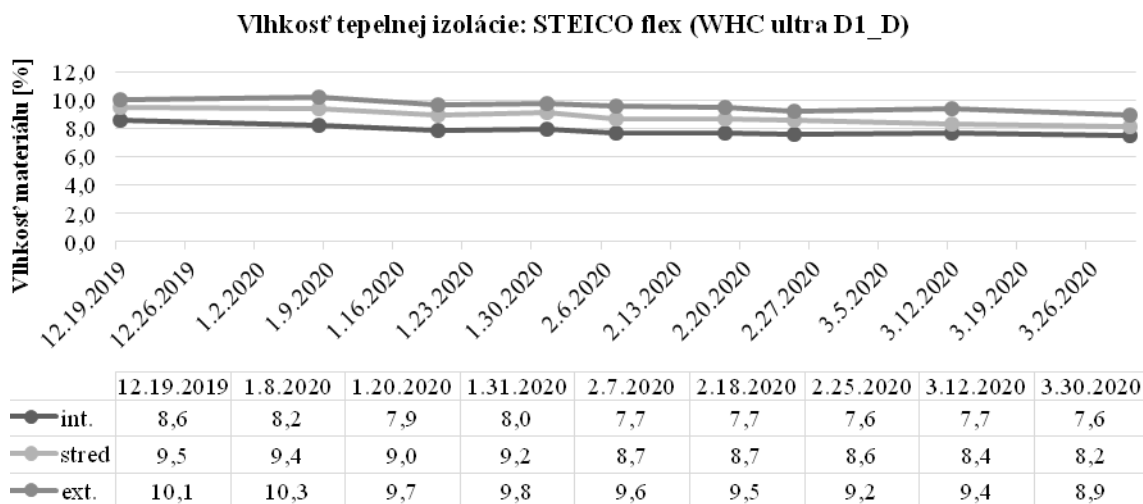
**Graf 4.** Vlhkosť inštaláčného roštu – SM [%].



**Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020**

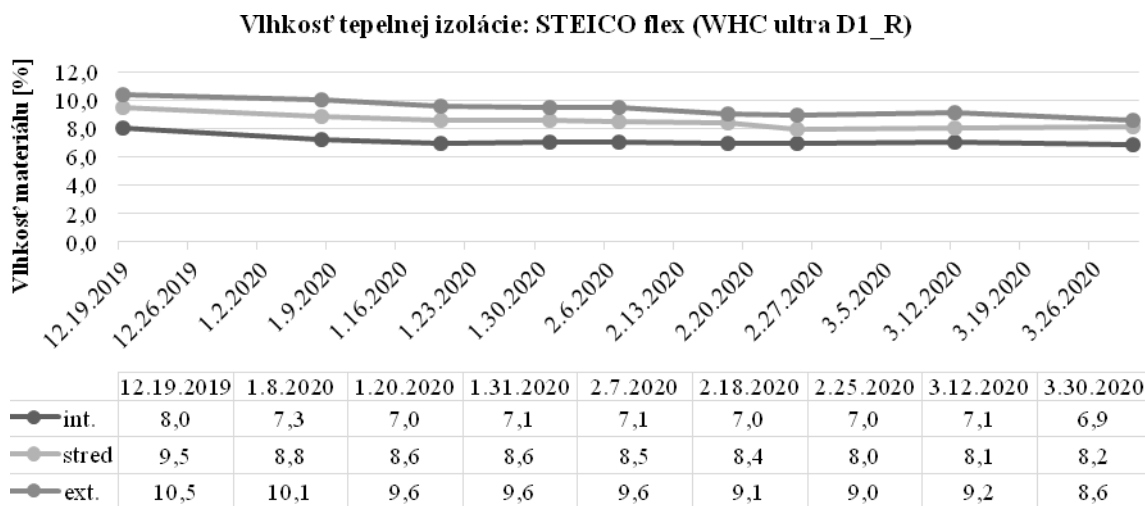
**Graf 5.** Vlhkosť tepelnej izolácie v rošte – ISOVER UNIROL [%].

Na Grafoch 6. a 7. sú zobrazené priebehy vlhkostí tepelnej izolácie STEICO flex umiestnenej vo fragmentoch konštrukcií WHC ultra D1\_D a D1\_R za parobrzdnou vrstvou (v smere tepelného toku cez konštrukciu). Tepelná izolácia bola z dôvodu lepšieho prehľadu o vlhkosťnom stave v priečnom smere vrstvy rozdelená po hrúbke vrstvy na tri rovnaké časti.



Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

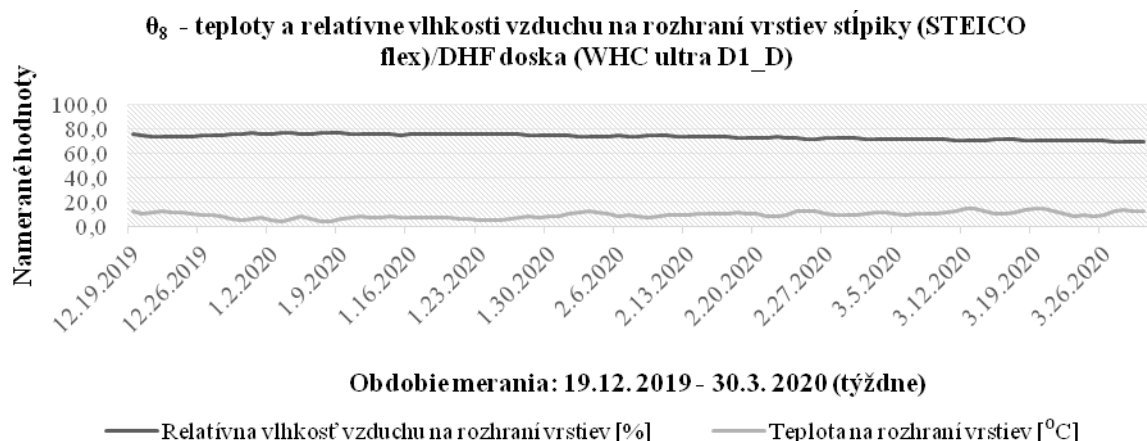
**Graf 6.** Vlhkosť medzistúpkovej tepelnej izolácie STIECO flex [%] – WHC ultra D1\_D.



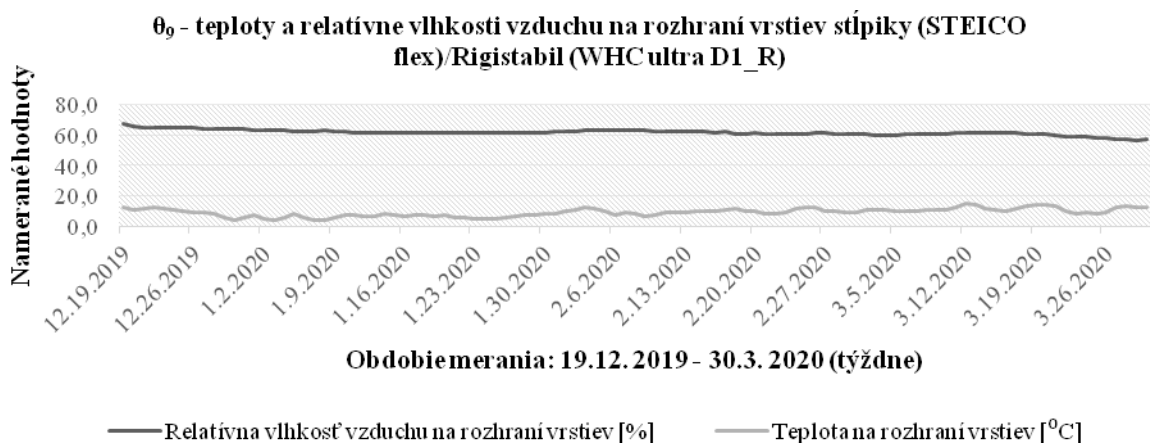
Obdobie merania: 19.12.2019 - 30.3.2020

**Graf 7.** Vlhkosť medzistúpkovej tepelnej izolácie STIECO flex [%] – WHC ultra D1\_R.

Na Grafoch 8. a 9. sú zobrazené priebehy teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu oboch fragmentov na rozhraní vrstiev: stúpkový a vonkajšie opláštenia nosných konštrukcií.

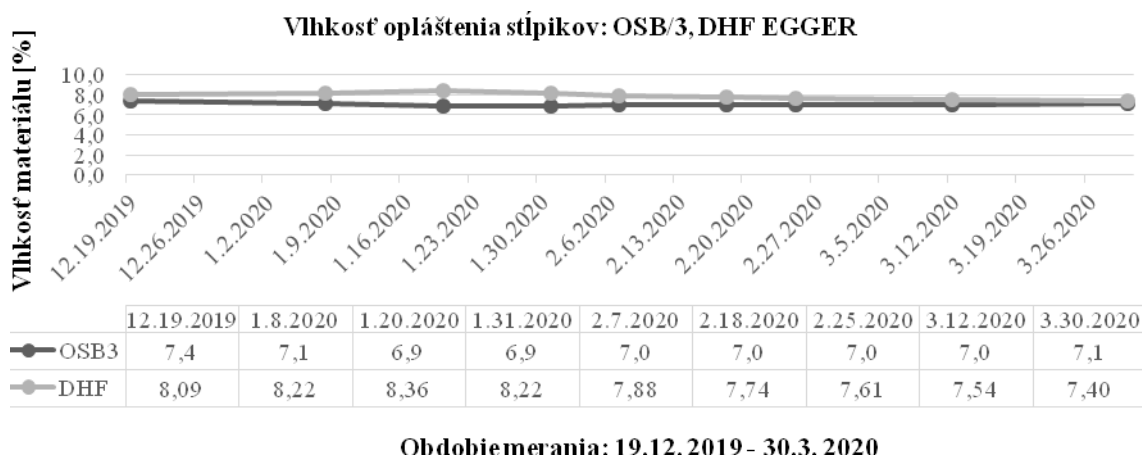


**Graf 8.** Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu (vrstva: stálpiky/vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie).



**Graf 9.** Priebeh teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu (vrstva: stálpiky a vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie).

Na Grafe 10. je zobrazený priebeh relatívnej vlhkosti opláštení nosnej konštrukcie: OSB3 dosky a DHF dosky EGGER v skladbe WHC ultra D1\_D počas celého obdobia merania.



**Graf 10.** Vlhkosť parobrzd (OSB3) a DHF dosky EGGER [%].

## 5 Vyhodnotenie výsledkov

Z teoretickej analýzy tepelno-technických a vlhkosťných vlastností vyplýva nasledovné:

1. Skladby oboch panelových obvodových stien na báze dreva (Tabuľka 1) spĺňajú všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti podľa STN 73 0540-2.
2. Podľa výpočtu dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepľovacieho systému (pod vrstvou fasádnej omietky) pri oboch konštrukciách, avšak ročná bilancia skondensovanej 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. Splnené je aj hygienické kritérium z pohľadu rizika kondenzácie vodnej pary na vnútornom povrchu konštrukcie – vnútorná povrchová teplota sa pohybuje bezpečne nad kritickou teplotou pre vznik plesní za daných výpočtových podmienok.

Z experimentálnych meraní vlhkosťného stavu materiálov jednotlivých konštrukcií 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 činiteľov ( $w < 15$  až  $18 \%$ ).
2. Podľa údajov v Grafoch 8. a 9. sa priemerná relatívna vlhkosť vzduchu v tejto vrstve za merané obdobie pri konštrukciách D1\_R pohybuje na úrovni  $61,7 \%$  a celkovo je o takmer  $12 \%$  nižšia ako priemerná vlhkosť vzduchu rovnakej vrstvy pri konštrukciách D1\_D. Na základe tohto faktu možno povedať, že parobrzda ISOCELL v konštrukciách WHC ultra D1\_R zabraňuje účinnejšie prenikaniu väčšieho množstva vlhkosti do konštrukcie ako OSB3 doska, čo súvisí s ich difúznymi charakteristikami.
3. Namerané hodnoty relatívnych vlhkostí vzduchu (Grafy 8. a 9.) v oboch konštrukciách nekorešponujú s predikciou programu AREA. Výpočtom sa predpokladalo nižšie rozloženie relatívnej vlhkosti vzduchu v tejto vrstve – o  $12 \%$  pri konštrukciách D1\_R a o  $17 \%$  pri konštrukciách D1\_D. Naopak, priemerné hodnoty teplôt na rozhraní týchto vrstiev, namerané počas sledovaného obdobia pri oboch konštrukciách, sú vyššie ako predikcia teoretickej analýzy oboch výpočtových programov (ISOVER fragment, AREA). 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 6. a 7.) môžeme povedať, že vlhkosťný stav sa za sledované obdobie pohybuje v takom rozmedzí, ktorý významne nezhoršuje tepelno-technické vlastnosti ( $\lambda$ , R) tepelnej izolácie a nevytvára priaznivé podmienky pre rozvoj a aktivitu drevokazných húb, plesní a škodcov, ktoré by mohli narušiť jej 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 vlhkosťný stav materiálov umiestnených za touto vrstvou v smere tepelného a difúzneho toku cez konštrukciu vzhľadom na jej difúzne vlastnosti. Pri vlhkosti konštrukčných materiálov za parobrzdnou vrstvou (STEICO flex) sa nezaznamenali výrazné rozdiely.
6. Z pohľadu použitia parobrzdnej fólie ISOCELL aj na vytvorenie vzduchotesnej roviny v konštrukciách je táto výhodnejšia ako OSB/3 doska, pretože zabraňuje prieniku väčšieho množstva vlhkého vzduchu do konštrukcie. Dokumentujú to aj namerané hodnoty relatívnych vlhkostí vzduchu za touto vrstvou v rovine nosného systému (Grafy 8. a 9.).

Fólia ISOCELL teda eliminuje šírenie vlhkosti vplyvom prúdenia vzduchu a jej použitie v konštrukciách má svoj praktický význam z pohľadu zníženia infiltrácie vzduchu do konštrukcie, čím znižuje riziko kondenzácie vodnej pary vo vnútri konštrukcie.

## 6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie preukázali splnenie normatívnych požiadaviek na tepelno-technické a vlhkosťové vlastnosti a funkčnú spoľahlivosť posudzovaných panelových konštrukcií s rôznymi materiálmi vo funkcií parobrzdy.

Z meraní a analýzy vlhkosťového stavu drevených zabudovaných prvkov a priebehov teplôt a relatívnych vlhkostí vzduchu v daných vrstvách (Grafy 3. – 9.) 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 a vonkajšie opláštenie nosnej konštrukcie (Grafy 8. a 9.) je zrejmé, že nedochádza ku kondenzáciám na vnútornom povrchu vonkajšieho opláštenia (DHF doska, Rigistabil). Teplota na rozhraní týchto vrstiev sa pohybuje počas celého obdobia bezpečne nad kritickou teplotou pre vznik plesní pri daných podmienkach, čo korešponduje aj s predikciou oboch výpočtových programov. V neprospech kondenzácie je aj vyššia nameraná teplota v daných vrstvách oproti výpočtovej.

Výskum preukázal, že parobrzdná fólia ISOCELL na báze papiera významne neznižuje vlhkosť materiálov za touto vrstvou (v smere tepelného toku) v porovnaní s OSB3 doskou, ale prispieva k eliminácii prúdenia teplého vzduchu do konštrukcie.

Z hľadiska exaktnejšieho poznania stavu vlhkosti jednotlivých konštrukčných materiálov v skladbe a účinnosti vplyvu parobrzdnej fólie je potrebné pokračovanie výskumu a meraní, najvhonajlepšie 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 firmami WHC s.r.o. a Inardex s.r.o.

## Literatúra

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

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

ŠTOMPF, P. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosťový stav panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 91 strán, 2 prílohy

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

REINPRECHT, L. – VIDHOLDOVÁ, Z. 2011. *Termodrevo = Thermowood*. Ostrava: Šmíra - Print, 2011. - 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7

## Summary

**Moisture properties of external diffuse wood-based prefabricated panel walls with different types of vapour-barriers.** The paper is focused on verification of thermal – diffusional properties and moisture conditions of the external prefabricated panel walls using natural insulation. The research part deals with the theoretical analysis and experimental verification of the moisture and diffusional characteristics 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; thermo-mechanical properties; moisture content of materials; diffusional properties.

## Contact Address

Stanislav Jochim, Patrik Štompf  
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, xstompf@is.tuzvo.sk





## VPLYV TEPELNO-TECHNICKÝCH VLASTNOSTÍ PANELOVÝCH STIEN NA BÁZE DREVA NA MERNÚ POTREBU TEPLA NA VYKUROVANIE

Patrik Štompf, Stanislav Jochim

### 1 Úvod

Negatívne trendy v energetike a životnom prostredí spôsobujú, že stavebníctvo v súčasnej dobe smeruje k výstavbe budov s čo najväčšou úsporou energie. Po roku 2020 bude v kontexte Európskej Únie povinnosťou výstavba ultranízkoenergetických budov, resp. budov s takmer nulovou spotrebou energie. Voľba drevenej konštrukcie v takýchto budovách sa rovná voľbe úspory energie a energetickej hospodárnosti budovy.

Popri voľbe drevenej konštrukcie je rozhodujúci aj jej návrh. Významnú úlohu pri návrhu má voľba nosného systému a druhu konštrukcie, od ktorých sa odvíja návrh skladby obvodového plášťa budovy, voľba materiálového zloženia a ich vplyv na výsledné vlastnosti konštrukcie (KOLB, 2011).

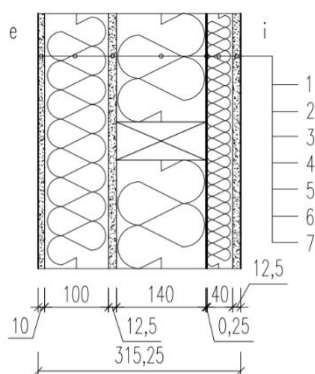
Z pohľadu energetického hodnotenia budovy, vzhľadom na súčasné požiadavky, je potrebné zamerať sa na zníženie spotreby energie na vykurovanie – čo súvisí s kvalitným návrhom obalového plášťa budovy a predpokladá adekvátne využitie pasívnych solárnych i vnútorných tepelných ziskov. V rámci konštrukčného riešenia je dôležité sa zamerať na jednotlivé detaily ale aj konštrukciu ako celok a minimalizovať tepelné straty prechodom tepla cez obálku budovy. Z pohľadu výpočtu potreby tepla na vykurovanie budovy, celkovej spotreby energie, potreby primárnej energie a zatriedenia do jednotlivých energetických tried v súčasnosti platia postupy a požiadavky STN 73 0540-2 a vyhlášky č. 364/2012.

Cieľom príspevku je analýza vplyvu tepelno-technických vlastností panelových obvodových stien na mernú potrebu tepla na vykurovanie prízemného rodinného domu.

### 2 Podklady pre analýzu

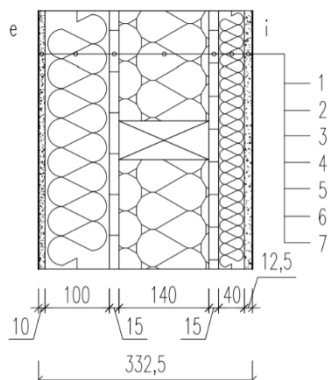
#### 2.1 Skladby panelových obvodových stien

Na Obrázkoch 1. a 2. sú zobrazené skladby panelových obvodových stien na báze dreva navrhnuté v spolupráci s firmou WHC – typ WHC ultra D1\_D a typ WHC ultra D1\_R, pre analýzu tepelno-technických vlastností a ich vplyvu na tepelné straty a mernú potrebu tepla na vykurovanie prízemného rodinného domu. Skladby sú navrhované pre výstavbu ultranízkoenergetických rodinných domov.



**Obrázok 1.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_R. (autor: P. Štompf) Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

1 – ometkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – vonkajšie opláštenie: RigiStabil, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – parobrzdná fólia ISOCELL ÖKO NATUR, 6 – inštalačný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: RigiStabil.

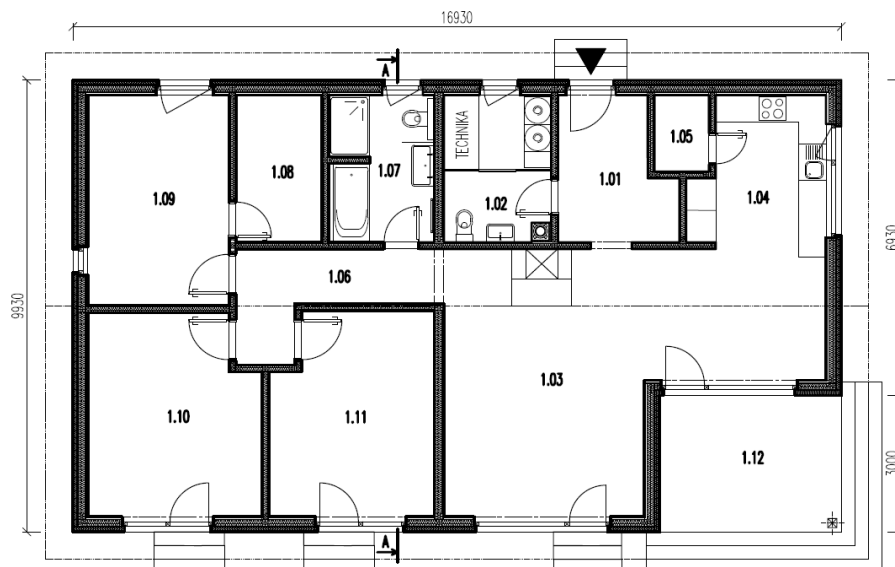


**Obrázok 2.** Skladba panelovej obvodovej steny WHC ultra D1\_D. (autor: P. Štopf) Skladba steny v smere od exteriéru do interiéru:

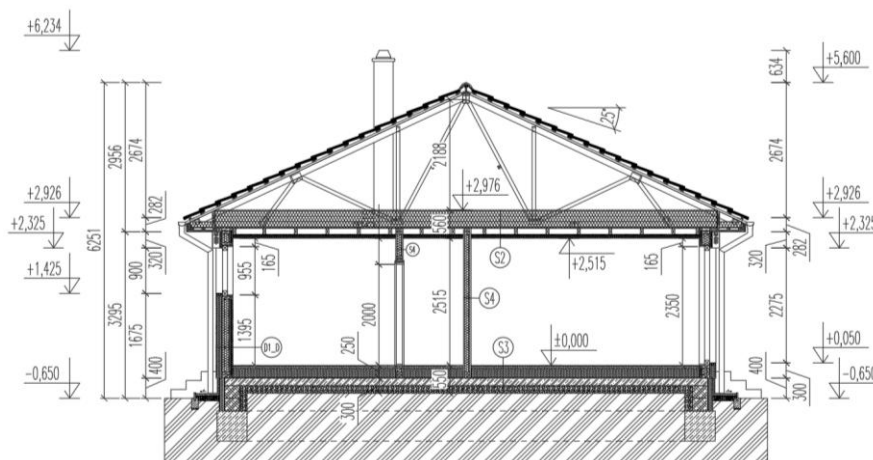
1 – ometkový systém CAPAROL (difúzne otvorený), 2 – kontaktná tepelná izolácia STEICO Protect Dry, 3 – vonkajšie opláštenie: DHF doska EGGER, 4 – nosná konštrukcia: KVH stĺpiky (profil: 60/140 mm) + tepelná izolácia STEICO flex, 5 – OSB/3 doska, 6 – inštalačný rošt: SM (profil: 40/60 mm) + tepelná izolácia ISOVER UNIROL PLUS, 7 – vnútorné opláštenie: SDK doska GKF.

## 2.2 Architektonicko-stavebné riešenie prízemného rodinného domu

Na Obrázku 3. a 4. je zobrazené architektonicko-stavebné riešenie reprezentatívneho rodinného domu s aplikáciou skladieb obvodových konštrukcií WHC ultra D1\_D a D1\_R.



**Obrázok 3.** Pôdorysné riešenie rodinného domu: Inardex – 001 S. (kreslil: P. Štopf).



**Obrázok 4.** Priečný rez A-A rodinného domu: Inardex – 001 S. (kreslil: P. Štopf).

### 3 Metodika

#### 3.1 Analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností stien

Teoretická analýza a vyhodnotenie tepelno-technických vlastností stien boli realizované programom ISOVER Fragment s metodikou v zmysle platnej STN 73 0540-2.

#### 3.2 Výpočet a hodnotenie potreby tepla na vykurovanie rodinného domu

Výpočet a hodnotenie mernej potreby tepla na vykurovanie rodinného domu bol stanovený pre normalizované podmienky a vykurovaciu sezónu v zmysle STN 73 0540-2.

### 4 Výsledky

V Tabuľke 1. sú výsledky analýzy tepelno-technických vlastností dvoch typov obvodových stien WHC.

Tabuľka 1. Výsledky výpočtov tepelno-technických vlastností konštrukcií D1\_R a D1\_D.

Konštrukcia WHC ultra	Súčiniteľ prechodu tepla U [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Tepelný odpor R <sub>o</sub> [(m <sup>2</sup> .K)/W]	Povrchová teplota konštrukcie θ <sub>si</sub> [° C]	Vodná para [kg/(m <sup>2</sup> .rok)]		Fázový posun ψ [h]	Teplotný útlm v [-]
				Ročné skondenzované množstvo g <sub>k</sub>	Ročná bilancia g <sub>k</sub> - g <sub>v</sub>		
D1_R	0,151	6,467	19,396	0,06660 <sup>(1)</sup>	-3,92388	13,626	208,888
D1_D	0,148	6,574	19,404	0,22784 <sup>(1)</sup>	-4,26991	14,888	506,701

**Poznámka:** <sup>(1)</sup> v oboch skladbách dochádza ku kondenzácii vodnej pary vo vrstve kontaktnej tepelnej izolácie

V Tabuľke 2. sú uvedené tepelné straty prechodom tepla konštrukciami a celkové tepelné straty rodinného domu.

Tabuľka 2. Tepelné straty prechodom tepla konštrukciami a rodinného domu s dvomi typmi stien.

P.č.	Konštrukcia	U <sub>i</sub> hodnota [W/(m <sup>2</sup> .K)]	Plocha A <sub>i</sub> [m <sup>2</sup> ]	Red. faktor b <sub>xi</sub>	U <sub>i</sub> · A <sub>i</sub> · b <sub>xi</sub> [W/K]	Výsledná tepelná strata [kWh/rok]
1.	Obvodová stena D1_R	0,151	130,7	1	19,34	1 620,83
	Obvodová stena D1_D	0,148	130,7	1	19,74	1 588,63
2.	Strop nad exteriérom	0,00	0,00	1	0,00	0,00
3.	Strop nad suterénom	0,00	0,00	0,5	0,00	0,00
4.	Strecha/strop	0,096	156,11	0,8	12,91	984,68
5.	Podlaha na teréne	0,14	156,11	1	21,85	1 795,00
6.	Okná	0,78	31,88	1	24,86	2 042,11
7.	Strešné okná	0,00	0,00	1	0,00	0,00
8.	Vchodové dvere	0,90	2,61	1	2,35	193,10
Plocha celkom ΣA <sub>i</sub>			<b>477,42</b>	-	-	-
Tepelné straty RD s rôznym typom obvodovej steny		Označenie	-	Výsledná tepelná strata		
				[W/K]	[kWh/rok]	
Obvodová stena – WHC ultra D1_R						
Tepelné straty celkom			<b>Q<sub>L</sub></b>	-	-	<b>11 169,39</b>
Obvodová stena – WHC ultra D1_D						
Tepelné straty celkom			<b>Q<sub>L</sub></b>	-	-	<b>11 137,24</b>

V Tabuľke 3. je uvedený prehľad tepelných ziskov, strát a potreby tepla na vykurovanie rodinného domu jednotlivu s aplikáciou steny WHC ultra D1\_R a D1\_D.

**Tabuľka 3.** Tepelné zisky, straty a ročná potreba tepla na vykurovanie rodinného domu s dvomi typmi stien.

Konštrukcia	Tepelné straty/ tepelné zisky, potreba tepla na vykurovanie	Označenie	Hodnota	
	Celkové vnútorné tepelné zisky	Q	5 102,95	[kWh/rok]
WHC ultra D1_R	Tepelné straty celkom	Q <sub>L</sub>	11 169,39	[kWh/rok]
	Ročná potreba tepla na vykurovanie	Q <sub>h</sub>	6 321,04	[kWh/rok]
WHC ultra D1_D	Tepelné straty celkom	Q <sub>L</sub>	11 137,24	[kWh/rok]
	Ročná potreba tepla na vykurovanie	Q <sub>h</sub>	6 288,84	[kWh/rok]

V Tabuľke 4. je porovnanie mernej potreby tepla na vykurovanie rodinného domu s požiadavkami STN 73 054-2 s aplikáciou dvoch typov stien WHC.

**Tabuľka 4.** Merná potreba tepla na vykurovanie rodinného domu s aplikáciou dvoch typov stien.

Popis	Označenie	Výpočet	Merná potreba tepla	
Merná potreba tepla na vykurovanie (D1_R) „2“	Q <sub>H,2,2</sub> (D1_R)	$Q_{H,2,2} = Q_h / V_b$	13,17	[kWh/m <sup>3</sup> .rok]
Merná potreba tepla na vykurovanie (D1_D) „2“	Q <sub>H,2,2</sub> (D1_D)	$Q_{H,2,2} = Q_h / V_b$	13,10	
<b>Normová potreba tepla na vykurovanie (normalizovaná a odporúčaná hodnota)</b>	Q <sub>H,nd,r2,2</sub>	$Q_{H,nd,r2,2} = 5,14 + 12,72 \cdot \sum A_i / V_b$	<b>17,73</b>	
	Q <sub>H,nd,r3,2</sub>	$Q_{H,nd,r3,2} = 0,5 \cdot Q_{H,nd,r2,2}$	<b>8,87</b>	
Merná potreba tepla na vykurovanie (D1_R) „1“	Q <sub>H,2,1</sub> (D1_R)	$Q_{H,nd,N2} = Q_h / A_b$	40,49	[kWh/m <sup>2</sup> .rok]
Merná potreba tepla na vykurovanie (D1_D) „1“	Q <sub>H,2,1</sub> (D1_D)	$Q_{H,nd,N1} = Q_h / A_b$	40,28	
<b>Normová potreba tepla na vykurovanie (normalizovaná a odporúčaná hodnota)</b>	Q <sub>H,nd,r2,1</sub>	$Q_{H,nd,r2,1} = Q_{H,nd,r2,2} \cdot h_{k,pr}$	<b>49,64</b>	
	Q <sub>H,nd,r3,1</sub>	$Q_{H,nd,r3,1} = 0,5 \cdot Q_{H,nd,r2,1}$	<b>24,82</b>	

**Poznámka:** A<sub>b</sub> – celková podlahová plocha budovy (156,11 m<sup>2</sup>), V<sub>b</sub> – celkový obostavaný objem budovy (480,05 m<sup>3</sup>),  $\sum A_i / V_b = 0,99$  [1/m] (faktor tvaru budovy), h<sub>k,pr</sub> = 2,8 m (normatívna výška podlaží)

## 5 Vyhodnotenie výsledkov

Z analýzy tepelno-technických vlastností obvodových stien WHC vyplýva:

1. Skladby oboch panelových obvodových stien na báze dreva (Tabuľka 1.) spĺňajú všetky požiadavky na tepelno-technické vlastnosti podľa STN 73 0540-2.
2. Podľa výpočtu dochádza ku kondenzácii vodnej pary v mieste kontaktného zatepl'ovacieho systému (pod vrstvou fasádnej omietky) pri oboch konštrukciách. Ročná bilancia skondezovanej a odparenej vlhkosti je však priaznivá a spĺňa požiadavku normy na maximálne ročné skondezované množstvo vodnej pary v konštrukcií. Nosná konštrukcia nie je z pohľadu rizika kondenzácie v tejto vrstve bezprostredne ohrozená.

3. Rovnako je splnené aj hygienické kritérium z pohľadu posúdenia kondenzácie vodnej pary na vnútornom povrchu konštrukcie. Vnútorná povrchová teplota sa pohybuje bezpečne nad teplotou rosného bodu za daných výpočtových podmienok.

Z výpočtu ročnej potreby tepla na vykurovanie prízemného rodinného domu vyplýva:

1. Rodinný dom s použitím oboch skladieb obvodových stien spĺňa normatívne požiadavky mernej potreby tepla na vykurovanie podľa STN 73 0540-2.
2. Konštrukcia WHC ultra D1\_R (s horšou  $U$ -hodnotou) nemá významne vyššie tepelné straty prechodom tepla (vyššie len o 2%) ako konštrukcia WHC ultra D1\_D.
3. Návrh rodinného domu nespĺňa cieľové odporúčané hodnoty potreby tepla na vykurovanie platné od 1.1. 2021, aj keď obalové konštrukcie spĺňajú požadované  $U$  - hodnoty v rámci kategórie ultranízkoenergetických budov.

## 6 Záver

Teoretická analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností panelových obvodových stien preukázali splnenie normatívnych požiadaviek a funkčnú spoľahlivosť.

Na požadovanú hodnotu mernej potreby tepla na vykurovanie významne vplýva faktor tvaru budovy a analyzovaný prízemný rodinný dom má nepriaznivú hodnotu podielu teplovýmenných plôch vzhľadom k obostavanému objemu budovy. Z tohto dôvodu pre splnenie normatívnych hodnôt mernej potreby tepla na vykurovanie je dôležité lepšie splnenie požiadaviek na súčiniteľ prechodu tepla obvodových stien, ale aj ostatných obalových konštrukcií.

Pre hospodárne zníženie ročnej potreby tepla na vykurovanie je taktiež dôležité využívať tepelné zisky (pasívne, aktívne) a minimalizovať tepelné straty prúdením vzduchu napr. nulovou infiltráciou vzduchu cez obalové konštrukcie a účinným vetraním s rekuperáciou tepla.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. APVV-17-0206 “Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva” a spolupráce Katedry drevených stavieb DF TU vo Zvolene s firmami WHC s.r.o. a Inardex s.r.o.

## Literatúra

- BAHÝL, V. – IGAZ, R. 2010. Stavebná fyzika. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 2010. ISBN 978-80-228-2219-0
- BÚRYOVÁ, D. – SEDLÁK, P. 2016. Drevená budova zrubovej konštrukcie – komplexná predikcia a kvantifikácia spotreby energie. In. *Dřevostavby 2016*. Volyně: Vydavateľstvo Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola. 2016. ISBN 978-80-227-4147-7
- CHMÚRNY, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7
- CHMÚRNY, I. 2019. Tepelná ochrana budov. Tepelnoizolačné vlastnosti stavebných konštrukcií. Bratislava. Nakladateľstvo STU. 2019. ISBN 978-80-227-4954-1
- JOCHIM, S.- BUBNIAK, M. Ekologické zrubové stavby realizované prírodnými materiálmi so zápornou bilanciou CO<sub>2</sub>. In *Stavebné materiály: Technológie - Konštrukcie - Výrobky*. ISSN 1336-7617, 2012, roč. 8, č. špeciál, s. 46-49.

KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

ŠTOMPF, P. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosť stav panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 91 strán, 2 prílohy

## Summary

**The influence of thermo-mechanical properties of panel walls based on wood on the specific heating energy demand.** The paper is focused on the analysis of thermo-mechanical properties of wooden building structures related to energy consumption for heating, following the current knowledge and results of the research. The project financed by the Slovak Research and Development Agency is an integral part of the research. The project is carried out at the Department of Wooden Structures: “Ultra-low-energy Green Buildings Based on Renewable Wood Raw Material”, within the framework of the Slovak Research and Development Agency grant. The examination and assessment are based on comparing the results of theoretical analysis of thermo-mechanical properties of both structures using calculation program – ISOVER Fragment. The research is followed by the application of both structures in the specific project of house and the calculation of heating energy demand.

## Keywords

Wooden constructions; wood-based perimeter walls; thermo-mechanical properties; heating energy demand.

## Contact Address

Patrik Štompf, Stanislav Jochim  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Sciences and Technology  
Technical University in Zvolen  
T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic  
xstompf@is.tuzvo.sk, jochim@tuzvo.sk

## ANALÝZA ENERGETICKEJ HOSPODÁRNOSTI RODINNÉHO DOMU PANELOVEJ KONŠTRUKCIE NA BÁZE DREVA

Patrik Štompf, Stanislav Jochim

### 1 Úvod

Požiadavky na energetickú hospodárnosť budov (EHB) sa podobne ako požiadavky na tepelno-technické vlastnosti obalových stavebných konštrukcií vyvíjali postupne. Postupné sprísňovanie požiadaviek na energetickú hospodárnosť a spotrebu energie reflektujú negatívne globálne trendy v energetike a životnom prostredí, ktoré vedú k výstavbe ultranízkoenergetických budov a budov s takmer nulovou potrebou energie. Výstavba takýchto budov bude v kontexte Európskej Únie pri novostavbách povinnosťou od 1.1. 2021.

Z hľadiska energetickej hospodárnosti a dopadov na životné prostredie má drevostavba viaceru výhod. Na rozdiel od ostatných stavebných materiálov a konštrukčných riešení, ktoré sa často musia prácne upravovať aby dosiahli parametre ultranízkoenergetických budov, moderná drevostavba pri správnom návrhu nemá problém vyhovieť takýmto požiadavkám a je dokonca schopná viesť k ďalším možnostiam energetických úspor a racionálnych riešení. Okrem úspor pri prevádzke stavby poskytuje drevostavba široký priestor úspor daných samotnou podstatou základného konštrukčného materiálu – dreva. Drevo je typický príklad obnoviteľného materiálu s minimálnymi energetickými nárokmi na spracovanie, prepravu a zapracovanie do stavby a je stále vo väčšej miere sprevádzané v rámci drevostavby materiálmi na obnoviteľnej a prírodnej báze (RÚŽIČKA, 2014).

Pri hodnotení energetickej hospodárnosti budovy, vzhľadom na súčasné požiadavky, je potrebné zamerať sa na zníženie spotreby energie na vykurovanie – čo súvisí s kvalitným návrhom obalového plášťa budovy a predpokladá adekvátne využitie pasívnych solárnych i vnútorných tepelných ziskov, resp. aj využitie aktívnych solárnych ziskov. Rovnako je potrebné, aby sa zníženie spotreby primárnej energie na vykurovanie, chladenie, vetranie, prípravu teplej vody a osvetlenie s pokrytím celkovej potreby primárnej energie obnoviteľnými zdrojmi stalo prirodzenou a neoddeliteľnou súčasťou postupu navrhovania ultranízkoenergetických budov.

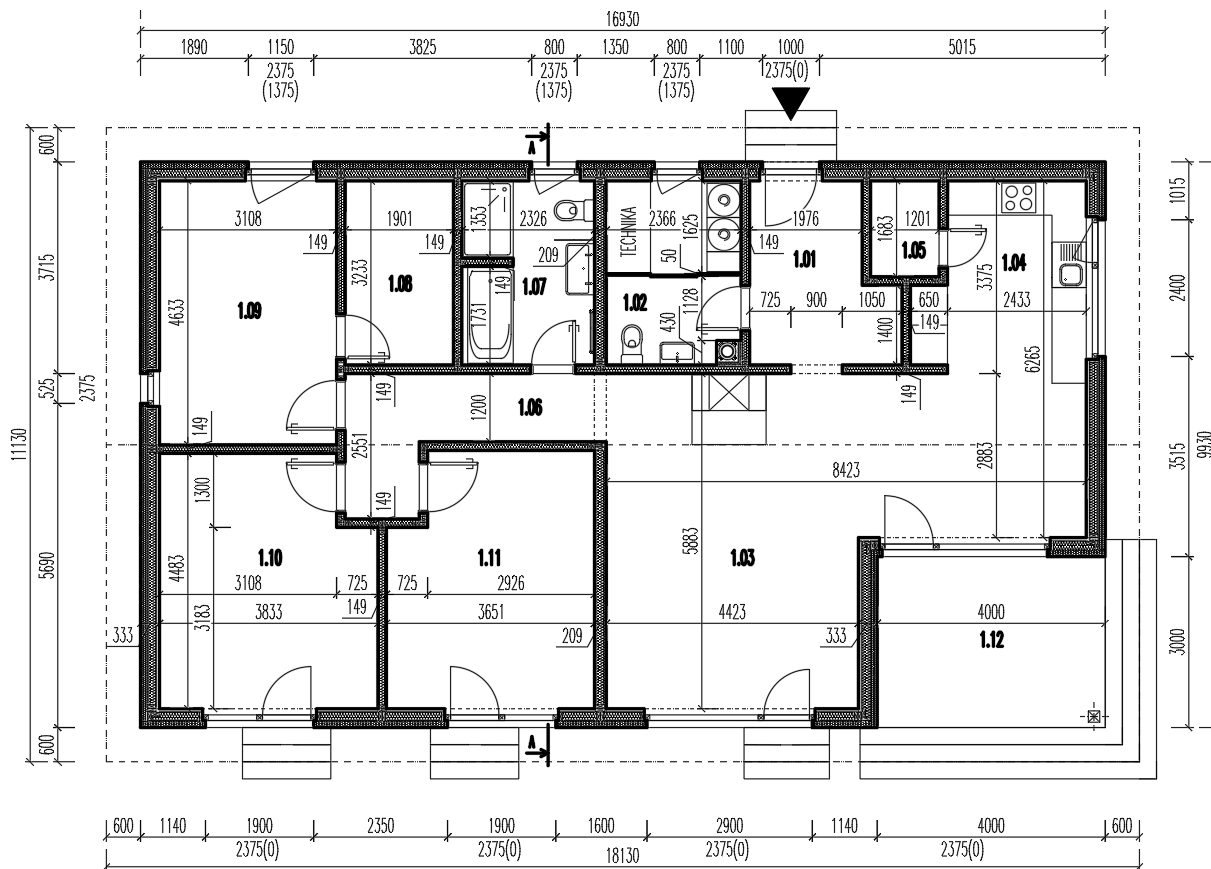
Z pohľadu riešenia energetickej hospodárnosti budov a zatriedenia do jednotlivých energetických tried v súčasnosti platia postupy a požiadavky STN 73 0540-2 a vyhlášky č. 364/2012, ktorou sa vykonáva zákon č. 555//2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov.

Cieľom príspevku je analýza projektového riešenia energetickej hospodárnosti prízemného rodinného domu panelovej konštrukcie na báze dreva. Premennou analýzy EHB je použitie rôznych energetických zdrojov na vykurovanie s cieľom dosiahnuť požadovanú energetickú triedu A1, resp. energetickú triedu A0.

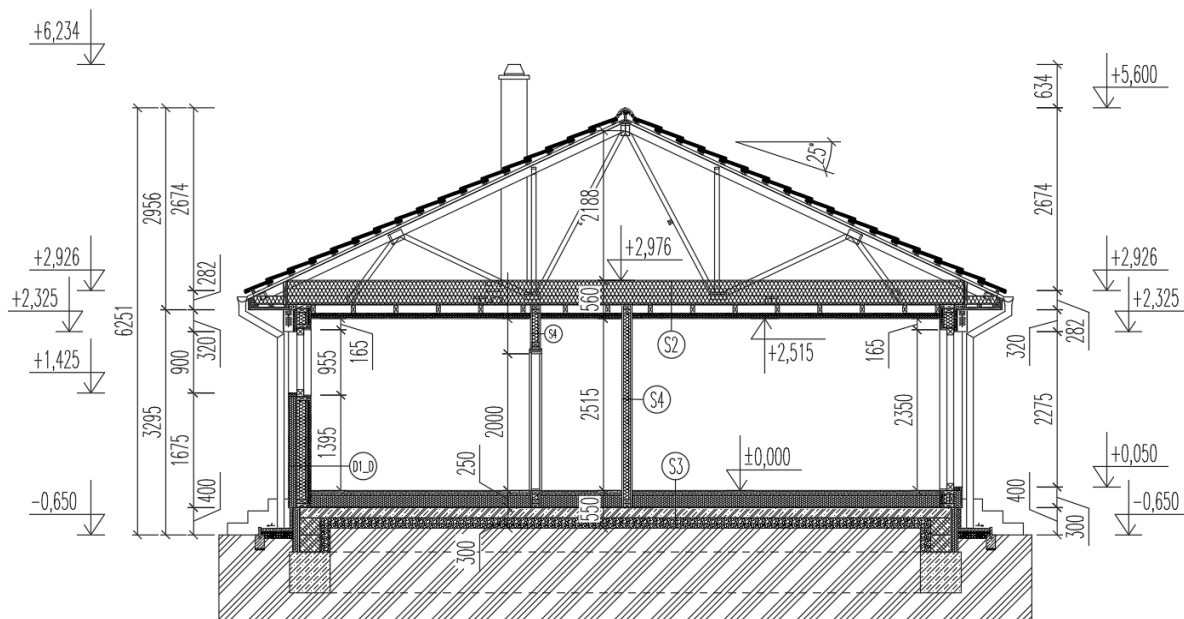
### 2 Rodinný dom pre analýzu EHB

Na Obrázkoch 1. a 2. sú zobrazené pôdorysné riešenie a rez reprezentatívneho jednopodlažného rodinného domu od firmy Inardex. V rámci konštrukcie rodinného domu bola použitá skladba obvodovej steny WHC ultra D1\_D od firmy WHC.





Obrázok 1. Pôdorysné riešenie rodinného domu: Inardex – 001 S. (kreslil: P. Štompf).



Obrázok 2. Priečny rez A-A rodinného domu: Inardex – 001 S. (kreslil: P. Štompf).

### 3 Metodika

#### 3.1 Analýza a posúdenie tepelno-technických vlastností

Analýza a vyhodnotenie tepelno-technických vlastností netransparentných častí obalových konštrukcií boli realizované programom ISOVER Fragment s metódou jednorozmerného šírenia tepla podľa STN 73 0540-2.

Výpočet priemernej hodnoty súčiniteľa prechodu tepla transparentných – výplňových konštrukcií (okien a terasových dverí) bol spracovaný podľa STN 73 0540-4.

#### 3.2 Projektové hodnotenie energetickej hospodárnosti rodinného domu

- 1) Výpočet a hodnotenie mernej potreby tepla na vykurovanie rodinného domu boli stanovené pre normalizované podmienky a vykurovaciu sezónu v zmysle STN 73 0540-2.
- 2) Výpočet potreby energie na prípravu teplej vody (Tabuľka 5.) bol prevedený podľa STN EN 15316 – požadovaný objem teplej vody za deň.
- 3) Hodnotenie energetickej hospodárnosti budovy z hľadiska potreby energie na vykurovanie, prípravu teplej vody, celkovej potreby energie a potreby primárnej energie a zatriedenie do jednotlivých energetických tried bolo vypracované podľa vyhlášky č. 364/2012 (Tabuľka 6. – 9.).

### 4 Výsledky

#### 4.1 Tepelno-technické vlastnosti obalových konštrukcií

V Tabuľke 1. sú uvedené výpočtové hodnoty súčiniteľov prechodu tepla obalových konštrukcií rodinného domu.

Tabuľka 1. Výpočtové hodnoty súčiniteľa prechodu tepla  $U$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ].

Konštrukcia	$U_i$ [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
Obvodová stena	0,148
Strop pod nevykurovaným priestorom	0,096
Podlaha	0,140
Okná	0,780 <sup>(1)</sup>
Vchodové dvere	0,900
Poznámka: <sup>(1)</sup> priemerná hodnota súčiniteľa prechodu tepla okien budovy	

#### 4.2 Ročná potreba tepla na vykurovanie rodinného domu

V Tabuľke 2. sú uvedené celkové tepelné straty budovy – prechodom tepla cez obalové konštrukcie, vplyvom tepelných mostov a merná tepelná strata vetraním.

Tabuľka 2. Tepelné straty rodinného domu.

P.č.	Konštrukcia	$U_i$ hodnota [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	Plocha $A_i$ [ $m^2$ ]	Red. faktor $b_{xi}$	$U_i \cdot A_i \cdot b_{xi}$ [ $W/K$ ]	Výsledná tepelná strata [ $kWh/rok$ ]
1.	Obvodová stena	0,148	130,7	1	19,74	1 588,63
2.	Strop nad exteriérom	0,00	0,00	1	0,00	0,00
3.	Strop nad suterénom	0,00	0,00	0,5	0,00	0,00
4.	Strecha/strop	0,096	156,11	0,8	12,91	984,68
5.	Podlaha na teréne	0,14	156,11	1	21,85	1 795,00
6.	Okná	0,78	31,88	1	24,86	2 042,11
7.	Strešné okná	0,00	0,00	1	0,00	0,00

8.	Vchodové dvere	0,90	2,61	1	2,35	193,10
	Plocha celkom $\sum A_i$		<b>477,42</b>	-	-	-
	<b>Tepelné straty</b>		<b>Označenie</b>	-	<b>Výsledná tepelná strata</b>	
					[W/K]	[kWh/rok]
	Celková merná tepelná strata		$H_{T,m}$	-	80,41	6 603,52
	Zväčšenie vplyvom tep. mostov		$\Delta H_{T,m}$	-	23,87	1 960,47
	Výsledná merná tepelná strata		$H_T$	-	104,28	8 564,00
	Merná tepelná strata vetraním		$H_v$	-	55,95	4 595,08
	Merná tepelná strata vetraním (NVR)		$Q_{vetr.}$	-	31,33	2 573,24
	Merná tepelná strata budovy		$H$	-	160,23	13 159,07
	Merná tepelná strata budovy (NVR)		$H$	-	135,61	11 137,24
	<b>Tepelné straty celkom</b>		<b><math>Q_L</math></b>	-	-	<b>11 137,24</b>

**Poznámka:** NVR – nútené vetranie s rekuperáciou tepla

V Tabuľke 3. sú uvedené interné, pasívne, solárne a celkové vnútorné tepelné zisky rodinného domu.

Tabuľka 3. Tepelné zisky rodinného domu.

Tepelné zisky	Označenie	Výpočet	Celkové interné tepelné zisky	
Interné tepelné zisky	$Q_i$	$Q_i = 5 \cdot q_i \cdot A_b$	3 122,30	[kWh/rok]
Pasívne solárne zisky	$Q_s$	$Q_s = \sum I_{s,j} \cdot \sum 0,5 \cdot g_w \cdot A_i$	1 980,66	[kWh/rok]
Celkové vnútorné tepelné zisky	$Q$	$Q = Q_i + Q_s$	5 102,95	[kWh/rok]

**Poznámka:**  $A_b$  – celková plocha podlaží (156,11 m<sup>2</sup>),  $q_i = 4$  [W/m<sup>2</sup>] (rodinné domy)

V Tabuľke 4. je uvedené porovnanie mernej potreby tepla na vykurovanie rodinného domu podľa STN 73 0540-2.

Tabuľka 4. Merná potreba tepla na vykurovanie rodinného domu (STN 73 0540-2).

Popis	Označenie	Výpočet	Merná potreba tepla	
Merná potreba tepla na vykurovanie „2“	$Q_{H,2,2}$	$Q_{H,2,2} = Q_h / V_b$	13,10	[kWh/m <sup>3</sup> .rok]
Normová potreba tepla na vykurovanie (normalizovaná a odporúčaná hodnota)	$Q_{H,nd,r2,2}$	$Q_{H,nd,r2,2} = 5,14 + 12,72 \cdot \sum A_i / V_b$	<b>17,73</b>	
	$Q_{H,nd,r3,2}$	$Q_{H,nd,r3,2} = 0,5 \cdot Q_{H,nd,r2,2}$	<b>8,87</b>	
Merná potreba tepla na vykurovanie „1“	$Q_{H,2,1}$	$Q_{H,nd,N1} = Q_h / A_b$	40,28	[kWh/m <sup>2</sup> .rok]
Normová potreba tepla na vykurovanie (normalizovaná a odporúčaná hodnota)	$Q_{H,nd,r2,1}$	$Q_{H,nd,r2,1} = Q_{H,nd,r2,2} \cdot h_{k,pr}$	<b>49,64</b>	
	$Q_{H,nd,r3,1}$	$Q_{H,nd,r3,1} = 0,5 \cdot Q_{H,nd,r2,1}$	<b>24,82</b>	

**Poznámka:**  $A_b$  – celková podlahová plocha budovy (156,11 m<sup>2</sup>),  $V_b$  – celkový obostavaný objem budovy (480,05 m<sup>3</sup>),  $\sum A_i / V_b = 0,99$  [1/m] (faktor tvaru budovy),  $h_{k,pr} = 2,8$  m (normatívna výška podlaží)

### 4.3 Potreba energie na prípravu teplej vody

V Tabuľke 5. je uvedená ročná potreba energie na prípravu teplej vody na m<sup>2</sup> podlahovej plochy za rok.

Tabuľka 5. Potreba energie na prípravu teplej vody (STN EN 15316).

Popis	Označenie	Výpočet	Potreba energie na prípravu teplej vody/ denný objem teplej vody	
Objem teplej vody	$V_{w,day}$	$V_{w,day} = 0,001 \cdot V_{w,f,day} \cdot f$	31,22	[m <sup>3</sup> /deň]
Potreba energie na prípravu teplej vody	$Q_w$	$Q_w = 4,182 \cdot V_{w,day} \cdot (\theta_{w,del} - \theta_{w,0})$	6 528,1	[MJ/deň]
		$Q_{w,1} = 0,277777777778 \cdot Q_w$	1 813,36	[kWh/deň]
		$Q_{w,2} = Q_{w,1}/A_b$	11,62	[kWh/m <sup>2</sup> .a]
<b>Poznámka:</b> f – počet funkčných jednotiek, ktoré sa uvažujú vo výpočte (rodinné domy: veľkosť podlahovej plochy), $V_{w,f,day}$ – objem teplej vody v litroch s teplotou $\theta_{w,del}$ na funkčnú jednotku na deň (50 l/deň/osoba = 200 l/deň), $\theta_{w,del} = 60$ ° C (teplota ohriatej vody), $\theta_{w,0} = 10$ ° C (teplota studenej vody)				

### 4.4 Projektové hodnotenie energetickej hospodárnosti rodinného domu

Tabuľka 6. uvádza jednotlivé škály energetických tried a porovnanie výpočtových hodnôt potreby energie na vykurovanie, prípravu teplej vody a celkovej potreby energie v [kWh/m<sup>2</sup>.a] s vyhláškou č. 364/2012.

Tabuľka 6. Škály energetických tried EHB v [kWh/m<sup>2</sup>.a].

Miesto spotreby	Kategórie budov	Triedy energetickej hospodárnosti budovy						
		A	B	C	D	E	F	G
Vykurovanie	Rodinné domy	≤ 42	43-86	87-129	130-172	173-215	216-258	>258
Požiadavka – energetická trieda A		<b>40,28</b>	-	-	-	-	-	-
Príprava teplej vody	Rodinné domy	≤ 12	13-24	25-36	37-48	49-60	61-72	>72
Požiadavka – energetická trieda A		<b>11,62</b>	-	-	-	-	-	-
Celková potreba energie v budove	Rodinné domy	≤ 54	55-110	111-165	166-220	221-275	276-330	>330
Požiadavka – energetická trieda A		<b>51,90</b>	-	-	-	-	-	-

Pri výpočte potreby primárnej energie pre rodinný dom boli uvažované tri alternatívne energetické zdroje vykurovania – tepelné čerpadlo vzduch-voda, kotol na zemný plyn a kotol na biomasu. V Tabuľke 7. sú zobrazené transformačné a prepočítavacie faktory účinnosti výroby a distribúcie tepla, emisií oxidu uhličitého, primárnej energie a hodnoty výhrevnosti palív podľa vyhlášky č. 364/2012. Tabuľka 8. obsahuje výpočet globálneho ukazovateľa – potreby primárnej energie pre jednotlivé alternatívy.

**Tabuľka 7.** Transformačné a prepočítavacie faktory účinnosti výroby a distribúcie tepla, emisií oxidu uhličitého, primárnej energie a hodnoty výhrevnosti palív (vyhláška 364/2012).

Energetický zdroj	Spôsob transformácie	Merná jednotka (m. j.)	Výhrevnosť [kWh/m. j.]	Faktor		
				transformácie a distribúcie energie	emisie CO <sub>2</sub> K [kg/kWh]	primárnej energie $f_p$
Ohriaty vzduch, elektrina	Tepelné čerpadlo: vzduch-voda	kWh	-	2,9	0,167	2,2
Zemný plyn	Nízko-teplotný kotol	m <sup>3</sup>	9,59	0,90 – 0,93	0,220 <sup>b)</sup>	1,10
Drevené peletky	Kotol na biomasu	kg	4,72	0,86	0,020	0,20

**Tabuľka 8.** Potreba primárnej energie pre rodinný dom – jednotlivé energetické nosiče (podľa Tabuľky 7.).

Popis	Označenie	Výpočet	Celková ročná potreba primárnej energie	
Globálny ukazovateľ – primárna energia (tepelné čerpadlo)	Q <sub>p</sub>	$Q_p = Q_{H,nd,N2} \cdot f_{p,1} / SCOP + Q_w \cdot f_{p,1}$	56,38	[kWh/m <sup>2</sup> .rok]
Globálny ukazovateľ – primárna energia (zemný plyn)		$Q_p = Q_{H,nd,N2} \cdot f_{p,2} / \eta_2 + Q_w \cdot f_{p,1}$	75,06	[kWh/m <sup>2</sup> .rok]
Globálny ukazovateľ – primárna energia (drevené peletky)		$Q_p = Q_{H,nd,N2} \cdot f_{p,3} / \eta_3 + Q_w \cdot f_{p,1}$	35,19	[kWh/m <sup>2</sup> .rok]

**Tabuľka 9.** Škála energetických tried globálneho ukazovateľa – primárna energia v [kWh/m<sup>2</sup>.a].

Miesto spotreby	Kategoríe budov	Triedy energetickej hospodárnosti budovy							
		A0	A1	B	C	D	E	F	G
Globálny ukazovateľ – primárna energia	Rodinné domy	≤ 54	55-108	109-216	217-324	325-432	433-540	541-648	>648
Požiadavka – energetická trieda A1									
Tepelné čerpadlo: vzduch-voda		-	<b>56,38</b>	-	-	-	-	-	-
Kotol na zemný plyn		-	<b>75,06</b>	-	-	-	-	-	-
Kotol na biomasu – drevené peletky		<b>35,19</b>	-	-	-	-	-	-	-

## 5 Vyhodnotenie výsledkov

Z výpočtu potreby tepla na vykurovanie vyplýva:

- Rodinný dom spĺňa súčasné požiadavky na potrebu tepla na vykurovanie podľa STN 73 0540-2.
- Návrh rodinného domu nespĺňa cieľové odporúčané hodnoty potreby tepla na vykurovanie platné od 1.1. 2021, aj keď obalové konštrukcie spĺňajú požadované  $U$  - hodnoty v rámci kategórie ultranízkoenergetických budov.

Z projektového hodnotenia energetickej hospodárnosti budovy vyplýva:

- Rodinný dom spĺňa požiadavky vyhlášky č. 364/2012 z hľadiska zatriedenia do požadovanej energetickej kategórie – A.

2. Všetky alternatívne energetické zdroje vykurovania pri výpočte potreby primárnej energie spĺňajú minimálnu požiadavku vyhlášky na energetickú triedu A1.
3. Najvhodnejší typ energetického zdroja je kotol na drevné peletky, z dôvodu najpriaznivejšieho faktora primárnej energie. Uvedená alternatíva vykurovania umožňuje splnenie požiadavky energetickej hospodárnosti rodinného domu kategórie A0.

## 6 Záver

Najvhodnejšie riešenie plošných a priestorových parametrov budovy je také, ktoré minimalizuje teplovýmenné plochy pri danom obostavanom objeme, čo vyjadruje faktor tvaru budovy. Analyzovaný prízemný rodinný dom s nepravidelným pôdorysným tvarom má však nepriaznivý faktor tvaru budovy, t.z. vyššia teplovýmenná plocha vzhľadom k obostavanému objemu budovy.

Ďalšími opatreniami pre efektívne zníženie ročnej potreby tepla na vykurovanie je dôležité optimalizovať tepelné zisky (pasívne, aktívne) a minimalizovať tepelné straty vetraním (účinné vetranie s rekuperáciou tepla, nulová infiltrácia vzduchu cez obalové konštrukcie). Pre optimalizáciu pasívnych solárnych ziskov je dôležitá správna orientácia budovy vzhľadom na svetové strany. Pri posudzovanom rodinnom dome sú najväčšie plochy otvorových výplní orientované na západnú stranu, čo predpokladá zníženie solárnych ziskov budovy v porovnaní s ich teoretickou orientáciou na južnú stranu.

Pri všetkých troch alternatívach zdrojov vykurovania je splnená súčasná požiadavka EHB RD na energetickú triedu A1. Vzhľadom na celkovú potrebu primárnej energie pri hodnotení EHB je najvhodnejšia alternatíva energetického zdroja kotol na biomasu. Neekologické sú neobnoviteľné zdroje energie – elektrina a zemný plyn. Tepelné čerpadlo s elektrinou na jeho prevádzku pri vysokej účinnosti výroby tepla vychádza vhodnejšia alternatíva ako kotol na zemný plyn.

## PodĎakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu č. APVV-17-0206 “Ultra-nízkoenergetické zelené budovy na báze obnoviteľnej suroviny dreva” a spolupráce Katedry drevených stavieb DF TU vo Zvolene s firmami WHC s.r.o. a Inardex s.r.o.

## Literatúra

- BAHÝL, V. – IGAZ, R. 2010. Stavebná fyzika. Zvolen: Vydavateľstvo TU vo Zvolene. 2010. ISBN 978-80-228-2219-0
- BÚRYOVÁ, D. – SEDLÁK, P. 2016. Drevená budova zrubovej konštrukcie – komplexná predikcia a kvantifikácia spotreby energie. In. *Dřevostavby 2016*. Volyně: Vydavateľstvo Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola. 2016. ISBN 978-80-227-4147-7
- CHMÚRNY, I. 2014. Stavebná tepelná technika. Základy tepelnej ochrany budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2014. ISBN 978-80-227-4147-7
- CHMÚRNY, I. 2019. Tepelná ochrana budov. Tepelnoizolačné vlastnosti stavebných konštrukcií. Bratislava. Nakladateľstvo STU. 2019. ISBN 978-80-227-4954-1
- KOLB, J. 2011. Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. 3., aktualizované vydání. Praha: Grada Publishing, a.s. 2011. ISBN 978-80-247-4071-3
- JOCHIM, S. 2016. Determining the heat transfer coefficient of insulated log-cabin walls based on one-dimensional heat conduction. In *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen: Vedecký časopis Drevárskej fakulty*. 2016. č. 2, s. 101-111. ISSN 1336-3824.

KRAJČÍK, M. – PETRÁŠ, D. – SKALÍKOVÁ, I. 2019. Energetické hodnotenie budov. Bratislava: Nakladateľstvo STU. 2019. ISBN 978-80-227-4903-9

RÚŽIČKA, M. 2014. Moderní dřevostavba. Praha: Grada Publishing, a.s. 2014. ISBN 978-80-247-3298-5

STN 73 0540-2/Z1+Z2: 2019 Tepelnotechnické vlastnosti stavebných konštrukcií a budov. Tepelná ochrana budov. Časť 2: Funkčné požiadavky

ŠTOMPF, P. 2020. Tepelno-technické vlastnosti a vlhkosť stav panelových stien na báze dreva s prírodnými izoláciami: Diplomová práca. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene. Drevárska fakulta. 2020. 91 strán, 2 prílohy

TYWONIAK, J. a kol. 2012. Nízkoenergetické domy 3: nulové, pasívne a ďalšie. Praha: Grada Publishing, a.s. 2012. ISBN 978-80-247-3832-1

Vyhláška č. 311/2009 Z. z. Ministerstva výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o výpočte energetickej hospodárnosti budov a obsah energetického certifikátu.

Vyhláška č. 364/2012 Z. z. Ministerstva dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja Slovenskej republiky, ktorou sa vykonáva zákon č. 555//2005 Z. z. o energetickej hospodárnosti budov a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov.

## Summary

### **Analysis of energy efficiency of the building based on wood using panel construction.**

The paper is focused on the analysis of energy efficiency of the building based on wood related to heating energy demand, energy for hot water preparation, total energy demand and primary energy demand. The project is carried out at the Department of Wooden Structures: “Ultra-low-energy Green Buildings Based on Renewable Wood Raw Material”, within the framework of the Slovak Research and Development Agency grant. The research is based on the project evaluation of energy efficiency of the single storey building and the calculation of heating energy demand and analysis of primary energy demand within comparison of different heating sources and classification into energy classes.

## Keywords

Wooden constructions; ultra-low energy houses; heating energy demand; primary energy demand.

## Contact Address

Patrik Štompf, Stanislav Jochim  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Sciences and Technology  
Technical University in Zvolen  
T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic  
xstompf@is.tuzvo.sk, jochim@tuzvo.sk

## PREHLAD SEPARAČNÝCH TECHNÍK PRE HUDOBNÉ SIGNÁLY

Peter Kasák, Michal Chmulík, Roman Jarina

### 1 Úvod

Ak by sme mali zoradiť kategórie umenia ktoré najviac ovplyvňujú náš každodenný život, na prvých miestach by bola bezpochyby hudba. Zvlášť v súčasnej epoche technologickej vyspelosti, majú užívatelia internetu prístup k nespočetnému množstvu hudobných nahrávok. Na streamovacích službách (Spotify, SoundCloud, Apple Music) a hudobných portáloch (Bandcamp, ReverbNation), sa za každých okolností očakáva vysoká kvalita produkcie, čo už dnes podvedome považujeme za samozrejmosť. Požadovaná kvalita však nie je zaručená pri mnohých finálnych nahrávkach. Staršie zaznamenávacie techniky, devalvácia na analógových prenosových médiách, prípadne aj novšie nekorektné vytvorené nahrávky, sú len niektoré z dôvodov pre nespokojnosť s výsledným zvukom. V tom prípade by sme chceli dodatočne modifikovať finálne znenie vytvorené procesom nahrávania a mixovania, pre dosiahnutie lepšej kvality, a tým aj umocnenie hudobného zážitku. Avšak v prípade, že nemáme prístup k originálnym hudobným zdrojom obsiahnutým v danej nahrávke, je cesta dodatočnej editácie takmer nemožná. Ak nie je možné hudobné dielo z časových a finančných dôvodov znova nahrávať a produkovať, ponúka sa možnosť diskretizácie pôvodných nástrojov. Separáciu, pri ktorej nemáme znalosť o individuálnych akustických zdrojoch a ich spôsobe homogenizácie, nazývame slepá separácia zdrojov (BSS - *Blind Source Separation*), v respektíve slepá separácia audio zdrojov (BASS - *Blind Audio Source Separation*). S prístupom ku kombinácii pôvodných hudobných signálov, nám dnešné technologické nástroje umožňujú zapojiť proces rekonštrukcie týchto cieľových zdrojov v podobe niektorej z techník hudobnej separácie zdrojov (MSS - *Musical Source Separation*).



Obrázok 1. Ilustrácia separácie hudby.

Mohli by sme požadovať zosilnenie alebo potlačenie niektorých nástrojov alebo vokálov, umiestnenie inštrumentov na iné miesto v rámci stereofónie, rozšírenie na priestorový zvuk, potlačenie niektorých rušivých elementov v nahrávke, a iné postprodukčné úlohy. Ďalej je MSS využívaní ako počiatočná fáza pri ďalších procesoch realizovaných na jednotlivých hudobných inštrumentoch. Spomenúť môžeme napríklad hudobnú transkripciu, vytvorenie



karaoke systémov, edukatívne účely separácie pre hudobníkov, či iné oblasti s potrebou získavania hudobných informácií (MIR - *Music Information Retrieval*). Pre úlohu MSS bolo v posledných dekádach vyvinuté veľké množstvo úspešných algoritmov, pričom s vývojom a dostupnosťou umelej inteligencie (AI - *Artificial Intelligence*) a strojového učenia (ML - *Machine Learning*) zaznamenávame ich exponenciálny nárast. V tejto prehľadovej práci sú uvedené najdôležitejšie nástroje a smery v širokej problematike MSS.

## 2 Definovanie vlastností latentných zdrojov a spôsoby ich kombinácie

Separácia hudobných zdrojov nie je úloha, ktorá sa dá pri obrovskej škále rozmanitých nahrávok zovšeobecniť na univerzálny mechanizmus. Pri nespočetnom množstve existujúcich hudobných nástrojov a kompozičných prístupov je jasné, že jeden systém separácie nebude úspešne fungovať pri heterogénnych žánroch a inštrumentálnych obsadeniach. Pred samotnou úlohou separácie je teda nevyhnutné aspoň z časti poznať vlastnosti cieľových zdrojov, konkrétne ich charakteristické správanie v čase a frekvenčnom spektre.

Pri MSS úlohe môžeme mať vo všeobecnosti dva základné princípy zmiešania zdrojov:

- Lineárna kombinácia
- Konvolučná kombinácia

Pri lineárnej kombinácii hudobných zdrojov máme výsledný signál  $x$ , ktorý vznikol v softvéri digitálnej audio stanice (DAW - *Digital Audio Workstation*), prípadne analógovej zmiešavacej konzole. Matematický model takejto kombinácie bude potom

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^J a_{ij} s_j(t), \quad (1)$$

kde  $i = 1, \dots, I$  je celkový počet kanálov a  $j = 1, \dots, J$  je celkový počet zdrojov, odpovedajúcich váhovým koeficientom  $a$ , ktoré určujú amplitúdovú príspevok každého zdroja.

Väčšina nahrávok v reálnom prostredí vzniká s prídavným dozvukom, prípadne sa rôzne časové oneskorenia pridávajú synteticky v postprodukčnej fáze. V tom prípade vzniká kombinácia s konvolúciou medzi zdrojmi  $s(t)$  a zmiešavacími koeficientami  $a_{ij}$ , čo je výsledkom impulznej odozvy miestnosti, a teda aj oneskorenia medzi zdrojmi (nástrojmi) a senzormi (mikrofónmi):

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^J (a_{ij} * s)(t). \quad (2)$$

Aj formulácia v rovnici má však svoje obmedzenia, a platí len pri statických zdrojoch počas nahrávania. Pri niektorých živých vystúpeniach je bežný pohyb hudobníkov a tým aj variabilná konvolučná odozva v závislosti od ich umiestnenia. Vhodnejšia definícia determinuje príspevok každého zdroja v priestore ako:

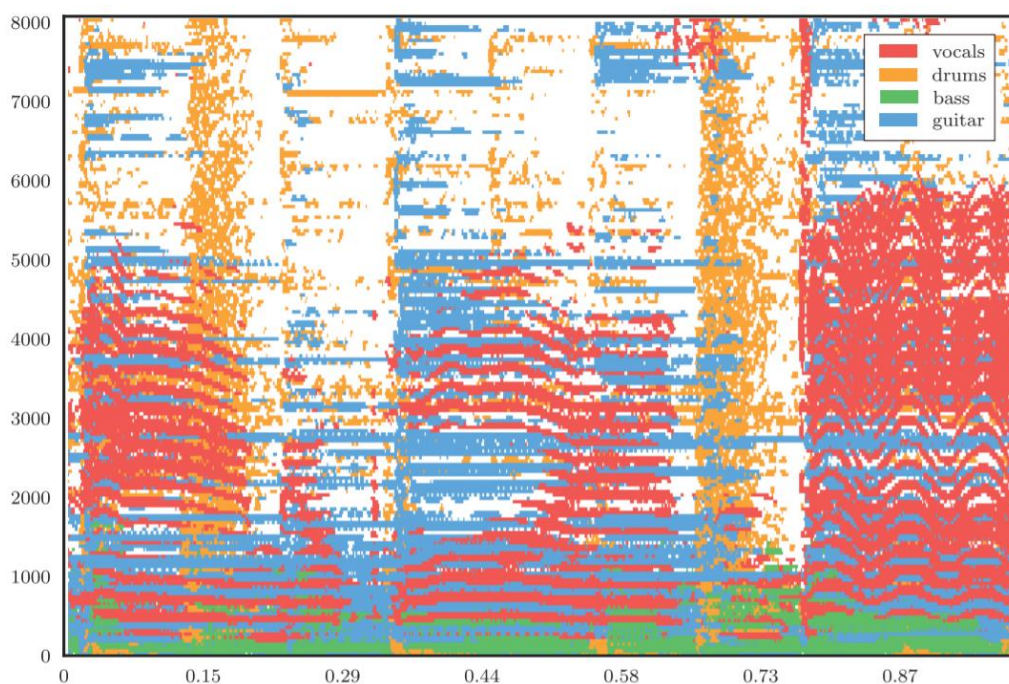
$$x_i(t) = \sum_{j=1}^J s'_{i,j}(t), \quad (3)$$

kde  $s'_{i,j}(t)$  je priestorový obraz zdroja  $j$  v kanáli  $i$  ako  $s'_{i,j}(t) = \sum_{j=1}^J (m_{ij} * s_{ij})(t)$ .

Pre vzniknutú superpozíciu, je nevyhnutné pred separáciou zvoliť vhodnú alternatívnu reprezentáciu signálov. Niektoré vlastnosti reprezentácie sú rozhodujúce pre úspešnú

segregáciu originálnych zdrojov. Umožňujú jednoduchšie a efektívnejšie analyzovanie, zlepšujú účinnosť algoritmov separácie, a v neposlednom rade zabezpečujú bezproblémovú invertibilnosť do pôvodnej domény bez prídavných artefaktov spôsobených rekonštrukciou. Po prevode signálu do diskretnej oblasti je výhodné používať časovo-frekvenčnú reprezentáciu, ktorá predstavuje dvojdimenzionálnu lokalizáciu frekvencií v čase. Príkladom je najčastejšie využívaná krátkodobá Fourierova transformácia (STFT – *Short Time Fourier Transform*), ktorá využíva lokálnu oknovú funkciu na segmentovanie časovej osi. Podstatná vlastnosť takejto transformácie je rozdelenie audio signálu do krátkodobých kvázistacionárnych úsekov. Tie vykazujú približne rovnaké štatistické vlastnosti, čo umožňuje v ďalšom procese separácie modelovať ich charakteristiky, a vytvárať účinné filtračné techniky.

Po transformácii do časovo-frekvenčnej oblasti a obdržaní spektrogramu (obrázok 2) je možné vidieť, v čom sú obštrukcie pri dekompozícii kombinovaných hudobných zdrojov. Individuálne nástroje majú vysokú časovú a frekvenčnú koreláciu, často znásobenú nelineárnymi filtermi pridanými v DAW softvéroch. Na druhej strane, každá skupina nástrojov má svoje unikátne vlastnosti, ktoré sú pri MSS nápomocné.



Obrázok 2. Kombinovaný spektrogram [52].

Hudobné signály môžu byť pri separačnej úlohe vo všeobecnosti rozdelené na:

- Harmonické zdroje
- Tranzientné zdroje

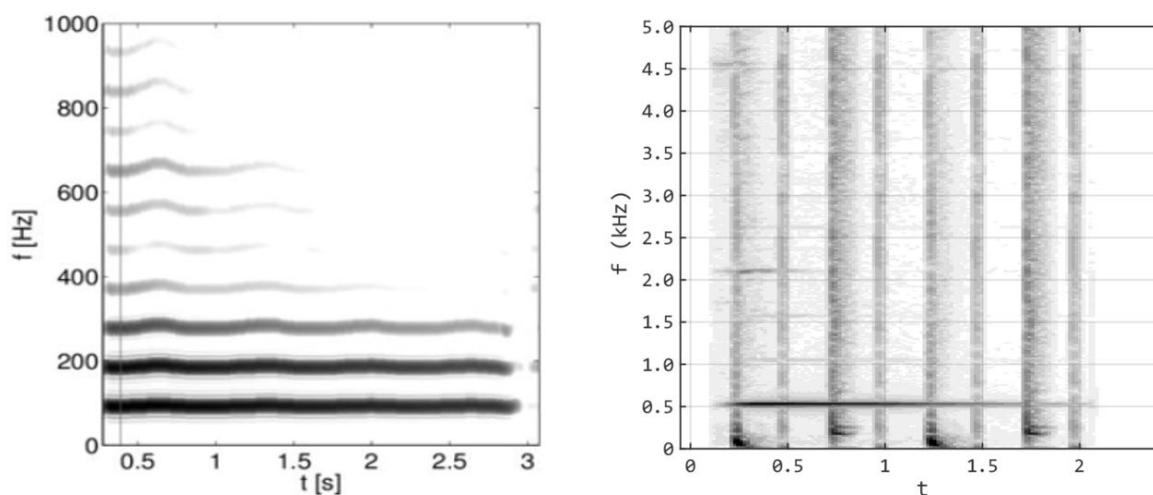
Táto kategorizácia je veľmi užitočná, kvôli kontrastným charakteristikám v časovo-frekvenčnej oblasti, čo je priamo využívané niektorými separačnými algoritmi.

Kategória harmonických nástrojov generuje periodický dej, ktorý nazývame tón. Tóny sú elementárnou časticou hudby a pomocou vzťahu medzi nimi definujeme konzonantné a dizonantné intervaly. Konzonantné intervaly znejú pre poslucháča príjemne a potešujúco, avšak práve tento efekt harmónie prináša pri polyfónii prekryvanie frekvenčného spektra nástrojov, a tým aj prekážky pri separácii. Periodické vlastnosti harmonických zdrojov

môžeme vidieť po prevode do časovo-frekvenčnej oblasti ako fundamentálnu frekvenciu a vyššie harmonické (Obrázok 3a), v hudobnej terminológii známe ako základný tón a jeho alikvoty. Najnižšia frekvencia je považovaná za základný tón, ktorým hudobníci pomenovávajú výšku, v ktorej daný inštrument znie (C4, E3...). Vyššie harmonické, inak nazývané parciálne alebo čiastkové frekvencie, sú celočíselnými násobkami základnej frekvencie. Podľa ich intenzity a zastúpenia v spektre sluchový systém rozlišuje charakteristickú farbu (timbre), ktorou nástroj znie. Napriek rovnakej fundamentálnej frekvencii je možné vďaka tejto timbrálnej charakteristike rozlíšiť zvuk rôznych nástrojov, aj keď hrajú presne ten istý tón.

Perkusívne nástroje majú tranzientný charakter a neurčitý tónový charakter, kvôli prevládajúcej šumovej zložke signálu. Tá vzniká extrémne komplexným spektrom, kvôli teoreticky nekonečnému počtu rezonančných módo, a teda aj kvantite konštruktívnych a deštruktívnych interferencií. Tento typ nástrojov slúži hudobníkom na orientovanie sa v rytmickej štruktúre hudobných diel. V spektrograme ich možno vidieť ako vertikálne zárezy, s rýchlym časovým nábehom (Obrázok 3b).

Ako bude ukázané v nasledujúcej kapitole, tieto anizotropné vlastnosti horizontálnych (harmonických) a vertikálnych (tranzientných) štruktúr, sú priamo využívané niektorými separačnými technikami.



Obrázok 3 a,b. STFT spektrogramy basgitary (a) a bicích (b).

Ďalšou dôležitou vlastnosťou hudobných signálov je pasivita väčšiny koeficientov v časovo-frekvenčnej doméne (z angl. *Sparse Signal*). Inak povedané, hudobné inštrumenty sú aktívne len na determinovaných frekvenčných a časových úsekoch.

Okrem technickej stránky sa pri definovaní zdrojov stretávame čoraz častejšie aj s hudobnou teóriou, ktorá môže viesť k pozitívnym prínosom pri návrhoch separačných algoritmov. Táto technika sa nazýva notačne informovaná zdrojová separácia (SISS - *Score-Informed Source Separation*), prehlbujúca robustnosť separácie vďaka teoretickej znalosti zdrojov, napriek ich zložitej spektrálnej rozpoznateľnosti [1]. Pri dostupnosti notového zápisu konkrétneho diela, môže jeho znalosť zlepšiť chápanie cieľových objektov a umocniť ich efektívnu segregáciu. Partitúry obsahujú napríklad aktiváciu a deaktiváciu jednotlivých inštrumentov, alebo ich aktuálne frekvenčné rozloženie. Presný fyzikálny čas aktivácií jednotlivých tónov je časovo náročné určiť z notového zápisu, pretože obsahuje len relatívny temporálny charakter. Tento problém riešia notačné audio algoritmy, o ktorých je viac informácií napríklad v [2]. Pomocou SISS sa dá vysporiadať aj s rôznymi prednesovými technikami nástrojov, ktoré

prinášajú problém do MSS. Ľudské ucho vníma hudbu kontinuálne a kontextuálne v dlhších časových úsekoch, avšak metódy založené na diskretných výpočtových technikách budú pri týchto hudobných ozdobách zlyhávať. Dobrým príkladom takého problému je prednesová technika vibráta, ktorá predstavuje periodické oscilovanie okolo primárneho tónu, alebo využitie flažoletov na strunových nástrojoch, pri ktorých znie prvý alikvotný tón.

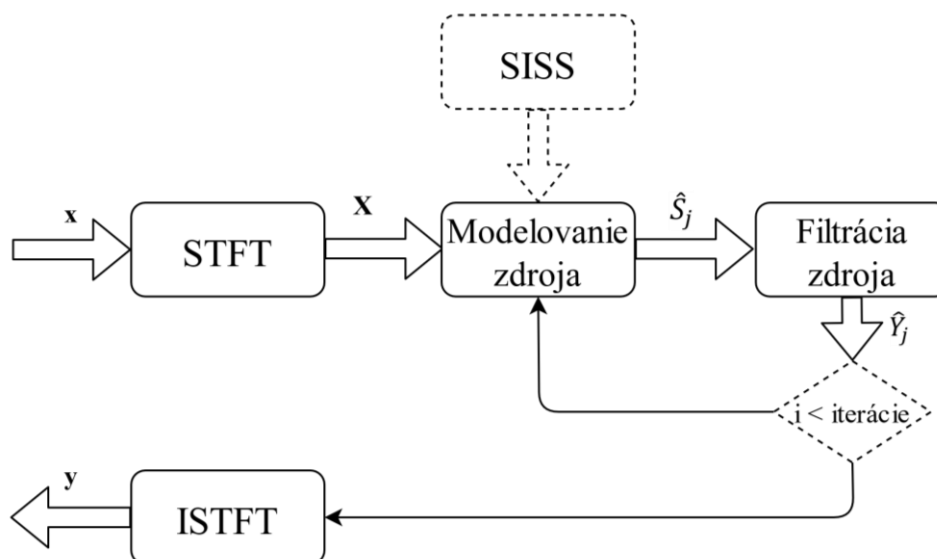
### 3 Definovanie separačného problému a všeobecný prístup estimácie

Ideálny cieľ ktorý chceme dosiahnuť ktoroukoľvek separáciou zameranou na kvalitu by sa dal označiť nasledovne: *Estimácia cieľového zdroja, bez prítomnosti reziduálneho signálu.* Matematicky môžeme vyjadriť túto situáciu nasledovne:

$$(x_i[n])_{1 \leq i \leq J} = f((s_m[n])_{1 \leq m \leq M}), \quad (4)$$

kde  $x_i[n]$  sú pozorované signály v kombinácii,  $s_m[n]$  sú zdrojové signály ktoré chceme obnoviť a  $f$  je zmiešavacia funkcia ktorá generuje vytvorenú kombináciu. Segregáciu samostatných zdrojov z vytvorenej kombinácie odlišujeme podľa už spomenutých podmienok jej vzniku. Okrem samotného spôsobu zmiešania je podstatné s koľko kanálmi a zdrojmi bola nahrávka vytvorená a na aký účel je separácia dedikovaná. Niektoré procesy separácie sú priamo určené na konkrétne scenáre.

Všeobecný princíp, ktorý sprevádza väčšinu algoritmov pre separáciu audio signálov, sa dá zobrazit' blokovou schémou na obrázku 4 [52]. Signál je z časovej domény transformovaný do časovo-frekvenčnej oblasti spektrogramu. Nasleduje modelovanie  $x$  cieľového zdroja, pre získanie aproximačného spektrogramu  $\hat{S}_j$ . Nasleduje filtrácia podľa rovnice 5, s cieľom extrahovania spektrogramu, pričom ostatné zdroje sú považované za interferenčné. Obzvlášť modelovanie zdroja nie je triviálna úloha, preto sa najčastejšie vykonáva v iteračnej podobe, pomocou EM (z angl. *Expectation Maximization*) algoritmu. Po dosiahnutí požadovaného množstva iterácií sa signál príslušnou inverznou transformáciou prevedie späť do časovej domény  $y_j$ .



Obrázok 4. Všeobecná blokovaná schéma separácie [52].

V prípade separácie monoaurálnych signálov sa frekventovane využíva estimácia pomocou extrahovaného magnitudového spektrogramu zdroja  $S_{ij}(f, t)$ . V tomto prípade patria medzi najpoužívanejšie filtračné procedúry techník jemného maskovania (z angl. *soft masking*), ako

je Wienerova filtrácia. V tom prípade je možné všeobecne vyjadriť monoaurálnu filtráciu nasledovne:

$$\hat{S}_{ij}(f, t) = \frac{S_{ij}(f, t)^\alpha}{\sum_{j=1}^J S_{ij}(f, t)^\alpha} X_i(t, f), \quad (5)$$

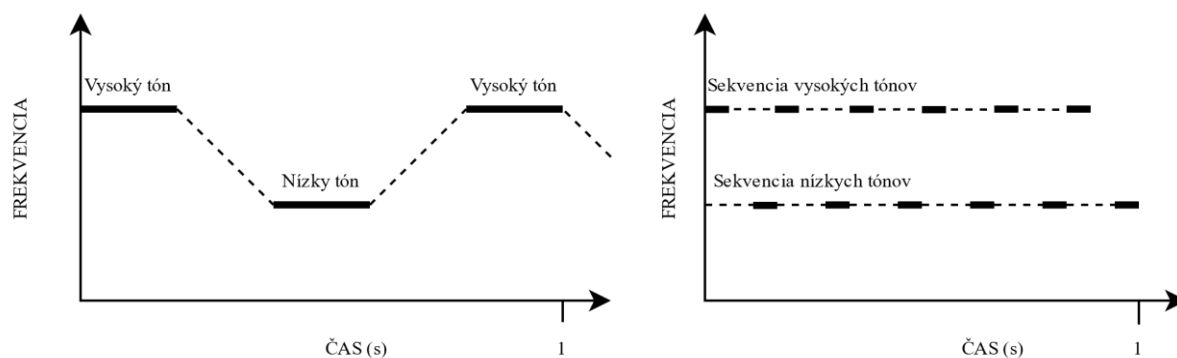
kde  $X_i(t, f)$  je magnitudový spektrogram zmiešaného kanála. Estimovaná maska je potom aplikovaná na pôvodný spektrogram pre extrakciu individuálneho zdroja.

#### 4 Prehľad audio separačných techník

V nasledujúcej kapitole je predložený prehľad konkrétnych metodológií, najviac využívaných pri separácii audio signálov. Široké spektrum rôznych techník, prístupov a ich podskupín má rôzne delenie, od kategorizácie podľa použitej filtrácie zdrojov, počtu kanálov, počtu zdrojov, zavádzaného oneskorenia, informácii o zdrojoch, až po použitie tréningových dát.

##### 4.1 Výpočtová analýza audio scény (CASA)

Výnimočná schopnosť ľudského sluchového vnemu jednoducho rozpoznávať a separovať multivariantné akustické zdroje, je obsahom viacerých štúdií pod názvom Analýza audio scény (ASA - *Auditory Scene Analysis*) [3], [27]. Situácia pri ktorej znejú simultánne viaceré zdroje, je v literatúre často referovaná ako koktail párty problém (CPP – *Coctail Party Problem*). Odlišovanie zdrojov sluchom prebieha úspešne aj pri vysokej časovej a frekvenčnej korelácii, pritom má naše ucho prístup len k superpozícii tlakových vln individuálnych zdrojov. Základom experimentálnych percepčných pozorovaní je, že pri ASA prebieha heuristický proces, pri ktorom sa alokujú samostatné zvuky na základe viacerých organizačných procesov, vyplývajúcich z ich vzájomných similarít a disimilarít. Organizácia percepčných množín podľa zdrojových atribútov môže prebiehať na základe sekvenčného (časového) alebo simultánneho (spektrálneho) integrovania.



Obrázok 5. Sekvenčná klastrácia zvukov.

Zgrupovanie prebieha na základe relatívnej percepčnej dištancie. Zvuky s príbuznou frekvenčnou charakteristikou, časovou aktiváciou, či priestorovou lokalizáciou sa organizujú do segregovaných skupín nazývajúcich sa audio toky (z angl. *Audio Streams*). Na obrázku 5 je príklad frekvenčného zgrupovania na základne dištancie medzi vysokými a nízkymi tónmi. Pri pomalom striedaní tónov poslucháč vníma sled tónov ako jeden zvuk, avšak keď sa zvýši ich počet na 12 tónov za sekundu, vníma segregované zvuky (prúdy) vyššej a nižšej frekvencie.

Simultánne zgrupovanie využíva separáciu samostatných zvukov regularizáciou prichádzajúcich podzvukov. Parciálne tóny sú priradzované konkrétnej fundamentálnej

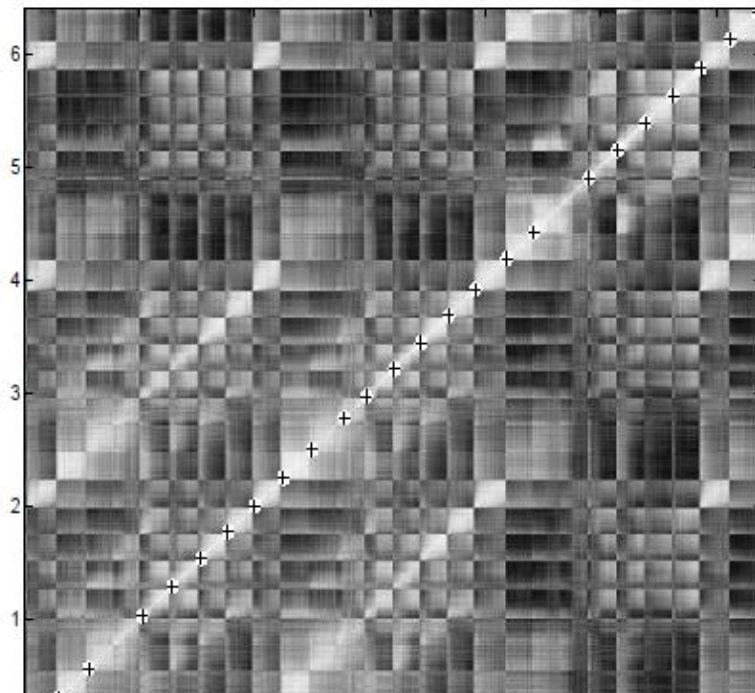
frekvencii, čím sa zároveň oddelia od iných. Tento princíp je využívaný aj pri automatickom rozpoznávaní rečníka, kvôli unikátnemu vokálnemu traktu a rozličnému rozloženiu násobkov základnej frekvencie. Snaha modelovať tieto psychoakustické príznaky a možnosť aplikovať ich v numerických modeloch, vyústila k výskumu výpočtovej analýzy audio scény (CASA - *Computational Auditory Scene Analysis*) [4-5], ktorej princíp je aplikovaný ako prídavný percepčný blok v niektorých algoritmoch, pre zavedenie postrannej informácie užitočnej pre robustnejšiu separáciu.

#### 4.2 Technika extrakcie opakovaných štruktúr (REPET)

Ako napovedá názov, táto metóda je založená na repetívnosti hudobných diel. Touto vlastnosťou sa obzvlášť vyznačuje západná populárna hudba, kde počujeme variujúce vokály na tých istých akordových sekvenciách opakujúcich sa bicích. Hlavnou ideou je identifikácia opakujúcich sa doprovodných častí od neopakujúcich sólových, a ich extrakcia cez časovo-frekvenčné maskovanie [6]. Táto skutočnosť najlepšie vystihuje situáciu vokálu a doprovodnej inštrumentácie, čo nás privádza k možnosti využitia pri segregácii hlasu a hudby. Vďaka svojej jednoduchosti je možná implementácia REPET v rôznych odvetviach s potrebou MIR, bez nutnosti komplexného predspracovania. V REPET je využitá podobnosť s psychoakustickou schopnosťou segregácie opakujúcich sa segmentov, bez znalosti o zdrojoch pôvodných [7]. Na vizualizáciu opakovacích štruktúr v hudbe môže byť použitá matica podobnosti [8], kde je vyobrazená vzdialenosť medzi všetkými kombináciami príznakových vektorov  $v_i, v_j$ , počítaná medzi audio úsekmi  $i$  a  $j$  v 2D priestore. Podobnosť môže byť založená na spektrograme [9-10], chromograme [11-13] alebo MFCC koeficientoch [14-16], ktoré majú výbornú koreláciu s percepciou. Vyhodnotenie podobnosti môže prebiehať pomocou niektorej z metrík ako napríklad Euklidova vzdialenosť, Kullback–Leibler (KL) a Itakura–Saito (IS) divergencia, prípadne kosínus uhlov medzi vektormi parametrov:

$$D_c(i, j) = \frac{v_i \cdot v_j}{\|v_i\| \|v_j\|} \quad (6)$$

Podobné inštancie pixelov  $i, j$  budú vyobrazené proporčne k ich podobnosti podľa šedotónovej stupnice. Pomocou nich je možné identifikovať funkcie podobnosti na mikro úrovni (takty) alebo makro úrovni (refrén/sloha), na základe zvolenej časovej mierky. Regióny s vysokou similaritou budú v matici similarity viditeľné ako biele diagonálne pruhy (obrázok 6).



Obrázok 6. Matica similarity [8].

### 4.3 Analýza nezávislých komponentov

Jedna z najznámejších metód v oblasti separácie signálov je Analýza nezávislých komponentov (ICA – *Independent Component Analysis*) [17], pracujúca na predpoklade štatistickej nezávislosti individuálnych zdrojov obsiahnutých v kombinácii. V istých ohľadoch sa podobá na Analýzu principiálnych komponentov (PCA – *Principial Component Analysis*), s rozdielom, že nehľadá najväčší rozptyl v dátach, ale pomocou vnútorných vlastností signálu sa snaží nájsť nezávislé vektory, do ktorých sa transformujú dáta.

Formulácia generatívneho problému ICA, je similárna ako všeobecný zápis BSS techník:

$$x_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \dots + a_{in}s_n \quad (7)$$

alebo alternatívne v maticovej podobe:

$$\vec{x} = A\vec{s} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_M(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{M1} & a_{M2} & \dots & a_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(n) \\ s_2(n) \\ \vdots \\ s_N(n) \end{bmatrix}$$

kde  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  je pozorovaný stĺpcový vektor hodnôt,  $A$  je zmiešavacia matica obsahujúca informácie o smeroch a zosilneniach, a  $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$  je vektor individuálnych zdrojov.

Problém by mal jednoduché lineárne riešenie v prípade znalosti zmiešavacej matice  $A$ , a následným výpočtom inverznej matice, čím by sme našli individuálne zdroje:

$$\vec{s} = A^{-1}\vec{x} \quad (9)$$

Avšak k dispozícii máme len pozorovaný vektor hodnôt  $\vec{x}$ , kvôli čomu je ICA považovaná za BSS metódu.

Okrem už spomenutej reštrikcie štatistickej nezávislosti individuálnych zdrojov, nesmú mať latentné komponenty Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti. V prípade, že by nebola dodržaná táto podmienka, mali by zdroje symetrické rozdelenie pravdepodobnosti (PDF - *Probability density function*), a následne by nebolo možné odhadnúť smery v zmiešavacej matici  $A$ . Dá sa teda tvrdiť, že ICA hľadá protipólne predpoklady závislosti a gaussianarity, pričom tieto extrémny v skúmaných dátach budú považované za individuálne zdroje.

Odhad nezávislých komponentov v algoritmickej podobe ICA prebieha permutáciami riadkových vektorov transformačnej matice  $W$  až do stavu, kedy bude rozloženie pravdepodobnostné rozloženie súčiny  $w_i x_i$  čo najviac odlišovalo od normálového. A teda mapovanie lokálneho maxima negaussianarity lineárnej kombinácie:

$$y = \sum_i w_i x_i \quad (10)$$

Pri správnej konfigurácii transformačnej matice, bude výstup v podobe  $y$ , považovaný za estimovaný vektor zdrojového signálu.

Pre nájdenie lokálnych maxím odpovedajúcim nezávislým komponentom sa zavádza mnoho merných techník, ako strmosť (z angl. *skewness*), negatívna entropia, alebo odhad maximálnej vierohodnosti (MLE - *Maximum Likelihood Estimation*). Najčastejšie využívanou metrikou je štvrtý centrálny moment štatistiky, v podobe špicatosti (z angl. *kurtosis*):

$$kurt(s) = E(s)^4 - 3E(s^2)^2 \quad (11)$$

kde  $E$  predstavuje strednú hodnotu. S touto metrikou hľadáme teda extrém špicatosti súčiny  $w_i x_i$ . Toto meranie je pomerne jednoduché na výpočet, a teda rýchle, avšak málo robustné voči odľahlým hodnotám, ktoré môže vnášať veľkú chybu merania. Vhodné je obzvlášť použitie na rečové signály, kvôli Laplaceovmu rozdeleniu pravdepodobnosti, typického pre tento druh signálu.

Hlavné obmedzenie ICA pri MMS je, že predpokladá minimálne rovnaký počet kanálov a zdrojov, čo pri hudobných signáloch nie je bežné. Produkované hudobné nahrávky obvykle obsahujú štyria a viac inštrumentov, zmiešaných v stereofónii a preto čistá ICA nemôže byť použitá na ich separáciu. Tiež sú hudobné objekty často štatisticky závislé a s podobnou distribúciou, obzvlášť pri inštrumentoch hrajúcich unisono.

#### 4.4 Techniky priestorovej filtrácie

Kategória metód priestorovej filtrácie (z angl. *beamforming*), využíva geometrické predpoklady o prichádzajúcich akustických signáloch. Tieto predpoklady sú založené na interferenčných javoch, ktoré umožňujú separovať individuálne zdroje podľa smeru, odkiaľ vyžarujú. V prípade, že máme prístup k viacerým senzorom, je táto technika veľmi efektívna, a môže vykonávať alokáciu zdrojov v reálnom čase. Tento princíp využívajú napríklad akustické kamery, kde mikrofónové pole umožňuje separovať na základne princípu odlišného časového príchodu vln (TDOA – *Time Difference Of Arrival*).

Známymi algoritmami spadajúcimi do tejto kategórie sú Technika odhadu degeneratívneho oddelenia (DUET) [19] a Technika estimácie projekcie (PROJET) [20]. Obe využívajú techniku separácie, založenú na lokalizácii energie, vytvorením priestorového energetického histogramu. Po určení dominantného zdroja pre každé STFT okno, sa histogram použije



pre následnú estimáciu časovo-frekvenčným maskovaním. Sú veľmi úspešné pri malom TF prekrývaní, čo je dobrý predpoklad pre separáciu rečových signálov, avšak horšie pri podmienkach hudobných nahrávok. Vykazujú však nízku komplexitu a výpočtovú náročnosť, čo umožňuje ich jednoduchú implementáciu a možnosť využitia pre aplikácie v reálnom čase.

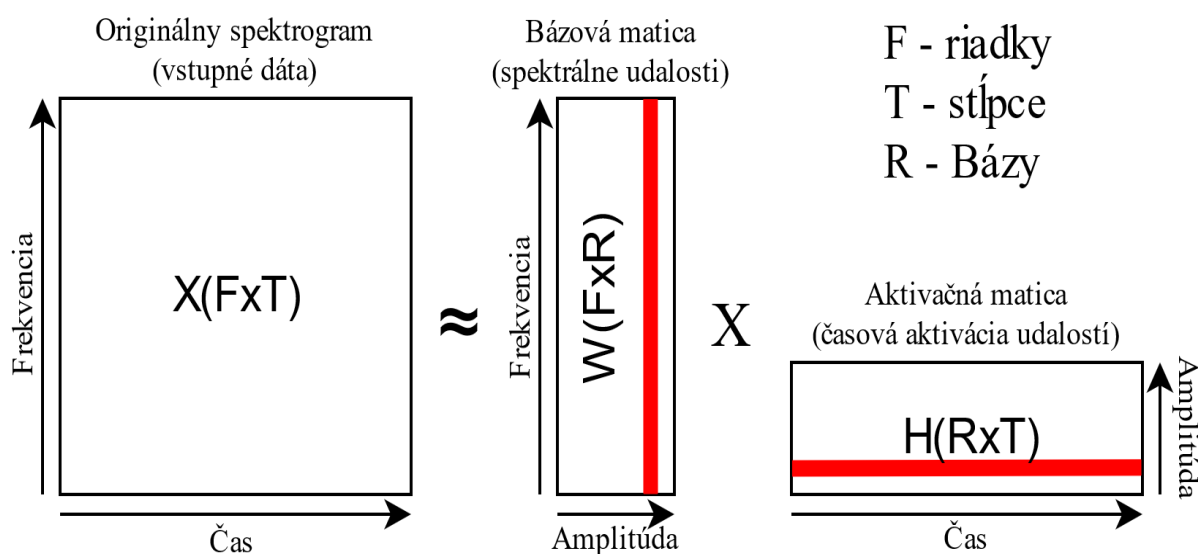
#### 4.5 Nezáporná maticová faktorizácia (NMF)

Najpopulárnejšia technika dosahujúca v mnohých oblastiach audio separácie najlepšie výsledky, je nezáporná maticová faktorizácia (NMF - *Non-negative Matrix Factorization*) [21]. NMF predstavuje lineárnu maticovú dekompozičnú techniku, pre generovanie partikulárnych matic s nezápornou reprezentáciou dát (obrázok 7). To sa ukázalo ako výhodné obzvlášť pri čiastkovej reprezentácii a objavení latentných komponentov významných pre perceptuálny vnem. Na rozdiel od štatistických techník ako ICA, NMF nevyžaduje predpoklad štatistickej nezávislosti zdrojov a tiež nevyžaduje rovnaký počet senzorov a kanálov.

Nech nezáporná matica  $X (\in \mathbb{R}_{\geq 0}^{FxT})$  reprezentuje magnitudový spektrogram akustického signálu, kde  $F$  a  $T$  sú frekvenčné, v respektíve časové indexy STFT. Chceme vykonať lineárnu dekompozíciu pôvodnej matice, s vytvorením partikulárnych matic v podobe:

$$X \approx WH \quad (12)$$

kde  $W (\mathbb{R}_{\geq 0}^{FxR})$  je slovníková matica obsahujúca spektrálne udalosti v matici  $X$ , a  $H (\mathbb{R}_{\geq 0}^{RxT})$  je aktivačná matica, obsahujúca odpovedajúce časové aktívacie spektrálnych udalostí.



Vynásobenie čiastkových matic, aproximácie zodpovedá pôvodnej matici  $X$ . Aproximácia prebieha pomocou iteratívnej minimalizácie rekonštrukčnej chyby medzi partikulárnymi maticami a STFT spektrogramom:

$$\min_{w, h \geq 0} D(X|WH) \quad (13)$$

kde kritérium divergencie  $D(X|WH)$ , môžeme matematicky vyjadriť nákladovou funkciou:

$$\min D(X|WH) = \sum_{f=1}^F \sum_{n=1}^N d([X]_{fn} | [WH]_{fn}) \quad (14)$$

Efektívny algoritmus minimalizácie chyby založený na optimalizácii gradientného poklesu v iteratívnej podobe predstavili Lee and Seung, s príslušnými multiplikatívnymi pravidlami [22]. Pre minimalizáciu použili metriku v podobe Euklidovej vzdialenosti:

$$d_{euclid}(x|y) = \frac{1}{2}(x - y)^2 \quad (15)$$

kde pravidlá pre aktualizácie matíc sú vyjadrené ako:

$$H \leftarrow H \otimes \frac{W^T X}{W^T (WH)} \quad (16)$$

$$W \leftarrow W \otimes \frac{H^T X}{(WH)H^T} \quad (17)$$

kde  $\otimes$  predstavuje Hadamardov produkt elementárnej multiplikácie matíc. Pri inicializácii sú  $H$  a  $W$  generované ako náhodné pozitívne matice.

V alternatívnej podobe je využitá Kullback-Leibler (KL) divergencia, definovaná ako [22]:

$$d_{KL}(x|y) = x \log \frac{x}{y} - x + y. \quad (18)$$

Pre KL divergenciu sú aktualizáčnne pravidlá definované ako:

$$H \leftarrow H \otimes \frac{W^T \frac{X}{(WH)}}{W^T \mathbf{1}} \quad (19)$$

$$W \leftarrow W \otimes \frac{\frac{X}{(WH)} H^T}{\mathbf{1} H^T} \quad (20)$$

kde  $\mathbf{1}$  je jednotková matica rovnakej veľkosti ako  $X$ .

Výber správnej divergentnej funkcie musí byť podmienený typom analyzovaných dát. Okrem spomenutých metrik sa na audio signály využíva aj IS-divergencia [23], ktorá bola komparatívne porovnávaná s Euklidovou vzdialenosťou aj KL-divergenciou [22]. V predloženej publikácii autori experimentálne dokázali, že IS-divergencia zlepšuje správnu sémantickú reprezentáciu hudobných signálov, vďaka čomu dosahuje lepšie výsledky ako Eulidova vzdialenosť a KL-divergencia. Formulácia IS-divergencie v matematickej podobe je definovaná ako:

$$d_{IS}(x|y) = \frac{x}{y} - \log \frac{x}{y} - 1 \quad (21)$$

s príslušnými multiplikatívnymi pravidlami:

$$H \leftarrow H \otimes \frac{W^T \frac{X}{(WH)^2}}{W^T (WH)^{-1}} \quad (22)$$

$$W \leftarrow W \otimes \frac{H^T \left( \frac{X}{(HW)^2} \right)}{(WH)^{-1}H^T} \quad (23)$$

Hlavnou výhodou NMF pri MSS je fakt, že hudobné signály sú vo svojej podstate zriedené, a sú teda neaktívne vo väčšine časovo-frekvenčnej reprezentácie. Táto redundančná vlastnosť prináša unikátnu dekompozíciu, ktorá môže dobre reprezentovať cieľové hudobné objekty, nájdením ich tranzientných oscilácií v čase. Ďalšie divergenčné metriky ako aj rozsiahle subkategórie NMF algoritmov možno nájsť v prehľadovom článku [25].

#### 4.6 Robustná analýza principiálnych komponentov (RPCA)

Faktorizačná technika RPCA [26], je aplikovaná hlavne pri separácii spevu od doprovodného pozadia [27-28], beat trackingu [29], a pre karaoke aplikácie [30]. Hlavný rozdiel oproti PCA je odolnosť voči odľahlým hodnotám, ktorá vnáša do tradičnej techniky veľké fluktuácie. Podobne ako REPET, RPCA využíva známy poznatok z hudobnej teórie, ktorý hovorí, že základnou vlastnosťou hudobného umenia je repetícia [31]. Doprovodnú hudbu hrajúcu opakované štruktúry, môžeme v dátovej podobe vnímať ako zriedený signál, naopak často variujúci komplexnejší spev ako zhustený signál. Majme dátovú maticu spektrogramu  $X$ , ktorá môže byť v dekompozícii ako:

$$X = L_0 + S_0, \quad (24)$$

kde  $L_0 \in \mathbb{R}^{m \times n}$  je low rank matrix a  $S_0 \in \mathbb{R}^{m \times n}$  je sparse matrix. Za týchto predpokladov môžeme považovať za hudobný doprovod obsah v matici  $L_0$  a vokálnu časť v matici  $S_0$ . Na spektrogram  $X$  je používaný algoritmus Augmented Lagrange Multiplier (ALM) [32], ktorý efektívne separuje spektrogram do čiastkových matic. Pre dosiahnutie lepších výsledkov sa na partikulárne matice môže použiť binárne frekvenčné maskovanie

$$X_n(m, n) = \begin{cases} 1 & |S(m, n)| > gain * |L(m, n)| \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (25)$$

pre všetky  $m = 1 \dots n_1$  a  $n = 1 \dots n_2$ . Maska je následne aplikovaná na pôvodný spektrogram  $X$  pre oddelenie vokálnej a inštrumentálnej časti

$$X_{singing}(m, n) = X_b(m, n)X(m, n) \quad (26)$$

$$X_{music}(m, n) = (1 - X_b(m, n))X(m, n) \quad (27)$$

pre všetky  $m = 1 \dots n_1$  a  $n = 1 \dots n_2$ .

Percepčný systém je obzvlášť úspešný pri tomto druhu separácie, kvôli citlivosti na ľudský hlas, čo však neplatí pre stroje, pre ktoré je táto úloha náročná. Pre ďalšie zlepšenie výkonu RPCA bolo vyvinutých mnoho modifikácií, z ktorých najlepšie výsledky dosahuje technika, ktorá zapája detekciu hlasovej aktivity (VAC - *Voice Activity Detection*) v separačnom procese [33].

#### 4.7 Sinusoidálne modelovanie (SM)

Táto kategória predstavuje proces syntetického vytvárania modelov podľa parametrov, ktoré budú čo najlepšie aproximovať požadované hudobné nástroje. Jednou z takýchto techník je Sinusoidálna/Aditívna technika [34], využívajúca Fourierov teorém o vytvorení ľubovoľného periodického priebehu sumáciou čiastkových vln. V matematickej podobe:

$$s(t) = \sum_{r=1}^R A_r(t) \cos[\theta_r(t)] + e(t) \quad (28)$$

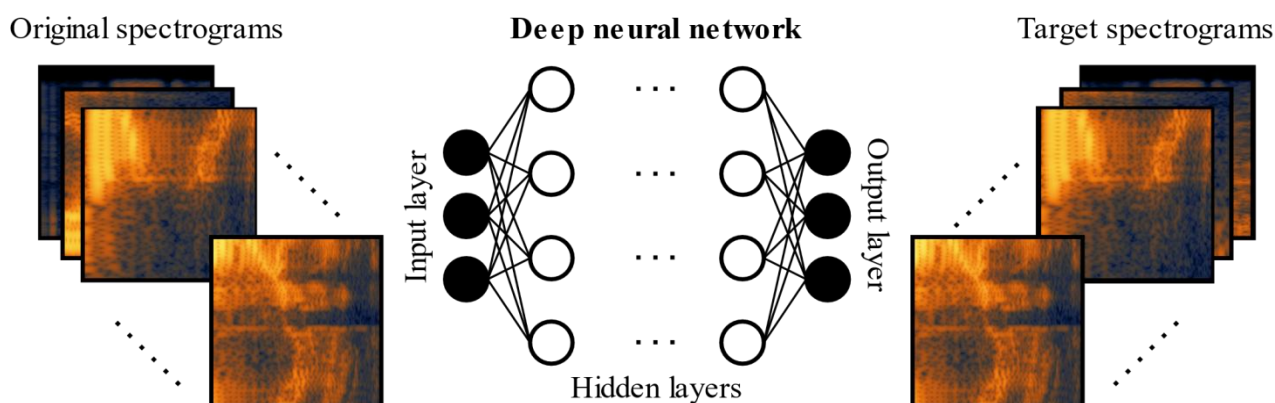
kde je okamžitá amplitúda,  $A_r(t)\theta_r$  je fáza vlny a  $e(t)$  je šumový komponent. Táto metóda je využívaná napríklad pri parametrických audio kodekoch, ale môže byť použitá aj pri separácii hudobných objektov. Iteratívny rekurzívny algoritmus v každom kroku analyzuje segment audio signálu v ktorom je detegovaná prominentná sinusoida, podľa energie reziduálneho signálu. Ten je získaný odpočítaním syntetického signálu od originálneho. Po získaní estimovaných parametrov je reprezentácia syntetizovaná a odstránená z originálneho signálu [35]. Táto technika môže byť obzvlášť úspešná pri separácii perkusívnych od harmonických inštrumentov (HPSS – *Harmonic/Percussive sound separation*), avšak generovanie veľkého množstva parametrov ktoré budú dobre aproximovať zdroje, môže byť výpočtovo veľmi náročné.

#### 4.8 Separácia modelmi hlbokého učenia (DLM)

Extrakcia užitočných príznakov z dát pomocou neurónových sietí (NN – *Neural Networks*), prenikla do variabilných revírov signálového spracovania. Idea NN prístupu je známa už mnoho dekád a vznikala už od počiatku vývoja umelej inteligencie a strojového učenia, avšak až dostupnosť informačných databáz, užívateľských nástrojov pre prácu s nimi, a výpočtovej výkonnosti poslednej dekády, umožnila jej plné využitie a rozšírenie. Špeciálne podkategória modelov hlbokého učenia (DLM – *Deep Learning Models*), sa stala novou a úspešnou paradigmou pre rozličné klasifikačné a regresné úlohy, nevynímajúc tie separačné. Hlavnou výhodou je, že DLM nepotrebujú nevyhnutne explicitné modely cieľových zdrojov vytvorené príznakovým inžinierstvom, a sú do veľkej miery automatizované. Na rozdiel od tradičných lineárnych prístupov strojového učenia, sa snaží DLM popísať nelineárne závislosti pomocou učenia sa z anotovaných tréningových databáz. Vďaka tomu je možné odhaliť komplexné vzťahy medzi zdrojovými signálmi, ktoré sú vo svojej podstate nelineárne.

Okrem nesporných výhod majú DLM techniky aj svoje limitácie. Miera ich úspešného aplikovania je priamo závislá od kvality a kvantity anotovaných dát. Pre všetky variabilné audio signály reálneho však nie sú a ani nemôžu byť dostupné databázy v požadovanej miere. Kvôli tejto závislosti sa nedá úspešnosť modelov generalizovať na viaceré úlohy separácie. Ďalšou nevýhodou je čiastočná neschopnosť predikcie vhodnej architektúry siete na konkrétne úlohy. DLM je čiastočne „čierna skrinka“, ktorej správanie je možné odhadnúť len početnými experimentami, ktoré sú navyše výpočtovo, a teda aj časovo náročné.

Pre DML audio separáciu je tradičným prístupom použitie časovo-frekvenčnej reprezentácie vstupných dát (obrázok 8). V procese učenia neurónovej siete sú inicializované váhy aktualizované podľa použitej optimalizačnej metódy. Výstup z neurónovej siete je v podobe priamych cieľových spektrogramov extrahovaných zdrojov, alebo časovo-frekvenčných masiek, ktoré sa aplikujú v postprocesingu na pôvodné spektrogramy.



Obrázok 8. Princípiálna topológia hlbkej neurónovej siete.

Prvé modely použité pre MSS predstavovali plne prepojené siete (FCN - *Fully Connected Networks*), s prídavnými kontextuálnymi informáciami k spektrogramom. To však viedlo k veľkému počtu parametrov a následných obštrukciách pri tréningu. Temporálny kontext sa zachovával vo väčšine modelov do 1 sekundy, čo je v prípade hudby nedostačujúce. Výhodu ktorú priniesli DNN oproti tradičným lineárnym faktorizačným technikám, je nelineárna separácia. Tradičné techniky nemusia dostatočne pokrývať komplexné vzťahy medzi separovanými zdrojmi a ich kombináciou, ktoré nemusia dostatočne pokrývať komplexné vzťahy medzi separovanými zdrojmi a ich kombináciou.

Špeciálne efektívne v úlohe nelineárneho modelovania časových závislostí sú rekurentné hlboké neurónové siete (DRNN – *Deep Recurrent Neural Network*) [36]. Pre zachovanie kontextuálnej informácie dôležitej v percepcii hudby, je kategória rekurentných sietí vhodným prístupom pre extrahovanie cieľových inštrumentov z kombinácie zdrojov. Po estimácii spektrogramov sa často aplikuje prídavná filtrácia jemnou maskou, ktorá zlepšuje dosahované výsledky odstránením artefaktov. Okrem dostatočnej kvantity databáz, je dôležitá aj samotná kvalita znenia inštrumentov, pre lepšiu generalizáciu učenia [37]. V tejto práci boli zapojené percepčného modelu CASA, pri ktorých sa hľadali sady frekvenčných komponentov s podobnými vlastnosťami.

Možný smer ďalšieho vývoja hudobnej separácie pomocou DNN udávajú „end-to-end“ modely separácie (z angl. *Wavenet-based*) [38]. Tie sú schopné odvodiť užitočné príznaky zo surového audio signálu pomocou konvolučných vrstiev. Keďže drvivá väčšina postupov využíva ako vstup do parametrických modelov magnitúdové spektrogramy, obchádza využitie fázových charakteristík signálu, ktoré môžu niesť užitočné informácie pre separáciu. Modely, ktoré pracujú v časovej doméne ako TasNet [39], sú zatiaľ použité prevažne pre problém separácie rečníkov. Na MSS sa zamerali v prácach [40-41], kde použili „end-to-end“ model pre separáciu spevu od doprovodnej hudby. Problémom tejto praktiky ostáva vysoká výpočtová náročnosť, obzvlášť pri potrebe kontextuálnej informácie.

## 5 Evalvacia separačných modelov

Dôležitou súčasťou pri vytváraní úspešných separačných schém musí byť ich správne výkonové ohodnotenie estimácie zdrojov. Úspešnosť BASS algoritmu je pri evalvácii prezentovaná ako rozdiel originálneho zdroja od estimovaného. Každý postup zavádza určitú mieru distorzie, ktorú bude poslucháč vnímať ako artefakty. Vznik nežiadúcich artefaktov môže prebiehať pri rôznych fázach procesu separovania, a z rôznych interferenčných zdrojov. Tak ako v iných oblastiach sa evalvacia delí na subjektívne testy vytvárané hodnotením poslucháčov a objektívne testy, vytvorené na numerických metódach. Príklad metodológie

subjektívneho testovania je napríklad prístup Multi Stimulus test with Hidden Reference and Anchor (MUSHRA) [46], alebo iné odporúčania od ITU-R.

Aj keď sú subjektívne audio testy pri správnom postupe stále najpresnejšie a najspoľahlivejšie, nevýhoda takého je veľmi veľká organizačná a časová náročnosť. Častejšie vykonávané sú objektívne testovania založené na numerických modeloch, ako napríklad metodika BSS Eval toolbox [47]. Predstavený algoritmus používa nasledovné kvadratické merania medzi estimovanými a pôvodnými zdrojmi:

- Pomer signál-skreslenie (SDR – Signal-to-distortion ratio)
- Pomer signál-interferencia (SIR – Signal-to-interference ratio)
- Pomer signál-šum (SNR – Signal-to-noise ratio)
- Pomer signál-artefakty (SAR – Signal-to-artefact ratio)

Tieto metódy však dobre neaproximujú perceptuálny vnem, čo môže byť pri hodnoteniach kruciálne. Preto sú tieto metriky vylepšované o špecifické sluchové vlastnosti, ako napríklad fenomén maskovania. Štandardizovaná metrika tohto druhu odporúčaná ITU-R je PEAQ [48], ktorá však pri BASS meraniach saturuje na nízkych hodnotách a pri opakovaných meraniach vykazuje veľké fluktuácie hodnotenia [49]. Objektívne metriky, ktoré majú za cieľ lepšie predikovať subjektívne testy boli predstavené aj v [50]. V tejto práci boli mapované subjektívne hodnotenia pre vytvorenie nových objektívnych metrick OPS, TPS, IPS a APS. Stále však pretrvávajú otázky validita týchto metrick, kvôli ich nepresnej korelácii s hodnotením percipientov [51].

## 6 Výzvy v oblasti výskumu MSS

MSS je rozsiahla a náročná problematika interdisciplinárne zasahujúca do viacerých odvetví spracovania signálov, umelej inteligencie a psychoakustiky. Za posledné desaťročie došlo k nevídanému pokroku v tejto úlohe, avšak ostáva mnoho nevyriešených problémov a výziev pre ďalšie zlepšovanie separačných techník. Jednotlivé výzvy MSS sa dajú zhrnúť do nasledujúcich bodov:

- Napriek robustnejším separačným technikám z posledných rokov sú pri každej technike zreteľne počuteľné artefakty, ktoré rušia poslucháča
- Zlepšenie architektúr a tréningových procedúr DLM techník a ich následná vhodná aplikácie na konkrétne problémy MSS.
- DNN modely sú priamo závislé na kvalite a kvantite tréningových dát, ktorých je v porovnaní s rečovými nedostatok. Je potrebné vytvorenie nových databáz s anotovanými dátami.
- DLM separácie sú adaptované na fixné množstvo a typ hudobných zdrojov. Subjektom výskumu by mala byť viac generalizovaná separácia, ktorá bude flexibilná pre univerzálne situácie a meniaci sa počet zdrojov.
- Od vzostupu neurónových sietí, je dominantná časť výskumu orientovaná na jej modely. Klasické prístupy strojového učenia však často dosahovali podobné výsledky, s menšími výpočtovými nárokmi. Fúzia ML a DLM by mohla byť sľubným smerom budúceho výskumu MSS.
- Ďalšie zlepšenie separačných modelov môže byť inšpirované výskumom ASA. Kontribúcia v podobe predspracovania výpočtovou podobou CASA, môže signifikantne zlepšiť segregačné systémy pre MSS, kde ešte nebula v dostatočnej miere.

- Pre efektívnejšiu separáciu je potrebné zapojiť okrem čisto technickej stránky aj poznatky z hudobnej teórie. Tieto postranné informácie môžu výrazne zlepšiť modelovanie cieľových zdrojov zo závislostí zapísaných v partitúrach hudobných diel.
- Ako bolo spomenuté, mnoho rokov sa ignorovalo spracovanie audio signálu v časovej doméne, ktoré môže priniesť benefity do úloh MSS. S nárastom výpočtového výkonu je sľubný smer je využitie sietí pracujúcich na end-to-end princípe, ktoré nevyžadujú predpracovanie a po spracovanie dát.
- Vhodný vyber modelov DLN kvôli ich nejednoznačnému ohodnoteniu je výzva pre vytvorenie nových metrik pre efektívne evalvácie, ktoré by štandardizovali porovnávanie jednotlivých MSS algoritmov, a zlepšili ich koreláciu so subjektívnymi testami.
- Uvažovať nad ďalšími využitiami hudobnej separácie. V spolupráci s inými multimediálnymi platformami je možné vytvoriť užitočné aplikácie pre výučbu hudby a hru na nástroj. Príkladom je interaktívna VR, ktorá by simulovala živé vystúpenie orchestra, do ktorého sa môže študent aktívne zapojiť s doprovodnou alebo sólovou časťou inštrumentácie. Na tento účel je potrebné jednotlivé zdroje separovať s orientáciou na kvalitu segregovaných sekcií.

## Pod'akovanie

Táto práca je výsledkom implementácie projektov: ITMS 26220120050 a ITMS 26210120021, sponzorovaných z EU zdrojov a Európskeho regionálneho fondu rozvoja.

## Referencie

- [1] S. Ewert, B. Pardo, M. Müller, and M. D. Plumbley, "Score-informed source separation for musical audio recordings: An overview" *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 31, no. 3, pp. 116–124, May 2014.
- [2] R. Dannenberg, and C. Raphael, 2006. "Music score alignment and computer accompaniment." *In Commun. ACM*, 49, 38-43, doi: 10.1145/1145287.1145311
- [3] M. Wertheimer, "Laws of organization in perceptual forms," in *A Source book of Gestalt psychology*, W. A. Ellis, Ed., pp. 71–88. Routledge and Kegan Paul, 1938.
- [4] M. P. Cooke, "Modelling auditory processing and organisation", *Ph.D. thesis*, Univ. of Sheffield, 1991.
- [5] D. P. W. Ellis, "Prediction-driven computational auditory scene analysis," Massachusetts Institute of Technology 201 Vassar Street, W59-200 Cambridge, MA, United States, 1996.
- [6] Z. Rafii and B. Pardo, "Repeating pattern extraction technique (REPET): A simple method for music/voice separation," in *IEEE Trans. Audio Speech Language Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 73–84, Jan. 2013.
- [7] J. H. McDermott, D. Wroblewski, and A. J. Oxenham, "Recovering sound sources from embedded repetition," in *Proc. Natural Acad. Sci. United States of Amer.*, vol. 108, no. 3, pp. 1188–1193, Jan. 2011.
- [8] J. Foote, "Visualizing music and audio using self-similarity," in *Proc. 7th ACM Int. Conf. Multimedia (Part 1)*, Orlando, FL, Oct.-Nov. 30–05, 1999, pp. 77–80.
- [9] J. Foote, "Automatic audio segmentation using a measure of audio novelty," *2000 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. ICME2000. Proceedings. Latest Advances in the Fast Changing World of Multimedia (Cat. No.00TH8532)*, New York, NY, 2000, pp. 452-455 vol.1, doi: 10.1109/ICME.2000.869637.

- [10] J. Foote and S. Uchihashi, "The beat spectrum: a new approach to rhythm analysis," *IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, 2001. ICME 2001., Tokyo, Japan, 2001, pp. 881-884, doi: 10.1109/ICME.2001.1237863.
- [11] M. A. Bartsch and G. H. Wakefield, "To catch a chorus: using chroma-based representations for audio thumbnailing," *Proceedings of the 2001 IEEE Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (Cat. No.01TH8575)*, New Platz, NY, USA, 2001, pp. 15-18, doi: 10.1109/ASPAA.2001.969531.
- [12] R. B. Dannenberg and N. Hu, "Pattern discovery techniques for music audio," *J. New Music Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 153–164, 2003.
- [13] K. Jensen, "Multiple scale music segmentation using rhythm, timbre, and harmony," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2007, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2010.
- [14] M. Cooper and J. Foote, "Automatic music summarization via similarity analysis," in *Proc. 3rd Int. Conf. Music Inf. Retrieval*, Paris, France, Oct. 13–17, 2002, pp. 81–85.
- [15] A. Pikrakis, I. Antonopoulos, and S. Theodoridis, "Music meter and tempo tracking from raw polyphonic audio," in *Proc. 9th Int. Conf. Music Inf. Retrieval*, Barcelona, Spain, Oct. 10–14, 2008.
- [16] G. Peeters, "Deriving musical structures from signal analysis for music audio summary generation: "Sequence" and "state" approach," in *Computer Music Modeling and Retrieval*, U. Wiil, Ed. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2004, vol. 2771, Lecture Notes in Computer Science, pp. 169–185.
- [17] A. Hyvärinen, J. Karhunen, and E. Oja, eds., "Independent Component Analysis." Wiley and Sons, 2001. ACM, Special Iss.: *Music information retrieval*, vol. 49, no. 8, pp. 38–43, 2006.
- [18] S. Ikeda, N. Murata, "A method of ICA in time-frequency domain", in: *Proc. Of the International Conference on Independent Component Analysis and Blind Source Separation (ICA99)*, Aussois, France, 1999, pp. 365–371.
- [19] S. Rickard, "The DUET blind source separation algorithm," in *Blind Speech Separation, Signals and Communication Technology*, S. Makino, H. Sawada, T. W. Lee, Eds. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007, pp. 217–241.
- [20] D. FitzGerald, A. Liutkus and R. Badeau, "Projection-Based Demixing of Spatial Audio," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, no. 9, pp. 1560-1572, Sept. 2016, doi: 10.1109/TASLP.2016.2570945.
- [21] D. D. Lee and H. S. Seung, "Algorithms for non-negative matrix factorization," in *Advances Neural Inform. Processing Syst.*, vol. 13, pp. 556–562, Apr. 2001.
- [22] D. D. Lee and H. S. Seung, "Learning the parts of objects with nonnegative matrix factorization," *Nature*, vol. 401, pp. 788–791, 1999.
- [23] C. Févotte, N. Bertin, and J.-L. Durrieu, "Nonnegative matrix factorization with the Itakura-Saito divergence. With application to music analysis," *Neural Computat.*, vol. 21, no. 3, pp. 793–830, Mar. 2009.
- [24] A. Cichocki, R. Zdunek, A. H. Phan, and S.-I. Amari, *Nonnegative Matrix and Tensor Factorizations: Applications to Exploratory Multi-Way Data Analysis and Blind Source Separation*. Hoboken, NJ: Wiley, 2009, doi: 10.1002/9780470747278



- [25] P. Smaragdis, C. Fevotte, G. J. Mysore, N. Mohammadiha, and M. Hoffman, "Static and dynamic source separation using nonnegative factorizations: A unified view," *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 31, no. 3, pp. 66–75, May 2014.
- [26] Emmanuel J. Candès, Xiaodong Li, Yi Ma, and John Wright, "Robust principal component analysis?," *J. ACM*, vol. 58, pp. 11:1–11:37, Jun. 2011.
- [27] P. Huang, S. D. Chen, P. Smaragdis and M. Hasegawa-Johnson, "Singing-voice separation from monaural recordings using robust principal component analysis," *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Kyoto, 2012, pp. 57-60, doi: 10.1109/ICASSP.2012.6287816.
- [28] T. Chan et al., "Vocal activity informed singing voice separation with the iKala dataset," *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brisbane, QLD, 2015, pp. 718-722, doi: 10.1109/ICASSP.2015.7178063.
- [29] J. R. Zapata and E. Gomez, "Using voice suppression algorithms to improve beat tracking in the presence of highly predominant vocals," *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vancouver, BC, 2013, pp. 51-55, doi: 10.1109/ICASSP.2013.6637607.
- [30] W. Tsai and H. Lee, "Automatic Evaluation of Karaoke Singing Based on Pitch, Volume, and Rhythm Features," in *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, no. 4, pp. 1233-1243, May 2012, doi: 10.1109/TASL.2011.2174224.
- [31] H. Schenker, "Harmony", University of Chicago Press, 1954.
- [32] Z. Lin, M. Chen, L. Wu, and Y. Ma, "The augmented Lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted lowrank matrices," *Tech. Rep. UILU-ENG-09-2215*, UIUC, Nov. 2009.
- [33] T. Chan et al., "Vocal activity informed singing voice separation with the iKala dataset," *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brisbane, QLD, 2015, pp. 718-722, doi: 10.1109/ICASSP.2015.7178063.
- [34] X. Serra, "Musical sound modeling with sinusoids plus noise," in *Studies on New Music Research*, M. Leman and P. Berg, Eds. Swets & Zeitlinger, 1997, pp. 91–122.
- [35] T. Virtanen and A. Klapuri, "Separation of harmonic sound sources using sinusoidal modeling," *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.00CH37100)*, Istanbul, Turkey, 2000, pp. II765-II768 vol.2, doi: 10.1109/ICASSP.2000.859072.
- [36] P. Huang, M. Kim, M. Hasegawa-Johnson and P. Smaragdis, "Joint Optimization of Masks and Deep Recurrent Neural Networks for Monaural Source Separation," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 23, no. 12, pp. 2136-2147, Dec. 2015, doi: 10.1109/TASLP.2015.2468583.
- [37] S. Uhlich, F. Giron and Y. Mitsufuji, "Deep neural network based instrument extraction from music," *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brisbane, QLD, 2015, pp. 2135-2139, doi: 10.1109/ICASSP.2015.7178348.
- [38] F. Lluís, J. Pons, X. Serra, "End-to-end music source separation: is it possible in the waveform domain?," *In Proc. of INTERSPEECH*, 2019
- [39] Yi Luo and Nima Mesgarani. "Tasnet: time-domain audio separation network for real-time, single-channel speech separation." *CoRR*, abs/1711.00541, 2017.

- [40] Emad M Grais, Dominic Ward, and Mark D Plumbley. "Raw multi-channel audio source separation using multiresolution convolutional auto-encoders." arXiv preprint arXiv:1803.00702, 2018.
- [41] D. Stoller, S. Ewert, S. Dixon, „Wave-U-Net: A Multi-Scale Neural Network for End-to-End Audio Source Separation,“ *Computer Science, Engineering, Mathematics*, 2018.
- [42] A. A. Nugraha, A. Liutkus and E. Vincent, "Multichannel Audio Source Separation With Deep Neural Networks," in *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 24, no. 9, pp. 1652-1664, Sept. 2016, doi: 10.1109/TASLP.2016.2580946.
- [45] N. Q. K. Duong, E. Vincent and R. Gribonval, "Under-Determined Reverberant Audio Source Separation Using a Full-Rank Spatial Covariance Model," in *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 18, no. 7, pp. 1830-1840, Sept. 2010, doi: 10.1109/TASL.2010.2050716.
- [46] International Telecommunication Union. (2015, Oct.). Recommendation BS.1534- 3: *Method for the subjective assessment of intermediate quality levels of coding systems*. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BS.1534-3-201510-I/en>
- [47] E. Vincent, R. Gribonval and C. Fevotte, "Performance measurement in blind audio source separation," in *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 14, no. 4, pp. 1462-1469, July 2006, doi: 10.1109/TSA.2005.858005.
- [48] ITU, "RECOMMENDATION ITU-R BS . 1387-1 Method for Objective Measurements of Perceived Audio Quality," *Tech. Rep.*, 2001.
- [49] B. Fox and B. Pardo, "Towards a Model of Perceived Quality of Blind Audio Source Separation," *2007 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, Beijing, 2007, pp. 1898-1901, doi: 10.1109/ICME.2007.4285046.
- [50] V. Emiya, E. Vincent, N. Harlander and V. Hohmann, "Subjective and Objective Quality Assessment of Audio Source Separation," in *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 19, no. 7, pp. 2046-2057, Sept. 2011, doi: 10.1109/TASL.2011.2109381.
- [51] E. Cano, D. FitzGerald and K. Brandenburg, "Evaluation of quality of sound source separation algorithms: Human perception vs quantitative metrics," *2016 24th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, Budapest, 2016, pp. 1758-1762, doi: 10.1109/EUSIPCO.2016.7760550.
- [52] E. Cano, D. FitzGerald, A. Liutkus, M. D. Plumbley and F. Stöter, "Musical Source Separation: An Introduction," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 36, no. 1, pp. 31-40, Jan. 2019, doi: 10.1109/MSP.2018.2874719.

## Summary

**Overview of musical audio source separation techniques.** In this paper was presented brief introduction to musical source separation task and the most successful methodologies for segregation of this type of sound. We presented nature of the music sources, general principle of source separation, as well as basic ideas of such techniques as ICA, NMF, RPCA and DNN. Even though recent years have brought great progress in MSS, there are remaining challenges for future research in this interdisciplinary area. Our ideas for future development are also presented in last document section. We see the greatest potential in collaboration of traditional machine learning and neural networks, as well as involvement of musical theory in musical source separation task.

## **Kľúčové slová**

Zdrojová separácia; hudobná segregácia; extrakcia audio zdrojov.

## **Kontaktné adresy**

Peter Kasák

Katedra multimédií a informačno-komunikačných technológií (KMIKT)

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií (FEIT)

Žilinská univerzita v Žiline

Univerzitná 8215/1

010 26 Žilina, Slovenská republika

peter.kasak@feit.uniza.sk

Roman Jarina

Katedra multimédií a informačno-komunikačných technológií (KMIKT)

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií (FEIT)

Žilinská univerzita v Žiline

Univerzitná 8215/1

010 26 Žilina, Slovenská republika

Roman.jarina@feit.uniza.sk

Michal Chmulík

Katedra multimédií a informačno-komunikačných technológií (KMIKT)

Fakulta elektrotechniky a informačných technológií (FEIT)

Žilinská univerzita v Žiline

Univerzitná 8215/1

010 26 Žilina, Slovenská republika

michal.chmulik@feit.uniza.sk

## PROPOSAL FOR REVERSABLE INTERVENTION TO HISTORICAL MONUMENT, BY MEANS OF ROOM ACOUSTIC SIMULATIONS

Magdaléna Kaššáková, Léopold Kritly, Lukáš Zelem, Monika Rychtáriková

### 1 Introduction

In renovation project, several aspect play roles and need to be taken into account. The first one and very important question is always, whether the building belong to a class of so called protected monuments or not, and to what extend the building or its parts should be preserved. Finally, a consensus has to be found between the user's needs, and user's behavior, architectural style, monument protection and technical issues such as stability, light, acoustics, ventilation etc as well as economical aspects [2]. Architectural acoustics is typically present through design of sufficient sound insulation on one hand and in designing the sufficient sound absorption on the other hand. Only little attention has been given to acoustics in terms of reversible interventions [3]. In this paper we try to show to what extend the acoustic comfort can be improved, by means of 3D simulation.

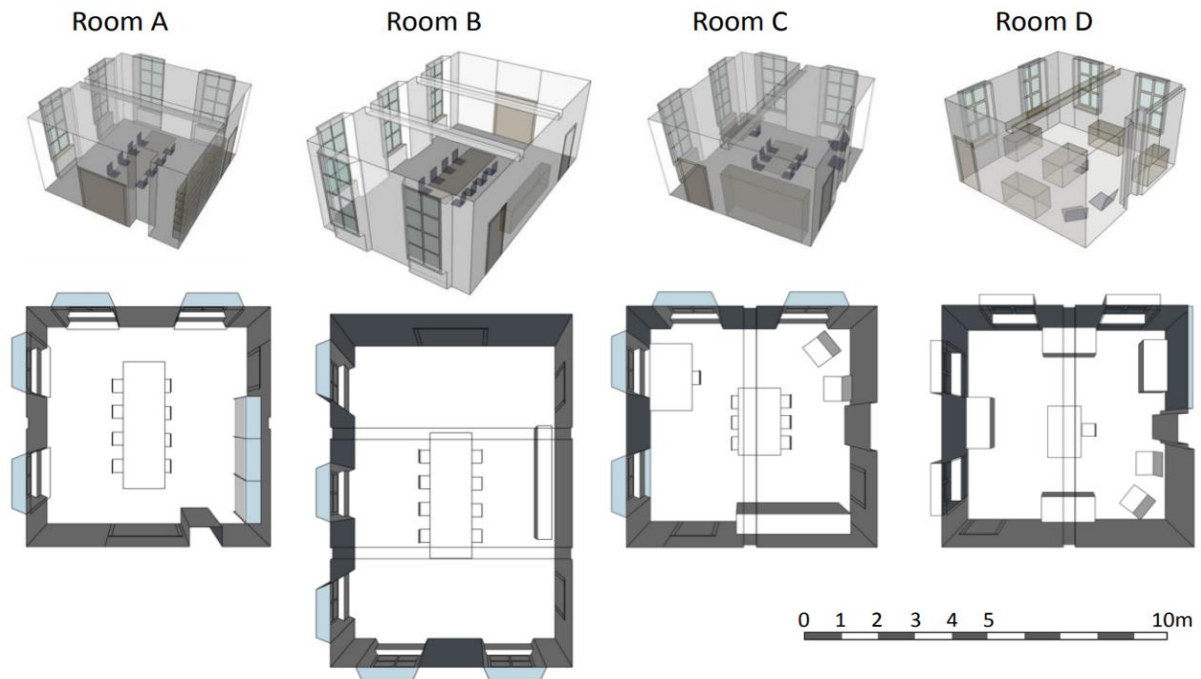
### 2 Description of the case study

The House of Silence is situated in a quiet forest area with low background noise levels (Figure 1.). New users refer to acoustic problem caused by internal sound sources that are audible inside the building. The main difference in comparison with past is a change of function. The most frequent sound sources here are human voices, human steps and sounds from a kitchen. The walls between rooms are masonry with a sufficient thickness to insulate produced speech in meeting rooms, but doors with historical value (Figure 1.) between the meeting rooms and doors between the rooms and corridor are rather weak. Floors are lightweight, constructed out of wood, without any acoustic treatment, resulting in rather weak impact sound insulation. Thus, the acoustic comfort in this place is strongly determined by users' behavior.



Figure 1. Four rooms investigated in the case study.

Historical rooms of House of Silence were never been used for conference meetings (Figure 2.). Nowadays meetings insist on the use of audio systems for presentations and calls. Big glass windows, plastered walls and floors made out of wooden parquet are hard materials which do not provide enough of sound absorption. At present, only few pieces of hard wood furniture are present in the room. In rooms C, D (Figure 2.) there are also two upholstered chairs which due to its small surface don't contribute to significant reduction in reverberation time. The volume of the room A is  $155 \text{ m}^3$ , the room B has a volume of  $215 \text{ m}^3$ . The rooms C and D have volumes around  $140 \text{ m}^3$ .



**Figure 2.** Four rooms investigated in the case study.

This article discusses several suggestions for improvement of acoustic quality for the given function. In the proposals the position of the sound source and receiver as well as distribution of sound absorption compared. Four variants include the use of heavy curtains, absorptive material on walls and combination of wall absorption and a thick carpet on the floor.

### 3 Measurements

The room acoustic measurement were performed in the four chosen meeting rooms (Figure 3.). The integrated room impulse response measurements were performed according to the ISO 3382 using sweep signal were performed in rooms with the presence of four people of the B&K Dirac software. Measurements were performed for 6 different microphone (B&K 4130) positions and 2 sound source positions. The height of the omnidirectional point source (B&K Omnisource 4295, with amplifier B&K 2642) was 1.5 m.

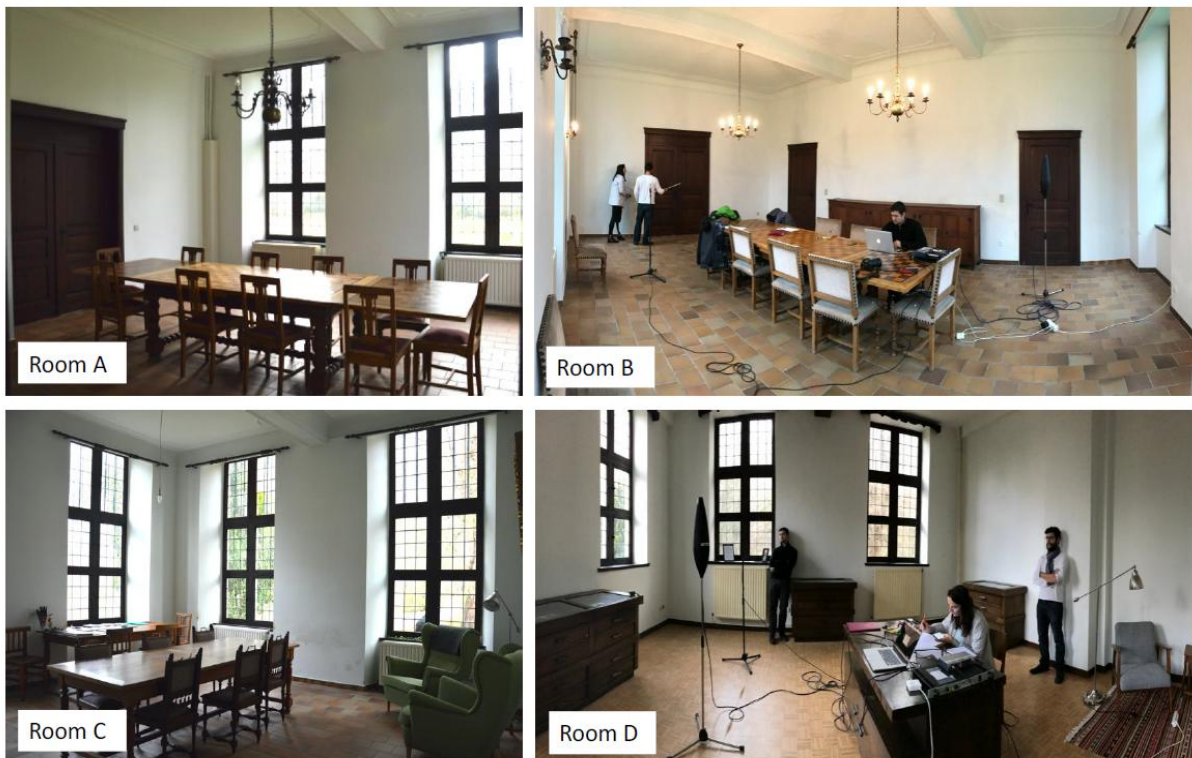


Figure 3. Snapshots of the measurements performed inside the House of Silence.

The results of the mean reverberation time expressed through parameter  $T_{30}$  (s) can be seen in Figure 4. The values are shown per room. Longest reverberation time has been measured in the biggest room B. In all studied room, the reverberation time was longer than 1.5s at middle frequencies, which is far too long for meeting room of the given volumes.

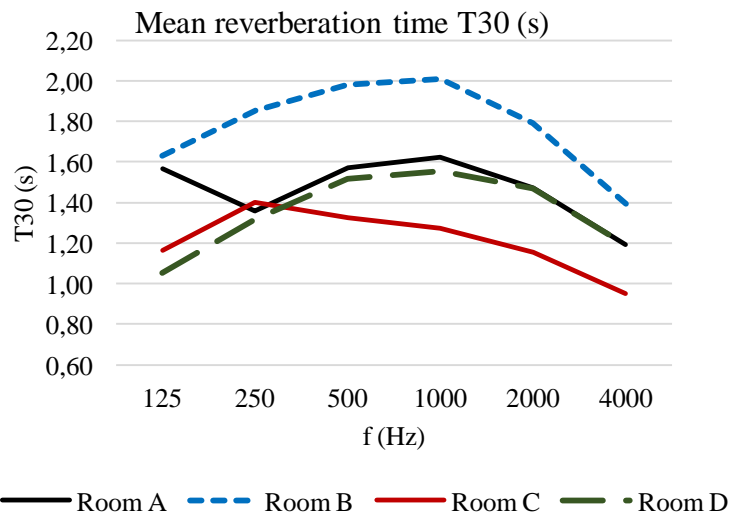


Figure 4. Measured reverberation time in the studied rooms.

## 4 Simulations

The room acoustic simulations were performed in the acoustic prediction software ODEON® (Figure 5. – 8., Table 1. – 2.). This computer software uses a hybrid calculation method that

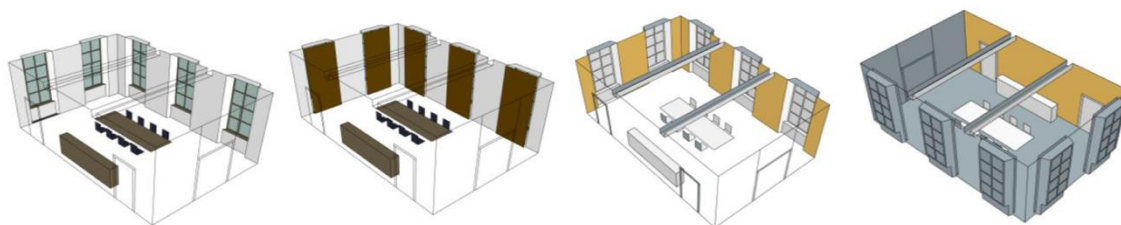
combines the image source method (ISM) and early-scattered rays to calculate the first sound reflection, and a modified ray-tracing algorithm (RTM), which includes scattering of the sound from the model surfaces using the Lambert's cosine law, for later reflections. The use of this hybrid combination is a popular approach for room impulse response calculations, since it allows exploring the advantages and to suppress the disadvantages of ISM and RTM, thus leading to a realistic prediction of a room impulse response (RIR). In comparison with an estimation of necessary additional sound absorption according to the Sabine formula, computer simulation allows for calculation of the whole room impulse response, similar to the measured one. Doing so, not only the amount of sound absorbing material, but also its position is taken into account in calculation of acoustic parameters, such as reverberation time, clarity of sound of speech transmission index. The 4 chosen cases (rooms) were modelled in 3D, exported into acoustic software and calibrated according to the measurements realized in situ. Several alternatives (solutions) in each room were simulated and evaluated. The optimal value of reverberation time ( $T_{30} = 0.6$  s) was taken from recommended values for rooms with a volume of  $150 \text{ m}^3$ , where speech is dominant. Simulation of each room was performed for 3 variants and the current situation.

**Table 1.** Sound absorption of the materials used for the simulations.

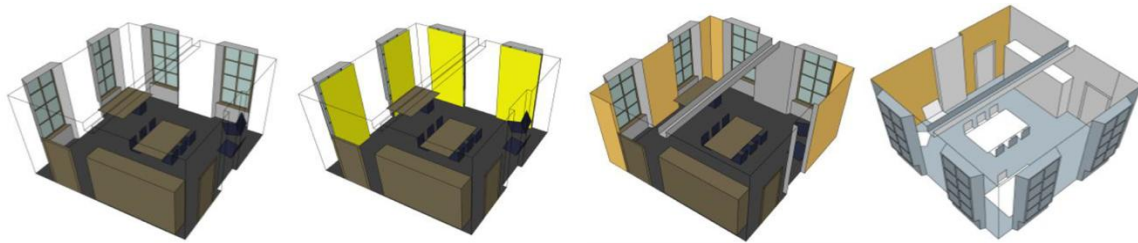
Material	Frequency (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
original (old) plaster		0.02	0.06	0.04	0.05	0.07	0.09
absorptive plaster (10 cm mineral wool)		0.58	0.69	0.96	0.97	0.99	0.91
wood		0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
thick carpet		0.03	0.09	0.25	0.31	0.33	0.44
heavy curtain		0.50	0.70	0.55	0.72	0.70	0.65
chairs with people		0.51	0.64	0.75	0.80	0.82	0.83
ceramic or stone floor tiles		0.51	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02



**Figure 5.** Simulated alternatives room A (from left to right): current situation; curtains in front of the windows (Variant 1); curtains, wall absorbers or acoustic plaster (Variant 2); wall absorption and thick carpet (Variant 3).



**Figure 6.** Simulated alternatives room B (from left to right): current situation; curtains in front of the windows (Variant 1); curtains, wall absorbers or acoustic plaster (Variant 2); side wall absorptive carpet (Variant 3).



**Figure 7.** Simulated alternatives room C (from left to right): current situation; curtains in front of the windows (Var.1); curtains, wall absorbers or acoustic plaster at walls between windows (Var.2); acoustic plaster at one wall + carpet (Var.3).



**Figure 8.** Simulated alternatives room D (from left to right): current situation; curtains in front of the windows (Variant 1); curtains, wall absorbers or acoustic plaster (Variant 2), side wall absorptive + carpet (Variant 3).

**Table 2.** Amount of absorptive materials used in simulation.

Room	Variant A / curtains	Variant 2/ wall absorption	Variant 3/ wall absorption + carpet	Variant 4/ Variant 3+ wall absorber
A	24 m <sup>2</sup>	40 m <sup>2</sup>	15 m <sup>2</sup>	37 m <sup>2</sup>
B	30 m <sup>2</sup>	45 m <sup>2</sup>	18 m <sup>2</sup>	56 m <sup>2</sup>
C	23 m <sup>2</sup>	33 m <sup>2</sup>	15 m <sup>2</sup>	36 m <sup>2</sup>
D	20 m <sup>2</sup>	37 m <sup>2</sup>	19 m <sup>2</sup>	39 m <sup>2</sup>

## 5 Results and conclusion

The measurements *in situ* have confirmed the too long sound reverberation in the four chosen meeting rooms. The simulated alternatives have shown the improvement thanks to the additional sound absorption. Results (Table 3., Figure 9.) have shown, a perfect acoustic condition, e.g. also at low frequency, can be reached only by intervention to the monument, by application of a lowered ceiling, installation of bass traps or panel resonators (example: Variant 4 in Room B). However, a significant improvement can be reached already by relatively unexpansive and non-invasive solutions and reversible intervention. Placing extra soft furniture, such as sofas or armchairs will contribute to the acoustic comfort in terms of shortening the reverberation time and is therefore also recommended.

**Table 3.** Results of simulation of STI with quality according to IEC 60268-16.

Room	Current	Variant 1	Variant 2	Variant 3
A	0,35 / fair	0,41 / poor	0,42 / poor	0,42 / poor
B	0,49 / fair	0,65 / good	0,65 / good	0,68 / good
C	0,57 / fair	0,72 / good	0,70/ good	0,72/ good
D	0,54 / fair	0,68/ good	0,68/ good	0,71 / good



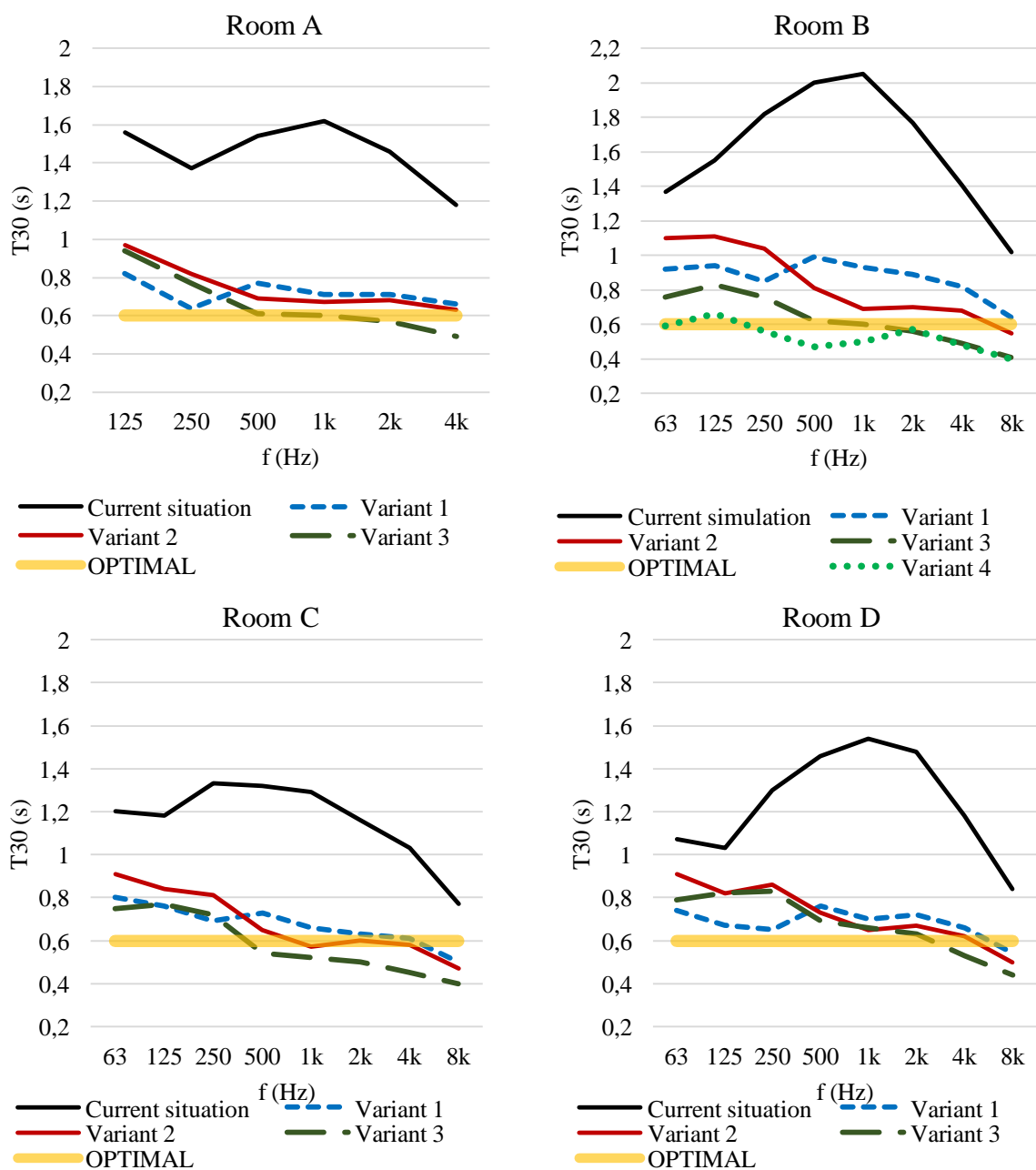


Figure 9. Comparison of simulated  $T_{30}$  for all variant of the different rooms.

### Acknowledgements

This work has been done with a support of H2020-MSCA- RISE-2015 No. 690970 „papabuild” and the Erasmus+ programme of the European Union.

### References

[1] <https://www.kuleuven.be/communicatie/congresbureau/oude-versies/english-old/stiltehuis/history-houseofsilence> (last seen on 28 July 2020)

[2] Polomová, B., Hanuliak, P., Vargová, A. Application of atrium tensile structure in historic building. Case study: Daylight modeling of atrium within historic building. Proceedings of the TensiNet Symposium 2019. Milan, Italy, 2019, p. 526-534.

[3] Vargic, L., Gregorová, J., Rychtáriková, M. Acoustic properties of façade fragments of historical monuments. Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics. Berlin, Germany: Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2019, p. 2974--2978.

## Summary

**Proposal for reversible intervention to historical monument, by means of room acoustic simulations.** The historical building “House of Silence” (17<sup>th</sup> century building) in Egenhoven, nearby Leuven (Belgium) has been already for more than 70 years recognized as a protected monument. In 2011 has this mansion become the property of KU Leuven with a promise on preservation of the spirit of the domain [1]. Several acoustic problems, related to sound insulation and sound reverberation, have been identified by the new users. It is well known, that the acoustic comfort inside the building strongly depend on its function, the change in function is always bringing new challenges in terms of acoustics. The house is situated in a very quiet area with very low background noise levels inside the building, which on one hand makes it in general a pleasant place for meditations, reading or concentration work, but at the same time it makes the sounds produced inside the building interior very audible. The second problem is a rather long reverberation time in the meeting rooms that makes it difficult for easy use of nowadays conferences or meetings. In this article we present a study case that has focused on an accurate prediction of acoustic comfort inside the meeting rooms, such as simulation of reverberation time and speech transmission index for different variants of reversible interventions to this monument.

## Keywords

Historical monument; building and room acoustics; measurements; simulations.

## Contact Address

Magdaléna Kaššáková  
Department of architecture,  
Faculty of Civil Engineering,  
STU Bratislava,  
Radlinského 11,  
81005, Bratislava, Slovak Republic  
magdalena.kassakova@stuba.sk

Léopold Kritly  
Faculty of Architecture,  
KU Leuven,  
Hoogstraat 51, 9000 Gent/ Paleizenstraat 65,  
1030 Brussel, Belgium

EPF – Graduate School of Engineering,  
3 bis rue Lakanal,  
F-92330 Sceaux, France  
leopold.kritly@kuleuven.be

Lukáš Zelem

Department of architecture,  
Faculty of Civil Engineering,  
STU Bratislava,  
Radlinského 11,  
81005, Bratislava, Slovak Republic  
lukas.zelem@stuba.sk

Monika Rychtáriková

Faculty of Architecture,  
KU Leuven,  
Hoogstraat 51, 9000 Gent/ Paleizenstraat 65,  
1030 Brussel, Belgium  
monika.rychtarikova@kuleuven.be

## ANALÝZA MATERIÁLOV POMOCOU VYSOKOFREKVENČNÝCH AKUSTICKÝCH MERANÍ

Jozef Kúdelčík, Peter Hockicko, Štefan Hardoň, Marek Veveričík

### 1 Úvod

V tomto príspevku chceme predstaviť výsledky a možnosti merania akustickej skupiny na Katedre fyziky na Fakulte elektrotechniky a informačných technológií na Žilinskej univerzity v Žiline. Vedecko-výskumná činnosť katedry je zameraná hlavne na využitie akustických a optických vlnových procesov na štúdium kondenzovaných látok.

Akustická skupina využíva široké spektrum akustických metód a techník, ako i akustoelektrické a akustooptické javy pri vyšetrovaní polovodičových štruktúr, kovov, iónových skiel a magnetických kvapalín. Pozornosť je taktiež venovaná vývoju nových akustických techník. Akustická skupina dosiahla pri vyšetrovaní polovodičových MOS štruktúr s tzv. high-K dielektrickými vrstvami ( $\text{Si-SiO}_2\text{-HfO}_2$ ), pri štúdiu magnetických kvapalín na báza transformátorového oleja ako i štúdiu iónových skiel typu LiPON významné výsledky, ktoré boli publikované v desiatkach karentovaných časopisoch a ďalších príspevkoch ako i viacerých konferenčných materiáloch.

Optická skupina sa zaoberá štúdiom fyzikálnych vlastností konvenčných optických vlákien a špeciálnych vlákien ako sú kapilárne a fotonické vlákna. Skupina má tiež technológie na prípravu a analýzy fotonických štruktúr pre integrovanú optiku a optoelektroniku. Najnovšie výsledky sú z oblasti optofluidných vlnovodov, kde sa vyvíjajú senzory a optické prvky. V oblasti aktívnych prvkov boli vyvinuté nové typy elektroluminiscenčných diód s povrchom upraveným fotonickou štruktúrou, resp. nových typov polymérnych membrán s fotonickou štruktúrou. Takéto typy optických a optoelektronických prvkov vykazujú unikátne vlastnosti hlavne v oblasti vyžarovania a vedenia žiarenia.

Teoretická skupina fyziky elementárnych častíc sa venuje štúdiu fenomenológie narušenia elektroslabej symetrie a štúdiu kvark-gluónovej plazmy. Pochopenie mechanizmu narušenia elektroslabej symetrie (NES) je jeden z najaktuálnejších problémov súčasnej časticovej fyziky. V spolupráci bol skonštruovaný a študuje sa tzv. top-BESS model s  $\text{SU}(2)$  izospinovým tripletom vektorových rezonancií ako efektívny opis spontánneho narušenia elektroslabej symetrie.

### 2 Experimentálne vybavenie

V rámci akustickej skupiny máme viacero akustických prístrojov na meranie rôznych akustických parametrov.

Ako prvé spomenieme komerčný prístroj 1. ultrazvukový spektrometer DT-100, ktorý je schopný viacero akustických meraní. Frekvenčný rozsah daného prístroja je 1 - 100 MHz. Útlm ultrazvuku a rýchlosť sa merajú detekciou útlmu signálu a jeho oneskorenia. Medzera medzi vysielačom a detektorom je variabilná 0,1 - 21 mm, čím je možné charakterizovať veľký rozsah koncentrácií disperzie v rozmedzí 0,1 až 50 obj.%. Na základe teórie vie prístroj stanoviť veľkosti častíc v rozmedzí od 5 nm do 1 000  $\mu\text{m}$  [1].

Ďalšie zariadenie č. 2 je sada prístrojov zložená do ultrazvukového spektrometra pre meranie útlmu v závislosti od magnetického poľa a teploty. Akustická vlna je generovaná piezoelektrickými meničmi po privedení vysokofrekvenčného impulzného signálu

z generátora MATEC-EXPLORER II vo frekvenčnom rozsahu 1 – 15 MHz. K dispozícii máme i ultrazvukový komparátor (PULSE MODULATOR & RECEIVER, MATEC 6600) a pulzný modulátor a prijímač (MATEC 7700) s frekvenčným rozsahom 1 – 50 MHz a k tomu MATEC Attenuation Recorder 2470 A [1]. Elektromagnet môže vytvárať magnetické pole do 1 T. Na stabilizáciu teploty vzorky sa využíva kryostat ( $\pm 0.01^\circ\text{C}$ ), termostat JULABO F25 ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) a laboratórna pec 0313V ( $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) v celkovom rozmedzí od 75 do 750 K [2, 3].

### 3 Materiály

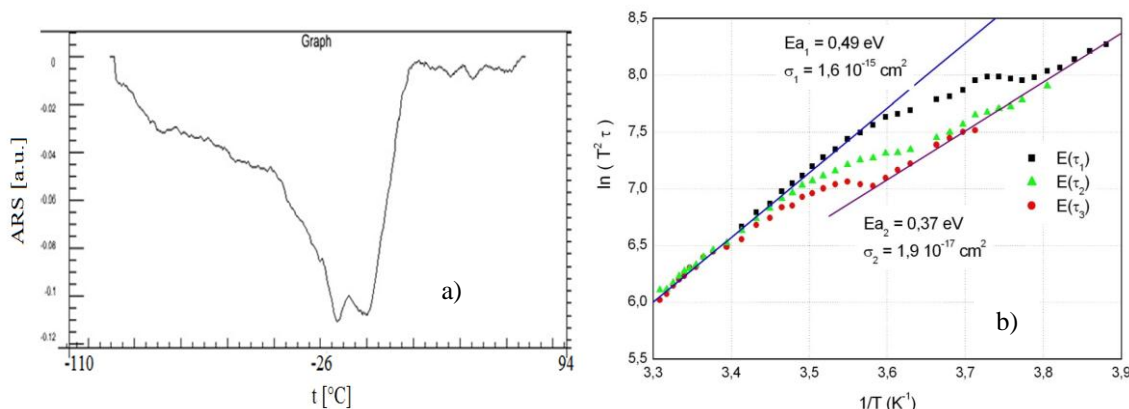
#### 3.1 Polovodiče

Fyzikálny význam akustických vln využívaných vo fyzike je v prevažnej miere spojený s tým, že akustickými vlnami sú bezprostredne budené periodické kmity častíc látky. Do tejto úvahy je potrebné zahrnúť aj to, že akustické vlny, ktoré sa šíria v danej látke nemajú žiadny priamy súvis s ich elektromagnetickým poľom. Procesy, ktoré sprevádzajú šíriacu sa akustickú vlnu v polovodičoch sú sprevádzané rôznymi efektmi. Pôsobením akustickej vlny vzniká deformácia kryštalickej mriežky a začínajú sa vytvárať tepelné gradienty, čím nastáva prerozdelenie voľných elektrických nábojov, ktoré súvisia s prímiesami v objeme, čo spôsobuje disperziu rýchlosti [4]. Polovodiče ako zvláštna skupina pevných látok sú stále veľmi aktuálne a atraktívne ako z hľadiska využitia ich technických možností vo všetkých odboroch vedy a techniky, tak aj z hľadiska poznávania stavby štruktúr. K základným vlastnostiam polovodičov, od ktorých závisí ich použitie patrí závislosť ich elektrickej vodivosti a iných parametrov na čistote (resp. na prímiesiach) a možnosť ovplyvnenia ich fyzikálnych vlastností externým činiteľom, napr. elektrickým a magnetickým poľom, svetlom, teplom, tlakom a žiarením všetkého druhu.

Výsledkom interakcie akustických vln s priestorovým nábojom na rozhraniach polovodičových štruktúr je signál akusto-elektickej odozvy a jeho závislosť na teplote a priloženom napätí. Týmto sa dajú zisťovať informácie o defektoch, stavoch na rozhraniach polovodičových štruktúr a následne z týchto poznatkov zistiť vplyv technologických postupov a vonkajších parametrov na ich vlastnosti. Všeobecne polovodičové štruktúry možno charakterizovať z hľadiska hlbokých centier a tým je potrebné určiť aj ich hustotu  $N$ , ich zachytňujúci prierez  $\sigma$  a energetickú hladinu  $E$ . Medzi najdôležitejšie metódy k určovaniu hlbokých prímiesových hladín patria metódy termostimulovaných prúdov [5], tranzientná spektroskopia hlbokých centier (DLTS – Deep Level Transient Spectroscopy) s jej početnými obmenami [6].

A-DLTS (Acoustic DLTS) má dve základné modifikácie [7]. Prvá modifikácia využíva buď jednosmernú (TAV – Transversal Acoustoelectric Voltage) alebo striedavú zložku akusto-elektickejho signálu (TAS – Transversal Acoustoelectric Signal), ktoré vznikajú priečne na smer šírenia povrchovej akustickej vlny (SAW), t.j. v smere štruktúry. Pri A-DLTS metóde je zachytený celý prechodový jav a to pri stálej teplote, čím sa získajú izotermické akustoelektické tranzienty, pričom merania sa uskutočňujú v širokom rozsahu teplôt. Daná izotermická akustoelektická tranzienta obsahuje len jednu exponenciálnu zložku zodpovedajúcu hlbokému centru s určitou aktivačnou energiou. Na katedre bola vyvinutá metóda, ktorá umožňuje bez straty informácií komprimovať údaje v pamäti. Daným spôsobom máme k dispozícii 8 okienok so vzorkovacími frekvenciami 4 kHz - 31.25 Hz po 256 hodnôt meraní. Na Obr. 1a) je priebeh ARS signálu skúmanej vzorky meranej v teplotnom rozsahu od  $+82^\circ\text{C}$  až do  $-97^\circ\text{C}$ . Vyšetrovaná vzorka je n-typu a bola pripravená

na fosforom dotovanej kremíkovej doštičke Si s merným odporom rádovo  $10 \Omega\text{cm}$ . Hrúbka  $\text{SiO}_2$  vrstvy je 3,5 nm.



**Obrázok 1.** a) A-DLTS spektrum meranej Si/SiO<sub>2</sub>/Al (MOS) štruktúry získané z odoziev akustoelektrického signálu (ARS). b) Arrheniove grafy a odpovedajúce aktivačné energie a záchytné prierezy dvoch identifikovaných hlbokých centier na vyšetrovanej štruktúre [8, 9].

Pomocou zvolených rýchlostných okienok pri vyhodnocovaní tranzient sa môže súčin relaxačných časov  $\tau_i$  a teploty, ktoré im odpovedajú ( $T_i$  pričom  $i=1, 2, \dots, n$ , kde  $n$  je počet rýchlostných okienok), vyjadriť vzťahom [4]

$$\ln(\tau T^2) = \frac{\Delta E}{k} \frac{1}{T} - \ln(\gamma \sigma)$$

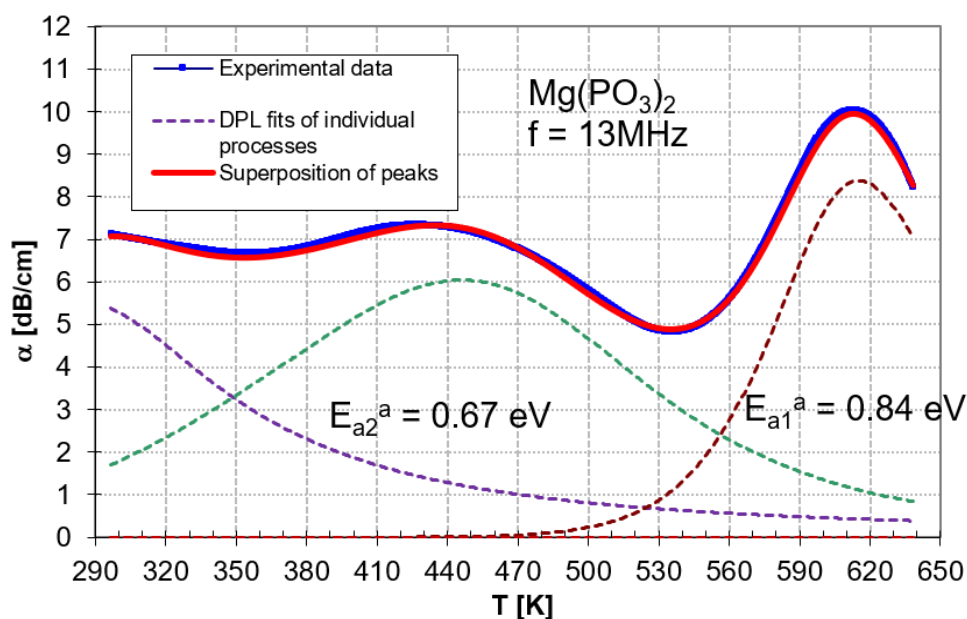
a ďalej vyniesť do grafu, pričom nameranými bodmi môžeme preložiť priamku podľa rovnice, čo predstavuje rovnicu priamky  $y=ax+b$ , kde  $y = \ln(\tau T^2)$ ,  $a = \Delta E/k$ ,  $x = 1/T$ ,  $b = \ln(\gamma \sigma)$ . Takto zostrojený graf sa nazýva Arrheniov graf (Obr. 1b). Z grafu podľa smernice priamky sa dá jednoduchým spôsobom určiť aktivačná energia  $E$  hlbokého centra, ktoré je sledované. Takisto sa dá pomocou prieniku predĺženia nameranej priamky a osi  $x$ , čiže z koeficientu  $b$  určiť záchytný prierez hlbokého centra  $\sigma$ .

### 3.2 Iónovo vodivé sklá

Iónovo vodivé sklá patria medzi perspektívne materiály a už dnes si nachádzajú svoje široké uplatnenie. Špeciálnou skupinou sú fosfátové sklá, o ktoré v posledných dekádach narástol značný záujem vďaka ich vlastnostiam, z ktorých možno spomenúť nízku prechodovú teplotu, vysoký teplotný expanzný koeficient i refrakčný index a priehľadnosť v UV, vysokú iónovú vodivosť už pri izbových teplotách, chemickú a tepelnú stabilitu. Fosfátové oxidy patria medzi najznámejšie sklo-formujúce oxidy. Chemická stabilita fosfátových skiel sa zlepšuje pridaním oxidov kovov. Fosfátové sklá, v porovnaní so kremíkovými sklami, poukazujú na vynikajúcu priepustnosť pre UV žiarenie. V súčasnej dobe fosfátové sklá jasne dominujú v aplikáciách pre hostiteľské materiály vysoko výkonových laserov a sú stále viac a viac používané v optoelektronike, pri generácii laserového žiarenia, v lítiových nabíjateľných batériách s tuholátkovými elektrolytmi, sú súčasťou elektrochemických zariadení ako sú elektrochemické pumpy, kondenzátory, spínače, displeje a senzory. Využívajú sa tiež v biomedicínskom výskume, konkrétne v svalových tkanivách aj ako distribučný systém antibakteriálnych látok pre ľudský organizmus alebo pre skladovanie rádioaktívneho odpadu. Spôsob prípravy metafosfátových skiel bol už popísaný [10].

Na vyšetovanie relaxačných procesov v iónovo vodivých sklách boli použité pozdĺžne akustické vlny s frekvenciou 13 MHz (niekedy aj 18, 27 MHz) generované modulátorom a prijímačom MATEC 7700 a akustickým meničom  $\text{LiNbO}_3$ . Po prechode akustickej vlny vzorkou bol následne za pomoci počítača analyzovaný akustický útlm. Akustické merania sa vykonali pri teplotách v rozmedzí od 290 K až 650 K pri náraste teploty 0,5 K/min. Pripravené vzorky boli väčšinou valcové (napr. pre metafosfátové sklo alkalických zemín zloženia  $50\text{MgO}-50\text{P}_2\text{O}_5$  bola hrúbka  $h = 2,9$  mm a 9,06 mm v priemere) pričom konce vzoriek boli leštené a rovnobežné.

Na Obr. 2 je znázornené namerané akustické spektrum pre  $\text{Mg}(\text{PO}_3)_2$  sklo. Z teplotných závislostí akustického útlmu a polôh píkov sa dajú pomocou Double Power Law (DPL) fitov stanoviť aktivačné energie dominantných procesov zodpovedných za iónový preskokový pohyb ( $E_{a1}^a = 0,84$  eV,  $E_{a2}^a = 0,67$  eV), ktoré súvisia s kationovým potenciálom modifikátora, menovite kovalentným potenciálom väzby Mg-NBO (Mg - nemostíkový kyslík) [11].

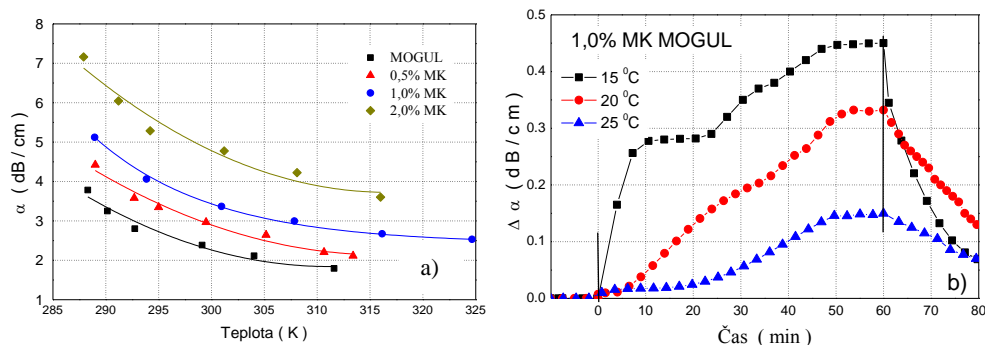


**Obrázok 2.** Akustické útlmové spektrum sklenej vzorky (plná čiara) merané pri frekvencii  $f = 13$  MHz a DPL fit niekoľkých predpokladaných relaxačných procesov (prerušovaná čiara) [11].

### 3.3 Magnetické kvapaliny

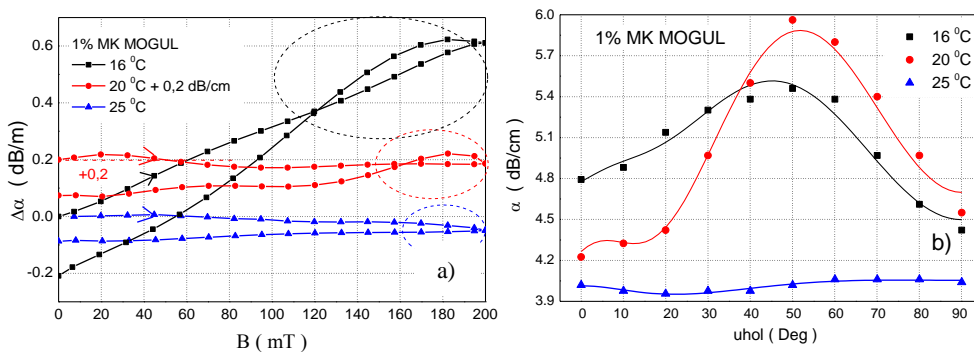
Jedným zo základných meraní, ktoré sa dajú vykonať pomocou akustickej spektroskopie, je meranie útlmu  $\alpha$  a rýchlosti  $v$ . Na Obr. 3a) je znázornená nameraná teplotná závislosť akustického útlmu pre rôzne koncentrácie magnetickej kvapaliny (MK) na báze transformátorového oleja MOGUL. Z nameraných hodnôt je vidieť, že útlm klesá s teplotou, no rastie s koncentráciou nanočastíc (NČ). Nárast útlmu s koncentráciou je spôsobený väčším počtom NČ v MK.

Útlm akustickej vlny, ako ukázali rôzne práce [12, 13, 14] zamerané na štúdium MK na báze transformátorových olejov, závisí od veľkosti magnetickeho poľa, rýchlosti jeho zmeny a tiež teploty. Ako základné meranie sa študuje vplyv skokovej zmeny magnetickeho poľa na útlm v MK. V tomto prípade sa dá pozorovať viacero charakteristík: zmena útlmu po aplikovaní poľa, časový priebeh po stabilizácii a zmena útlmu po vypnutí poľa.



**Obrázok 3.** a) Závislosť útlmu od teploty pre rôzne koncentrácie magnetických nanočastíc pri teplote 25 °C a b) závislosť zmeny akustického útlmu pri skokovej zmene magnetického poľa na hodnotu 200 mT pri rôznych teplotách v MK na báze transformátorového oleja MOGUL.

Na Obr. 3b) je znázornená zmena akustického útlmu v závislosti od skokovej zmeny magnetického poľa z 0 mT na 200 mT. Po zmene zostalo magnetické pole konštantné počas určitej doby a po je uplynutí okamžite kleslo na hodnotu 0 mT. V MK MOGUL pozorujeme dlhšiu časovú zmenu útlmu na stabilnú hodnotu. V prípade MK MOGUL [15] môžeme však pozorovať aj rýchlu zmenu akustického útlmu. Pozorované zmeny útlmu akustickej vlny sú spôsobené štruktúrnymi zmenami v MK, čo znamená, že magnetické nanočastice sa spájajú do nových štruktúr. Existujú rôzne typy štruktúr, ako sú: diméry, triméry, vyššie oligoméry, klastre a ich rôzne kombinácie. Vzniknuté štruktúrne zmeny sú dôsledkom interakcie medzi magnetickým poľom a magnetickými momentmi NČ v MK. Nezávisle od typu MK s narastajúcou teplotou klesá zmena útlmu. Je to spôsobené hlavne s nárastom rýchlosti tepelného pohybu, vďaka čomu klesá aj počet vzniknutých štruktúr a aj ich veľkosť. Väčšia rýchlosť NČ je spojená s menšou pravdepodobnosťou ich spojenia alebo zachytenia štruktúrou. Tiež stabilita štruktúr je menšia aj vďaka častejším zrážkam štruktúr s energetickejšími NČ. Pri vypnutí magnetického poľa pre MK MOGUL sa pozoruje tiež pomalý pokles útlmu na pôvodnú hodnotu [15], čo je spôsobené aj tým, že životnosť štruktúr je dlhšia, čo súvisí pravdepodobne so silnejšími medzičasticovými silami.



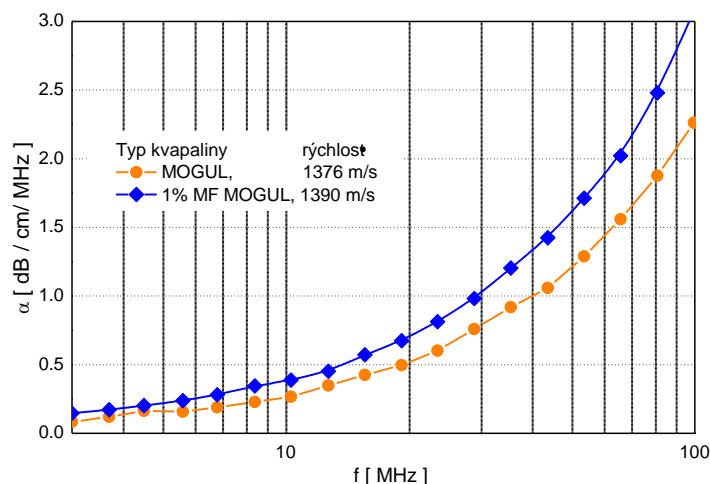
**Obrázok 4.** a) Zmena akustického útlmu meraná pri lineárnej zmene magnetického poľa do 200 mT počas 60 min a b) anizotropia akustického útlmu meraná pri B = 200 mT pre rôzne teploty v 1,0 % MF MOGUL.

Ďalšia možnosť aplikácie magnetického poľa je lineárna zmena s časom do maximálnej hodnoty a potom pokles na nulové pole (Obr. 4a). Postupný nárast útlmu s poľom zodpovedá postupnému nárastu veľkosti a počtu vzniknutých štruktúr. V podstate pre všetky typy MK nezávisle od typu nosnej kvapaliny pozorujeme hysteréznú slučku pri poklese magnetického poľa. Táto slučka je dôsledkom toho, že procesy nárastu, príp. vzniku štruktúr, nastávajú aj pri poklese magnetického poľa. Tak isto ako pre skokovú zmenu, tak aj pre lineárnu zmenu



magnetického poľa má teplota výrazný vplyv na pokles zmeny útlmu, a teda na štrukturálne usporiadanie nanočastíc. Je to spôsobené hlavne s nárastom rýchlosti tepelného pohybu, vďaka čomu klesá aj počet vzniknutých štruktúr a aj ich veľkosť. Pri 1% MK MOGUL už od teploty 25 °C a pri ostatných typoch MK až od 30 °C [16] už s nárastom poľa nepozorujeme takmer žiadnu zmenu útlmu.

Pomocou anizotropie (závislosť akustického útlmu  $\alpha$  od uhlu  $\varphi$  medzi vlnovým vektorom akustickej vlny  $\vec{k}$  a smerom magnetického poľa  $\vec{B}$ ) dokážeme určiť dôležité informácie týkajúce sa usporiadania nanočastíc v danej štruktúre, ich veľkosť, hustotu a ďalšie. Tieto parametre sa dajú vypočítať pomocou vhodných teoretických modelov: Taketomi [17] i Shliomis [18]. Pri nižších teplotách pre MK MOGUL (15 °C, 20 °C) pozorujeme lokálne maximum medzi 40° až 50° (Obr. 4b). Pri nižšej teplote sú priemery štruktúr väčšie ako pri vyššej teplote (mení sa z 93 na 19 nm). Pri vyšších teplotách je zmena akustického útlmu takmer nezávislá od smeru pôsobiaceho magnetického poľa. Pri vyššej teplote sa tepelný pohyb zvyšuje, čo vedie k poklesu počtu zhlukov a hlavne ich priemeru. Menší počet zhlukov a ich kratšia dĺžka spôsobujú menší vplyv na akustický útlm. Pri teplote nad 25 °C [16, 19] je vplyv magnetického poľa na akustický útlm malý a ako vyplýva z našich výsledkov, väčšina NČ je už voľná a nenachádza sa v štruktúrach.



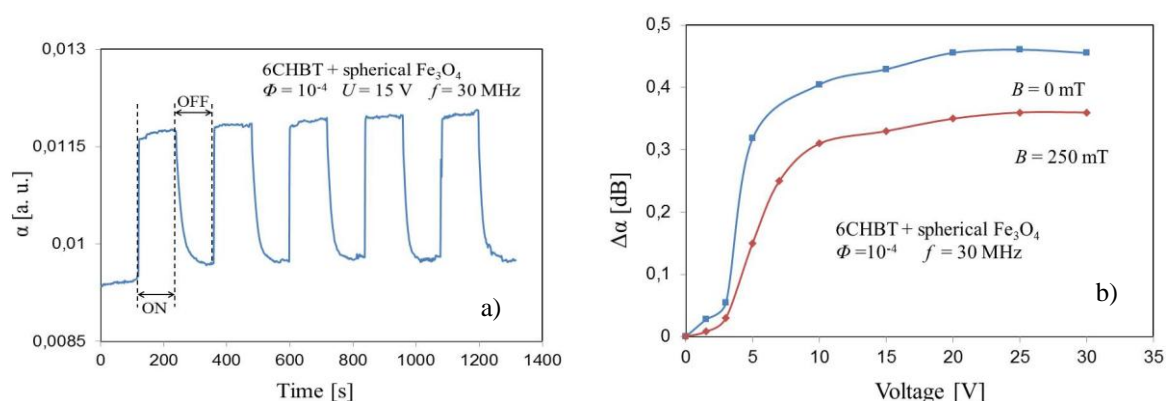
**Obrázok 5.** Frekvenčná závislosť útlmu akustického signálu pre rôzne typy tekutín pri teplote 25 °C.

Pri meraní používame i komerčný akustický spektrometer DT-100, ktorý meria útlm šíriacej sa ultrazvukovej vlny v širokom rozsahu frekvencií od 1 do 100 MHz pre medzery v rozsahu: 0.1-21 mm. Dané zariadenie umožňuje stanovenie veľkostí častíc v rozmedzí od 5 nm do 100 μm pri rozmedzí koncentrácií: 0.1-50 obj. %. Z Obr. 5 je evidentné, že útlm v študovaných kvapalinách narastá s frekvenciou. Po pridaní magnetických nanočastíc do transformátorového oleja rozptyl akustickej vlny narastá, čo spôsobuje i nárast útlmu oproti čistému oleju. Útlm pre magnetickú kvapalinu je vyšší, pretože nanočastice spôsobujú dodatočný rozptylový útlm. Ďalším tlmiacim účinkom, ktorý tu spôsobuje nárast útlmu je nárast viskozity. Každé namerané frekvenčné spektrum útlmu ultrazvuku obsahuje informácie i distribúciu veľkosti častíc.

### 3.4 Kvapalné kryštály

Experimentálne štúdiá ukazujú, že správanie kvapalných kryštálov možno meniť vplyvom elektrického alebo magnetického poľa. Kvapalné kryštály môžu byť orientované pod vplyvom magnetického alebo elektrického poľa v dôsledku ich anizotropných vlastností.

Avšak, pretože majú malú hodnotu anizotropie diamagnetickej citlivosti, k usmerneniu kvapalných kryštálov musí byť použité magnetické pole s pomerne veľkými hodnotami ( $B > 1$  T). V snahe zvýšenia ich magnetickej susceptibility sú dopované rôznymi magnetickými nanočasticami. Experimenty potvrdili existenciu orientovaných a koncentrovaných účinkov v dopovaných kvapalných kryštáloch, ako aj skutočnosť, že podstatným znakom týchto systémov je silné orientované spájanie medzi magnetickými časticami a kvapalnou kryštalickou mriežkou. Akustické (ultrazvukové) metódy boli väčšinou používané na charakterizáciu elastických a viskózných parametrov kvapalných kryštálov hlavne v blízkosti fázových prechodov, častejšie u nematických kvapalných kryštálov. Obzvlášť SAW boli využité na určenie distribúcie viskozity vo vrstve kvapalného kryštálu v závislosti na aplikovanom elektrickom poli alebo na štúdium účinkov štrukturálnych zmien v kvapalných kryštáloch po účinku akustických oscilácií. SAW môžu byť tiež využité na preusporiadanie kvapalných kryštálov na základe akusto-optického javu, ako riadiaci činiteľ pre svetelnú uzávierku (prepínač), alebo tiež súčasť SAW senzora [20, 21, 22].



**Obrázok 6.** Útlm SAW pre 6CHBT dopovaného s  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\Phi = 10^{-4}$ ) pri aplikovanom napätí (15V) Zmeny závislosti útlmu SAW na aplikovanom elektrickom poli meraním pri  $B=250$  mT ( $B/E$ ) [9].

SAW sa ukázali na základe viacerých experimentov zostavených za účelom štúdia štrukturálnych vlastností nematických kvapalných kryštálov dopovaných magnetickými nanočasticami (feronematika), že sú vhodnejšie pre daný účel ako pozdĺžne akustické vlny. Bolo zostavené experimentálne usporiadanie, ktoré umožňuje sledovať vplyv tak elektrického ako i magnetického poľa, ale i teploty na útlm SAW, ktorý jednoznačne odráža zmeny prebiehajúce vo vyšetřovanom feronematiku [23].

Účinok priloženého napätia na útlm SAW pre 6CHBT, ktorý je dopovaný  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\Phi = 10^{-4}$ ) pri striedavom zapnutí a vypnutí elektrického poľa je zobrazená na Obr. 6a). Z meraní môžeme vidieť ako dynamika spínacieho efektu (pri zapnutí a vypnutí) vplyva na útlm, keď molekuly kvapalného kryštálu menia svoju orientáciu vplyvom elektrického poľa v priebehu niekoľkých sekúnd. Tento efektu je závislý od intenzity aplikovaného elektrického poľa.

Ako ďalší experimentálny výsledok znázorňuje Obr. 6b), kde je závislosť zmeny útlmu SAW na elektrickom poli pre ten istý dopovaný kvapalný kryštál pri nulovom magnetickom poli a pre magnetické pole  $B = 250$  mT. Je možné vidieť, že pre napätie vyššie ako 5V sú pozorované výraznejšie zmeny akustického útlmu, čo znamená výraznú zmenu v orientácii molekúl kvapalného kryštálu. V prípade nulového elektrického poľa sa môžu molekuly kvapalného kryštálu preorientovať, aj keď s menším účinkom, ak magnetické pole smeruje

kolmo k povrchu elektród. Ak je elektrické pole aplikované v konštantnom magnetickom poli, zmeny akustického útlmu sú menšie. Saturácia dosiahnutých zmien útlmu akustickej vlny pre napätie vyššie ako 15V predstavuje situáciu, keď nedochádza k ďalším štrukturálnym zmenám. V čistom 6CHBT kvapalnom kryštáli, účinok aplikácie elektrického poľa nespôsobuje výrazné zmeny útlmu akustickej vlny, čo poukazuje na interakciu dipólových momentov nanočastíc a molekúl kvapalného kryštálu v prípade dopovania.

Experimentálne výsledky jednoznačne potvrdzujú vplyv magnetických častíc v kvapalných kryštáloch a ich interakciu s molekulami v kvapalnom kryštály. Výsledky sa zhodujú s predchádzajúcimi publikáciami, ktoré boli získané na rovnakých kvapalných kryštáloch vyšetrením dielektrických vlastností [24, 25]. Závislosť merania útlmu SAW na magnetickom poli do 250 mT však poukazuje na to, že proces zmeny orientácie magnetických častíc kvapalných kryštálov je pravdepodobne tiež spojený s určitými štrukturálnymi zmenami častíc. Dá teda predpokladať, že nastáva aj spojenie viacerých molekúl vplyvom magnetických síl medzi magnetickými nanočasticami.

#### 4 Záver

V rámci príspevku bolo prezentované pracovisko Katedry fyziky, ktoré využíva na analýzu materiálov metódy vysokofrekvenčnej akustickej spektroskopie. Pomocou akustickej spektroskopie vieme analyzovať rôzne typy materiálov, pričom v článku je základný prehľad experimentálneho vybavenia a získaných výsledkov.

Ako prvé boli prezentované polovodičové materiály, ktoré sa skúmajú na katedre od začiatku. Pri štúdiu polovodičov bola použitá metóda DLTS, pomocou ktorej sa dajú zistiť energetické hladiny a ich záchytný prierez. Štúdium relaxačných procesov v iónovo vodivých sklách je tiež riešené pomocou pozdĺžnych akustických vln. Z teplotných závislostí akustického útlmu a polôh pík sa dajú pomocou DPL fitov stanoviť aktivačné energie dominantných procesov zodpovedných za iónový preskokový pohyb. Použitím akustickej spektroskopie bol pozorovaný významný vplyv magnetického poľa a aj teploty na nanočasticové štruktúry v magnetických kvapalinách vyrobených na báze transformátorových olejov. Tento efekt bol spôsobený rôznym usporiadaním magnetických nanočastíc do štruktúr. Ako posledné prezentované sú výsledky vyšetrenia štrukturálnych zmien v dopovaných kvapalných kryštáloch, na štúdium ktorých sa využívajú povrchové akustické vlny. Experimentálne výsledky jednoznačne potvrdzujú úlohu magnetických častíc v kvapalných kryštáloch a ich interakciu s molekulami v kvapalnom kryštáli pod vplyvom externého magnetického a elektrického poľa.

#### Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Slovenskou grantovou agentúrou KEGA 029ŽU-4/2018.

#### Literatúra

- [1] KÚDELČÍK, J., DRGA, J. 2014. Acoustic spectroscopy of nanoparticulates in magnetic fluids. In *Nové trendy akustického spektra = New trends of acoustic spectrum: vedecký recenzovaný zborník*. Zvolen - Slovakia: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-228-2647, s. 127-130.
- [2] KÚDELČÍK, J., BURY, P., DRGA, J., KOPČANSKÝ, P., ZAVIŠOVÁ, V., TIMKO, M. 2013. Structure of transformer oil-based magnetic fluids studied using acoustic

- spectroscopy, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Roč. 326(1), str. 75-80, 2013.
- [3] KÚDELČÍK, J., BURY, P., DRGA, J., KOPČANSKÝ, P., ZAVIŠOVÁ, V., TIMKO, M. 1999. Comparison of theories of anisotropy in transformer oil-based magnetic fluids, *Advances in electrical and electronic engineering*. Roč. 11(2), str. 147-155, 2013.
- [4] BURY, P. JAMNICKÝ, I. 1999. Akustická spektroskopía hlbokých centier v polovodičoch, In *EDIS, Žilina 1999*. 152 s. ISBN 80-7100-677-7.
- [5] WEISBERG L. R., SCHADE M. 1968. A Technique for Trap Determinations in Low Resistivity Semiconductors, In *Journal of Applied Physics*, 1968, roč. 39, s. 5149-5152.
- [6] HOCKICKO, P. 2012. Akustická spektroskopía vybraných materiálov pre elektrotechniku, In *Habilitačná práca, Žilina 2012*.
- [7] LANG, D. V. 1974: Deep-level transient spectroscopy, In *Journal of Applied Physics*, 1974, roč. 7, s. 3023-3032.
- [8] BURY, P. - BELLAN, I. – JAMNISKÝ, I. - KÚDELČÍK, J. - HARDOŇ, Š. 2016. Acoustoelectric effect in semiconductor structures - tool for interface states investigation by complex acoustic spectroscopy. In: *Acta acustica united with acustica*. ISSN 1610-1928. Vol. 102, no. 4 (2016), s. 652-662, Scopus, WoS
- [9] HARDOŇ, Š. 2015. Vývoj akustických techník pre výskum materiálov a štruktúr, In *Dizertačná práca, Žilina, 2015*, 99 s.
- [10] HOCKICKO, P., MIZERÁKOVÁ, J., MUŇOZ, F.: The internal friction of lithium and sodium borophosphate glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, 498, pp. 194-198.
- [11] HOCKICKO, P.: Analysing of ultrasonic attenuation of the metaphosphate glass of the composition 50MgO - 50P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, *Akustika*, 2019, 31(1), pp. 84-86.
- [12] HORNOWSKI, T. a kol. 2015. The effect of particle aggregate shape on ultrasonic anisotropy in concentrated magnetic fluids, In *Journal of Physics D Applied Physics*, 2015, roč. 48, 175303.
- [13] JÓZEF CZAK, A. HORNOWSKI, T., SKUMIEL, A. 2010. Temperature Dependence of Particle Size Distribution in Transformer Oil-Based Ferrofluid, In *International Journal of Thermophysics*, 2010, roč. 32(4), s. 795-806.
- [14] JÓZEF CZAK, A., ŁABOWSKI, M., SKUMIEL, A. 2002. Hysteresis of changes of ultrasonic wave absorption coefficient in a magnetic fluid caused by the magnetic field, In *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, roč. 252, s. 356-359.
- [15] KÚDELČÍK, J., BURY, P., DRGA, J., KOPČANSKÝ, P., ZAVIŠOVÁ, V., TIMKO, M. 2013. Structure of transformer oil-based magnetic fluids studied using acoustic spectroscopy, In *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013, roč. 326(1), str. 75-80.
- [16] KÚDELČÍK, J., BURY, P., KOPČANSKÝ, P., TIMKO, M. 2015. Structure of nanoparticles in transformer oil-based magnetic fluids, anisotropy of acoustic attenuation, In *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, roč. 388, str. 28-34.
- [17] TAKETOMI, S. 1986. The anisotropy of sound attenuation in magnetic fluid under an external magnetic field, In *Journal of the Physical Society of Japan*, 1986, roč. 55, s. 838.

- [18] SHLIOMIS, M., MOND, M., MOROZOV, K. 2008. Ultrasound Attenuation in Ferrofluids, In *Physical Review Letters*, 2008, roč. 101, 074505.
- [19] KÚDELČÍK, J., BURY, P., DRGA, J., KOPČANSKÝ, P., ZAVIŠOVÁ, V., TIMKO, M. 2013. Comparison of theories of anisotropy in transformer oil-based magnetic fluids, In *Advances in electrical and electronic engineering*, 2013, roč. 11(2), s. 147-155.
- [20] PASECHNIK, S.V., CHIGRINOV, V. G., SHMELIOVA, D.V. 2009. Liquid Crystals Viscous and Elastic Properties, WILEY-VCH Verlag GmbH&Co, KGaA, Weinheim, 2009. ISBN: 9783-5274-07200, DOI:10.1002/9783527627660
- [21] SATO, S., UEDA, H. 1981. Effects of surface acoustic waves on molecular orientation in nematic liquid crystals, In *Japanese Journal of Applied Physics*, 1981, roč. 20, L511-L514.
- [22] MORITAKE, H., OZAKI, R., CHIBA, K., YAMAMOTO, H., OGAWA, J., YOSHINO, K. 2011. Properties of liquids, liquid crystals, electrolyte solutions and ionic liquids in thin cells and at interfaces studied using shear horizontal wave, In *IEEE International conference on dielectric liquids*, 26-30 June 2011, 12221108.
- [23] BURY, P., VEVERIČÍK, M., KOPČANSKÝ, P., KÚDELČÍK, J., TIMKO, M., ZÁVIŠOVÁ, V. 2018. SAW investigation of structural changes in liquid crystals doped with magnetic particles, In *Acta Acustica United with Acustica*. ISSN 1610-1928. roč. 104, č. 1, 48-53.
- [24] TOMAŠOVIČOVÁ, N. a kol. 2008. The structural transitions in 6CHBT-based ferronematic droplets, In *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, roč. 20, 204123.
- [25] TOMAŠOVIČOVÁ, N. a kol. 2013. Capacitance changes in ferronematic liquid crystals induced by low magnetic fields, In *Physical Review E*, 2013, roč. 87(1), 014501.

## Summary

**Materials analysis using high-frequency ultrasound measurements.** The paper presented the Department of Physics, which uses the methods of high-frequency ultrasound spectroscopy for the analysis of materials. Using ultrasound spectroscopy, we can analyze different types of materials, and the article is a basic overview of experimental equipment and results obtained. First, semiconductor materials were presented, which are investigated at the department from the beginning. For the study of the semiconductor, the DLTS method was used, using which were to determine energy levels and their capture cross-sections. The study of relaxation processes in ionic conductive glasses is also solved using longitudinal acoustic waves. From the temperature dependencies of the ultrasound attenuation and the positions of the peaks, the activation energies of the dominant processes responsible for the ionic hopping motion can be determined using DPL fits. Using ultrasound spectroscopy, a significant effect of the magnetic field as well as temperature on nanoparticle structures in magnetic fluids based on transformer oils was observed. This effect was caused by the different arrangements of the magnetic nanoparticles into structures. The last presented results are using liquid crystals, where for their study of the surface ultrasound waves are used. The experimental results confirm the role of magnetic particles in liquid crystals and their interaction with molecules in liquid crystals in both magnetic and electric fields.

## Keywords

Acoustic; spectroscopy; materials; temperature.

## Contact Address

doc. RNDr. Jozef Kúdelčík, PhD.

Katedra fyziky, Fakulta elektrotechniky a informačných technológií

Žilinská univerzita v Žiline (KF, FEIT, UNIZA)

Univerzitná 1, 010 26 Žilina, Slovensko

Tel. +421 41 513 2316

Jozef.kudelic@feit.uniza.sk

doc. PaedDr. Peter Hockicko, PhD. (KF, FEIT, UNIZA)

Tel. +421 41 513 2364

peter.hockicko@feit.uniza.sk

Ing. Štefan Hardoň, PhD. (KF, FEIT, UNIZA)

Tel. +421 41 513 2334

hardon@fyzika.uniza.sk

Ing. Marek Veveričík, PhD. (KF, FEIT, UNIZA)

Tel. +421 41 513 2317

marek.vevericik@feit.uniza.sk



## MOŽNOSTI POUŽITÍ MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ SKENOVÁNÍ PRO SPECIÁLNÍ VÝŘEZY DŘEVA

Vojtěch Ondrejka, Tomáš Gergeľ, Tomáš Bucha

### 1 Úvod

Díky neustále se zvyšujícím ekologickým standardům, je světový dřevařský průmysl pod rostoucím tlakem klást stále větší důraz na posuzování kvality a původu dřevní suroviny. Z těchto důvodů bylo ve světě vytvořeno několik organizací a systémů certifikace zabraňující nelegální a nadměrné těžbě dřeva. Jsou to například FLEGT (Forest Law Enforcement, Governance and Trade), REDD (Reducing emissions from deforestation and degradation) a certifikace FSC (Forest Stewardship Council) (ONDREJKA A KOL., 2020). K ekologickému zhodnocení dřeva také významně přispívá maximalizace výtěžku a sortimentace pro zabezpečení lepšího zhodnocení surovin dřeva. Na optimální zhodnocení dřeva je potřebná detekce kvalitativních a kvantitativních znaků dřeva. Existuje množství defektoskopických přístrojů, které pracují na různých fyzikálních principech. Nejnovější technologickou novinkou je implementace three-dimensional (3D) computed tomography (CT) skenerů pro hodnocení kulatiny dřeva (GERGEE A KOL., 2019).

Tato moderní technologie dokáže s vysokou přesností odhalit vnitřní vady dřeva. To skýtá k využití této technologie pro skenování specializovaných výřezů vysoké kvality, využívané z velké míry na výrobu hudebních nástrojů. Ve světě se získává surovina vysoké kvality mnoha druhů dřevin. Na Slovensku se při výběru dřeva na výrobu hudebních nástrojů musí zohledňovat speciální přístup k aplikaci pěstovatelských opatření, těžebně-pěstovatelských metod a pracovních postupů včetně času těžby tak, aby neznehodnotil potenciálně cenný sortiment surového dřeva (GEJDOŠ A KOL., 2014). Cílem příspěvku je popsat dnešní stav hodnocení specializovaných výřezů pro výrobu hudebních nástrojů a navrhnout využití moderního CT skeneru pro hodnocení těchto výřezů.

### 2 Dnešní stav problematiky hodnocení speciálních výřezů dřeva

Speciální výřezy dřeva využívané na výrobu hudebních nástrojů mají velmi specifické vlastnosti. Důležitá je jejich kvalita, minimální podíl chyb dřeva, proto jsou ve slovenských normách STN 48 0055, STN 48 0056 a v evropských normách STN EN 1316-3, STN EN 1927-1 zařazeny do nejvyšší třídy 1, resp. třídy A. Na výrobu akustických hudebních nástrojů se využívá velké množství dřevin, jako: libanonský cedr (*Cedrus libani* Laws.), různé druhy mahagonů (americký – *Swietenia mahagani*, africký – *Khaya ivorensis*, atd.), palisandrů (honduratský – *Dalbergia Stevensonii*, brazilský – *Dalbergia nigra*, atd.), eben (*Diaspyros piscatoria*) ovocné dřeviny (ořechy - *Juglans nigra*, třešně - *Prunus avium*) (BUCUR 2020). Nejvíce používané, a to hlavně na strunné nástroje, je rezonanční dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*), jedle bělokoré (*Abies alba*) a javora horského (*Acer pseudoplatanus*) (ČULÍK, 2013).

V podmínkách Slovenska a České republiky se nachází hlavně rezonanční jehličnaté dřevo smrku (*Picea*), popřípadě jedle (*Abies*). Vhodné stromy se vyskytují ve vyšších a středních horských polohách (Alpy, Karpaty) a ve středních polohách (Šumava). Optimální nadmořská výška pro růst rezonančního dřeva je například v Alpách 1000 až 1990 m.n.m., na Slovensku 700 až 1200 m.n.m. a v ČR nad 600 m.n.m. (HRIVNÁK, 1996).



Pro subjektivní hodnocení a výběr vhodného rezonančního dřeva (stojící strom nebo výřezy) je nutné mít velké zkušenosti. Při této základní vizuální metodě probíhá hodnocení většinou in situ a je při ní posuzován četný soubor znaků. U stojících stromů se hodnotí rovný, válcovitý, pravidelně rostlý kmen bez suků a trhlín ve spodní části v délce 5-6 m (ILLE, 1968). Kůra bývá jemná, s malými kulatými šupinkami, bez stop po větvích a sucích, pryskyřice, bez odloupané kůry. Kmen je málo sbíhavý a má vysoko nasazenou úplně symetrickou korunu (SUHOMELOV & GEJDOŠ, 2011). Roste na severních expozicích, na chudých stanovištích, kdy se tvoří úzké letokruhy s malým podílem letního dřeva. Produkční doba rezonančního dřeva střední jakosti je 150 až 160 let, což odpovídá 6 letokruhům na 1 cm a 10 až 12 cm široké vrstvy dřeva (POŽGAJ A KOL., 1997).

Výběr speciálních kmenů a výřezů na hudební nástroje byl po staletí byl realizován subjektivně, na základě praktických zkušeností houslařů, kteří pomocí sluchu vnímali rozdílnost zvuků padajících stromů při jejich kácení. Další metodou je subjektivní vizuální hodnocení stromů a výřezů, které se využívá nejvíce i dnes. Před skácením stromu je také možné použít pro určení hustoty letokruhů, jako hlavního parametru rezonančního dřeva, přírůstkový vrták (ČULÍK, 2013). Při této metodě se ručně zavrtá dutý vrták do kmene stromu a po vytažení vrtáku se zevnitř vybere vzorek, na kterém jsou patrné roční přírůstky stromu. Velmi zřídka se využívají i nedestruktivní akustické, nebo ultrazvukové metody hodnocení vlastností stromů.

### 3 Návrh využití moderních metod skenování pro hodnocení speciálních výřezů dřeva

Z výše uvedeného vyplývá, že speciální kulatina nebo výřezy jsou dnes hodnoceny a tříděny převážně podle subjektivních metod. Ty jsou velmi náročně na kvalitu, odbornost hodnotící osoby a nelze také zaručit přesně dokladovatelné hodnocení kvality výřezů. Dnes je však známo velké množství nedestruktivních metod, které jsou zvláště vhodné pro speciální výřezy vysoké kvality.

Nedestruktivní hodnocení je identifikace fyzikálních a mechanických vlastností materiálu, bez změny jeho konečného použití a pomocí zjištěných vlastností rozhoduje o jeho vhodných aplikacích (ROSS A KOL., 1998). Nedestruktivní průmyslové zařízení pro zjišťování vlastností výřezu se využívají hlavně v automatizovaných moderních pilách. Zde zjištěné parametry napomáhají kvalitativně i kvantitativně lépe zhodnotit zpracovávané výřezy, a tak surovinu lépe finančně ocenit. Nejčastěji využívané fyzikální principy v nedestruktivním hodnocení jsou: akustické, ultrazvukové, mikrovlnné, obrazové, laserové a rentgenové. Pro hodnocení vlastností dřeva na povrchu tak i vevnitř (skryté vady) je nejpřesnější rentgenová metoda využívající počítačové tomografie (CT) (ONDREJKA A KOL., 2020).

Tato technologie byla vyvinuta hlavně pro lékařství a poté byla přenesena do oblasti dřevozpracujícího průmyslu (ÖSTERBERG, 2009). V současné době jsou k dispozici účinná komerční rentgenová zařízení pro hodnocení kulatiny a řeziva, využívající se jak ve výzkumu, tak i v praxi. Například výzkumy CT technologií využívají pro zjišťování hustoty dřeva a velikosti ročních přírůstků u jehličnatých i listnatých dřevin (LONGUETAUD A KOL., 2017; JACQUIN A KOL., 2019). Dalším využitím je zjišťování vnitřních vlastností jako např. dřev, jádro, suky, trhlíny a jiné (STÄNGLE A KOL., 2015; RAIS A KOL., 2017).

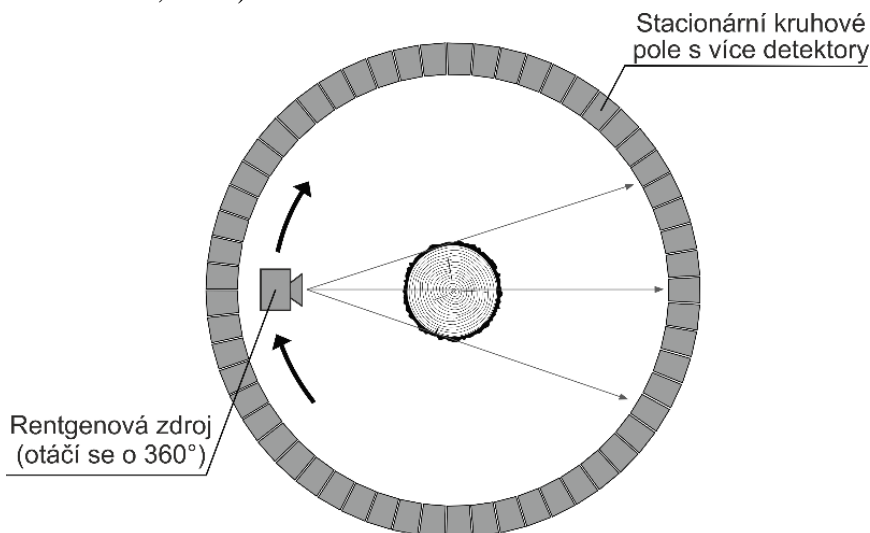
Velkou nevýhodou je vysoká pořizovací cena, která dovoluje použít tuto technologii hlavně ve středních a velkých dřevařských závodech. Z výzkumů vyplývá prokazatelný nárůst zisku ze zpracovaného dřeva o 11,3 % až 23,7 % u jehličnaté kulatiny a o 24 % u listnaté. Doba

návratnosti pro velké pily je cca 3 roky a pro střední pily 8 let zpracovávající listnatou surovinu. U zpracování jehličnaté suroviny je návratnost asi 4 roky a pro střední pily 8 let (GERGEL A KOL., 2019).



Obrázek 1. CT Log scanner. © Microtec (MICROTEC, 2019).

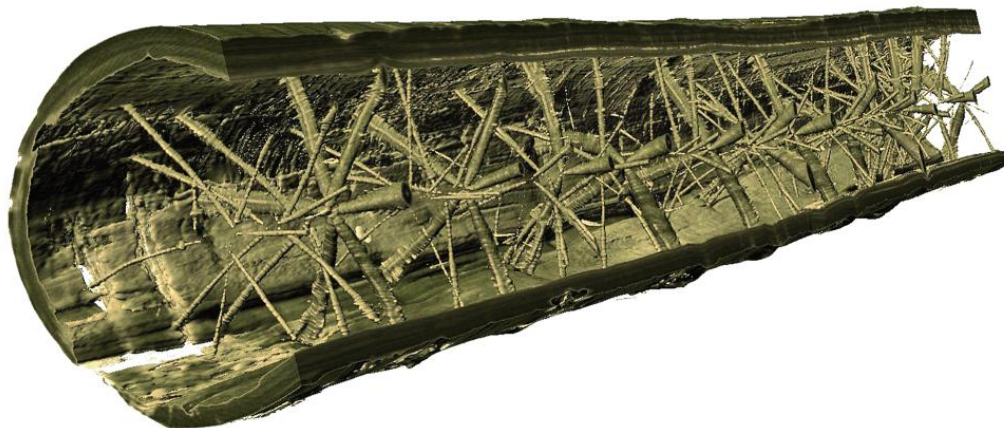
Italská firma MICROTEC® je nejznámější a nejpokrokovější firma věnující se oblasti CT skenerů pro dřevařský průmysl. Její zařízení **CT log** (viz. Obrázek 1.) je jediným známým zařízením na světě určeným pro 3D skenování kulatiny. Toto zařízení naskenuje a digitálně rekonstruuje vnitřní vlastnosti výřezu, což umožní optimalizovat požezový plán v reálném čase (MICROTEC, 2019). CT log více-senzorový skener s využitím moderní CT skener (4. generace viz Obrázek 2.) s možností spirálového CT skenování, které poskytuje téměř dokonalou volumetrickou (objemovou) rekonstrukci vytvořených z CT obrazů (BEAULIEU & DUTILLEUL, 2019)



Obrázek 2. Schéma CT skeneru 4. generace.

Implementace moderních technologií jako zařízení CT log v evropském prostoru je velmi rozličná. Výrazný náskok ve využívání těchto technologií mají Švédsko, Finsko a v oblasti střední Evropy hlavně Německo a Rakousko. Na Slovensku jsou skenovací technologie využívány velmi omezeně a zařízení CT log se na území Slovenska zatím nenachází

(ONDREJKA A KOL., 2020). Rentgenové skenování speciálních výřezů pro určení jeho kvality neboli jeho ceny, není na Slovensku ani ve světě příliš známé. Na Obrázku 3. je znázorněn příklad jednoho z možných výstupů ze skenovacího zařízení CT log.



Obrázek 3. 3D model vnitřní struktury skenovaného výřezu (MICROTEC, 2019).

Evropské, ale i světové burzy zaměřující se na prodej jak vzácných exotických dřevin, tak i rezonančního dřeva, na výrobu hudebních nástrojů vyprodukují velké množství finančního kapitálu. Při takovém prodeji není nijak zaručena vnitřní struktura a kvalita výřezů a určení jejich ceny je tak velmi nepřesné. Proto technologie CT skeneru dřeva je přímo předurčena pro vytvoření 3D modelu každého výřezu, kde bude deklarovaná vnitřní struktura i s vadami dřeva. Bylo by vhodné vytvořit databázi prodávaných výřezů, která výrazně napomůže v ohodnocování dřevní suroviny. Vhodné by bylo také tento systém certifikovat, kdy by kupující získal certifikovanou doklad o skutečné kvalitě dřeva. Tento systém lze kombinovat s certifikací FSC (Forest Stewardship Council) nebo akčním plánem EU FLEGT (Forest Law Enforcement, Governance and Trade), kdy bude zabezpečena kompletní dokumentace dřeva od jeho skácení až po prodej koncovému zpracovateli. Lze tak výrazně omezit černý obchod se vzácnými exotickými dřevinami.

#### 4 Závěr

Tento příspěvek popisuje dosavadní subjektivní způsob hodnocení a určování kvality speciálních výřezů určených z velké části na výrobu hudebních nástrojů. Navrhuje a popisuje využití moderních nedestruktivních technologií 3D CT skenování speciálních výřezů, vycházející ze získaných poznatků od domácích a zahraničních autorů. Dnes stále ještě většina výrobců hudebních nástrojů vybírá dřevo na základě zkušeností. Problém dostupnosti a výběru speciálních výřezů vysoké kvality je možné vyřešit použitím moderního nedestruktivního skenovacího zařízení CT log.

Získané údaje (detailní 3D model i s vnitřní strukturou výřezů), lze využít k sortimentaci výřezů a tím pomoci k významné úspoře a zkvalitnění zhodnocení dřevní suroviny a přesnějšímu určování prodejní ceny suroviny. To lze případně využít pro zkvalitnění metody hodnocení a určování cen speciálních výřezů (exotické dřeviny, rezonanční smrk atd.) na burzách dřeva po celém světě.

Bylo by velmi vhodné trend nedestruktivního hodnocení vlastností výřezů, (např. 3D CT skenerů) podpořit dotacemi ze strany státu či EU, protože tyto technologie významně přispívají ke konkurenceschopnosti dřevozpracujícího průmyslu efektivně zpracovávat surovinu. Tato zásadní technologická inovace přibližuje dřevozpracující průmysl k technologickým lídrům jako jsou například automobilový, strojnický a kovozpracující průmysl.

## Poděkování

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva; (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Literatura

- BEAULIEU, J., DUTILLEUL, P., 2019. Applications of computed tomography (CT) scanning technology in forest research: a timely update and review. In. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, č. 49, s.1173–1188.
- BUCUR, V., 2006. *Acoustics of wood*. Springer Science & Business Media, 394 s., ISBN-13 978-3-540-26123-0
- ČULÍK, M., 2013. *Drevo a jeho využitie vo výrobe hudobných nástrojov*, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. ISBN 978-80-228-2511-5. 93 s.
- ČULÍK, M. DANIHELOVÁ, A., DANIHELOVÁ, Z., 2016 Wood for musical instruments, In. *AKUSTIKA*, 2017. č. 25 s. 66-72.
- GEJDOS, M.; SUCHOMEL, J.; SLOVAKOVA, I. 2014. Creation of new standard-wood for the production of musical instruments. In. *AKUSTIKA*, 2014. č. 21 s. 14-21.
- GERGEL, T., BUCHA, T., GEJDOS, M., VYHNÁLIKOVÁ, Z., 2019. *Computed tomography log scanning—high technology for forestry and forest based industry*. Central European Forestry Journal. č. 65, s. 51–59.
- HRIVNÁK, Š., 1996. Vyhľadavanie a určovanie rezonancného dreva, In. *Drevo*, ISSN 0012-6144, roč. 51. 1996, s. 53-56.
- ILLE, R., 1968. Ozvucné drevo smrku, In. *Sborník VLÚ VŠZ v Praze*, 11/1968, 67 – 87 str.
- JACQUIN, P., MOTHE, F., LONGUETAUD, F., BILLARD, A., KERFRIDEN, B., LEBAN, J. M., 2019. CarDen: a software for fast measurement of wood density on increment cores by CT scanning. In. *Computers and electronics in agriculture*, 2019, č. 156, s. 606-617.
- LONGUETAUD, F., MOTHE, F., SANTENOISE, P., DIOP, N., DLOUHA, J., FOURNIER, M. A KOL., 2017. Patterns of within-stem variations in wood specific gravity and water content for five temperate tree species. In. *Annals of Forest Science*, 2017, č. 74, s. 64.
- MICROTEC: CT Log Computed Tomography for the sawmill of the future [online]. 2019. MICROTEC, Itálie. [cit. 2020-10-19]. Dostupné na internetu: <https://microtec.eu/assets/products/ctlog/MT-CT-Log2.pdf>
- ONDREJKA, V., GERGEL, T., BUCHA, T., PÁSTOR, M. 2020. *Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality*, Central European Forestry Journal, č. 66. s. 1-11.
- Österberg, P., 2009. *Wood quality and geometry measurements based on cross section images - Diss. Thesis*. Tampere University of Technology, Tampere, Finland 192 p.

- POŽGAJ, A. a kol. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*, Príroda – Bratislava, 1993, 485 str. ISBN 80-07-00960-4.
- RAIS, A., URSELLA, E., VICARIO, E., GIUDICEANDREA, F., 2017. The use of the first industrial X ray CT scanner increases the lumber recovery value: case study on visually strength-graded Douglas-fir timber. In. *Annals of forest science*, 2017, č.74, s. 28.
- ROSS, R. J., BRASHEW, B. K., PELLERIN, R. F., 1998: Nondestructive evaluation of wood, In. *Forest products journal*, 1998, roč. 48, s. 14.
- STÄNGLE, S. M., BRÜCHERT, F., HEIKKILA, A., USENIUS, T., USENIUS, A., SAUTER, U. H., 2015. Potentially increased sawmill yield from hardwoods using X-ray computed tomography for knot detection. In. *Annals of forest science*, 2015, č.72, s. 57–65.
- STN 48 0055. Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny (2007)
- STN 48 0055. Kvalitatívne triedenie listnatej guľatiny (2007)
- STN EN 1316-3. Listnatá guľatina. Kvalitatívne triedenie. Časť 3: Jaseň a javory (2000)
- STN EN 1927-1. Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny. Časť 1: Smrek a jedle (2008)
- SUCHOMEL, J., GEJDOŠ, M. 2011. Nové prístupy v posudzovaní dreva na výrobu hudobných nástrojov v lesníckej praxi. In. *Material – Acoustics – Place 2011: proceedings of the 6th International Conference: September 12-14, 2011, Zvolen – Slovakia*. Zvolen: technická univerzita vo Zvolene, 2011. ISBN 978-80.228-2258-9, s. 161-170.

## Summary

**Possibilities of using modern scanning technologies for special logs of wood.** This paper describes the current subjective method of evaluation and determination of the quality of special logs intended, for the most part, to produce musical instruments. It designs and describes the use of modern non-destructive 3D CT scanning technologies for special logs, based on knowledge gained from domestic and foreign authors. The problem of availability and selection of special high-quality logs can be solved by using a modern non-destructive CT log scanning device. This technology can be used to obtain quantitative and qualitative data on logs and thus help to significantly save and more accurately determine the selling price of wood raw material. There is an opportunity to use this method to improve the evaluation and pricing of special cuts on wood exchanges around the world. Modern technologies of non-destructive evaluation of log properties should be supported by subsidies from the state or the EU because these technologies significantly contribute to the competitiveness of the wood processing industry.

## Keywords

3D scanning; CT log; wood industry; non-destructive evaluation; musical instruments.

## Contact Address

Vojtěch Ondrejka  
Forest Research Institute (FRI)  
National Forest Centre  
T.G. Masaryka 2175/22  
960 53 Zvolen, Slovak Republic  
Tel. +421 45 5314 111  
vojtech.ondrejka@nlcsk.org

Tomáš Gergel  
Forest Research Institute (FRI)  
National Forest Centre  
T.G. Masaryka 2175/22  
960 53 Zvolen, Slovak Republic  
Tel. +421 45 5314 111  
tomas.gergel@nlcsk.org

Tomáš Bucha  
Forest Research Institute (FRI)  
National Forest Centre  
T.G. Masaryka 2175/22  
960 53 Zvolen, Slovak Republic  
Tel. +421 45 5314 111  
tomas.bucha@nlcsk.org



## INTERAKCIA RÝCHLOSTI ŠÍRENIA ZVUKU A HUSTOTY BUKOVÉHO KONŠTRUKČNÉHO DREVA

Alena Rohanová

### 1 Úvod

Akustické charakteristiky dreva patria medzi významné aj z pohľadu praktického využitia. Vychádzajú z vedeckých poznatkov z oblasti vlastností dreva, ich interakciu s ďalšími parametrami (vlhkosť, hustota dreva a i.). Pri hodnotení kvality konštrukčného dreva sa z akustických charakteristík využívajú rýchlosť šírenia zvuku a prirodzená frekvencia. Môžu sa zisťovať prístrojmi na rôznych princípoch (ultrazvukový, vibračný). Napr. prístroj Sylvatest Duo® zisťuje rýchlosť šírenia zvuku ultrazvukovou metódou. Má široké použitie: od stromov, konštrukčného reziva až po zabudované stavebné prvky (SANDOZ, 1989, ROSS – PELLERIN, 1994, SANDOZ – BENOIT, 2007, KANDEMIR *et al.* 2007, BAJZA – ROHANOVÁ, 2018).

Hustota dreva je z pohľadu diagnostiky kvality konštrukčného dreva dominantná. Zisťuje sa rôznymi metódami. Ich výber určuje účel použitia. Interakciou hustoty dreva s rôznymi parametrami na ideálnych telesách sa zaoberá oblasť náuky o dreve. Skúmanie hustoty dreva na veľkorozmerových telesách je zamerané na konštrukčné drevo. Pri vyhodnocovaní interakcii sa požaduje, aby všetky parametre boli pri rovnakej vlhkosti ( $w=12\%$ ).

Poznatky o interakcii medzi rýchlosťou šírenia zvuku a hustoty dreva sú nejednotné. Napr. MISHIRO (1996) uvádza, že rýchlosť šírenia zvuku neovplyvňuje hustotu dreva. BUCUR (2006) uvádza zvýšenie rýchlosti šírenia zvuku s klesajúcou hustotou. Podobne aj pri drevinách boli zistené rozdielne hodnoty korelácií. Napr. *Quercus*,  $r = 0,64$  (KOLLMANN – CÔTE 1968), *Eucalyptus grandis*,  $r = 0,89$  (OLIVEIRA – SALES, 2006). POŽGAJ *et al.* (1997) pri dubovom dreve uvádza nízku závislosť rýchlosti šírenia zvuku na hustote dreva. Tieto poznatky boli zisťované na ideálnych telesách (bez chýb, rovnomerná štruktúra). V článku sa uvádzajú výsledky z experimentov na bukovom konštrukčnom dreve.

### 2 Výpočet hustoty dreva

Výber výpočtu určuje úroveň použitia. Oblasť vedecko-teoretická, je presná ale zložitá (napr. náuka o dreve). Aplikačná, využíva sa pri diagnostike charakteristík dreva najmä prístrojovou technikou. Je dostatočne spoľahlivá a rýchla. Finálnym výsledkom z výpočtov sú hustoty dreva pri 12% vlhkosti. Uvedený je stručný popis výpočtu hustoty dreva podľa oblastí:

a) vedecko-teoretická, na ideálnych telesách ( $\rho_{12}$ ), ktoré majú zvyčajne štandardný rozmer  $20 \times 20 \times 30$  mm. Hustota dreva sa vypočíta podľa rovnice (POŽGAJ *et al.*, 1999):

$$\rho_{12} = \frac{1+12}{1 + \frac{\rho_0}{1000} \cdot 0,12} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (1)$$

Vyžaduje si zistiť hustotu dreva v absolútne suchom stave ( $\rho_0$ ), čo je realizovateľné len laboratórne.

b) aplikačná:

- $\rho_{\text{small}, w}$ , skúšobné teleso sa vymanipuluje z konštrukčnej dosky pri vlhkosti  $w$  (podľa STN EN 408),
- $\rho_{\text{board}, w}$ , hustota celej dosky pri vlhkosti  $w$ .



Hustoty dreva  $\rho_{\text{small}, w}$  a  $\rho_{\text{board}, w}$  sa vypočítajú podľa rovnice:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}] \quad (2)$$

pričom hmotnosť ( $m_w$ ) a objem ( $V_w$ ) dreva je pri tej istej vlhkosti  $w$ .

Rovnica na prepočet hustoty dreva ( $\rho_{\text{small}, w}$  a  $\rho_{\text{board}, w}$ ) na 12% vlhkosť určuje STN EN 384:

$$\rho_{12} = \rho(u) (1 - 0,005 (u - u_{\text{ref}})) \quad (3)$$

kde:  $u$  je vlhkosť pri testovaní ( $8\% \leq u \leq 18\%$ ),

$u_{\text{ref}}$  je referenčná vlhkosť 12% ( $t = 20^\circ\text{C}$ , a 65% relatívna vlhkosť).

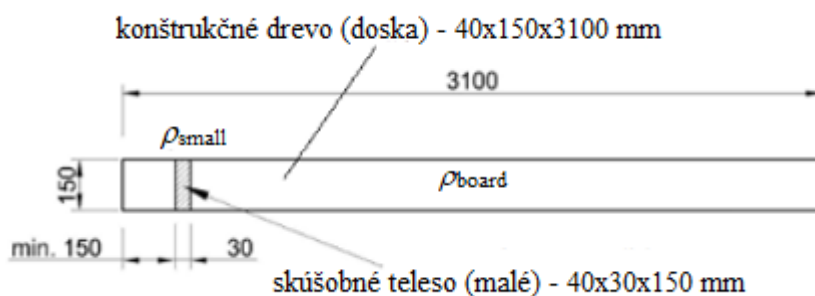
Ide o zjednodušený výpočet, ktorý nevyžaduje zisťovať  $\rho_0$ . Diferencie pri prepočítaní hustôt dreva na 12% podľa rovníc 1 a 3 boli malé (len  $\sim 3\%$ ).

### 3 Materiál a metódy

Experimentálne bolo testované bukové drevo (*Fagus Sylvatica*, L.) vyťažené na Slovensku. Konštrukčné drevo (dosky) mali rozmer: 50/150  $\times$  3100 mm, počet  $n = 54$ . Skúšobné telesá boli klimatizované na  $w = 12\%$ . Vlhosť sa merala prístrojom Hydromette HT 85T (in situ). Boli zisťované dve hustoty dreva (Obrázok 1.):

- $\rho_{\text{small}}$ , malé telesá (30 $\times$ 40 $\times$ 150 mm) ako segment vybraný z dosky podľa STN EN 408,
- $\rho_{\text{board}}$ , konštrukčné dosky (50 $\times$ 150 $\times$ 3100 mm).

Prepočet  $\rho_{\text{small}}$  a  $\rho_{\text{board}}$  na 12% vlhkosť bol podľa rovnice (3).



Obrázok 1. Skúšobné telesá hustoty dreva  $\rho_{\text{small},12}$  a  $\rho_{\text{board},12}$ .

Prístrojom Sylvatest Duo® boli na konštrukčných doskách merané rýchlosti šírenia zvuku rovnobežne s vláknami ( $c_{//}$ ), pri vlnovej dĺžke 3100 mm (Obrázok 2.).



Obrázok 2. Sylvatest Duo® pri experimentoch.

Pri analýze vplyvu vlhkosti na rýchlosť šírenia zvuku na bukovom konštrukčnom dreve bolo zistené, že pri rozsahu vlhkosti  $12\% \pm 3\%$  je vplyv vlhkosti na  $c_{//}$  zanedbateľný (malý interval  $12 \div 16\%$ ) (ROHANOVÁ – BAJZA, 2019). Preto pri vyhodnocovaní sa všetkým hodnotám rýchlosti šírenia zvuku  $c_{//}$  priradili vlhkosti dreva  $w = 12\%$  (rovnané ako pri  $\rho_{small}$  a  $\rho_{board}$ ).

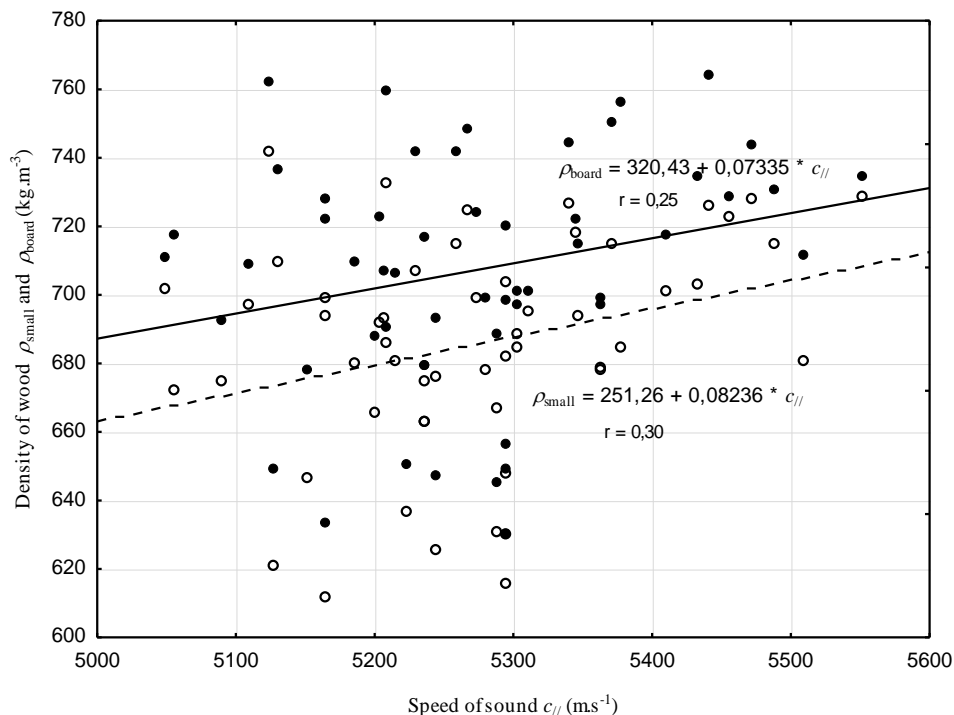
#### 4 Výsledky a diskusia

V Tabuľke 1. sú uvedené základné štatistické charakteristiky vlhkosti, rýchlosti šírenia zvuku a hustoty dreva namerané na bukovom konštrukčnom dreve.

**Tabuľka 1.** Štatistické charakteristiky vlhkosti dreva, rýchlosti šírenia zvuku a hustoty dreva na bukovom konštrukčnom dreve (BAJZA, 2018).

Štatistické charakteristiky	Charakteristiky			
	Vlhkosť dreva $w$ (%)	Rýchlosť šírenia zvuku $c_{//}$ ( $m \cdot s^{-1}$ ) 40×150×3100 (mm)	Hustota dreva ( $kg \cdot m^{-3}$ )	
			$\rho_{small}^*$ 30×40×150 (mm)	$\rho_{board}^*$ 40×150×3100 (mm)
N	54			
$\bar{x}$	14	5272	707	685
$x_{max}$	16	5551	764	742
$x_{min}$	12	5048	630	612
CV (%)	6	2	5	5

Výsledky boli vyhodnotené závislosťami (Obrázok 3.).



**Obrázok 3.** Závislosť rýchlosti šírenia zvuku rovnobežne s vláknami na hustote dreva ( $\rho_{small}$ ,  $\rho_{board}$ ) na bukovom konštrukčnom dreve ( $w = 12\%$ ).

Závislosť  $\rho_{board}$  od  $c_{//}$  je slabá (6,2%) a na hranici štatistickej významnosti ( $p = 0,073$ ).

Závislosť  $\rho_{\text{small}}$  od  $c_{//}$  je mierne silnejšia (8,8%) a štatisticky významná ( $p=0,030$ ). Výhoda  $\rho_{\text{small}}$  je na úrovni štatistickej odchýlky.

Z praktického hľadiska je vhodnejšie použiť  $\rho_{\text{board}}$  (meranie rozmerov in situ), pretože prínos  $\rho_{\text{small}}$  je zanedbateľný a v praxi zložito realizovateľný. Napr. pri aplikácii akustického prístroja MTG Timber Grader in situ sa meria  $\rho_{\text{board}}$  a vyhodnocuje kvalita konštrukčného dreva.

#### 4 Záver

- Na bukovom konštrukčnom dreve sa skúmal vplyv hustoty dreva na rýchlosť šírenia zvuku rovnobežne s vláknami,
- hodnoty rýchlosti šírenia zvuku rovnobežne s vláknami na bukovom konštrukčnom dreve ( $l = 3100$  mm,  $w = 12\%$ ) sú oproti ideálnym telesám nižšie  $\sim 13\%$ ,
- vplyv vlhkosti na rýchlosť šírenia zvuku na bukovom konštrukčnom dreve pri rozsahu  $12\% \pm 3\%$  je zanedbateľný (malý interval  $12 \div 16\%$ ,  $r^2 = 0,014$ ) (ROHANOVÁ – BAJZA, 2019),
- hustota dreva bola určovaná na konštrukčnom dreve: malé skúšobné teleso ( $\rho_{\text{small}}$ ) a skúšobné teleso (board)  $\rho_{\text{board}}$  - rozdiel priemerných hustôt dreva je len 3%,
- závislosť  $\rho_{\text{board}}$  od  $c_{//}$  je slabá (6,2%) a na hranici štatistickej významnosti ( $p = 0,073$ ),
- závislosť  $\rho_{\text{small}}$  od  $c_{//}$  je mierne silnejšia (8,8%) a štatisticky významná ( $p=0,030$ ),
- na zisťovanie hustoty dreva in situ je možné použiť  $\rho_{\text{board}}$  (jednoduché a dostatočne spoľahlivé),
- koeficienty korelácie medzi  $\rho_{\text{small}}$ ,  $\rho_{\text{board}}$  a  $c_{//}$  sú pri bukovom konštrukčnom dreve nízke ( $r = 0,30$ ,  $r = 0,25$ ), pri ideálnych telesách (bez chýb, rovnomerná štruktúra) sú rôzne napr. *Quercus*,  $r = 0,64$  (KOLLMANN – CÔTE, 1968), *Eucalyptus grandis*,  $r = 0,89$  (OLIVEIRA – SALES, 2006), ale veľmi nízke napr. pri *Picea abies*  $r = 0,13$  ((KOLLMANN – CÔTE, 1968),
- interakcia hustoty dreva a rýchlosti šírenia zvuku je významná vo výpočtoch dynamických modulov pružnosti dreva.

#### Pod'akovanie

Tento príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia projektu APVV-17-0206.

#### Literatúra

- BAJZA, O. 2018. *Verifikácia parametrov kvality bukového konštrukčného dreva rôznymi metódami triedenia*. Dizertačná práca. DF Technická univerzita vo Zvolene, 2018, 125 s.
- BAJZA, O. – ROHANOVÁ, A. 2018. Rýchlosť šírenia zvuku v piliarskych sortimentoch z buka (*Fagus sylvatica*, L.). In *Nové trendy akustického spektra: vedecký recenzovaný zborník*. 2018. s. 129--133. ISBN 978-80-228-3053-9.
- BUCUR, V. 2006. *Acoustics of Wood*. 2nd Edition. Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- KOLLMANN, F. – CÔTE, W.A. 1968. *Principles of Wood Science and Technology*. Vol. 1. Solid Wood. 1. Vyd. Berlín - Heidelberg - New York, Springer - Verlag 1984. 592 s.
- FABIANA GOIA ROSA DE OLIVEIRA – ALMIR SALES. 2006. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. *Bioresource Technology* 97, (2006) 2443-2446. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.04.050.

- KANDEMIR-YUCEL, A., TAVUKCUOGLU, A., CANER-SALTIK, E.N. 2007. In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity. Elsevier Publishing Co., Oxford, England. *Infrared Physics & Technology* 49, 2007, p. 243–248.
- MISHIRO, A. 1996. Effect of density on ultrasonic velocity in wood. *Mokuzai Gakkaishi* 42 (9), 1996, p. 887–894.
- POŽGAJ, A. – CHOVANEC, D. – KURJATKO, S. – BABIAK, M. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda, a. s., Bratislava, 485 s., ISBN 80-07-00960-4.00.
- ROHANOVÁ, A. – BAJZA, O. 2019: Influence of moisture content on speed of sound in beech sawmill assortments (*Fagus sylvatica*, L.). In *Proceedings of the international conference "Acoustics 2019 High Tatras": a joint event of MAP and ATF 2019*. 2019. s. 209–214. ISBN 978-80-228-3157-4. URL: <http://acoustics.sk/zborniky/Proceedings-ACOUSTICS-2019-High-Tatras.pdf>.
- ROSS, R.J. - PELLERIN, R.F. 1994. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. *Gen. Tech. Report. FPL—GTR—70*. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Sandoz, J.L., Benoit, Y., 2
- SANDOZ, J. L. 1989. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology* 23:95-108.
- SANDOZ, J. – BENOIT, Y. 2007. Timber grading machine using multivariate parameters based on ultrasonic and density measurement. *COST E 53 Conference - Quality Control for Wood and Wood Products*. 15<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup> October 2007, Warsaw, Poland.

## Summary

**Interaction of Sound Speed and Density of Structural Timber (*Fagus sylvatica*, L.)** This paper explores the interaction of sound speed in the longitudinal direction and density of structural timber (*Fagus sylvatica*, L.). The experiments were performed using test specimens with dimensions  $40 \times 150 \times 3100$  mm,  $w = 12\%$ ,  $n = 54$ . The density of wood of small specimens  $\rho_{\text{small}}$  (according to STN EN 408) and the whole board  $\rho_{\text{board}}$  was determined by the gravimetric method. The sound speed in the longitudinal direction ( $c_{//}$ ) of boards was determined ( $l = 3100$  mm) with the Sylvatest Duo® device. The boards contained a natural occurrence of wood defects. The results showed that the dependence of  $\rho_{\text{board}}$  on  $c_{//}$  is weak (6.2%) and at the limit of statistical significance ( $p = 0.073$ ). The dependence of  $\rho_{\text{small}}$  on  $c_{//}$  is slightly stronger (8.8%) and statistically significant ( $p = 0.030$ ). The correlation coefficients for the dependencies of  $\rho_{\text{small}}$ ,  $\rho_{\text{board}}$  on  $c_{//}$  are low for beech timber ( $r = 0.30$ ,  $r = 0.25$ ). The interaction of wood density and sound speed is significant in the calculations of dynamic modulus of elasticity.

## Keywords

Beech wood; structural timber; speed of sound; density of wood; small specimen; board.

## Contact Address

Alena Rohanová

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, Slovak Republic

rohanova@tuzvo.sk



## FREKVENČNÉ ROZLOŽENIE HLUKU CISTERNOVÝCH ŽELEZNIČNÝCH VOZŇOV

Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš, Juraj Úradníček, Peter Petrák, Ladislav Mačák, Marián Moravčík

### 1 Úvod

Na intenzitu zvuku (hluku) vlakových súprav vplyvajú viaceré faktory, a to predovšetkým uloženie koľajového zvršku, kontakt valiacich sa kolies s koľajnicami, konfigurácia a rozloženie brzdnej sústavy na podvozok vozňa, typ použitých dvojkolies v podvozku a v neposlednom rade je to nadstavba, ktorou v analyzovanom prípade je nádrž cisternového vozňa. Vibro-akustické merania konkrétneho cisternového vozňa sa vykonali v pokojovom stave a za pohybu pri rôznych rýchlostiach jazdy tohto vozňa. Okrem frekvenčnej analýzy generovaného zvuku a kmitania vytipovaných komponentov podvozku a nádrže vozňa sa vykonala aj modálna analýza komponentov podvozku a nádrže vozňa.

Experimentálnym skúškam vibro-akustických parametrov za pohybu vyvíjaného prototypu cisternového vozňa predchádzali dve merania, a to meranie vibro-akustických parametrov prototypu tohto vozňa v pokojovom stave a pri jeho presúvaní z vonkajšieho stanovišťa do haly využívajúc gravitačný ráz kolies pri páde zo zrezaného klina a druhé bolo akustické meranie frekvenčnej ozvy vybraných komponentov podvozku prototypu cisternového vozňa budených oceľovým kladivkom, ktoré vzišlo z frekvenčnej analýzy prvého merania [4, 5]. Tretie meranie za pohybu prototypu cisternového vozňa na skúšobnej dráhe vo VUZ Veľím potvrdilo výsledky merania získané a analyzované v pokojovom stave a pri veľmi malej rýchlosti presúvania sa tohto vozňa [11]. Pri celkovej vibro-akustickej analýze cisternového vozňa s objemom nádrže  $93 \text{ m}^3$ , sa využili aj časové záznamy z akustických meraní vozňa s menším objemom nádrže ( $88 \text{ m}^3$ ), ale s rovnakým podvozkom na štyroch dvojkolesiach, ktorý poskytla Tatragónka.

Získané poznatky z oblasti konštrukcie cisterny a uloženia brzdnych komponentov na spodku nádrže a podvozku cisterny z hľadiska vybudenia vibro-akustickej energie umožnili presnejšie stanoviť miesta budenia vybraných komponentov podvozku cisternového vozňa pre akustické meranie a meracie miesta pre vibro-akustické merania za pokoja a pohybu na skúšobnej dráhe spĺňajúcej požiadavky normy STN EN ISO 3095 pri analýze vozňa s objemom nádrže  $93 \text{ m}^3$ .

Úsilie pri znižovaní mechanického kmitania a hluku železničných vozňov je zamerané na znižovanie akustického výkonu samotného zdroja, na zníženie vyžiarenej akustickej energie zdrojom do voľného priestoru a zamedzenie šírenia energie mechanicou sústavou, teda podvozkom a samotnou nádržou cisternového vozňa.

Mechanické kmitanie vznikajúce počas prevádzky tejto mechanickej sústavy obsahuje mnoho užitočných informácií o ich technickom stave a tiež odzrkadľuje charakter prevádzkových procesov a intenzitu zaťaženia danej mechanickej sústavy. Oproti iným diagnostickým metódam vibrodiagnostika umožňuje stanoviť nielen konštrukčný nedostatok alebo poškodenie, ale aj ich príčiny, čo je hlavný cieľ pri redukcii hluku vozňových súprav.

Otázkam znižovania kmitania a hluku, vo vyspelých štátoch sveta, sa venuje významná pozornosť. Aktivita v tejto oblasti sa sústreďuje predovšetkým na primárne znižovanie kmitania a hluku, čiže priamo na odstraňovanie príčin vzniku výraznej vibro-akustickej energie technických komponentov vozňových sústav, a to predovšetkým dvojkolesia.

V danom prípade je nevyhnutné sústrediť sa aj na prenos dynamického zaťaženia, teda nájsť možnosti redukcie zvýšenej dynamickej ozvy (kmitanie, hluk) od primárneho zdroja, teda kontaktu kolesa podvozku s koľajnicou, nádrže cisterny cez jednotlivé hlavné komponenty vozňa ako sú vypruženie – ložisková skriňa a rázsocha [9, 10], hlavný priečnik, klznice a guľový čap. Tiež je potrebné analyzovať vibro-izoláciu brzdnej sústavy vozňa, ktorá môže byť výrazným zdrojom vybudenia samotnej nádrže cisterny [8]. Takýmto prístupom možno dosiahnuť najefektívnejšie výsledky vyžadovanej redukcie hluku.

## 2 Cieľ, metodika vibro-akustických meraní a meracia technika

Cieľ experimentálnych skúšok bol zistiť vlastné frekvencie vlastných tvarov a potenciálnu veľkosť dynamického zaťaženia (kmitania) jednotlivých komponentov cisternového vozňa, začínajúc podvozkom a jeho hlavnými časťami (blokmi), ako sú ložisková skriňa, primárne vypruženie rázsochy a rám podvozku cez komponenty prepájajúce podvozok a kostru cez klznice, guľový čap až po samotnú nádrž cisterny od už uvedeného budenia. Zdrojom budenia pri skúške bolo rázové kladivko pričom sa meral časový priebeh zrýchlenia kmitania a kinematické budenie kolies od koľajnic pri rôznych rýchlostiach [4, 11]. Cieľ akustických meraní bol analyzovať frekvenčné rozloženie zvuku (hluku) sledovaných komponentov podvozku vrátane brzdnej sústavy a koľajnice a frekvenčne a amplitúdovo analyzovať zvukové zaťaženie blízkeho prostredia od týchto komponentov cisternového vozňa pri budení jednoduchým oceľovým kladivkom, čo je cieľ tohto článku.

Hlavný cieľ týchto troch experimentálnych meraní je prijateľne znížiť emisie hluku prázdneho cisternového vozňa, a to na hladiny A zvuku približujúce sa k hodnote 78 dB pri prejazde rýchlosťou 80 km/h. Pri dosahovaní cieľa je potrebné klásť dôraz na zachovanie čo najnižších hmotnostných prírastkov v dôsledku protihlukových opatrení.

Pri meraní mechanického a akustického kmitania sa použila meracia technika od firiem Bruel & Kjaer (B&K) a NORSONIC, a to 12 kanálová meracia karta B&K PULSE, zvukové analyzátory s využiteľným frekvenčným rozsahom do 25 600 Hz pre záznam meraných signálov, ktoré reprezentujú otvorené systémy poskytujúce viac informácií a spoľahlivosti v procese merania, analýzy, vyhodnotenia a expertízy; akcelerometre B&K 4534-B-001 a B&K 4533-B-001 s využiteľnými frekvenčnými rozsahmi 0,2 Hz – 12,8 kHz o hmotnosti 8,6 g a citlivosti 10 mV/g a akcelerometer Dytran 3093B s citlivosťou 100 mV/g a s frekvenčným rozsahom 0,6 Hz – 5 000 Hz; merací mikrofón 4189 A 21 určený na merania vo voľnom poli s využiteľným frekvenčným rozsahom 20 Hz – 20 kHz a dynamickým rozsahom (16,5 – 134) dB a mikrofón Nor1225 s frekvenčným rozsahom 3,15 Hz – 20 kHz; rázové kladivko B&K 8207 s citlivosťou 0,225 mV/N a hmotnosťou 454 g s maximálnou rázovou silou 35 584 N a iná dopĺňajúca technika.

## 3 Frekvenčná analýza zvuku komponentov podvozku vozňa

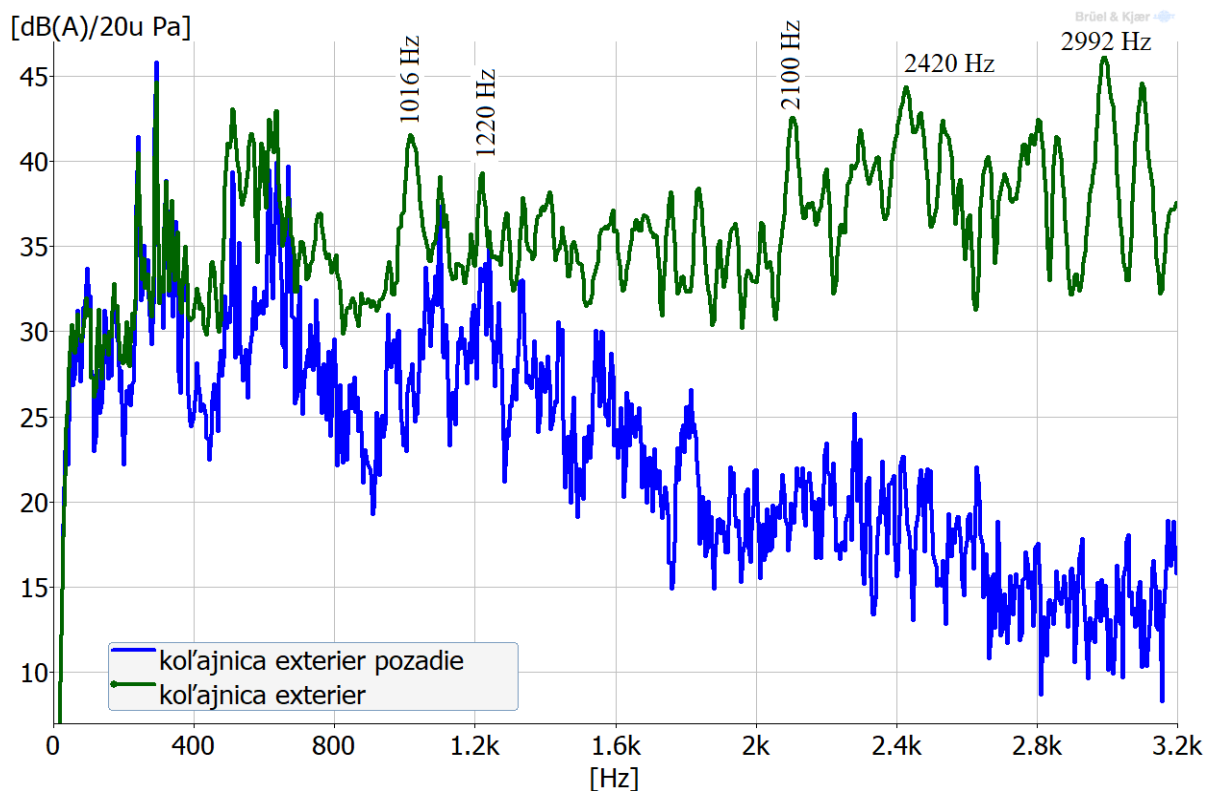
Vibro-akustické vlnenie generované jednoduchým oceľovým kladivkom na analyzovaných komponentoch podvozku vozňa sa šíri a prenáša energiu tuhým pružným prostredím do konštrukčných blokov podvozku, plášťa cisterny a do blízkeho okolia cisternového vozňa, kde sa časový priebeh akustického vlnenia zaznamenal, v Pascaloch, pomocou ručného analyzátora zvuku. S využitím zodpovedajúceho softvéru sa tento časový signál prostredníctvom FFT analýzy transformoval do frekvenčnej oblasti. Cieľ bol porovnať a aj potvrdiť frekvenčné rozloženie zvuku generované jej hlavnými konštrukčnými blokmi podvozku, a to predovšetkým z hľadiska prenosového útlmu [6]. Pozornosť frekvenčného rozloženia zvuku sa sústredila aj na brzdnu sústavu.

### 3.1 Frekvenčná analýza zvuku generovaného koľajnicou

Vyžarovanie zvuku podvozkom vozňa závisí aj od železničného zvršku, čiže koľajníc a ich uloženia. V súčasnosti je snahou železničných spoločností redukovať hluk vlakov vibro-izolačným uložením koľajníc na podvaly a podložie. Treba konštatovať, že takýmto prístupom sa poznateľne redukujú emisie kmitania a hluku pohybujúcej sa vlakovej súpravy. Intenzita generovania vibro-akustickej energie je závislá od drsnosti koľajníc, geometrickej nepravidelnosti kontaktnej plochy koľajníc s dvokolesím, zaťaženia resp. kontaktného tlaku (Hertzove tlaky), opotrebenia koľajníc, ale aj priečného náhodnému pohybu vozňov vlakovej súpravy, kedy dochádza aj ku kontaktu časti okolesníka s bokom koľajnice.

Na zistenie frekvenčného rozloženia imisií zvuku koľajníc sa využilo budenie oceľovým kladivkom. Budenie koľajníc sa vykonalo kolmo na ich kontaktnú plochu, čo reprezentuje ich rozhodujúce zaťaženie. Frekvenčná analýza zvuku emitovaného koľajnicami klasicky uloženými na podvaly je na Obrázku 1. Frekvenčná analýza zvuku koľajníc pri ich klasickom uložení jednoznačne potvrdzuje, že koľajnice generujú zvuk v oblasti vyšších frekvencií, a to od 1 kHz vyššie. V tejto frekvenčnej oblasti sa vybudili aj výrazné diskkrétne frekvencie, čo sú vlastné frekvencie vlastných tvarov daného typu koľajnice, ako napríklad 1,016 kHz, 1,22 kHz, 2,1 kHz, 2,42 kHz a 2,992 kHz.

Vykonaná frekvenčná analýza zvuku koľajnice vymedzuje jej frekvenčnú oblasť, ktorú treba brať do úvahy pri návrhu opatrení redukcie hluku podvozkov železničných vozňov. Inými slovami, tieto frekvencie, ktoré pri redukcii hluku cisternového vozňa nie je možné ovplyvniť sa z procesu znižovania hluku vylúčia. Treba však konštatovať, že odborné vibro-izolačné uloženie zvršku koľajníc poznateľne redukuje hluk vlakových súprav. Teda, príspevok kvality trate, ako aj inštalácia protihlukových opatrení na úrovni trate, má významný vplyv na celkový vyžiarený hluk.

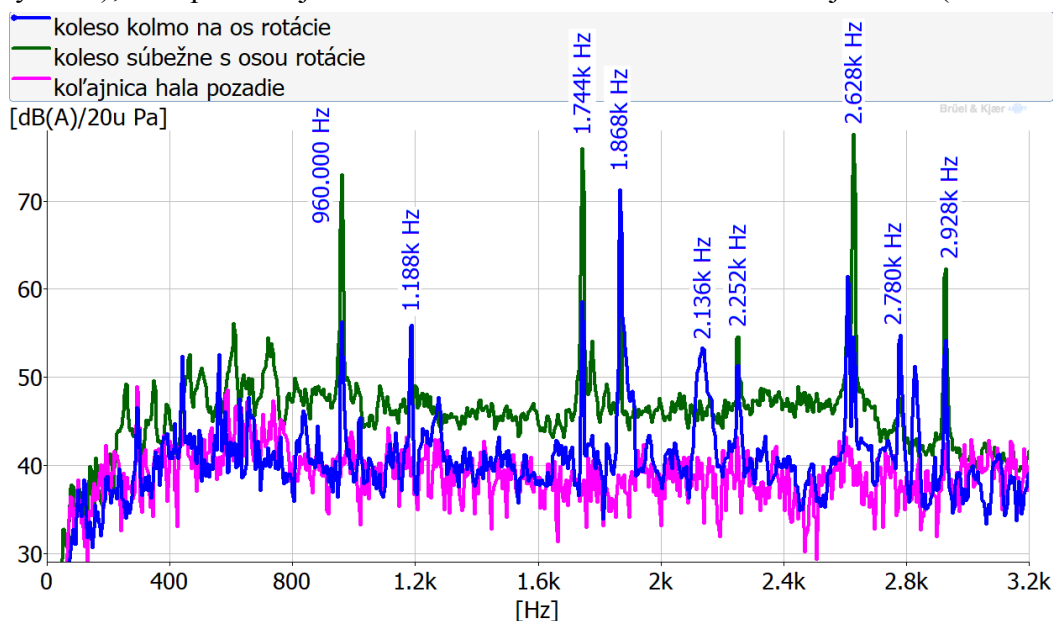


Obrázok 1. Frekvenčné spektrum hladiny A akustického tlaku generované koľajnicou.

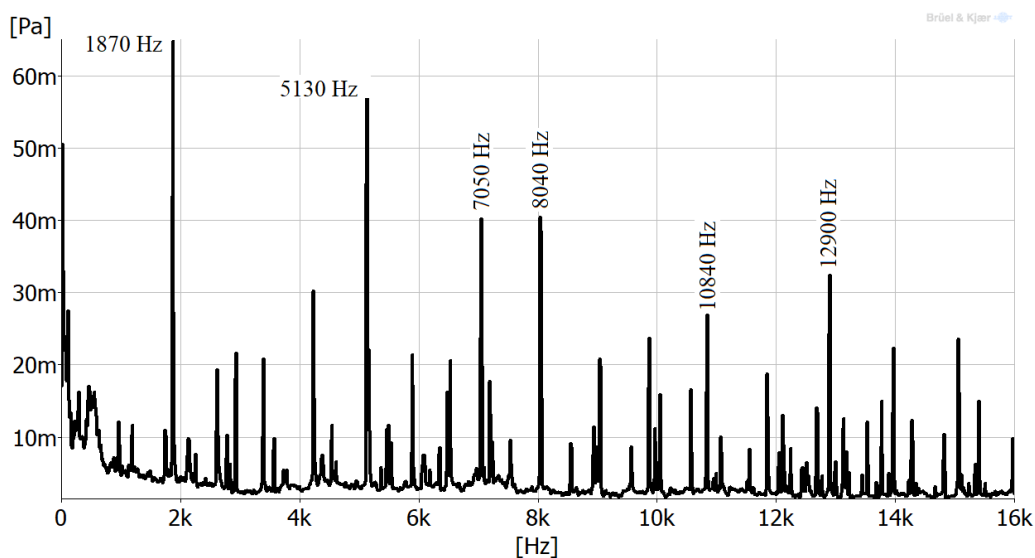


### 3.2 Frekvenčná analýza zvuku generovaná kolesom

Pri interakcii valenia kolies po koľajniciach sa generuje vibro-akustická energia (štruktúrny hluk), ktorá sa šíri konštrukčnými komponentmi cisternového vozňa a následným vyžarovaním do okolitého priestoru. Intenzita generovania vibro-akustickej energie je závislá od drsnosti kontaktných plôch kolies s koľajnicami a ich konštrukčnej úpravy, nepravidelnosti geometrického tvaru kolies, kontaktného tlaku (Hertzove tlaky), rýchlosti vozňa, ale aj od polomeru zákruty, či sklonu trate a bočného zaťaženia dolnej časti okolesníka s koľajnicou pri náhodnom priečnom pohybe vozňa, priečnom sklone koľajnic a v zatáčke. Na zistenie frekvenčného rozloženia imisií zvuku kolesa sa k budeniu využilo oceľové kladivko. Budenie kolesa sa vykonalo kolmo na os dvojkolesia (radiálny smer) a rovnobežne s jeho osou (axiálny smer), čo reprezentuje bočné zaťaženie okolesníka kolesa dvojkolesia (Obrázok 2.).



**Obrázok 2.** Frekvenčné spektrum hladiny A imisií zvuku kolesa vozňa pri budení kolmo na os (modrá) a rovnobežne s osou dvojkolesia (zelená) pre rozsah do 3,2 kHz.



**Obrázok 3.** Frekvenčné spektrum imisií zvuku pre rozsah 16 kHz pri budení kolmo na os rotácie dvojkolesia.

Frekvenčné spektrá na Obrázkoch 2. a 3. charakterizujú vlastné frekvencie vlastných tvarov experimentálne skúšaného dvojkoľesia podvozku cisternového vozňa. Dvojkoľesie pri valení po koľajniciach generuje diskrétne frekvencie od 960 Hz najmä pri bočnom budení (rovnobežne s osou) až po približne 10 kHz. Dominujúce frekvencie zvuku sa nachádzajú vo frekvenčnej oblasti približne od 1 kHz do 3 kHz, a to pri oboch smeroch budenia. Výraznejšie amplitúdy sa však dosahujú pri bočnom (axiálnom) budení koľesa. Príčinu treba vidieť v tom, že medzi okolesníkom a koľajnicou dochádza k relatívnemu pohybu, teda k prešmykaniu okolesníka s koľajnicou, čo generuje tónový zvuk.

Vykonaná frekvenčná analýza zvuku dvojkoľesia vymedzuje jej frekvenčnú oblasť, ktorú treba brať do úvahy pri návrhu opatrení redukcie hluku podvozkov železničných vozňov. Výrazné amplitúdy, v oboch smeroch budenia skúšaného koľesa, sú pri frekvenciách 960 Hz, 1,188 kHz, 1,744 kHz, 1,868 kHz, 2,136 kHz, 2,252 kHz, 2,628 kHz, 2,78 kHz a 2,928 kHz.

Redukcia výrazných amplitúd v uvedených frekvenčných oblastiach pre koľajnice a dvojkoľesia nie je predmetom výskumu. Získané frekvenčné spektrá sú však dôležité z hľadiska redukcie vibro-akustickej energie pre zostávajúce komponenty (bloky) podvozku železničných vozňov. Treba konštatovať, že vhodnou konštrukčnou úpravou dvojkoľesia možno výrazne redukovať prenos vibro-akustickej energie do konštrukčne nadväzujúcich komponentov (blokov) podvozku vozňa.

Zvýšená hladina hluku pri budení v axiálnom smere, teda v smere osi dvojkoľesia potvrdzuje reálnu skutočnosť, že pri bočnom kontakte okolesníka s koľajnicou dochádza k šmykovému treniu medzi okolesníkom a koľajnicou, ktoré spravidla vybudzuje nepríjemný hluk tónového (pískavého) charakteru. Tento špecifický hluk je závislý aj od rýchlosti vlakovej súpravy a sklonu koľajnicovej dráhy pri zmene jej smeru (zákruta).

### 3.3 Frekvenčná analýza zvuku generovaného uložením guľového čapu

Priečnik rámu podvozku je nosným komponentom nádrže cisterny, na ktorom je privarené uloženie guľového čapu s nalisovanou plastovou vložkou (Obrázok 4.). Aplikovaná plastová vložka čiastočne vibro-izoluje rám podvozku od plášťa nádrže cisterny. Nádrž cisterny je cez štyri klznice a dva guľové čapy, kde sú aplikované plastové vložky, spojená s rámom podvozku. Prenos vibro-akustickej energie od hlavného zdroja budenia (dvojkoľesia) do plášťa cisterny je najmä cez tieto nosné a stabilizačné kontaktné miesta cisternového vozňa. Pre skúmaný cisternový vozeň je prenos tejto energie možný aj cez brzdňú sústavu, ktorá prepája priečnik rámu podvozku so spodnou časťou plášťa cisterny (pozri Obrázok 6.) [7].

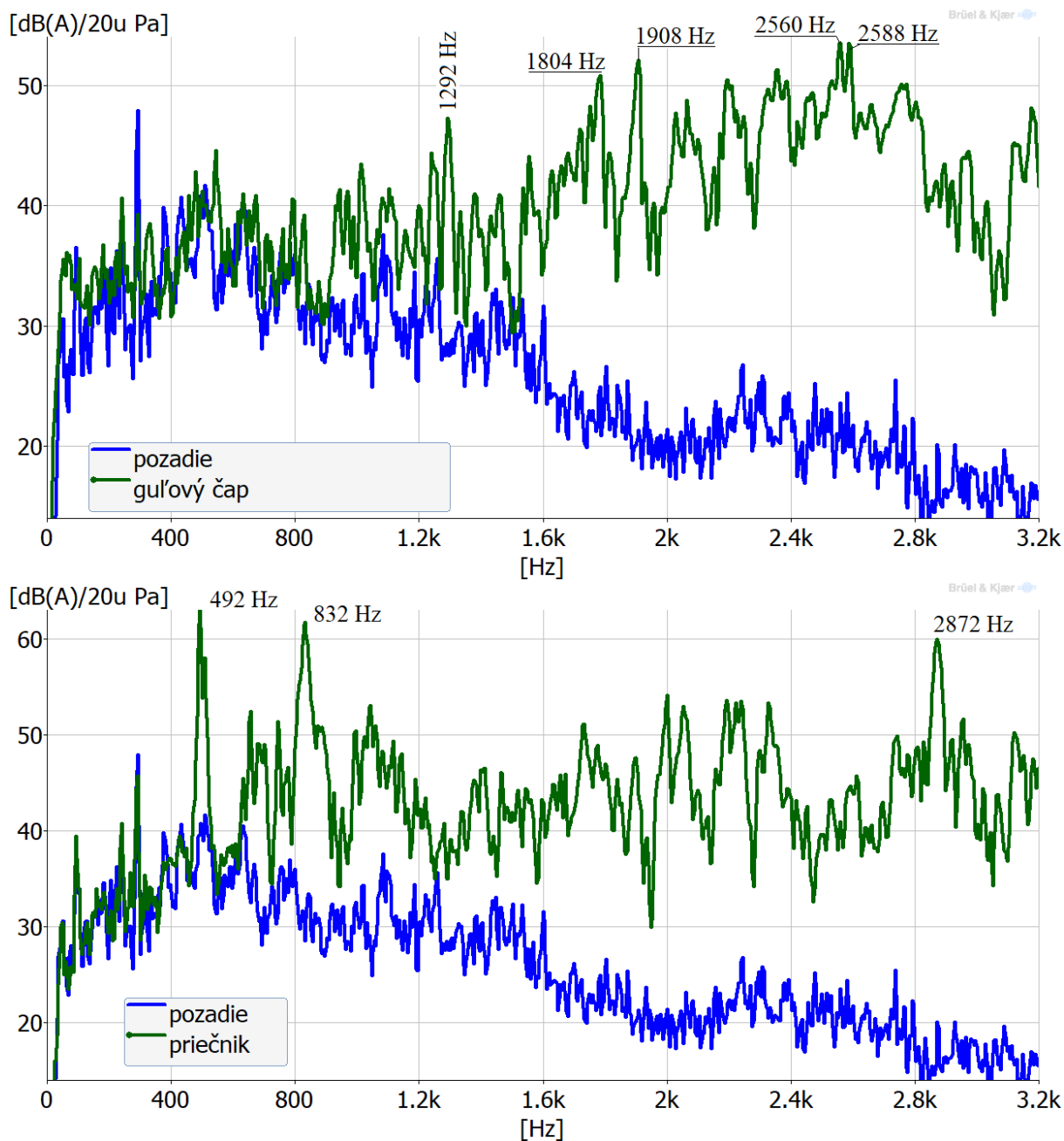


**Obrázok 4.** Priečnik rámu podvozku s plastovým lôžkom pre guľový čap a klznicu.

Frekvenčná analýza zvuku, ktorý sa generoval kladivkom, sa sústredila na analýzu imisií zvuku v blízkosti plastového lôžka uloženého na priečniku rámu podvozku. Analýza zvuku sa vykonala vo frekvenčnom rozsahu do 3,2 kHz. Z autospektra, pri budení kladivkom, je vidieť výraznejšiu oblasť zvuku vo frekvenčnom pásme od 500 Hz pri priečniku a od 1 200 Hz pri plastovom lôžku guľového čapu s výraznými diskretnými amplitúdami v oblasti vyšších frekvencií, a to 1 292 Hz, 1 908 Hz, 2 560 kHz a 2 588 Hz, tiež 2 872 Hz (Obrázok 5.).

V oblasti nižších frekvencií sú výraznejšie amplitúdy pri frekvenciách 492 Hz a 832 Hz. Tieto frekvencie s výraznou amplitúdou sa analyzovali aj pri vibro-akustických meraniach prototypu cisternového vozňa za pokoja [4]. Frekvencia pozadia pri 300 Hz s výraznou amplitúdou bola generovaná vzduchotechnickým zariadením blízkej výrobnéj haly.

Diskrétné frekvencie s výraznými amplitúdami treba brať do úvahy ako budiace frekvencie nádrže cisterny, ktoré prispievajú k vybudeniu jej vlastných frekvencií vlastných tvarov, čím prispievajú k zvýšeniu emisií a teda aj imisií hluku plášťa nádrže cisternového vozňa. Pri analýze nameraných výsledkov získaných pri meraní za pohybu vozňa je im potrebné venovať zvýšenú pozornosť. Pri návrhu opatrení je žiaduce amplitúdy týchto frekvencií redukovať na minimálnu hodnotu, a to aj zmenou geometrie, či vytvorením diskontinuit [6, 7, 8].



Obrázok 5. Frekvenčné spektrum hladiny A zvuku priečnika rámu podvozku (hore) a plastového lôžka guľového čapu (dole).

### 3.4 Frekvenčná analýza zvuku generovaného brzdým tiahom

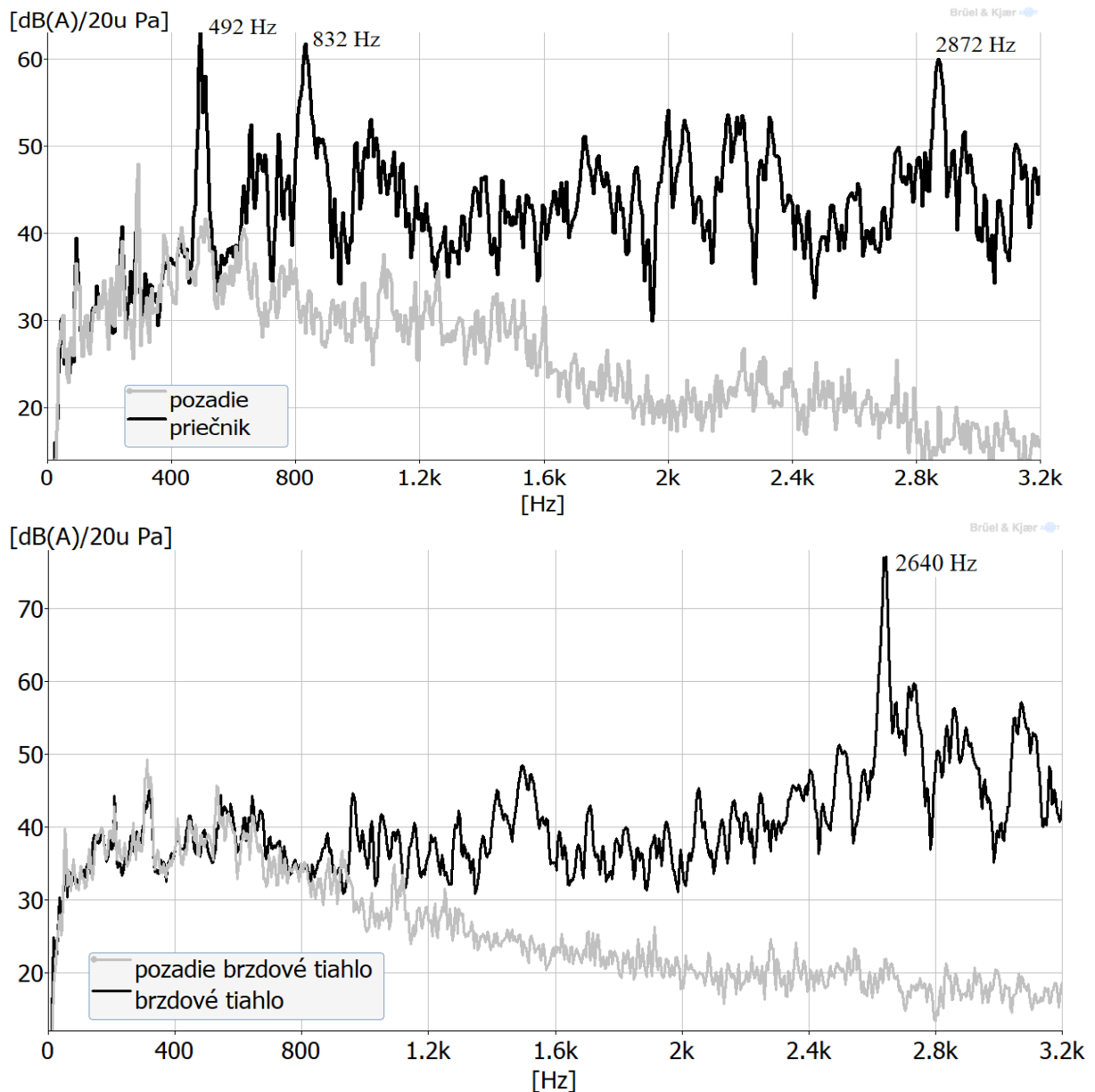
Nosným komponentom nádrže cisternového vozňa je priečnik rámu podvozku, na ktorom je privarené lôžko guľového čapu s nalisovanou plastovou vložkou a klznice (Obrázok 6. hore). Aplikovaná plastová vložka čiastočne vibro-izoluje podvozok od plášťa cisterny. Nádrž cisterny, ako sa už uviedlo, je cez štyri klznice a dva guľové čapy, kde sú aplikované plastové vložky, spojená s podvozkom. Prenos kmitania od zdroja budenia (kolesa) do plášťa nádrže cisterny je teda cez tieto nosné a stabilizačné kontaktné miesta. Nádrž cisterny je však s priečnikom rámu podvozku mechanicky spojená aj cez brzdú sústavu, kde dochádza k prenosu vibro-akustickej energie od priečného rámu podvozku, ako hlavného zdroja

budenia od dvojkolesia, do plášťa cisterny. Zdrojom nežiaduceho budenia plášťa cisterny je aj samotné brzdne tiahlo (Obrázok 6. dole). Má toto spojenie vplyv na celkovú hlučnosť cisternového vozňa? Tento predpoklad, že táto skutočnosť je reálna, potvrdili aj vibroakustické merania za pohybu [11].



**Obrázok 6.** Priečník rámu podvozku s guľovým čapom a pripojenie brzdneho tiahla k priečníku (hore); tiahlo brzdnej sústavy spojené s priečníkom a plášťom nádrže cisterny.

Vykonala sa frekvenčná analýza zvuku, ktorý sa generoval kladivkom a tento zvuk sa analyzoval vo frekvenčnom rozsahu do 3,2 kHz na priečníku rámu podvozku a na brzdnom tiahle. Z autospektra, pri budení kladivkom, je vidieť výraznejšiu oblasť zvuku vo frekvenčnom pásme od 600 Hz pri priečníku a od 900 Hz pri brzdnom tiahle s výraznými diskretnými amplitúdami v oblasti nízkych, stredných (492 Hz, 832 Hz) a vyšších (2 640 Hz, 2 872 Hz) frekvencií (Obrázok 7.). V predchádzajúcich analýzach [4] sa konštatuje, že prenosový útlm vo frekvenčných oblastiach 1,2 kHz až 1,8 kHz a 2,3 kHz až 2,5 kHz nie je dostačujúci, čo potvrdzujú aj frekvenčné spektrá imisnej zvukovej analýzy. Diskrétné frekvencie s výraznými amplitúdami reprezentujú vlastné frekvencie vlastných tvarov priečníka rámu podvozku a brzdneho tiahla.



**Obrázok 7.** Frekvenčné spektrum zvuku generovaného na priečniku (hore) a na brzdovom tiahle (dole) pre frekvenčný rozsah do 3,2 kHz.

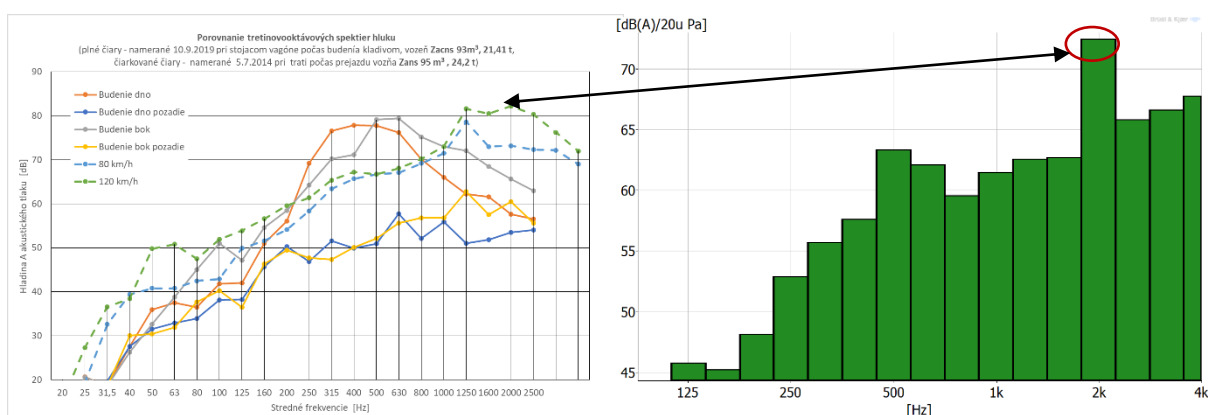
Frekvencie 492 Hz a 832 Hz sa analyzovali pri priečniku a tieto frekvencie s výraznou amplitúdou sa analyzovali aj pri vibro-akustických meraniach (modálnej analýze) prototypu cisternového vozňa za pokoja [4].

Pri návrhu opatrení zníženia hluku cisternového vozňa je potrebné amplitúdy týchto frekvencií redukovať na minimálne hodnoty, a vhodnou vibro-izoláciou brzdnej sústavy zabrániť prenosu vibro-akustického vlnenia na plášť nádrže cisterny od zdroja kmitania, ktorým je priečnik rámu podvozku, ale aj kmitanie pohyblivých komponentov brzdnej sústavy. Túto skutočnosť potvrdila aj vibro-akustická analýza meraní za pohybu prototypu cisternového vozňa.

## 4 Diskusia a záver

Vykonané akustické merania vybraných komponentov podvozku cisternového vozňa sa sústredili na frekvenčné zloženie akustického kmitania generované týmito komponentmi, a to najmä podvozku, od dynamického budenia kladivkom na koľajnicu, koleso vozňa, priečník, a brzdnú sústavu. Na skúšobnej dráhe sa v minulosti vykonali akreditované merania hluku podobných cisternových vozňov, čo umožnilo z časového záznamu frekvenčne a amplitúdovo porovnať a analyzovať vykonané vibro-akustické merania za pokoja cisternového vozňa s výsledkami merania hluku podobných cisternových vozňov za pohybu.

Frekvenčné spektrá hluku sa transformovali do tretinovo-oktávových spektier a porovnali sa s tretinovo-oktávovými spektrami hluku nameraného iným subjektom za pohybu podobného cisternového vozňa. Porovnanie sa vykonalo pre hladiny Z sledujúce reálne energetické pôsobenie vibro-akustickej energie na okolité prostredie [5] a hladiny A hluku (Obrázok 8. hore) sledujúce citlivosť sluchového orgánu človeka.



**Obrázok 8.** Porovnanie zistených tretinovo-oktávových frekvenčných spektier s výsledkami merania iného subjektu.

Z grafu na Obrázku 8. je možné vidieť, že cisternový vozň, ako celok, generuje výrazný hluk charakteristický pre nádrž cisterny, a to vo frekvenčnej oblasti približne od 300 Hz do približne 1 000 Hz a výrazný hluk charakteristický pre podvozok cisterny, a to vo frekvenčnej oblasti od približne 1 100 Hz do približne 3 000 Hz pri použití filtra A, ktorý sleduje citlivosť zdravého sluchového orgánu človeka (Obrázok 9.). Treba však mať na zreteli, že citlivosť sluchového orgánu sa zvyšuje až do 4 kHz. Aj druhé meranie naznačuje, že hluk podvozku bude prispievať vyššou mierou k celkovému hluku cisternového vozňa. Z prvého a druhého merania vyplýva, že pri redukcii hluku cisternového vozňa treba brať do úvahy dva hlavné zdroje, a to nádrž cisternového vozňa a jeho podvozok. Výsledky merania za pohybu cisternového vozňa potvrdili uvedený smer optimálnej redukcie hluku cisternového vozňa ako celku, naznačený výsledkami prvých dvoch statických vibro-akustických a akustických meraní.

Z analýzy tretinovo-oktávových spektier podvozku cisternového vozňa zobrazených na Obrázku 8. je vidieť frekvenčnú zhodu maximálnych hladín pri strednej frekvencii 2 kHz. Výrazná amplitúda je aj pri strednej frekvencii 4 kHz. Toto frekvenčné rozloženie priority zodpovedá frekvenčnej oblasti vybudenej dvojkoľesím podvozku.

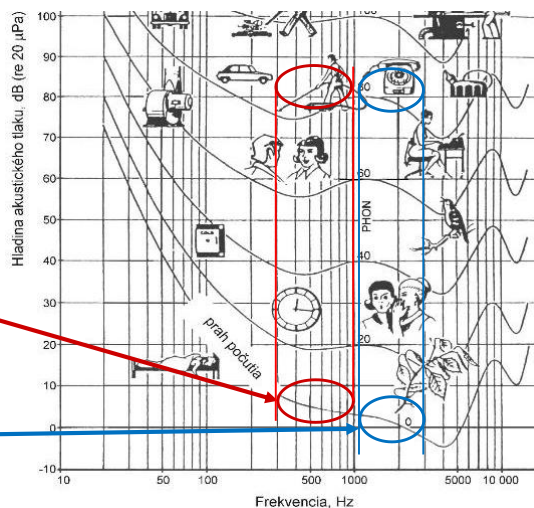
Výsledky akustických meraní zameraných na frekvenčné rozloženie zvuku jednotlivých komponentov podvozku cisternového vozňa ukazujú, že frekvenčný rozsah zasahuje do najcitlivejšej oblasti sluchového orgánu, a to do 5 kHz (Obrázok 9.). Znamená to, že

amplitúdovo výraznejšie vlastné frekvencie vlastných tvarov dvojkolesia, ako časti podvozku a koľajnice, sú v oblasti, kde normálny sluchový orgán človeka citlivo vníma hluk, a to v blízkosti 4 kHz (pozri Obrázok 3.). Expozícia človeka takýmto hlukom má negatívny vplyv na jeho zdravie. Piskľavý hluk brzdenia vozňa a prechod zatáčkou, či nízkofrekvenčný dunivý hluk vo väčších vzdialenostiach od trate má nežiaduci vplyv najmä na psychiku človeka [1, 3]. Pre tento frekvenčný rozsah zvuku sú veľmi účinné protihlukové bariéry, ktoré zvukovo izolujú nežiaduci líniový zvuk od chráneného prostredia [2].

## Krivky rovnakej hlasitosti

Frekvenčná oblasť vyžarovania hluku nádrže cisterny

Frekvenčná oblasť vyžarovania hluku brzdnej sústavy a podvozku vozňa



Obrázok 9. Krivky rovnakej hlasitosti s vyznačením frekvenčnej oblasti hluku nádrže cisterny a hluku podvozku vozňa.

Zistenie vlastných frekvencií vlastných tvarov koľajnice a dvojkolesia umožní z procesu redukcie hluku a kmitania vylúčiť niektoré frekvencie výrazných amplitúd, ktoré sú generované týmito komponentmi. Redukcia výrazných amplitúd v uvedených frekvenčných oblastiach pre koľajnice a dvojkolesia nie je však predmetom tohto článku. Získané diskkrétne hodnoty frekvenčných spektier sú však dôležité z hľadiska redukcie prenosu vibro-akustickej energie pre zostávajúce komponenty podvozku železničných vozňov, ako sú primárne vypruženie a rázsocha, hlavný priečnik s panvou pre guľový čap a samotný guľový čap, klznica, kde je možné redukovať ich amplitúdy.

## Pod'akovanie

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 and



This contribution was elaborated within execution of the project “New generation of freight railway wagons” (Project code in ITMS2014+:313010P922), on the basis of support of the operational programme Research and innovation financed from the European Regional Development Fund.

## Literatúra

- [1] Balazikova, M. and Sinay, J. 2012. Implementation of Auditory and Non-auditory Effects of Noise in the Risk Assessment Process in Mechanical Engineering. *Procedia Engineering*, No. **48**, 621-628.
- [2] Čulík, M.,-Jochim, S.-Ondrejka, V. 2019. *Sound insulation of partition wall and ceiling in panel timber frame structure*. *Akustika*. Volume 31, 145-152, ISSN 1801-9064.



- [3] Flimel, M. 2017. *Possibilities of active reduction of noise in the workplace*. Akustika, Volume 28, 27-31.
- [4] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Mačák, L. 2019. Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 1.: Meranie vibroakustických vlastností cisternového vozňa. *Výskumná správa SjF STU v Bratislave, Trnava 2019*, str. 73.
- [5] Žiaran, S., Chlebo, O., Musil, M., Úradníček, J., Mačák, L. 2020. Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 2.: Frekvenčná analýza zvuku podvozku cisternového vozňa. *Výskumná správa SjF STU v Bratislave, Trnava 2020*, str. 31.
- [6] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Tuma, J., Mačák, L. 2020. Use of vibro-isolation and non-conventional materials for reducing noise of railway wagons. Will be issued. Reviewed. ICSV27 Prague 2020.
- [7] Chlebo O., Úradníček J., Žiaran S., Musil, M. 2020. Transfer of Vibration Energy from the Wagon Wheel to the Tank Body and Possibilities of its Reduction. Will be issued. Reviewed. EM Czech Republic.
- [8] Žiaran, S., Chlebo, O., Cekan, M. and Tuma, J. 2019. Transmission of Vibrations through Vibration Isolators, Theory and Application. The 15th IFToMM World Congress, Krakow, Poľsko, *Springer Nature Switzerland AG 2019*, pp. 3995-4004.
- [9] Žiaran, S., Šooš, L. and Chlebo, O. 2020. *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, pp. 253–262.
- [10] Chlebo, O., Šooš, L., Žiaran, S. and Musil, M. 2019. Application of Vibroacoustics in Subjective and Objective Assessment of Bearing Quality. *Proceedings of the International Conference Acoustics2019 High Tatras 2019* p. 203-208, ISBN 978-80-228-3157-4.
- [11] Žiaran, S., Chlebo, O., Petrák, P., Úradníček, J., Šooš, L., Mačák, L., Búry, M. 2020. Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 3.: Frekvenčná analýza kmitania a hluku cisternového vozňa za pohybu s návrhom opatrení. *Výskumná správa SjF STU v Bratislave, Trnava 2020*, str. 166.

## Summary

**Frequency Noise Distribution of Tank Railway Wagons.** The noise intensity of train sets is influenced by several factors, in particular the mounting of the track superstructure, the contact of the rolling wheels with the rails, configuration and layout of the wagon braking system, type of wheel-sets used, and last but not least the superstructure used to analyze the tank wagon. The article deals with the frequency distribution of noise generated by the structural components of a tank wagon, including the rail. It analyzes the dominant sources of the chassis and compares them with the noise emission by the tank shell. A steel hammer is used to generate sound. A hand frequency analyzer with a usable frequency range of up to 25,6 kHz is used to record the time signal near the source, providing new possibilities and more information and reliability in the process of measurement, analysis, evaluation and expertise. The aim of the experimental tests was to determine the natural frequencies of the Eigen shapes and the potential magnitude of the dynamic load (vibration) from the individual components of the tank wagon, starting with the chassis and its main structural blocks such as bearing housing, primary suspension of horn-plate and the chassis frame via components connecting the chassis and the skeleton via slider, ball joint up to the tank shell itself from excitation with a steel hammer. The obtained results of the frequency distribution of sound

were compared with the results of measurements of other subjects, which confirmed the agreement of the results for the shell and the chassis of the tank wagon. Determining the natural frequencies of the Eigen shapes of the rail and the wheel set will make it possible to exclude from the process of noise and vibration reduction of the tank wagon some frequencies of significant amplitudes which are generated by the rails and the wheel sets. However, the reduction of significant amplitudes in the mentioned frequency domains for rails and wheel sets is not the subject of this article. However, the obtained discrete values of the frequency spectra are important in terms of reducing the transmission of vibro-sound energy for the remaining components of the railway carriage, such as primary suspension and horn-plate, the main cross bar with the ball joint and the ball joint itself, slider and the braking system, where their amplitudes can be reduced.

### **Keywords**

Tank wagon; measurement; noise sources; frequency analysis; human.

### **Contact Address**

Stanislav Žiaran; Ondrej Chlebo, Lubomír Šooš, Juraj Úradníček, Peter Petrák  
Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia,  
Nám. slobody 17, 81231 Bratislava  
stanislav.ziaran@stuba.sk; ondrej.chlebo@stuba.sk; lubomir.soos@stuba.sk;  
juraj.uradnicek@stuba.sk; peter.petrak@stuba.sk  
<http://www.stuba.sk>

Ladislav Mačák, Marián Moravčík  
Tatravagónka a.s. Poprad, Štefánikova 887/53, 05801 Poprad  
ladislav.macak@tatravagonka.sk; marian.moravcik@tatravagonka.sk  
<http://www.tatravagonka.sk>



Special 30<sup>th</sup> SKAS Anniversary Issue of Proceedings

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  
2020

ISBN 978-80-228-3224-3



9 788022 832243