



TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Martin Čulík – Anna Danihelová

# NOVÉ TRENDRY AKUSTICKÉHO SPEKTRA

New Trends of Acoustic Spectrum

2023

Vedecký recenzovaný zborník  
Peer-reviewed Proceedings

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*



2023

### *PodĎakovanie / Acknowledgement:*

Vedecký recenzovaný zborník vznikol v rámci riešenia projektu VEGA 1/0714/21 "Výskum vybraných vlastností trvalo udržateľných izolačných materiálov s potenciálom využitia v drevostavbách" (34%) a KEGA č. 023ŽU-4/2021 „Rozvoj intelektuálnych spôsobilostí a manuálnych zručností v STEM vzdelávaní“ (33%). Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Progresívny výskum úžitkových vlastností materiálov a výrobkov na báze dreva (LignoPro), kód ITMS: 313011T720 (33%), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Peer-reviewed Proceedings was written within the project VEGA 1/0714/21 "Výskum vybraných vlastností trvalo udržateľných izolačných materiálov s potenciálom využitia v drevostavbách" and KEGA 023ŽU-4/2021 „Rozvoj intelektuálnych spôsobilostí a manuálnych zručností v STEM vzdelávaní“. This publication is the result of the project implementation: Progressive research of performance properties of wood-based materials and products (LignoPro), ITMS: 313011T720, supported by the Operational Programme Integrated Infrastructure (OPII) funded by the ERDF.

*Editori / Editors:* Martin Čulík, Anna Danihelová

## **NOVÉ TRENDY AKUSTICKÉHO SPEKTRA**

*Vedecký recenzovaný zborník*

## **NEW TRENDS OF ACOUSTIC SPECTRUM**

*Peer-reviewed Proceedings*

### *Partneri / Partners:*



**Katedra  
drevených  
stavieb**



**ZVÄZ SLOVENSKÝCH  
VEDECKOTECHNICKÝCH  
SPOLOČNOSTÍ**



**Katedra fyziky,  
elektrotechniky a  
aplikovanej  
mechaniky**

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

### I. vydanie

Rok vydania 2023. Počet strán 142, elektronická forma vydania.

Za odbornú a jazykovú úroveň textu sú zodpovední autori jednotlivých príspevkov. V zborníku sú publikované pôvodné vedecké práce. Príspevky boli recenzované.

Spracovanie obálky Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene

Zostavovateľ zborníka Martin Čulík | Grafický návrh obálky Miroslav Chovan

© Technická univerzita vo Zvolene

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

**ISBN 978-80-228-3374-5**

## OBSAH / CONTENTS

---

Predhovor (Preface)	5
Zvukovoizolačné vlastnosti obvodového plášt'a prototypového výskumného objektu drevenej stavby <b>Martin Čulík, Michal Hrčka, Anna Danihelová</b> ( <i>Peter Hockicko, Monika Rychtáriková</i> )	7
Porovnanie deklarovaných a nameraných hodnôt hluku pri brúsení dreva elektrickým ručným náradím <b>Miroslav Dado, Marián Schwarz, Richard Jankovič</b> ( <i>Miroslav Němec, Ondrej Chlebo</i> )	17
Neistota merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti medzi miestnosťami <b>Milan Drahoš, Richard Drahoš</b> ( <i>Martin Jedovnický, Vojtech Chmelík</i> )	25
Prístupy k posudzovaniu zhody výsledkov meraní určujúcich veličín <b>Milan Drahoš, Richard Drahoš</b> ( <i>Vojtech Chmelík, Martin Jedovnický</i> )	33
Využitie akustického tomografu v podmienkach lesníckej prevádzky <b>Miloš Gejdoš, Katarína Michajlová</b> ( <i>Luboš Krišťák, Ondrej Chlebo</i> )	39
Možnosti využitia 3D CT technológie pri detekcii vnútorných chýb dreva na špeciálne využitie <b>Radovan Gracovský, Tomáš Gergel'</b> ( <i>Miloš Gejdoš, Rastislav Igaz</i> )	47
Vplyv štrkovej vrstvy na vlhkosťné vlastnosti plochej jednoplášťovej strechy na báze dreva s parozábranou alebo parobrzdou fóliou s premenlivou difúznou hrúbkou – Numerická analýza dynamického šírenia vlhkosti <b>Martin Haladej, Jozef Štefko</b> ( <i>Monika Rychtáriková, Vojtech Chmelík</i> )	57
Three principles of the European 12-TET system applied to organs of the constant measure <b>Ján Haluška</b> ( <i>Andrej Štafura, Peter Hockicko</i> )	69
Rozvíjanie manuálnych zručností využitím akustických experimentov v STEM vzdelávaní <b>Peter Hockicko</b> ( <i>Miroslav Němec, Miroslav Dado</i> )	77
Akustický potenciál dreva prípravných drevín <b>Petr Horák, Vlastimil Borůvka, Jan Kozel</b> ( <i>Rastislav Igaz, Andrej Štafura</i> )	81

Dielektrická spektroskopia polymérnych nanokompozitov <b>Jozef Kúdelčík, Štefan Hardoň</b> ( <i>Miroslav Dado, Luboš Krišťák</i> )	93
Aplikácia subjektívnych a objektívnych metód hodnotenia pri hodnotení kvality zvuku <b>Kristián Pástor, Miroslav Badida</b> ( <i>Miroslav Němec, Peter Hockicko</i> )	101
Zvuková pohltivosť penového hliníka a akustickej dosky z recyklovanej textílie <b>Andrej Štafura, Martin Čulík, Miroslav Němec, Michal Kuriš</b> ( <i>Daniel Urbán, Vojtech Chmelík</i> )	113
Design of a prototype composite timber beam in 4-point bending load <b>Róbert Uhrín, Nadežda Langová, Patrik Štompf, Viliam Púček</b> ( <i>Martin Jedovnický, Rastislav Igaz</i> )	119
Vplyv konštrukcie poťahového materiálu na pevnosť šitého spoja čalúneného nábytku <b>Anna Vilhanová, Nadežda Langová, Marek Merčiak</b> ( <i>Rastislav Igaz, Stanislav Jochim</i> )	127
Možnosti znižovania prenosu štruktúrneho hluku podvozku železničného vozňa <b>Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Eubomír Šooš</b> ( <i>Miroslav Dado, Peter Hockicko</i> )	135

## **PREDHOVOR / PREFACE**

---

Publikovanie pôvodných vedeckých prác zameraním na akustiku a materiálové inžinierstvo pokračuje aj v roku 2023. Vedecký recenzovaný zborník „Nové trendy akustického spektra“ je už jedenásty v sérii.

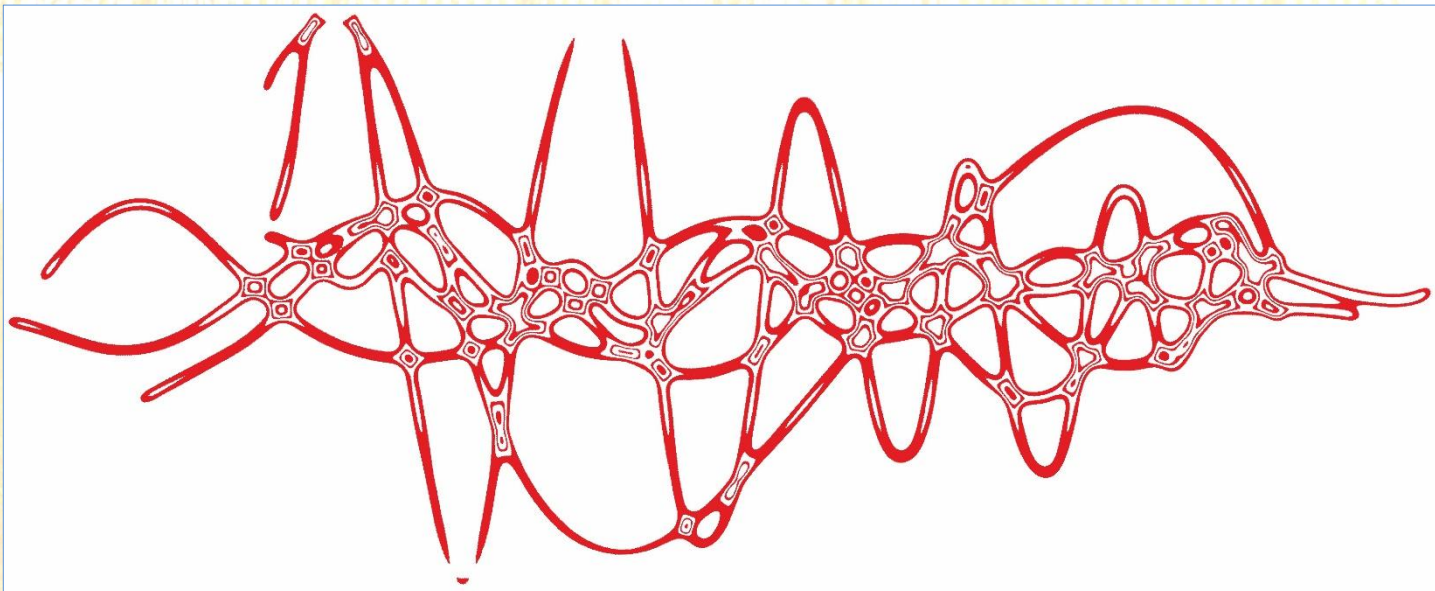
Zborník originálnych vedeckých príspevkov prezentuje nové vedecké poznatky. Je pre odborníkov a ďalších záujemcov významným zdrojom aktuálnych informácií z oblasti akustiky, jej aplikácií, materiálového inžinierstva a interdisciplinárnej spolupráce.

***Editori***

Publishing original research papers focused on acoustics and material engineering continues also in 2023. Scientific peer-review proceedings "New Trends of Acoustic Spectrum" is the eleventh in this series.

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

***Editors***



# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



# ZVUKOVOIZOLAČNÉ VLASTNOSTI OBVODOVÉHO PLÁŠŤA PROTOTYPOVÉHO VÝSKUMNÉHO OBJEKTU DREVENEJ STAVBY

Martin Čulík, Michal Hrčka, Anna Danihelová

## 1 Úvod

Obvodový plášť budovy tvorí akýsi obal, ktorý oddeľuje vnútorné prostredie domu od prostredia vonkajšieho, ktoré je počas roku v našich končinách (stredoeurópskych) odlišné. Obvodový plášť zodpovedá za tepelné straty objektu a jeho kvalita následne zásadne ovplyvňuje náklady na vykurovanie. Obvodový plášť budovy oddeľuje vnútorné a vonkajšie prostredie. Čím väčšie sú rozdiely medzi vonkajším a vnútorným prostredím, tým väčšie nároky musí obvodový plášť spĺňať (ŠTEFKO A KOL., 2021).

Obvodová stena je konštrukcia obalového plášťa najviac zaťažená hlukom. Obvodové konštrukcie, ktoré sú zložené z dvoch alebo viacerých plošných častí s rozdielnou nepriezvučnosťou sa zaraďujú medzi akusticky zložené konštrukcie. Okná, dvere a ďalšie otvory majú obyčajne menšiu nepriezvučnosť v porovnaní s plnou časťou deliacej konštrukcie (ČULÍK, DANIHELOVÁ, 2021).

Obvodový plášť budov tvoria rôzne stavebné prvky, ktorých akustické vlastností pri prenose zvuku vzduchom vyjadruje nepriezvučnosť. Nepriezvučnosť je vlastnosť stavebných (fasádnych) prvkov a obvodových plášťov budov prenášať zvuk z vonkajšieho prostredia do vnútorných priestorov (miestnosti príjmu), priamym prenosom vzduchom a bočným prenosom (STN EN ISO 12354-3, 2018).

V stavebnej akustike sa na hodnotenie zvukovo-izolačných vlastností konštrukcií využíva hlavne frekvenčný rozsah od 100 Hz do 3 150 Hz. S vývojom nových stavebných materiálov a technologických postupov (ľahké stavebné konštrukcie) však narastajú problémy v oblasti nižších frekvencií, a preto merania začínajú využívať už rozsah od 50 do 5000 Hz (RYCHTÁRIKOVÁ A KOL., 2019).

S popularizáciou stavby budov s využitím drevených stavebných konštrukcií pripadá v súčasnej dobe do úvahy aj vývoj novo navrhovaného parametra pre hodnotenie zvukovej izolácie  $R_{\text{living}}$  (*living noise from neighbour*) a  $R_{\text{traffic}}$  (*traffic noise*) (SCHOLL A KOL., 2013) alebo  $R_{\text{mod}}$  a  $R_{\text{mod},2}$ , ktorý je metodickým pokusom hodnotenia zvukovej izolácie budov s postupným menením sklonu referenčnej krivky v oblasti pod 100 Hz (CHMELÍK A KOL., 2020).

Katedra drevených stavieb DF TU vo Zvolene má na experimentálne účely postavený prototypový výskumný objekt drevenej stavby (PROTOTYPOVÝ VÝSKUMNÝ OBJEKT, 2023). Prototypový výskumný objekt Katedry drevených stavieb slúži na predvedenie prototypových skladieb, meranie a ukážky výsledkov meraní tepelnotechnických a energetických, ako aj akustických vlastností obalového plášťa pre nízkoenergetické zelené budovy na báze dreva.

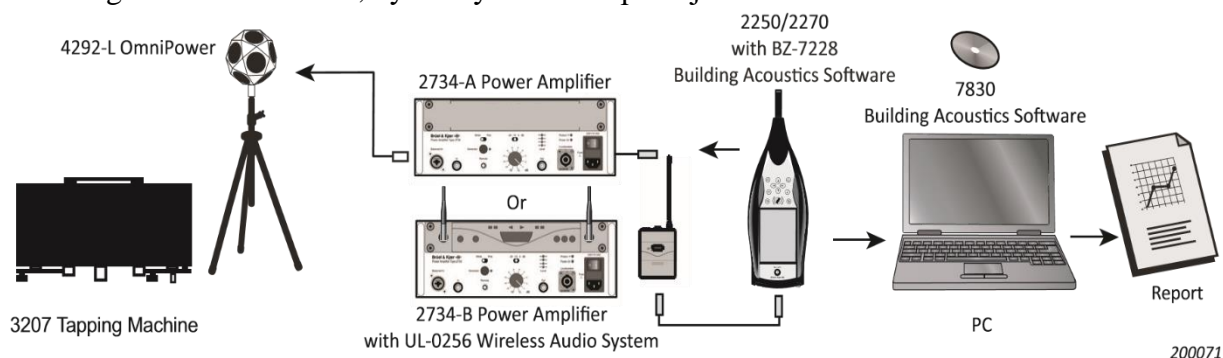
## 2 Metóda merania, aparátúra a skúmaný objekt

Meranie parametrov vzduchovej nepriezvučnosti obvodového plášťa priamo na stavbe – prototypový výskumný objekt Katedry drevených stavieb, DF, TUZVO, prebiehalo podľa aktuálne platnej normy STN EN ISO 16283-3 (ISO 16283-3: 2016).

Norma STN EN ISO 717-1 ponúka metódu pre určenie jednočíselnej hodnoty, tzv. váženej hodnoty daného určujúceho parametra stavebnej akustiky so započítaním aj dôležitých adaptačných činiteľov (ISO 717-1: 2020).



Meracia aparátúra, schematicky znázornená na Obrázku 1, pozostáva z certifikovaných prístrojov, softvérov na meranie a spracovanie výsledkov od firmy Brüel & Kjær. Súčasťou kompletného meracieho systému sú: všesmerový zdroj zvuku Type 4292-L so stojanom; mechanizmus na simuláciu krokov Type 3207 (normalizovaný zdroj krokového zvuku, tzv. klopadlo); zosilňovač Type 2734-A s kabelážou; ručný analyzátor zvuku Type 2270 s licenciou na meranie parametrov Stavebnej akustiky; softvér na archiváciu nameraných dát a vyhodnotenie výsledkov parametrov stavebnej akustiky Measurement Partner Suite BZ5503 a Building Acoustics Partner; výsledky merania spracujúci notebook.



**Obrázok 1.** Schematické prepojenie aparátúry na meranie parametrov stavebnej akustiky od firmy Brüel & Kjær [HOTTINGER BRÜEL & KJÆR, 2023].

## 2.1 Určujúca veličina vyjadrujúca akustické vlastnosti budov

Zvukovú izoláciu obvodových plášťov budov podľa STN EN ISO 12354-3 vyjadruje niekoľko veličín, ktorých hodnoty sa stanovujú v tretinooktávových alebo v oktávových pásmach vo zvukovo-izolačnej oblasti (100 Hz až 3 150 Hz). Jednočíselné vyjadrenie akustických vlastností obvodových plášťov je určené podľa postupu uvedeného v STN EN ISO 717-1 aj s adaptačnými činiteľmi spektra ( $C$ ;  $C_{tr}$ ). Akustické vlastnosti obvodových plášťov v tomto prípade merania stavebného prvku charakterizuje veličina (DRAHOŠ, DRAHOŠ, 2021):

- **Stupeň stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'_{45^\circ}$**  (k reproduktorovej sústave) v dB je vzduchová nepriezvučnosť stavebného prvku, ak zdrojom zvuku je reproduktorová sústava, uhol dopadu zvukových vln je  $45^\circ$  a zvukové pole v prijímacej miestnosti sa približuje k difúznemu poľu, daná vzťahom (1):

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

kde  $L_{1,s}$  je priemerná hladina akustického tlaku na vonkajšom povrchu stavebného prvku zahrňujúca odraz zvuku od obvodového plášťa, v dB;  $L_2$  je priemerná hladina akustického tlaku v prijímajúcej miestnosti, v dB;  $A$  je ekvivalentná pohltivá plocha v miestnosti príjmu, v  $m^2$ ;  $S$  je plocha testovaného stavebného prvku, v  $m^2$ . Uhol dopadu zvukových vln  $45^\circ$  je uhol, ktorý zvierá os reproduktora smerujúca na stred stavebného prvku a normálou na povrchu obvodového plášťa (fasády).

Merači môžu merať zvukové pole pomocou ručného mikrofónu alebo zvukomera. Pri ručne držanom mikrofóne je mikrofón pripravený k prenosnému zvukomeru (ručný analyzátor zvuku) alebo tyči, ktorú merateľ drží v pevnej polohe v ruke vo vzdialenosti aspoň na dĺžku paže od svojho trupu (ISO 16283-3: 2016).

V prijímacej miestnosti je, okrem akustického výkonu vyžarovaného skúmaným prvkom, významný aj akustický výkon vyžarovaný ohraničujúcimi prvkami alebo inými komponentmi. Vo všeobecnosti sa akustický výkon prenášaný do prijímacej miestnosti skladá zo súčtu

niekoľkých komponentov z rôznych prvkov (okno, ventilátor, dvere, stena atď.) (ISO 16283-3: 2016).

Na posúdenie zvukovoizolačných vlastností obvodového plášťa, resp. jeho prvkov, sa v tomto prípade používa jednočíselný parameter: Vážená stavebná nepriezvučnosť –  $R'_{45^\circ, w}$ , aj so započítaním viacerých adaptačných činiteľov. Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov určuje slovenská norma. Požadované hodnoty jednočíselných veličín vyjadrujúcich akustické vlastnosti obvodových plášťov budov na bývanie sú stanovené v STN 73 0532 pre deň, večer a noc (STN 73 0532, 2013). Splnenie normy ( $R'_{w,n}$ ) znamená, že je potrebné uplatniť nižšie uvedené kritérium porovnania jednočíselných hodnôt skúmaných akustických parametrov ( $R'_w$ , resp.  $R'_{45^\circ, w}$ ) vo výslednom hodnotení aj so zohľadnením všetkých aktuálne platnou normou udávaných adaptačných činiteľov (2):

$$(R'_w + C, C_{tr}) \geq R'_{w,n} \quad (2)$$

## 2.2 Prototypový výskumný objekt

Pri meraní vzduchovej nepriezvučnosti priamo na stavbe sa využila plná časť obvodového plášťa prototypového objektu KDS, vrátane zadebneného stavebného otvoru pre budúce osadenie okna. Pohľad na skúmanú časť drevenej stavby s umiestnením všesmerového zdroja zvuku pred vonkajšou stenou je na Obrázku 2.

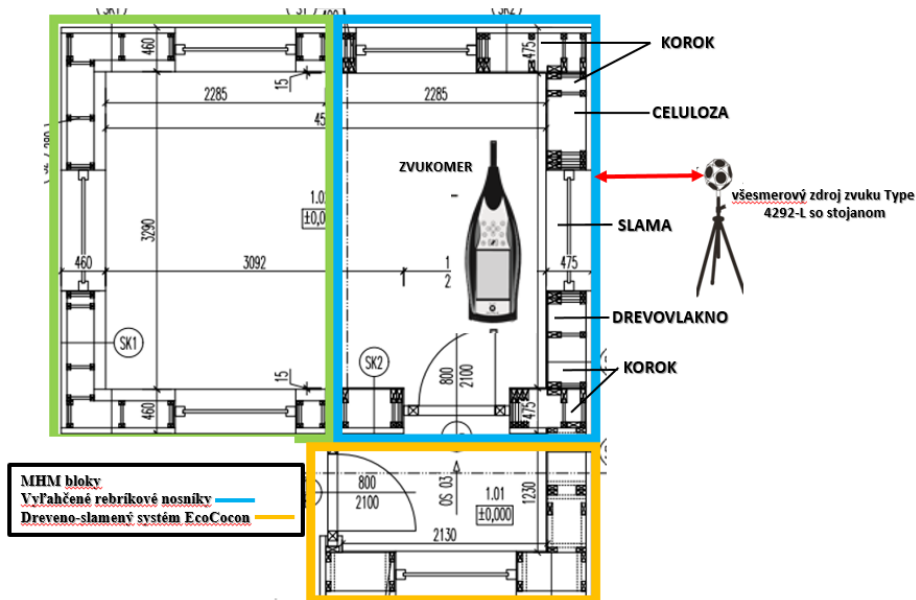
Zdroj zvuku sa odporúča, pri meraní nepriezvučnosti fasád a fasádnych prvkov, umiestniť do jednej či viac polôh zdroja zvuku vo vzdialenosti min. 3,5 až 5 m od fasády, kvôli uhlu dopadu zvuku približne  $45^\circ$  (RYCHTÁRIKOVÁ A KOL., 2019).



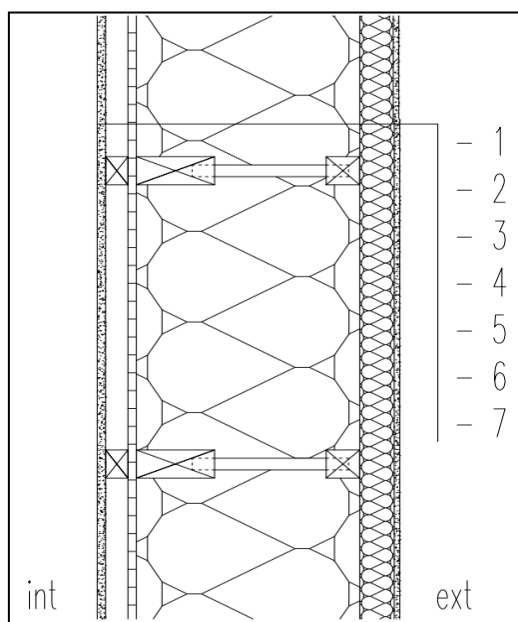
**Obrázok 2.** Pohľad na meranie nepriezvučnosti vonkajšej steny, časti obvodového plášťa skúmaného objektu KDS.

Na Obrázku 3 je nakreslený pôdorys skúmaného prototypového objektu drevenej stavby KDS. Výhodou referenčnej drevenej stavby je možnosť meniť skladbu stien – skladby drevenej stavebnej konštrukcie, najmä tepelnej či zvukovej izolácie, a tak zabezpečiť výskum porovnaním výsledkov určujúcich veličín skúmanej vlastnosti stavebnej konštrukcie priamo na stavbe.

Obrázok 4 znázorňuje skladbu meranej obvodovej steny s nosnou konštrukciou tzv. ľahkých nosníkov.



Obrázok 3. Pôdorys výskumného objektu drevenej stavby KDS.



Obrázok 4. Rez obvodového panelu referenčného objektu drevenej stavby s nosnou konštrukciou vyľahčených nosníkov:

1. silikónová omietka + lepidlo -15 mm
2. STEICO Protect-60mm,
- 3.I – nosník a rôzna tepelná izolácia v jednotlivých blokoch: korok – konopné pazderie – slama – Steico Zell (fúkané drevovlákno)-400 mm
3. OSB 3 – 15 mm
4. SDK podkonštrukcia CD profil – 30 mm
5. SDK GKF – 15 mm  $\Sigma = 520$  mm.

**Apparent sound reduction index according to ISO 16283-3**  
**Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades**

Client:

Date of test: 5. 5. 2023

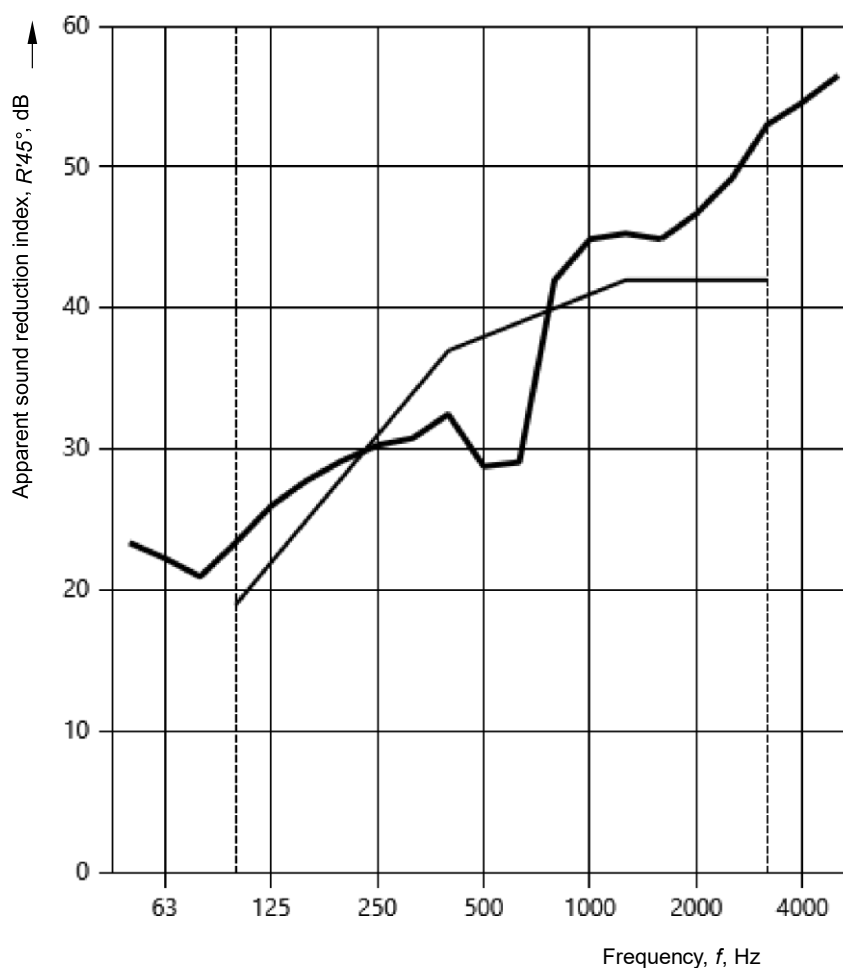
Façade sound insulation to Project 026 (2)

Area S of test specimen: 20,50 m<sup>2</sup>

Receiving room volume: 56,10 m<sup>3</sup>

----- Frequency range according to the  
 ——— curve of reference values (ISO 717-1)

Frequency f Hz	R' <sub>45°</sub> 1/3-octave dB
50	23,4B
63	22,3
80	21,0
100	23,4
125	26,0
160	27,8
200	29,2
250	30,3
315	30,8
400	32,5
500	28,8
630	29,1
800	42,0
1000	44,9B
1250	45,3
1600	44,9
2000	46,7
2500	49,2
3150	53,0
4000	54,6
5000	56,5B



B: R'<sub>45°</sub> ≥ value shown

Rating according to ISO 717-1

R'<sub>45°w</sub>(C;Ctr) = 38 (-2; -4) dB

C50-3150 = -2 dB

C50-5000 = -1 dB

C100-5000 = -1 dB

Ctr50-3150 = -5 dB

Ctr50-5000 = -5 dB

Ctr100-5000 = -4 dB

Evaluation based on field measurement

results obtained in 1/3-octave bands by an engineering method

**Obrázok 5.** Protokol z merania: Výsledok merania váženej stavebnej nepriezvučnosti  $R'_{45^\circ, w}$  obvodovej steny prototypového objektu KDS.

Pri meraní vzduchovej nepriezvučnosti časti obvodového plášťa referenčného objektu bol vyhodnotený jednočíselný parameter *Vážená stavebná nepriezvučnosť* –  $R'_{45^{\circ}, w}$  (aj so zohľadnením viacerých adaptačných činiteľov), ktorého hodnota sa odčítala podľa normy pri frekvencii 500 Hz z posunutej smernej krivky. Na skúmanie vzduchovej nepriezvučnosti sa použil ručný analyzátor zvuku Type 2270 s licenciou na meranie parametrov Stavebnej akustiky a na vyhodnotenie protokolu z merania sa použila aplikácia *Building Acoustics Partner* od firmy Hottinger Brüel & Kjær.

Obrázok 5 ukazuje podstatnú časť dosiahnutého výsledku z protokolu merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti vybranej časti obvodového plášťa skúmaného objektu.

Tabuľka 1 prezentuje výsledok a zhodnotenie merania priamo na stavbe, podľa aktuálne normou STN 73 0532 stanovených požiadaviek minimálnych hodnôt (Obytné miestnosti bytov, izby v ubytovniach, hoteloch a penziónoch, internáty a pod.).

**Tabuľka 1.** Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov pre deň/večer podľa STN 73 0532 a dosiahnutý výsledok merania so zohľadnením adaptačných činiteľov.

Prototypový výskumný objekt Katedry drevených stavieb TU vo Zvolene	Požadovaná hodnota $R'_w$ v dB						
	$L_{Aeq,2m}$ v dennom/večernom čase						
	< 50	> 50	> 55	> 60	> 65	> 70	> 75
		≤ 55	≤ 60	≤ 65	≤ 70	≤ 75	≤ 80
Minimálna hodnota stanovená normou	30	30	30	<b>33</b>	38	43	46
Nameraná hodnota $R'_{45^{\circ}, w}$	$R'_{45^{\circ}, w}(C; Ctr) = 38 (-2; -4)$ dB						
Adaptačný činiteľ pre hluk z dopravy $/R_{traffic}/$	$C_{tr50-5000} = -5$ dB /33 dB/						
Výsledok porovnania podľa normy	Vyhovuje pri ekvivalentnej hladine A zvuku vonkajšieho prostredia do 65 dB						

**Tabuľka 2.** Požiadavky na zvukovú izoláciu obvodových plášťov pre noc a dosiahnutý výsledok merania so zohľadnením adaptačných činiteľov.

Prototypový výskumný objekt Katedry drevených stavieb TU vo Zvolene	Požadovaná hodnota $R'_w$ v dB						
	$L_{Aeq,2m}$ v nočnom čase						
	< 40	> 40	> 45	> 50	> 55	> 60	> 60
		≤ 45	≤ 50	≤ 55	≤ 60	≤ 65	≤ 70
Minimálna hodnota stanovená normou	30	30	30	<b>33</b>	38	43	46
Nameraná hodnota $R'_{45^{\circ}, w}$	$R'_{45^{\circ}, w}(C; Ctr) = 38 (-2; -4)$ dB						
Adaptačný činiteľ pre hluk z dopravy $/R_{traffic}/$	$C_{tr50-5000} = -5$ dB /33 dB/						
Výsledok porovnania podľa normy	Vyhovuje pri ekvivalentnej hladine A zvuku vonkajšieho prostredia do 55 dB						

### 3 Záver

Cieľom práce bolo experimentálne meranie vzduchovej nepriezvučnosti vybranej referenčnej steny obvodového plášťa prototypového objektu KDS priamo na stavbe. Výsledky merania vzduchovej nepriezvučnosti ukázali, že aj po započítaní potrebných adaptačných činiteľov, najmä  $R'_w + C_{tr50-5000}$  ( $R_{traffic}$  – novo navrhovaný a odporúčaný jednočíselný parameter pre

ľahké stavebné konštrukcie kvôli nízkym frekvenciám) a porovnaním s minimálnymi hodnotami  $R'_{w,n}$  podľa normy STN 73 0532:

- a) bola splnená normovaná požiadavka podľa Tabuľky 1 v dennom/večernom čase, ak ekvivalentná hladina A zvuku neprekračuje 65 dB z vonkajšieho prostredia 2 m pred fasádou stavby,
- b) bola splnená normovaná požiadavka podľa Tabuľky 2 v nočnom čase, ak ekvivalentná hladina A zvuku neprekračuje 55 dB z vonkajšieho prostredia 2 m pred fasádou stavby.

Najslabším miestom pre vznik zvukových mostov bol v čase merania provizórne zadenbený otvor pre osadenie okna. Stavba nebola ešte v stave úplne finálneho dokončenia a vytvára sa tak priestor na ďalšie experimentálne merania a porovnania výsledkov, ako aj postupná tvorba ucelenej metodiky merania akustických vlastností budov v oblasti „Akustika drevených stavieb“, pri ďalšej zmene uskutočnenej do konštrukcie aj samotnej obvodovej steny.

## Podakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu VEGA 1/0714/21 "Výskum vybraných vlastností trvalo udržateľných izolačných materiálov s potenciálom využitia v drevostavbách" riešeného na DF TU vo Zvolene. Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Progresívny výskum úžitkových vlastností materiálov a výrobkov na báze dreva (LignoPro), kód ITMS: 313011T720, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Literatúra

ČULÍK, Martin a Anna DANIHELOVÁ. *Fyzikálna analýza budov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2019. ISBN 978-80-228-3170-3.

DRAHOŠ Richard, Milan DRAHOŠ. Predikcia vzduchovej nepriezvučnosti obvodových plášťov v štádiu projektovej prípravy budov na bývanie. *Nové trendy akustického spektra: vedecký recenzovaný zborník*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2021, 67-81. ISBN 978-80-228-3267-0.

CHMELÍK, Vojtech, Monika RYCHTÁRIKOVÁ, Herbert MÜLLNER, Kristian JAMBROŠIĆ, Lukáš ZELEM, Jakub BENKLEWSKI a Christ GLORIEUX. Methodology for development of airborne sound insulation descriptor valid for light-weight and masonry walls. *Applied Acoustics*. 2020, (160). ISSN 0003-682X.

*Prototypový výskumný objekt* [Online]. 2023. Katedra drevených stavieb, Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, Slovensko. [cit. 2023-10-02]. Dostupné na internete: <https://kds.tuzvo.sk/sk/prototypovy-vyskumny-objekt>

*Product Data: Sound Source and Impact Sound Source for Building Acoustics: Omnipower Sound Source Type 4292- L, Tapping Machine Type 3207 and Power Amplifiers Type 2734-A and 2734-B* [Online]. 2023. HOTTINGER BRÜEL & KJÆR A/S, Virum, Denmark. [cit. 2023-03-31]. Dostupné na internete: <https://www.bksv.com/media/doc/bp1689.pdf>

RYCHTÁRIKOVÁ, Monika, Vojtech CHMELÍK a Daniel URBÁN. *Akustika : stavebná a priestorová*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Eurostav, 2019. 236 s. ISBN 978-80-89228-62-1.

STN EN ISO 12354-3: 2018 *Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z vlastností stavebných prvkov. Časť 3: Vzduchová nepriezvučnosť voči vonkajšiemu zvuku* (ISO 12354-3: 2017)

STN EN ISO 16283-3: 2016. *Akustika. Meranie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií v budovách. Časť 3: Zvukovoizolačné vlastnosti obvodových plášťov* (ISO 16283-3: 2016)

STN EN ISO 717-1. *Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť* (ISO 717-1: 2020)

STN 73 0532: 2013. *Akustika. Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky*

SCHOLL Werner, Judith LANG, Volker WITTSTOCK. Revision of ISO 717: Future single-number quantities for sound insulation in buildings. In *International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013. Merano/Meran*. pp. 1805-1808. ISBN 978-3-939296-05-8.

ŠTEFKO, Jozef, Alena ROHANOVÁ, Dominika BÚRYOVÁ, Roman SOYKA, Stanislav JOCHIM, Pavol SEDLÁK, Martin ČULÍK a Rozália VAŇOVÁ. *Drevené stavebné konštrukcie: vysokoškolská učebnica*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2021. ISBN 978-80-228-3205-2.

ŠTOMPF, Patrik, Stanislav JOCHIM a Róbert UHRÍN. Prototypový výskumný objekt Katedry drevených stavieb Technickej univerzity vo Zvolene. *Nové trendy akustického spektra: vedecký recenzovaný zborník*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2022, 103-123. ISBN 978-80-228-3325-7.

## Summary

### **Façade Sound Insulation of the Wooden Constructions Prototype Research Object.**

Department of Wooden Constructions (TU in Zvolen, Slovakia) has a prototype wooden constructions for experimental purposes. The prototype research object serves for the demonstration of prototype compositions, measurement, and demonstration of the results of measurements of thermal and energy, as well as sound insulation in buildings for low-energy green buildings based on wood. The field measurements of the Façade sound insulation parameters in buildings and of building elements are carried out according to the currently valid standard ISO 16283-3: 2016.

The results of the façade sound insulation measurement in prototype wooden constructions showed that even after considering the required spectrum adaptation terms ( $R_{\text{traffic}} = 33$  dB) and comparing with the minimum values of  $R'_{w, n}$  (Weighted apparent sound reduction index according to the standard):

- a) the standardized requirement has been met during the day/evening time, if the equivalent sound level A does not exceed 65 dB from the external environment 2 m in front of the facade of the building,
- b) the standardized requirement has been met at night if the equivalent sound level A does not exceed 55 dB from the external environment 2 m in front of the facade of the building.

The building was not yet in a state of complete final completion, and time is being created for further experimental measurements and comparisons of results in the case of further changes made to the construction of the exterior wall.

## Keywords

Wooden constructions; Acoustics; Airborne sound insulation; Apparent sound reduction index.

## Contact Address

Martin Čulík

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24

960 01 Zvolen, Slovak Republic

culik@acoustics.sk

<https://www.tuzvo.sk/martin-culik>

<https://www.acoustics.sk>

Michal Hrčka

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24

960 01 Zvolen, Slovak Republic

xhrcka@is.tuzvo.sk

Anna Danihelová

Department of Physics, Electrical Engineering and Applied Mechanics (KFEAM)

Faculty of Wood Science and Technology

Technical University in Zvolen

T.G. Masaryka 24

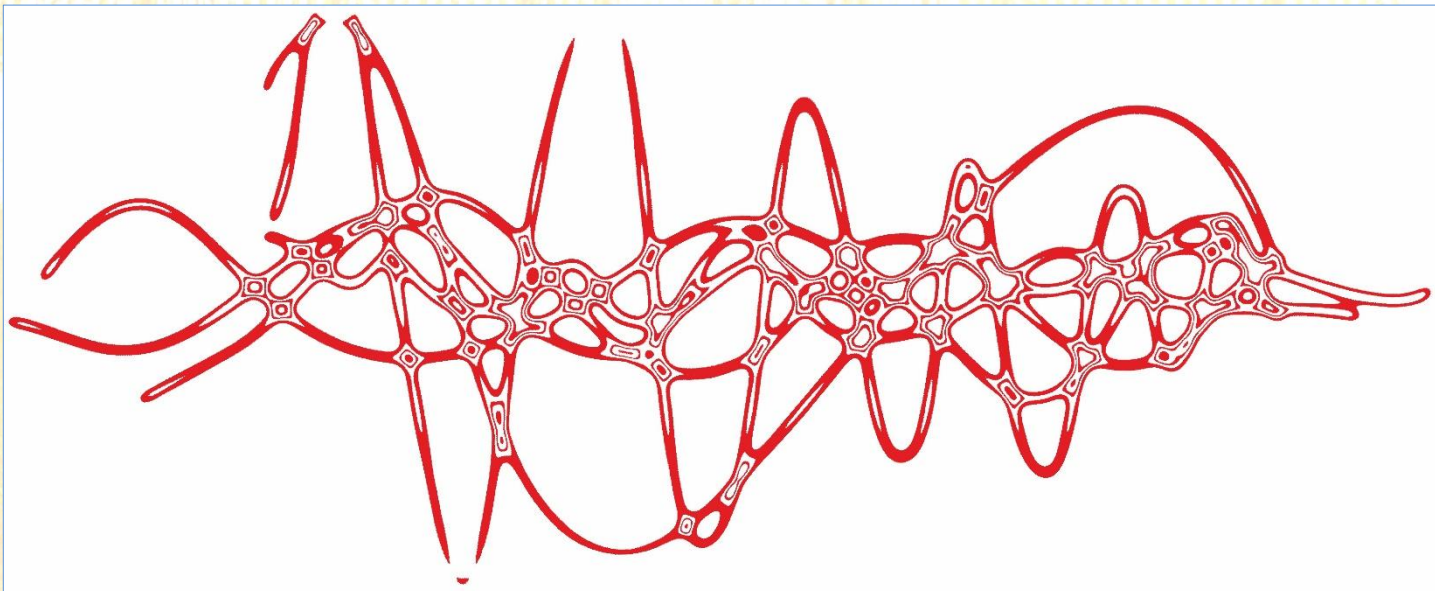
960 01 Zvolen, Slovak Republic

Tel. +421455206465

danihelova@acoustics.sk

<http://www.acoustics.sk>





# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## POROVNANIE DEKLAROVANÝCH A NAMERANÝCH HODNÔT HLUKU PRI BRÚSENÍ DREVA ELEKTRICKÝM RUČNÝM NÁRADÍM

Miroslav Dado, Marián Schwarz, Richard Jankovič

### 1 Úvod

Ručná elektrická brúska je často používaným nástrojom pri obrábaní dreva a predstavuje významný zdroj rizika z pohľadu prašnosti, vibrácií a v neposlednom rade aj hluku. Zamestnávateľ, ktorý používa alebo prevádzkuje zariadenia, ktoré sú zdrojom hluku, je povinný zabezpečiť v súlade s paragrafom 32 zákona č. 355/2007 Z. z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov technické, organizačné a iné opatrenia, ktoré vylúčia alebo znížia na najnižšiu možnú a dosiahnuteľnú mieru expozíciu zamestnancov hluku a zabezpečia ochranu zdravia a bezpečnosti zamestnancov. Pri plnení povinností ustanovených vo vyššie uvedenom prepise zamestnávateľ posúdi úroveň hluku, ktorému sú zamestnanci exponovaní, a ak je to potrebné, zabezpečí meranie hladiny hluku. Informácie o emisiách hluku – deklarované hodnoty emisie hluku, ktoré uvádzajú výrobcovia strojového zariadenia sú jedným z aspektov, na ktoré zamestnávateľ prihliada pri posudzovaní rizík z expozície hluku. V závislosti od jeho potrieb a informácii o hladinách emisie hluku zariadenia musí zamestnávateľ/používateľ zvoliť a vybrať zariadenie s najnižšou emisiou hluku so zreteľom na limitné a akčné hodnoty stanovené v nariadení vlády Slovenskej republiky č. 115/2006 Z. z. o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku v znení neskorších predpisov.

Skúšobný predpis a požiadavky na meranie emisií hluku ručných elektrických brúsok (iných ako kotúčových) je uvedený v normách:

- STN EN 62841-1 Elektrické ručné náradie, prenosné náradie a strojové zariadenia pre trávnik a záhradu. Bezpečnosť. Časť 1: Všeobecné požiadavky,
- STN EN 62841-2-4 Elektrické ručné náradie, prenosné náradie a strojové zariadenia pre trávnik a záhradu. Bezpečnosť. Časť 2-4: Osobitné požiadavky na ručné brúsky a leštičky iné ako kotúčové.

Účelom vyhlásenia výrobcu strojového zariadenia o emisiách hluku je poskytnúť informácie užitočné pre posudzovanie rizík súvisiacich s expozíciou hluku a pomáhať používateľom pri výbere strojového zariadenia s redukovanými emisiami hluku. V tejto súvislosti je však potrebné si uvedomiť, že úroveň expozície hluku sa nedá jednoducho odvodiť z vyhlásenia o emisiách hluku, pretože na expozíciu hluku obsluhy strojového zariadenia vplývajú aj iné faktory. Vystavenie osôb pôsobeniu hluku zo strojových zariadení závisí od takých faktorov, ako je napríklad inštalácia strojového zariadenia, podmienky používania strojového zariadenia, charakteristiky pracoviska (napríklad pohlcovanie hluku, rozptyl hluku, odraz hluku), emisie hluku z iných zdrojov (napríklad z iných strojových zariadení), poloha osôb vzhľadom na zdroje hluku, doba trvania vystavenia pôsobeniu hluku a používanie chráničov sluchu (EK, 2009). Brereton a Patel (2016) dávajú do pozornosti skutočnosť, že deklarované hodnoty emisie hluku získané v súlade s harmonizovaným skúšobným postupom nemusia za každých okolností poskytovať dôveryhodnú indikáciu skutočného rizika expozície hluku pri typickom používaní strojového zariadenia. Ako príklad uvádzajú hodnoty emisie hluku pre ručné elektrické brúsky na drevo, ktoré boli omnoho nižšie ako hodnoty namerané na mieste obsluhy počas reálneho

používania. K podobným zisteniam dospela aj Shanks (2007), ktorá porovnaním medzi deklarovanými hodnotami a nameranými hodnotami v reálnej prevádzke zistila priemerný rozdiel takmer 9 dB.

Cieľom príspevku je na základe výsledkov experimentálnych meraní zistiť rozdiel medzi hodnotami, ktoré deklarujú výrobcovia ručných elektrických brúsok a nameranými hodnotami hluku pri ich reálnom používaní.

## 2 Materiál a metódy

### 2.1 Použité ručné elektrické náradie

Pri meraní hluku boli použité rôzne typy ručných elektrických brúsok od firmy Robert Bosch Power Tools GmbH, ktorých technické parametre sú uvedené v Tabuľke 1. Deklarované hodnoty emisie hluku sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 1. Technické parametre ručných elektrických brúsok.

Brúska	Označenie brúsky	Typ brúsky	Menovitý príkon (W)	Výstupný výkon (W)	Hmotnosť (kg)
A	GBS 75 AE	pásová	750	410	3,4
B	PBS 75 A	pásová	710	350	3,2
C	GEX 125-1 AE	excentrická	250	-	1,3
D	PEX 300 AE	excentrická	270	-	1,5
E	GSS 23A	vibračná	190	-	1,7

Tabuľka 2. Technické parametre ručných elektrických brúsok.

Brúska	Hladina akustického výkonu $L_{WA}$ (dB)	Neistota $K_{WA}$ (-)	Hladina akustického tlaku $L_{pA}$ (dB)	Neistota $K_{pA}$ (-)
A	96	3	85	3
B	104	3	93	3
C	88	3	77	3
D	96	3	85	3
E	91	3	80	3

### 2.2 Použitý merací prístroj

Meranie hluku bolo realizované integrujúcim priemerujúcim zvukomerom (B&K, model 2245), ktorý vrátane prepolarizovaného kondenzátorového mikrofónu (B&K, typ 4966) spĺňa požiadavky normy IEC 61672-1:2013 pre presnosť triedy 1. Kalibrácia meracieho prístroja bola verifikovaná pred každou sériou a po každej sérii meraní pomocou akustického kalibrátora (B&K, model 4231). Spracovanie nameraných údajov bolo realizované prostredníctvom softvérovej aplikácie (B&K, Noise Work Partner, verzia 1.6.3.0).

### 2.3 Postup pri meraní

Meranie ekvivalentnej hladiny akustického tlaku bolo realizované pri brúsení skúšobných vzoriek bukového a smrekového dreva s rozmermi 500 mm (dĺžka) x 250 mm (šírka) x 50 mm (hrúbka) a vlhkosťou 10%, ktorá bola zisťovaná hrotovým digitálnym vlhkomerom (Testo, model 606-2). Skúšobné vzorky boli pri brúsení upnuté pomocou flexibilných čelustí na pracovnom stole (Bosch, model PWB 600). Pri brúsení boli použité brúsne prostriedky s hrubou (P60), strednou (P120) a jemnou (P240) zrnitosťou.

Mikrofón zvukomeru bol umiestnený na statíve vo vzdialenosti 0,2 m od vyústenia zvukovodu vonkajšieho ucha obsluhy brúsky. Bol orientovaný v línii očí rovnobežnej so zornou osou

obsluhy a na strane s väčšou expozíciou hluku. Mikrofón zvukomeru bol opatrený krytom proti vetru – automatická korekcia na kryt vo zvukomere bola zapnutá.

Merací časový interval 3 minúty bol odvodený od času potrebného na prebrúsenie skúšobnej vzorky za nasledovných prevádzkových podmienok: chod brúsky naprázdno (15 sekúnd), brúska pri plnom zaťažení (165 sekúnd). Pre každú kombináciu faktorov bolo zrealizovaných 5 meraní. Celkový počet meraní bol 150. Rozdiel medzi nameranými hladinami akustického tlaku v mikrofónnej pozícii pri prevádzke a mimo prevádzky brúsky (hluk pozadia) bol vyšší ako 15 dB.

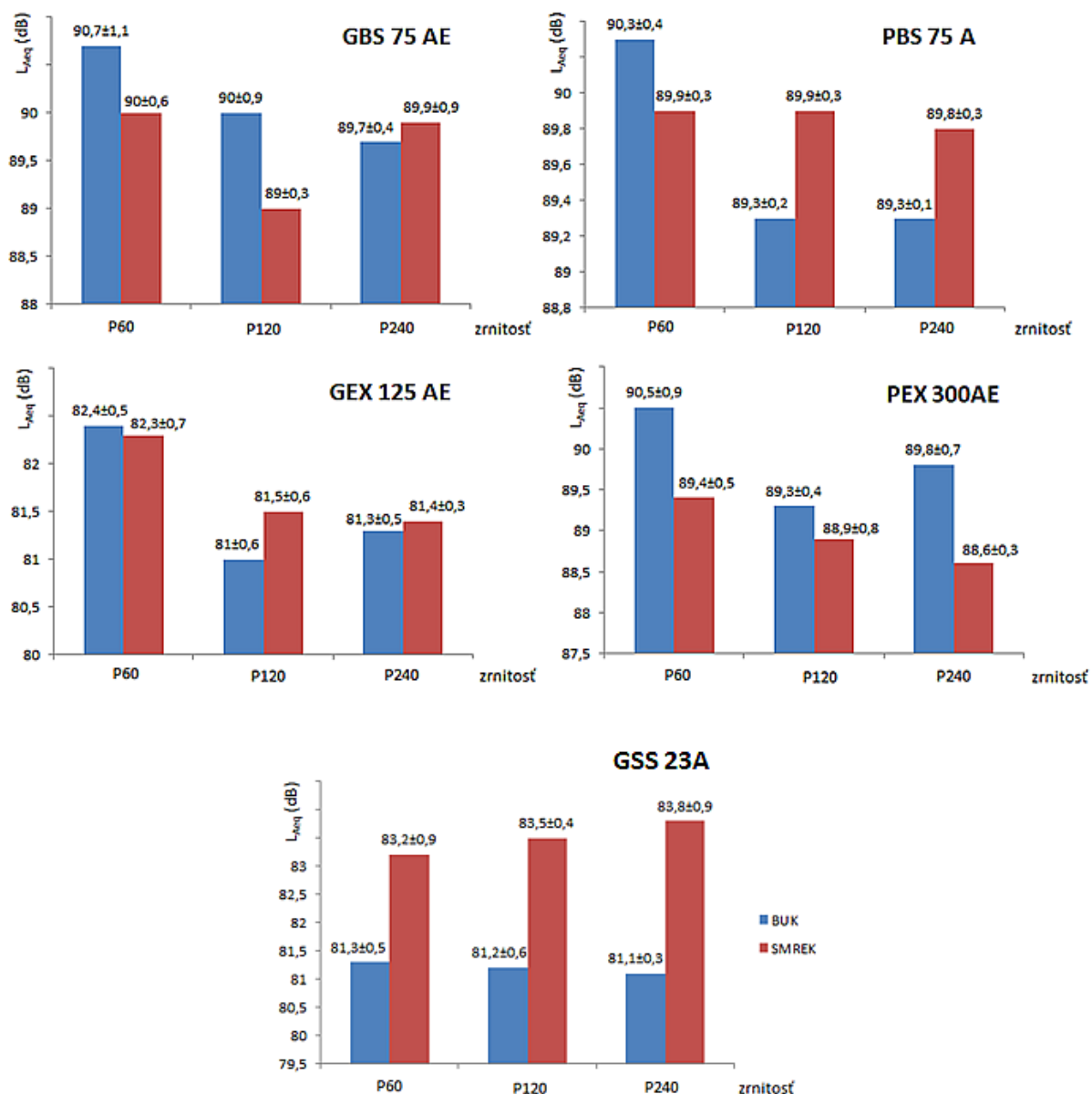
Súčasťou merania bolo aj monitorovanie mikroklimatických podmienok (teplota a vlhkosť vzduchu) pomocou multifunkčného meracieho prístroja (Testo, model 480). Teplota v skúšobnej miestnosti počas experimentu dosahovala relatívne konštantnú úroveň hodnôt v rozsahu 20 až 21 °C pri vlhkosti 36 až 37 %.



**Obrázok 1.** Usporiadanie pri experimentálnom meraní.

### 3 Výsledky

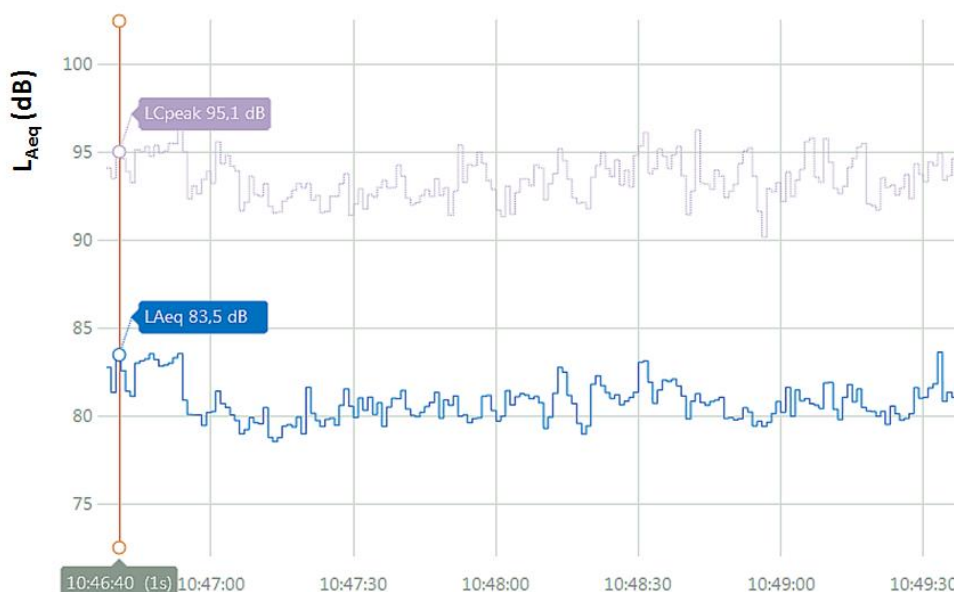
Namerané priemerné hodnoty ekvivalentnej hladiny akustického tlaku pre jednotlivé typy ručných elektrických brúsok sú uvedené na Obrázku 2.



**Obrázok 2.** Hodnoty ekvivalentnej hladiny akustického tlaku (aritmetický priemer ± smerodajná odchýlka) pri brúsení jednotlivými brúskami.

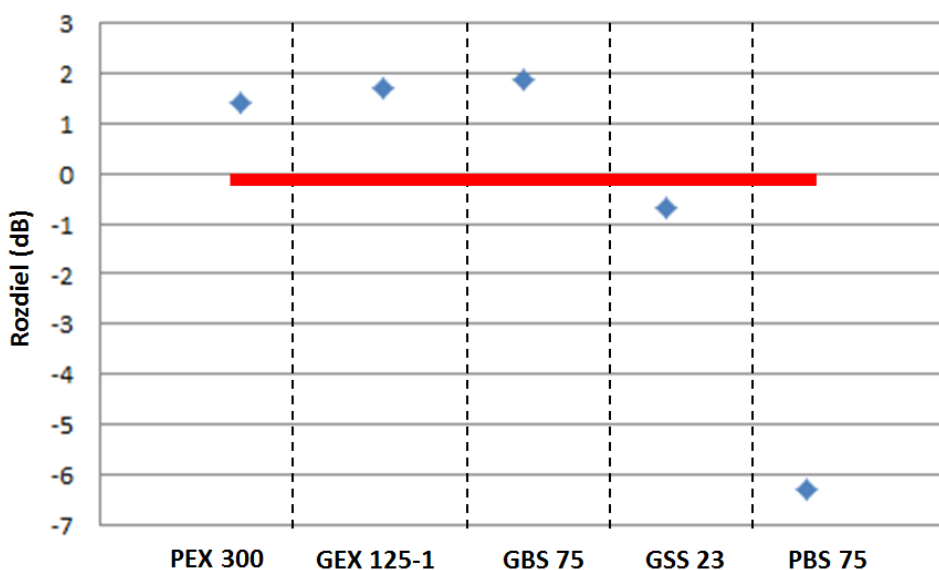
Na základe dosiahnutých výsledkov merania je možné dôvodne predpokladať, že vo všeobecnosti druh dreveniny ani zrinitosť brúsneho prostriedku nemajú vplyv na veľkosť emisnej hladiny akustického tlaku v mieste obsluhy brúsky.

Analýzou časových priebehov ekvivalentnej hladiny akustického tlaku bolo zistené, že vo viacerých prípadoch boli namerané hodnoty hluku vyššie pri chode brúsky naprázdno ako pri samotnom brúsení (viď Obrázok 3).



Obrázok 3. Časový priebeh ekvivalentnej hladiny akustického tlaku pri brúsení brúskou GEX 125-1 AE.

Na Obrázku 4 je znázornený rozdiel medzi nameranými hodnotami hluku a výrobcom deklarovanými hodnotami hluku so zohľadnením neistoty merania. Hodnota väčšia ako nula znamená, že deklarovaná hodnota môže viesť k nedostatočnej ochrane v porovnaní s hodnotami hluku nameranými pri reálnom používaní brúsky.



Obrázok 4. Rozdiely medzi nameranými hodnotami hluku a výrobcom deklarovanými hodnotami hluku pre jednotlivé brúsky.

## 4 Diskusia a záver

Imisné hladiny akustického tlaku na pracovnom mieste sú všeobecne vyššie než emisné hladiny akustického tlaku v tom istom pracovnom mieste uvedené v deklarácií emisie hluku, a to v dôsledku odrazov od stien, príspevkov od iných zdrojov zvuku a prevádzkových podmienok odlišných od tých, ktoré sa uvádzajú v deklarácií o hluku (ISO 11690-1, 2020).

Porovnaním nameraných a deklarováných hodnôt hluku boli pri jednotlivých typoch brúsok zistené rozdiely v rozsahu od -3,3 dB do 4,9 dB. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že v 60-tich percentách prípadov použitie deklarováných hodnôt emisií hluku pri posudzovaní rizík podhodnocuje veľkosť expozície hluku obsluhy ručnej elektrickej brúsok. Uvedené zistenie korešponduje aj s výsledkami iných autorov. Shanks (2007) porovnávala výrobcami deklarované hodnoty emisií hluku 16-tich elektrických a pneumatických brúsok s hodnotami hluku nameranými pri ich reálnom používaní. Zistila, že namerané hodnoty hluku boli v priemere o 8,7 dB vyššie ako deklarované hodnoty hluku v rozsahu od -0,6 dB do 23,7 dB. Patel a Brereton (2017) na vzorke 14-tich pneumatických a elektrických brúsok zistili, že namerané hodnoty hluku boli v porovnaní s deklaroványmi hodnotami v priemere o 9 dB vyššie a to v rozsahu od 3 dB do 17 dB.

Aj napriek určitým obmedzeniam (napr. počet brúsok, počet výrobcov), ktoré limitujú generalizáciu dosiahnutých experimentálnych výsledkov, predložená štúdia potvrdzuje skutočnosť, že deklarované hodnoty emisií hluku získané v súlade s harmonizovaným skúšobným postupom nemusia za každých okolností poskytovať dôveryhodnú indikáciu skutočného rizika expozície hluku pri typickom používaní strojového zariadenia.

## Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol v rámci riešenia projektu KEGA 009TU Z-4/2022.

## Literatúra

BRERETON, P. a J. PATEL, 2016. Buy Quiet as a Means of Reducing Workplace Noise. *Acoustic Australia*, Vol. 44, s. 55–65.

Európska komisia, 2009. *Právne nezáväzná príručka o osvedčených postupoch pre uplatňovanie smernice 2003/10/ES o hluku pri práci* [online]. Luxemburg: Úrad pre vydávanie publikácií Európskej únie.[cit. 2023-04-11]. ISBN 978-92-79-11350-5. Dostupné na: doi/10.2767/68671

ISO 11690-1: 2020, *Acoustics – Recommended practice for the design of low-noise workplaces containing machinery – Part 1: Noise control strategies*.

Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 115/2006 Z. z. o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku v znení neskorších predpisov

PATEL, J. a P. BRERETON, 2016. *A critical review of the the standard methods used to determine emission sound pressure level, peak sound pressure level and sound power level as required by Machinery Directive 2006/42/EC* [online]. Buxton: Health and Safety Executive. [cit. 2023-06-11]. **Dostupné na:** <https://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr1116.pdf>

SHANKS, E., 2007. *Correlation of noise emission of sanders and polishers with in use noise levels* [online]. Buxton: Health and Safety Executive. [cit. 2023-04-12]. **Dostupné na:** [https://www.hse.gov.uk/research/hsl\\_pdf/2007/hsl0743.pdf](https://www.hse.gov.uk/research/hsl_pdf/2007/hsl0743.pdf)

Zákon č. 355/2007 Z. z. o ochrane, podpore a rozvoji verejného zdravia a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov

## Summary

**Comparison of Declared and Measured Noise Values when Sanding Wood with Power Hand Tools.** The hand-held power sander is a frequently used tool in woodworking and it is a significant source of risk in terms of dust, vibration and, not least, noise. The purpose of the hand-held power sander manufacturer's noise emission statement is to provide information

useful for assessing the risks associated with noise exposure and to assist users in selecting a hand-held power sander with reduced noise emissions. Declared noise emission values obtained in accordance with a harmonised test procedure may not in all circumstances give a reliable indication of the actual risk of noise exposure in typical use of a hand-held power sander. The aim of this work was to investigate the difference between the values declared by manufacturers of hand-held power sanders and the measured noise values in actual use. The measurement of the equivalent sound pressure level was carried out by integrating-averaging sound level meter (B&K, model 2245) during the sanding of beech and spruce wood with different types of hand-held electric sanders (belt, random orbital, orbital) with abrasives of coarse, medium and fine grit. By comparing the measured and declared noise values, differences ranging from -3,3 dB to 4,9 dB were found for the different types of sanders. The results of the study show that the use of declared noise emission values in risk assessment underestimates the magnitude of operator noise exposure.

### **Keywords**

Noise; sanding; wood.

### **Kontaktné adresy**

Miroslav Dado

Katedra výrobných technológií a manažmentu kvality (KVTMKv)

Fakulta techniky

Technická univerzita vo Zvolene

Študentská 26

960 01 Zvolen, Slovenská republika

Tel. +421455206864

dado@tuzvo.sk

Marián Schwarz

Katedra environmentálneho inžinierstva (KEI)

Fakulta ekológie a environmentalistiky

Technická univerzita vo Zvolene

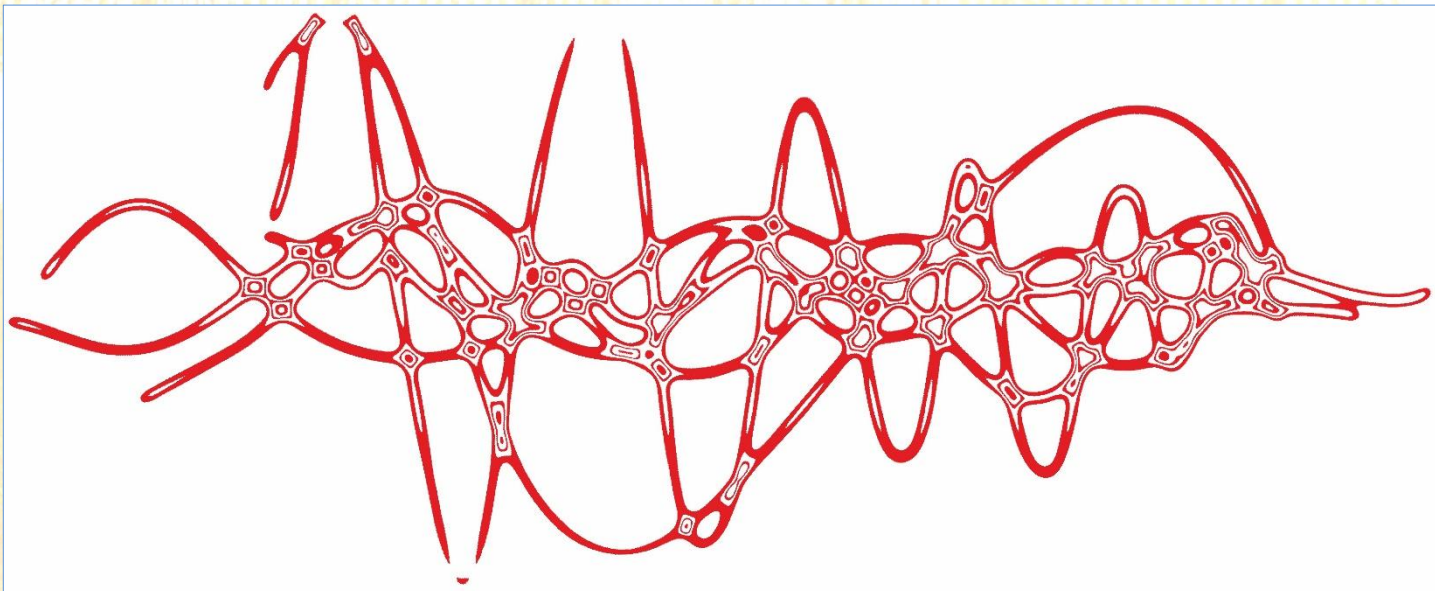
T.G. Masaryka 24

960 01 Zvolen, Slovenská republika

Tel. +421455206655

schwarz@tuzvo.sk





# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## NEISTOTA MERANIA STAVEBNEJ VZDUCHOVEJ NEPRIEZVUČNOSTI MEDZI MIESTNOSŤAMI

Milan Drahoš, Richard Drahoš

### 1 Úvod

Pojem neistoty bol do metrologickej praxe zavedený ako výsledok medzinárodnej konvencie [1] za účelom jednotného vyjadrovania výsledkov akýchkoľvek meraní z ľubovoľného laboratória. Informácia o neistote výsledkov merania sa vyžaduje, ak je dôležitá pre platnosť alebo ak neistota ovplyvňuje posudzovanie zhody výsledkov so špecifikovanou medzou [2] ustanovenou v právnych predpisoch alebo v technických normách. Pri stanovení neistôt meraní sa vychádza z teórie pravdepodobnosti, z matematickej štatistiky a zo zákona šírenia neistôt [3].

Neistotu daného modelu merania spôsobujú identifikovateľné a kvantifikovateľné zdroje chýb (systémové chyby), ako aj náhodné chyby, ktoré ovplyvňujú výsledok merania, preto výsledok merania je len odhadom (pravej, skutočnej) hodnoty meranej veličiny. Základnou (kvantitatívnu) charakteristikou neistoty je štandardná neistota  $u$ , ktorá vymedzuje rozsah hodnôt intervalom  $(-u, +u)$  okolo hodnoty udávanej priamym meraním alebo nepriamym meraním (výpočtom).

Pod modelom merania sa rozumie súhrn vzťahov (rovníc) medzi vstupnými a výstupnými veličinami daného merania [3]. Do výstupných veličín sa zahrňujú veličiny, ktorých hodnoty tvoria výsledok merania a do vstupných veličín merania patria: priamo merané veličiny, významne ovplyvňujúce veličiny, všetky ostatné veličiny potrebné na stanovenie výsledku, prevzaté z rôznych podkladov, ako napr. fyzikálne konštanty a podobne.

Akustické vlastnosti stavebných prvkov a stavebných konštrukcií, prenášať zvuk medzi miestnosťami v budovách, vyjadruje vzduchová nepriezvučnosť. Samotný prenos zvuku stavebnými prvkami medzi susediacimi miestnosťami, charakterizuje: priamy prenos vzduchom (iba zvukom dopadajúcim na stavebný prvok), nepriamy prenos vzduchom (cez vzduchové prenosové cesty ako chodby a pod.) a bočný prenos (cez konštrukčné a vibračné cesty) [4].

Pri meraní vzduchovej nepriezvučnosti stavebných prvkov medzi susediacimi miestnosťami (stien, stropov a dverí) v budovách sa postupuje podľa normy STN EN ISO 16283-1 [5]. Pri meraní „in situ“, akustické vlastnosti stavebných prvkov, vyjadruje hodnota stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  v tretinovo-oktávových pásmach, spravidla vo frekvenčnom rozsahu od 100 Hz do 3 125 Hz (zvukovoizolačnej oblasti).

### 2 Zákon šírenia neistôt

Pod zákonom šírenia neistôt [3] sa rozumie vzťah, podľa ktorého sa prenášajú štandardné neistoty vstupných veličín modelu merania na veličiny výstupné. V prípade jednej výstupnej veličiny  $Y$  a modelu merania, ktorý je definovaný vzťahom

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_k, \dots, X_m) = f(X) \quad (1)$$

sa prenášajú štandardné neistoty vstupných veličín  $u(x_j)$ ,  $u(x_k)$  na neistotu výstupnej veličiny  $u(y)$  podľa vzťahu

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^m c_j^2 \cdot u(x_j)^2 + 2 \sum_{j=2, k, j}^m c_j \cdot c_k \cdot u(x_j) \cdot u(x_k) \cdot r_{j,k} \quad (2)$$

kde  $c_j$ ,  $c_k$  sú citlivostné (prevodové) koeficienty, pre ktoré platí

$$c_j = \frac{\partial f(X)}{\partial X_j} \quad c_k = \frac{\partial f(X)}{\partial X_k} \quad (3)$$

$r_{j,k}$  – korelačný koeficient, ktorý ohodnocuje stochastickú závislosť (koreláciu) veličín  $X_j$  a  $X_k$  považovaných za náhodné veličiny.

Tento vzťah sa označuje ako všeobecný alebo kovariančný zákon šírenia neistôt. Ak vstupné veličiny nie sú korelované, alebo hodnoty korelačných koeficientov sú blízke nule, získa sa klasický, tzv. Gaussov zákon šírenia neistôt

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^m c_j^2 \cdot u(x_j)^2 \quad (4)$$

### 3 Štandardná a kombinovaná štandardná neistota

Štandardné neistoty daného modelu merania sa podľa spôsobu ich vyhodnotenia členia na:

- štandardné neistoty typu A ( $u_A$ ) získané z opakovaných meraní hodnoty tej istej veličiny alebo zo štatistickej analýzy série nameraných hodnôt (výsledkov merania); neistoty typu A sú charakterizované výberovým rozptylom  $s_i^2$  alebo výberovou smerodajnou odchýlkou  $s_i$  a počtom stupňov voľnosti  $n_i$ ,
- štandardné neistoty typu B ( $u_B$ ) pochádzajú z rôznych zdrojov a zlučujú sa do výslednej štandardnej neistoty typu B; neistoty typu B sú charakterizované príslušným rozptylom  $u_j^2$  alebo smerodajnou odchýlkou  $u_j$ ; ak je medzi komponentmi vzájomná korelácia, zahrnie sa do výpočtu kovariancia.

Ekvivalencia ohodnocovania neistôt typu A a typu B umožňuje zlúčiť všetky štandardné neistoty (typu A a typu B) do jednej hodnoty - kombinovanej štandardnej neistoty

$$u_C^2 = u_A^2 + u_B^2 \quad (5)$$

Aby sa zvýšila pravdepodobnosť, s akou sa nachádza skutočná hodnota v určitom intervale, zaviedol sa pojem rozšírená neistota  $U$ . Hodnota rozšírenej neistoty  $U$  sa stanoví z kombinovanej štandardnej neistoty modelu merania  $u_C$  jej vynásobením koeficientom pokrytia (rozšírenia)  $k$ . Ak sa predpokladá normálne rozloženie výsledku merania, volí sa  $k$  ako kvantil normovaného normálneho rozdelenia  $k = 2$  (pravdepodobnosť pokrytia cca 96 %).

Priradenie hodnoty rozšírenej neistoty  $U$  k výsledku merania umožňuje porovnať výsledky meraní medzi rôznymi laboratóriami alebo konštatovať *prípustný stav* (súlad, neprekročenie) alebo *nepripustný stav* (nesúlad, prekročenie) špecifikovaných požiadaviek v právnych predpisoch alebo v technických normách.

### 4 Model merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti

Model merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  je daný vzťahom

$$R' = (L_1 - L_2) + 10 \log \left( \frac{S \cdot T_2}{0,16 \cdot V_2} \right) \quad (6)$$

kde:

$L_1$  je energeticky priemerná hladina akustického tlaku vo vysielacej miestnosti,

$L_2$  je energeticky priemerná hladina akustického tlaku v prijímacej miestnosti,

$S$  je plocha deliaceho prvku v  $m^2$ ,

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

$T_2$  je priemerný čas dozvuku v prijímacej miestnosti v sekundách.

Na meranie stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti stavebných konštrukcií medzi susediacimi miestnosťami v budovách, je v norme [5] stanovený rad podmienok. Okrem požiadavky na zdroje ustáleného širokopásmového zvuku (bieleho šumu) vo vysielacej miestnosti a na počet polôh mikrofónov vo vysielacej a v prijímacej miestnosti, rozhodujúcou podmienkou je vytvorenie difúzneho zvukového poľa v oboch miestnostiach.

## 5 Neistota merania

Zo vzťahu (1) vyplýva, že model merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  predstavuje nepriame meranie výstupnej veličiny z viacerých vstupných veličín, kde štandardné neistoty vstupných veličín  $u(L_1)$ ,  $u(L_2)$ ,  $u(S)$ ,  $u(V_2)$  a  $u(T_2)$  sa prenášajú na neistotu výstupnej veličiny  $u(R')$ .

Za predpokladu, že medzi vstupnými veličinami nie je korelácia, potom pre kombinovanú štandardnú neistotu  $u(R')$  platí vzťah

$$u(R') = \sqrt{u^2(L_1) + u^2(L_2) + u_B^2(S) + u_B^2(V_2) + u_A^2(T_2)} \quad (7)$$

kde

$$u(L_1) = \sqrt{u_A^2(L_1) + u_B^2(z_1)} \quad (8)$$

$$u(L_2) = \sqrt{u_A^2(L_2) + u_B^2(z_2)} \quad (9)$$

$u_A(L_1)$  je štandardná neistota odhadu hladín akustického tlaku vo vysielacej miestnosti, vyhodnotená metódou A,

$u_B(z_1)$  je zlúčená štandardná neistota ovplyvnená vlastnosťami zvukomera vo vysielacej miestnosti, vyhodnotená metódou B,

$u_A(L_2)$  je štandardná neistota odhadu hladín akustického tlaku v prijímacej miestnosti, vyhodnotená metódou A,

$u_B(z_2)$  je zlúčená štandardná neistota ovplyvnená vlastnosťami zvukomera v prijímacej miestnosti, vyhodnotená metódou B,

$u_B(S)$  je štandardná neistota stanovenia plochy deliaceho prvku (konštrukcie), vyhodnotená metódou B,

$u_B(V_2)$  je štandardná neistota stanovenia objemu prijímacej miestnosti, vyhodnotená metódou B,

$u_A(T_2)$  je štandardná neistota odhadu času dozvuku v prijímacej miestnosti, vyhodnotená metódou A.

### 5.1 Neistoty vyhodnotené metódou A

Odhad energeticky priemernej hodnoty hladiny akustického tlaku vo vysielacej a v prijímacej miestnosti pre každé tretinovooktávové pásmo pri požadovanom počte polôh mikrofónu ( $n \geq 10$ ) je daný vzťahom

$$\bar{L} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{0,1L_j} \right) \quad (10)$$

a štandardná neistota tohto odhadu

$$u_A(L) = \frac{s(L_j)}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

kde  $s(L_j)$  je smerodajná odchýlka z  $n$ -nameraných hodnôt hladín akustického tlaku,  $n$  je celkový počet nameraných hodnôt hladín akustického tlaku.

Odhad priemerného času dozvuku v prijímacej miestnosti pre každé tretinovooktávové pásmo pri požadovanom počte polôh mikrofónu ( $m \geq 6$ ) je daný vzťahom

$$\bar{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i \quad (12)$$

a štandardná neistota tohto odhadu

$$u_A(T) = \frac{s(T_i)}{\sqrt{m}} \quad (13)$$

kde  $s(T_i)$  je smerodajná odchýlka z  $m$ -nameraných hodnôt času dozvuku,  $m$  je celkový počet nameraných hodnôt času dozvuku v prijímacej miestnosti.

### 5.2 Neistoty vyhodnotené metódou B

Zdroje chýb zvukomerov vplyvom prevádzkových vlastností sa delia na frekvenčne závislé a frekvenčne nezávislé. Ak sú v certifikátoch o overení, v technickej dokumentácii výrobcov a pod., uvádzané odchýlky  $\Delta_i$  daného zdroja  $Z_i$ , hodnoty rozšírenej neistoty  $U$  a koeficient rozšírenia  $k$ , potom štandardná neistota  $u_B(z_i)$

$$u_B(z_i) = \Delta_i + \frac{U}{k} \quad (14)$$

V prípade, že sú udané len tolerancie dovolených odchýlok  $\pm z_{i,\max}$  od nominálnej hodnoty daného zdroja  $Z_i$ , potom štandardná neistota  $u_B(z_i)$

$$u_B(z_i) = \frac{|z_{i,\max}|}{\chi} \quad (15)$$

kde  $\chi$  je hodnota zvolenej aproximácie rozdelenia pravdepodobnosti odchýlky v tomto intervale.

Zdroje chýb frekvenčne závislých parametrov a frekvenčne nezávislých parametrov zvukomera a spôsob stanovenia príspevkov štandardných neistôt typu B sú zhrnuté v tabuľke 1 [6].

**Tabuľka 1.** Zdroje chýb a spôsob stanovenia príspevkov štandardných neistôt typu B.

Zdroj chyby (parameter)	Označenie	Príspevok štandardnej neistoty
Frekvenčná váhová funkcia Z zvukomera	$\delta_{PFE}$	$u(\delta_{PFE})_f = \left( (\Delta_{RFE})_f + \frac{U_E}{k} \right)$ $(\Delta_{RFE})_f$ odchýlka od funkcie Z na danej frekvencii $U_E$ je neistota elektrickej kalibrácie, $k = 3$
Frekvenčná charakteristika mikrofónu	$\delta_{PFA}$	$u(\delta_{PFA})_f = \left( (\Delta_{RFA})_f + \frac{U_A}{k} \right)$ $(\Delta_{RFA})_f$ odchýlka od normovanej charakteristiky na danej frekvencii $U_A$ je neistota zvukovej kalibrácie, $k = 3$
Smerová charakteristika mikrofónu $\pm 90^\circ$ od referenčného smeru	$\delta_{PMS}$	$u(\delta_{PMS})_f = \frac{(\Delta_{MS})_f}{\sqrt{3}}$ $\Delta_{SM}$ je maximálna odchýlka od normovanej charakteristiky na danej frekvencii, $\chi = \sqrt{3}$
Linearita amplitúdovej charakteristiky zvukomera	$\delta_{LS}$	$u(\delta_{LS}) = s_L$ $s_L$ je smerodajná odchýlka linearity
Časové váženie (RMS detektor)	$\delta_{RMS}$	$u(\delta_{RMS}) = s_R$ $s_R$ je smerodajná odchýlka detektora
Časové váženie (Fast)	$\delta_{PT}$	$u(\delta_{PT}) _{Fast} = \frac{\Delta_{PT}}{\sqrt{3}}$ $\Delta_{PT}$ je maximálna odchýlka, $\chi = \sqrt{3}$
Rozlíšenie displeja	$\delta_{ES}$	$u(\delta_{ES}) = \frac{E_S}{2\sqrt{3}}$ $E_S$ je vymedzená rozlíšiteľnosť displeja
Vplyv teploty vzduchu	$\delta_{TS}$	$u(\delta_{TS}) = \frac{\alpha_M \Delta T}{\sqrt{3}}$ $\alpha_M$ je teplotný koeficient, $T_{M \pm \Delta T}$ , $\chi = \sqrt{3}$
Vplyv zmeny statického tlaku	$\delta_{PS}$	$u(\delta_{PS}) = \frac{\gamma_M \Delta P}{\sqrt{3}}$ $\gamma_M$ je tlakový koeficient, $P_{M \pm \Delta P}$ , $\chi = \sqrt{3}$

Štandardná neistota stanovenia plochy deliaceho prvku  $u_B(S)$  a objemu prijímacej miestnosti  $u_B(V_2)$  sa spravidla vyjadrujú v percentách (napr. 1 %) a prepočet na dB je podľa vzťahu

$$u(\text{dB}) = 20 \log \left( 1 + \frac{u(\%)}{100} \right) \quad (16)$$

Z analýzy zdrojov neistôt súvisiacich s procesom merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  vyplýva, že rozhodujúce čiastkové štandardné neistoty sú: štandardné neistoty odhadu hladín akustického tlaku  $u_A(L_1)$ ,  $u_A(L_2)$ , štandardná neistota odhadu času dozvuku  $u_A(T_2)$ , a zlúčená štandardná neistota zvukomera(ov)  $u_B(Z_1)$  a  $u_B(Z_2)$ .

Príklad stanovenia kombinovanej štandardnej neistoty  $u_C(R')$  a rozšírenej neistoty  $U(R')$  merania vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  medzi miestnosťami v tretinovoóktávových pásmach 100 Hz až 3 125 Hz je uvedený v tabuľke 2 [6].

Tabuľka 2. Štandardná a rozšírená neistota nerania stavebnej nepriezvučnosti  $R'$ .

$f_s$ Hz	$u_c(R')$ dB	$U(R')$ dB	$f_s$ Hz	$u_c(R')$ dB	$U(R')$ dB
100	1,052	2,1	630	0,596	1,2
125	0,849	1,7	800	0,689	1,4
160	0,746	1,5	1 000	0,791	1,6
200	1,448	2,9	1 250	0,846	1,7
250	1,149	2,3	1 600	0,789	1,6
315	0,798	1,6	2 000	0,796	1,6
400	0,696	1,4	2 500	0,646	1,3
500	0,845	1,7	3 150	0,648	1,3

## 6 Záver

Pri stanovení kombinovanej štandardnej neistoty  $u_c(R')$  merania stavebnej vzduchovej nepriezvučnosti  $R'$  medzi susediacimi miestnosťami v budovách, do bilancie zdrojov neistôt, okrem štandardných neistôt typu B, vstupujú aj štandardné neistoty typu A. Štandardné neistoty typu A sú odvodené zo "vzorkovania" hladín akustického tlaku v predpokladanom difúznom poli vo vysielačnej a prijímacej miestnosti a zo „vzorkovania“ času dozvuku v prijímacej miestnosti.

Požadované (normované) hodnoty veličín zvukovej izolácie medzi miestnosťami v stavbách na bývanie sú uvedené v norme STN 73 0532 [7], a sú vyjadrené jednočíselnými veličinami: váženou stavebnou nepriezvučnosťou  $R'_w$  alebo váženým normalizovaným rozdielom hladín  $D_{nT,w}$ . Postup stanovenia týchto jednočíselných veličín zvukovej izolácie medzi miestnosťami je uvedený v STN EN ISO 717-1 [8].

## Literatúra

- [1] *Guide to the Expressoin of Uncertainty in Measurement*, Revidované vydanie, 2004
- [2] PALEČÁR R., KUREKOVÁ E., HALAJ M.: *Meranie a metrologia pre manažérov*, STU Bratislava 2007
- [3] TPM 0051-93: *Stanovenie neistôt pri meraniach*, 1. diel, SMÚ Bratislava 1993
- [4] STN EN ISO12354-1: 2018, *Stavebná akustika. Výpočet akustických vlastností budov z akustických vlastností stavebných prvkov. Časť 1. Vzduchová nepriezvučnosť medzi miestnosťami*
- [5] STN EN ISO16283-1: 2014, *Akustika. Meranie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií v teréne. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť*
- [6] CID J.C., SOBREIRA M.S.: Uncertainty evaluation for airborne noise acoustic insulation measurements. In *19. medzinárodná akustická konferencia, Madrid 2007*
- [7] STN 73 0532: 2013 *Akustika. Hodnotenie zvukoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií. Požiadavky*
- [8] STN EN ISO 717-1: 2021, *Akustika Hodnotenie zvukovoizolačných vlastností budov a stavebných konštrukcií v teréne. Časť 1: Vzduchová nepriezvučnosť (EN ISO 717-1: 2020)*

## Summary

**Measurement Uncertainty of Airborne Sound Insulation between Rooms.** The uncertainty of any measurement model is caused by random errors, systematic errors and gross (subjective)

errors that affect the measurement result, therefore the measurement result is only an estimate of the (true, real) value of the measured quantity. The paper presents the procedure for the balance of sources of partial uncertainties of type A and B in the measurement of airborne sound insulation between rooms in residential buildings in the third-octave bands 100 Hz to 3125 Hz.

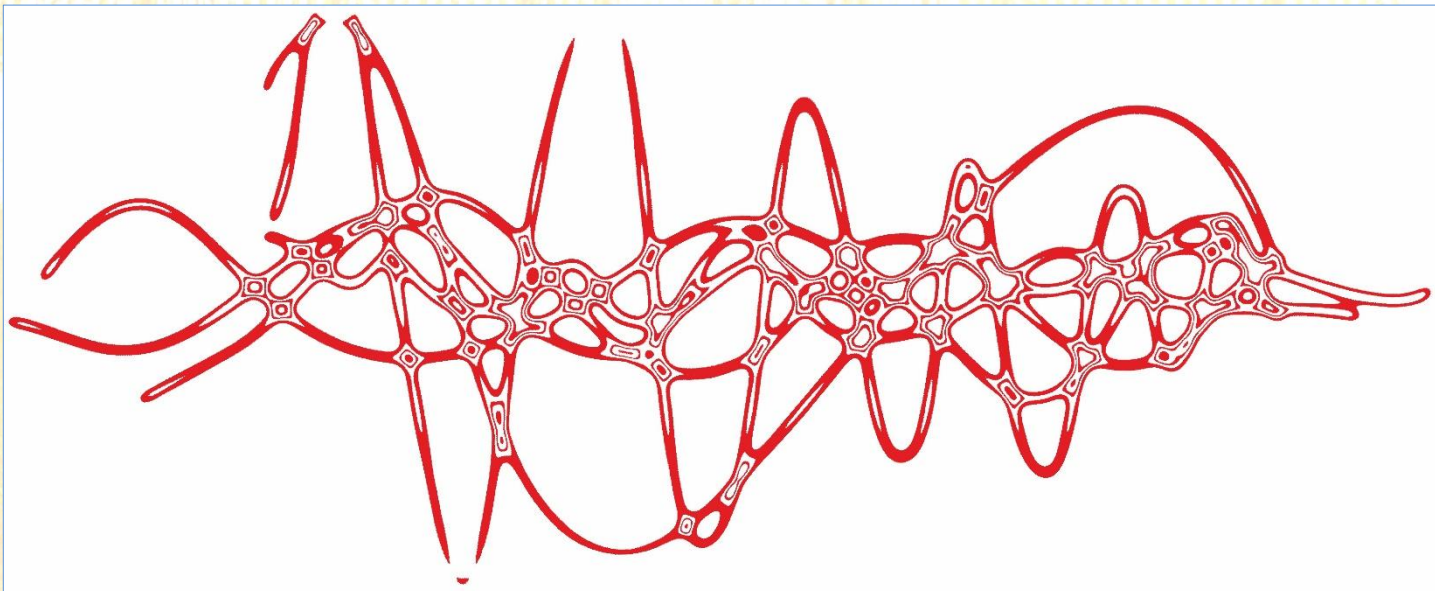
### **Keywords**

Measurement uncertainty; Noise; Airborne sound insulation; Sound insulation.

### **Kontaktné adresy**

Milan Drahoš, Richard Drahoš  
D2R engineering, s.r.o., Na letisko 42, 058 01 Poprad  
e-mail:d2r@d2r.sk  
<http://www.d2r.sk>





# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## PRÍSTUPY K POSUDZOVANIU ZHODY VÝSLEDKOV MERANÍ URČUJÚCICH VELIČÍN

Milan Drahoš, Richard Drahoš

### 1 Úvod

Každý proces merania je však zaťažený rôznymi chybami a preto výsledok merania je len odhadom pravej (skutočnej) hodnoty meranej určujúcej veličiny na opis fyzikálnych faktorov. Pri oznamovaní výsledku merania je dôležité stanoviť aj kvalitu (hodnovernosť) tohto odhadu, ktorá je vyjadrená hodnotou neistoty.

Informácia o hodnote neistoty výsledkov merania určujúcich veličín sa vyžaduje vtedy, ak je dôležitá pre platnosť výsledku merania alebo, ak ovplyvňuje posudzovanie zhody výsledkov merania so špecifikáciou stanovenou v právnych predpisoch alebo v technických normách.

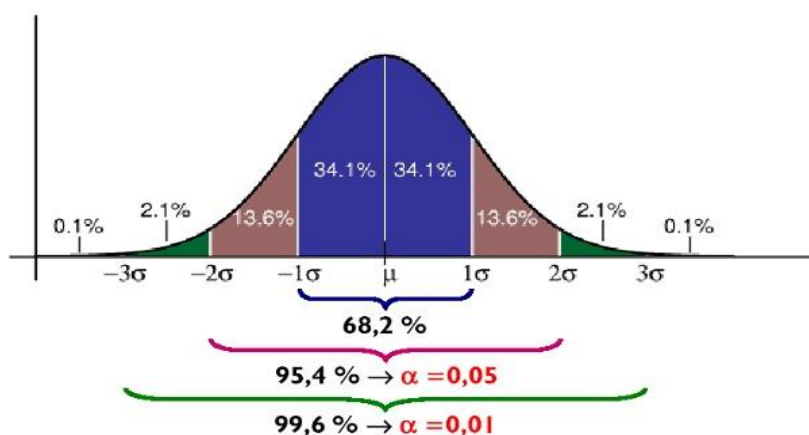
Podľa technickej normy STN EN ISO/IEC 17025 [1] sa pri uvádzaní zhody výsledkov merania so špecifikáciou postupuje podľa rozhodovacieho pravidla, ktoré opisuje, ako sa zohľadňuje neistota merania.

Pri definovaní rozhodovacieho pravidla by sa malo prihliadať na poznatky, z ktorých sa vychádzalo pri stanovení medzných (prípustných, limitných normovaných) hodnôt určujúcich veličín daného fyzikálneho faktora a na skutočnosť, že výsledok merania určujúcej veličiny je len odhadom, a neistota merania vyjadruje pravdepodobnosť intervalu, v ktorom sa nachádza pravá (skutočná) hodnota.

### 2 Neistota merania

Pri meraní určujúcich veličín najmä v podmienkach „in situ“ je potrebné definovať rozhodujúce zdroje neistôt, ktoré môžu ovplyvniť výsledok merania. Pri stanovení neistôt z týchto zdrojov sa vychádza z teórie pravdepodobnosti a matematickej štatistiky, pričom sa predpokladá, že nameraná hodnota určujúcej veličiny, ako aj chyby, majú určité rozdelenie pravdepodobnosti znamená, že aj výsledok merania má určité rozdelenie pravdepodobnosti.

Normálne rozdelenie pravdepodobnosti charakterizuje Gaussova krivka [2], kde súbor hodnôt je rozdelený po oboch stranách od strednej (maximálnej) hodnoty a to vždy presne v rovnakej časti „plochy“ pod krivkou (obrázok 1). V úseku medzi  $+\sigma$  a  $-\sigma$  leží 68,26 % hodnôt a v úseku medzi  $+2\sigma$  a  $-2\sigma$  leží 95,4 % hodnôt.



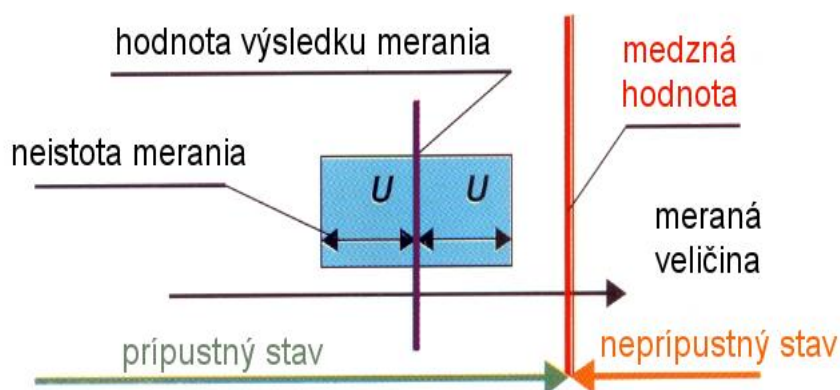
Obrázok 1. Gaussova krivka [2].

Základnou kvantitatívnu charakteristikou neistoty merania je štandardná neistota  $u$ , vyjadrená smerodajnou odchýlkou  $\sigma$  príslušného rozdelenia pravdepodobnosti a udáva sa spravidla v hodnotách meranej fyzikálnej veličiny. Štandardná neistota  $u$  vytvára interval pokrývajúci pravé (skutočné) hodnoty meranej veličiny s pomerne malou pravdepodobnosťou (cca 68 %).

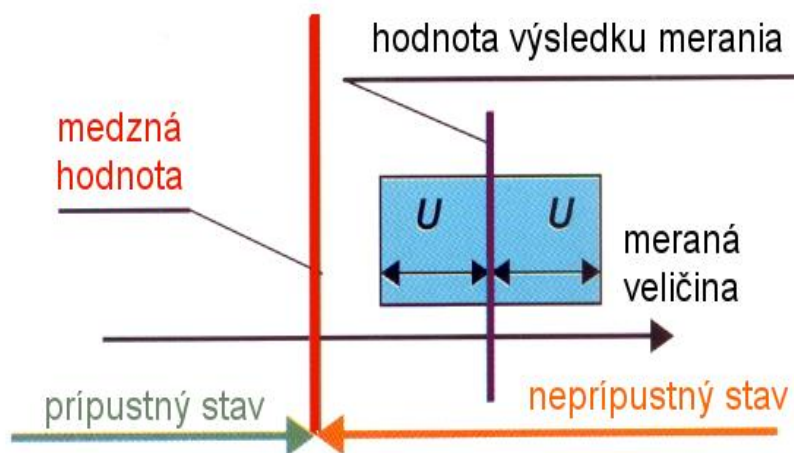
V praxi sa požaduje hodnota neistoty, ktorá by vytvárala interval s pravdepodobnosťou pokrytia blízku 100 %. Takáto neistota sa nazýva rozšírená neistota  $U$  a stanoví sa z kombinovanej štandardnej neistoty  $u_C$  jej vynásobením koeficientom pokrytia (rozšírenia)  $k_u = 2$  (zodpovedá normálnemu rozdeleniu o hladine významnosti  $\alpha = 0,05$  (95 % konfidenčný interval strednej hodnoty).

### 3 Rozhodovacie pravidlo

Podľa zásad metrologickej praxe [3, 4] sa pri posudzovaní zhody výsledkov merania určujúcich veličín zisťuje prípustný stav (obrázok 2), tzn. dodržanie (súlad, neprekročenie) medzných hodnôt alebo neprípustný stav (obrázok 3), tzn. prekročenie (nesúlad, nedodržania) medzných hodnôt.

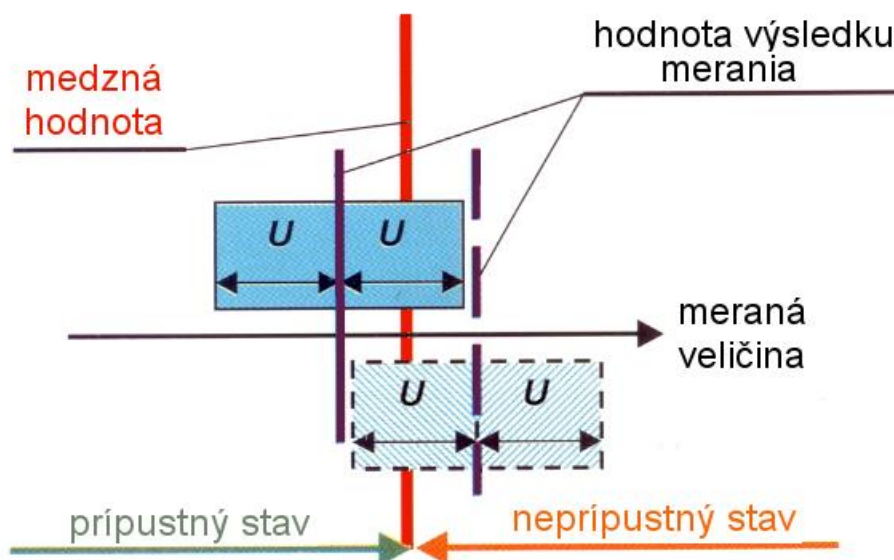


Obrázok 2. Prípustný stav, jednoznačné dodržanie výsledkov merania.



Obrázok 3. Nepripustný stav, jednoznačné prekročenie výsledkov merania.

Problémy vznikajú v prípade, ak nastane prienik prekrývajúceho intervalu nameranej hodnoty veličiny s medznou hodnotou (Obrázok 4), to znamená, že sa nedá jednoznačne konštatovať prípustný stav alebo neprípustný stav.



Obrázok 4. Sporné prípady, kde sa nedá prípustný alebo neprípustný stav výsledkov merania.

Prienik prekrývajúceho intervalu nameranej hodnoty veličiny s medznou hodnotou sa nazývaná aj „šedá zóna“ a znamená, že prípustný ani neprípustný stav nie je preukázateľne dokumentovaný.

Pri posudzovaní zhody výsledkov meraní, súčasťou rozhodovacieho pravidla je rozhodovací limit (medzný limit), ktorý jednoznačne stanovuje oblasť prípustného alebo neprípustného stavu.

V závislosti na oblasti použitia výsledkov merania v praxi sa spravidla aplikujú dva rozhodovacie limity:

- dolný rozhodovací limit – stanovený limit (medzná hodnota) *minus* neistota merania  $U$ , určuje oblasť prípustného stavu,
- horný rozhodovací limit – stanovený limit (medzná hodnota) *plus* neistota merania  $U$ , určuje oblasť neprípustného stavu.

## 4 Príklady rozhodovacích pravidiel

Pri posudzovaní zhody výsledkov merania určujúcich veličín fyzikálneho faktora – hluku v životnom prostredí, má rozhodovacie pravidlo vychádzať z princípu, že štátne orgány (orgány verejného zdravotníctva) zasahujú do práv dotknutých osôb (občanov) alebo právnych subjektov (prevádzkovateľov zdrojov hluku) iba v prípade, keď je neprípustný (protiprávny) stav preukázateľne dokumentovaný.

### 4.1 Rozhodovacie pravidlo v Českej republike

V nariadení vlády ČR č. 272/2011 Sb. [5] na posúdenie zhody výsledkov merania hluku v mimopracovnom prostredí s hygienickými limitmi hluku je rozhodovacím pravidlom „horný rozhodovací limit“, ktorým sa jednoznačne preukazuje neprípustný (protiprávny) stav.

Rozhodovacie pravidlo na základe horného rozhodovacieho limitu neznamená zvýšenie hygienického limitu (HL), ale ide len o štatistické vyhodnotenie pravdepodobnosti, že hygienický limit bude preukázateľne prekročený [6].

Takto stanovené rozhodovacie pravidlo prihliada aj na skutočnosť, že pokiaľ by bol hygienický limit v mimopracovnom prostredí považovaný za neprekročiteľný, potom by nemohli existovať rôzne hygienické limity (prípustné hodnoty) pre rovnaké zdroje hluku, napr. podľa citlivosti chráneného prostredia na hluk [7].

Preto § 20 ods. 4 citovaného nariadenia vlády ČR je v znení „Výsledná hodnota hladiny akustického tlaku neprekračuje hygienický limit (HL), ak výsledná ekvivalentná hladina akustického tlaku po odčítaní hodnoty neistoty je rovná alebo nižšia ako hygienický limit alebo výsledná maximálna hladina akustického tlaku je rovná alebo nižšia ako hygienický limit“.

Rozhodovacie pravidlo pre neprekročenie hygienických limitov pre cestnú dopravu v chránených vonkajších priestoroch stavieb pre noc, vyjadrené nerovnosťou má tvar

$$(L_{Aeq,8h} - U) \leq L_{Aeq,HL8h} \quad (1)$$

kde  $L_{Aeq,HL,8h} = (L_{Aeq,z} + K)$ ,

$L_{Aeq,z}$  je základná hodnota ekvivalentnej hladiny A akustického tlaku ( $L_{Aeq,z} = 40$  dB),

$K$  je korekcia prihliadajúca na druh chráneného priestoru a nočnú dobu.

Akreditované alebo autorizované subjekty na základe bilancie zdrojov neistôt deklarujú rozšírenú neistotu merania hluku  $U$  v mimopracovnom prostredí od 1,8 dB až 2,5 dB. Podľa metodického návodu [8], ak hodnota rozšírenej neistoty merania  $U$  je väčšia ako 2 dB, pri hodnotení (posudzovaní) zhody výslednej hladiny ekvivalentnej hladiny akustického tlaku sa použije „štandardná konvenčná hodnota neistoty hodnotenia“, ktorá sa rovná 2 dB.

#### 4.2 Rozhodovacie pravidlo v Slovenskej republike

Podľa § 6 ods. 5 vyhlášky MZ SR č. 549/2007 Z. z. [8] sa pri posudzovaní zhody výsledkov merania, nameraná alebo odvodená hodnota *zväčší* o hodnotu rozšírenej neistoty merania  $U$  (v prípade potreby aj o ďalšie korekcie  $K$ ) a takto získaná „posudzovaná hodnota“ pre príslušný referenčný časový interval sa porovnáva s prípustnou hodnotou.

Rozhodovacie pravidlo pre neprekročenie prípustných hodnôt ekvivalentných hladín A akustického tlaku napr. pre cestnú dopravu v chránených vonkajších priestoroch budov pre noc, vyjadrené nerovnosťou má tvar

$$L_{R,Aeq,8h} \leq L_{Aeq,8h,p} \quad (2)$$

kde  $L_{R,Aeq,8h} = (L_{Aeq,8h} + U + K)$ ,

$L_{Aeq,8h}$  je nameraná alebo odvodená hodnota hladiny A akustického tlaku pre noc (8 h),

$K$  je korekcia pre špecifický hluk (zvlášť rušivý hluk).

Takto definované rozhodovacie pravidlo znamená, že v prípade prekročenie prípustnej hodnoty ekvivalentnej hladiny A akustického tlaku pre príslušnú kategóriu územia napr. o

0,5 dB, príslušný orgán verejného zdravotníctva požaduje, aby správca cestnej komunikácie vykonal technické alebo organizačné opatrenia na zníženie hluku.

Pripočítanie hodnoty rozšírenej hodnoty neistoty k nameranej alebo odvodenej hodnote hladiny A akustického tlaku pre príslušný referenčný časový interval (deň, večer, noc) znamená, aj skutočnosť, že hodnota neistoty merania  $U$  sa vzťahuje len k jednej strane, tzn. v neprospech správcu cestnej komunikácie alebo prevádzkovateľov identifikovaných (iných) zdrojov hluku.

Stanovisko, že pripočítanie hodnoty rozšírenej neistoty výsledkov merania je za účelom ochrany verejného zdravia, potláča pravdepodobnostný charakter výsledku merania oznamovaný akreditovaným subjektom a v prípade relatívne malého prekročenia prípustnej hodnoty nevyjadruje ani mieru zdravotného rizika z pôsobenia (expozície) hluku z identifikovaného zdroja.

## 5 Záver

Každý proces merania je však zaťažený rôznymi chybami a preto výsledok merania je len odhadom pravej (skutočnej) hodnoty meranej určujúcej veličiny. Pri posudzovaní zhody výsledkov meraní so špecifikáciou (právnym predpisom, technickou normou), súčasťou rozhodovacieho pravidla je rozhodovací limit (medzný limit), ktorý jednoznačne stanovuje oblasť prípustného alebo neprípustného stavu.

Pri posudzovaní zhody výsledkov merania určujúcich veličín hluku v životnom prostredí s hygienickými limitmi (prípustnými hodnotami), rozhodovacie pravidlo má vychádzať z princípu, že orgány verejného zdravotníctva majú zasahovať do práv dotknutých osôb (občanov) alebo právnych subjektov (prevádzkovateľov zdrojov hluku) iba v prípade, keď je neprípustný (protiprávny) stav dokumentovaný.

## Použité odkazy

- [1] STN EN ISO/IEC 17025: 2019 Všeobecné požiadavky na kompetentnosť skúšobných a kalibračných laboratórií
- [2] [www.george11.eu/matematika/pst/12.htm](http://www.george11.eu/matematika/pst/12.htm)
- [3] František Vdoleček: Neistoty měření a posudzování shody. Akustika 8/2007
- [4] MSA-L/04 Návod na oznamovanie súladu so špecifikáciou, SNAS Bratislava, 2017
- [5] Nařízení vlády ČR č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací v znení nařízení vlády ČR č. 217/2016 Sb., č. 241/2018 Sb. a č. 433/2022 Sb.
- [6] Metodický návod pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. Vestník MZ ČR 11/2017
- [7] Odborné doporučení pro měření a hodnocení hluku v mimopracovním prostředí. ZÚ Ostrava, Březen 2018
- [8] 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 MZSR č. 237/2009 Z. z.

## Summary

**Approaches to the Conformity Assessment of the Measurements Results of the Determining Physical Quantities.** However, each measurement process is burdened with various errors, and therefore the measurement result is only an estimate of the true (real) value

of the measured determinant. When assessing the conformity of the measurement results with the specification (legal regulation, technical standard), part of the decision rule is the decision limit (marginal limit), which unequivocally determines the area of permissible or impermissible status. When assessing the conformity of the results of measuring the determining quantities of noise in the environment with hygienic limits (permissible values), the decision-making rule should be based on the principle that public health authorities should intervene in the rights of affected persons (citizens) or legal entities (operators of noise sources) only in case, when the inadmissible (illegal) state is documented.

### **Keywords**

Measurement uncertainty; Noise; Sound pressure level.

### **Contact Address**

Milan Drahoš, Richard Drahoš  
D2R engineering, s.r.o., Na letisko 42, Poprad  
e-mail:d2r@d2r.sk  
<http://www.d2r.sk>

## VYUŽITIE AKUSTICKÉHO TOMOGRAFU V PODMIENKACH LESNÍCKEJ PREVÁDZKY

Miloš Gejdoš, Katarína Michajlová

### 1 Úvod

Ekonomické fungovanie lesného hospodárstva ovplyvňuje predovšetkým predaj dreva a jeho kvalita. Kvalitatívne hodnotenie dreva sa najmä z pohľadu jeho spracovania a využitia opiera najmä o sústavu kvalitatívnych a kvantitatívnych znakov. Meranie a hodnotenie týchto znakov je stanovené príslušnou normatívnou legislatívou (najmä norma STN EN 1309-3 Guľatina a rezivo. Metódy merania rozmerov. Časť 3: Znaký a biologické poškodenie). Na základe zisteného rozsahu týchto znakov sú stanovené technické podmienky šiestich kvalitatívnych tried dreva v zmysle noriem STN 48 0055 Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny; a STN 48 0056 Kvalitatívne triedenie listnatej guľatiny.

Presná determinácia kvalitatívnych znakov v zmysle platnej legislatívy je však zväčša obmedzená na ich hodnotenie na už spílenom – vyťaženom kmeni/výreze guľatiny. Pre manažérske plánovanie odbytu a obchodu ako aj časové rozvrhnutie plánu ťažby je však potrebné aspoň orientačné poznanie kvalitatívnej distribúcie dreva v stojacom lesnom poraste. Vo väčšine prípadov sú pre tieto potreby v lesníckej prevádzke zatiaľ používané len metódy, ktoré v sebe prinášajú pomerne vysokú mieru subjektivity hodnotiteľa, ktorý akostné hodnotenie vykonáva. Väčšina dostupných metód, ktoré sú vhodné z hľadiska aplikovateľnosti pre lesnícku prevádzku je založená na deštruktívnych a semideštruktívnych spôsoboch, prípadne na zariadeniach, ktoré nie sú využiteľné v exponovaných terénoch lesných porastov.

Nedeštruktívne metódy sú také, pri ktorých nedochádza k poškodeniu dreva. Kvalita danej dreveniny sa následne určí pomocou nameraných hodnôt alebo vlastností charakteristických pre konkrétnu metódu. Tieto metódy môžeme rozdeliť na: elektrické (napr. Vitamat, Dielektrik); ultrazvukové (napr. Arbasonic, Pundit, Sylvatest); akustické 2D a 3D tomografy (napr. Fakkop 2D, Arbotom 2D a 3D, Arbasonic 3D); rádiografické (mobilná alebo stacionárna CT počítačová tomografia, X-lúčová a neutrónová rádiografia) (REINPRECHT, L., HRIVNÁK, J., 2012).

V príspevku sa budeme venovať najmä akustickej tomografii, možnostiam a limitom jej použitia v lesníckej prevádzke najmä prostredníctvom tomografu Arbotom.

### 2 Akustické a ultrazvukové metódy hodnotenia rastúceho dreva

Akustická tomografia je založená na zmene rýchlosti vo vnútri kontrolovaného prvku. Drevo je však heterogénne a anizotropné, čo spôsobuje prirodzené kolísanie rýchlosti. V dreve je veľkou výzvou pri aplikácii tejto technológie interpretovať a odlíšiť prirodzené variácie materiálu od tých, ktoré sú spôsobené poškodením. Akustická tomografia na stromoch analyzuje prítomnosť anomálií alebo zhoršenia kvality a je založená na vytváraní obrazov vytvorených priradením pásov rýchlosti k farbám. Na stromoch sa môže vyskytnúť niekoľko typov defektov (dutiny, praskliny alebo zóny dreva poškodené hubami a termitmi) a singularít (hrče, živicové vrecia a reakčné drevo). Všetky tieto defekty a singularity v rôznej miere ovplyvňujú anatomickú štruktúru materiálu a jeho lokálnu tuhosť. Tieto defekty môžu byť zachytené zmenami v rýchlostiach šírenia vln. Drevo je však heterogénne a anizotropné, čo



vedie k normálnym zmenám rýchlosti, ktoré nie sú výsledkom žiadneho druhu rozpadu (WANG X., WIEDENBECK, J., LIANG, S., 2009).

Akustické metódy patria medzi najstaršie metódy hodnotenia vlastností dreva. Akustická rýchlosť sa vo forme prechodových elastických vln, generovaných prudkým uvoľnením energie šíri materiálom. Zdrojom je akustický impulz, ako napr. úder kladiva alebo vybudený akustický signál (zvuk). Preto sa najčastejšie na hodnotenie používa skenovanie rýchlosti akustických vln v dreve (ONDREJKA, V. et al., 2020).

Ďalšou nedeštruktívnou akustickou metódou je ultrazvukové meranie. Ultrazvuk je mechanické vlnenie s frekvenciou všeobecne vyššou ako 20 kHz. Diagnostické prístroje pracujú s frekvenciami v rozsahu od 20 kHz do 500 kHz. Počas merania sa generujú ultrazvukové vlny k objektu a následne sa merajú prenášané vlny, aby sa identifikovali prenosové vlastnosti dreva (ÖSTERBERG, P., 2009).

Vývoj akustických zariadení na hodnotenie stojacich stromov otvoril cestu k hodnoteniu vlastností dreva stromov pred ich ťažbou. To uľahčuje riadenie, plánovanie ťažby a spracovania dreva spôsobom, ktorý maximalizuje hodnotu získanú zo zdroja. V posledných desaťročiach sa akustické technológie stali v drevospracujúcom priemysle osvedčenými zariadeniami na hodnotenie materiálov. Stali sa široko akceptovaným nástrojom pre kontrolu kvality a klasifikáciu produktov, ale aj pre šľachtiteľský výskum, kde sa využívajú na hodnotenie mladých stromčekov. Väčšina akustických zariadení, ktoré vyhodnocujú vlastnosti stromov sú modelované pre radiálne meranie (kolmo na os kmeňa).

### 3 Akustický tomograf ARBOTOM®

Akustický tomograf Arbotom patrí do skupiny impulzných tomografov, ktoré umožňujú reálny dvojrozmerný alebo trojrozmerný obraz vnútorného stavu kmeňa a koreňového systému stojacich stromov alebo vyťaženej guľatiny. Vďaka zvukovým impulzom dokáže odhaliť ukryté znaky, neviditeľné dutiny, praskliny alebo hnilobu a dokáže zobrazit' ich rozsah a veľkosť. Vychádza zo zistenia, že neporušené drevo vedie akustické vlny rýchlejšie, ako poškodené drevo s defektmi (SIMON, J. et al., 2015). Táto nedeštruktívna metóda stojace stromy nijako nepoškodzuje a umožňuje presnú lokalizáciu chýb v stojacich kmeňoch alebo guľatine. Vyhodnotenie je relatívne rýchle (15 až 30 minút/1 strom), jednoduché a aplikuje sa priamo na mieste v lesnom poraste. Vyhodnocovací softvér prehľadne zobrazuje dvojrozmerný obraz o vnútornom stave objektu. Okrem merania kvality dreva kmeňov, koreňov a guľatiny sa využíva na zisťovanie bezpečnosti stromov v mestách, parkoch či riečnych hrádzach.

#### 3.1 Princíp činnosti

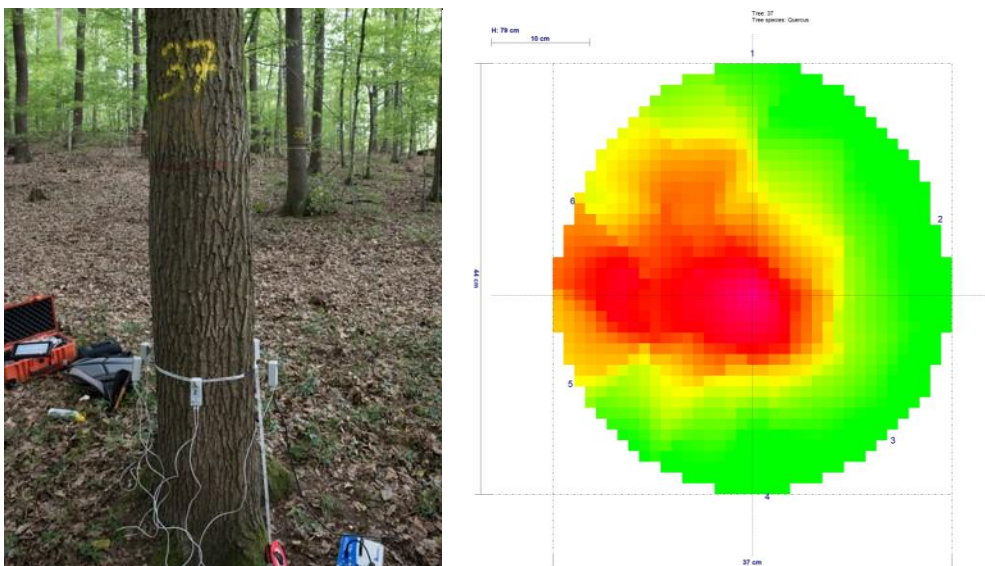
Tomograf posudzuje štruktúru dreva vo vnútri stromu na základe vybudenej akustickej vlny poklepaním po jednotlivých senzoroch, ktoré sú rozmiestnené po obvode kmeňa (obrázok 1). Následne vykreslí obraz priečného rezu vo vlastnom softwérovom prostredí.

Po údere na úderovú plochu jedného senzora, tento vysiela akustickú vlnu, ktorú ostatné senzory zachytávajú a vyhodnocujú rýchlosť jej prechodu priečnym prierezom kmeňa. Na každý senzor sa udiera minimálne 5-10 krát. Počet senzorov a ich rozostup sa volí individuálne podľa hrúbky a nepravidelnosti kmeňa. Všetky by mali byť umiestnené v rovnakej výške. Upevňujú sa na špeciálne klince, ktoré sa zatĺkajú do kmeňa stromu, tak aby prenikli až do drevnej časti kmeňa. Táto skutočnosť strom fyziologicky nijako nepoškodzuje a zdravý jedinec rany po klincoch zaleje miazgou. Preto túto metódu radíme medzi nedeštruktívne. Rýchlosť prechodu akustickej vlny vyhodnocuje softvér, ktorý zároveň

uplatňuje prepočítavací algoritmus podľa zadaného druhu dreveny, počtu senzorov, hrúbky stromu a pod. (obrázok 2).



Obrázok 1. Vybudzovanie akustickej vlny po rozmiestnených senzorech tomografu ARBOTOM



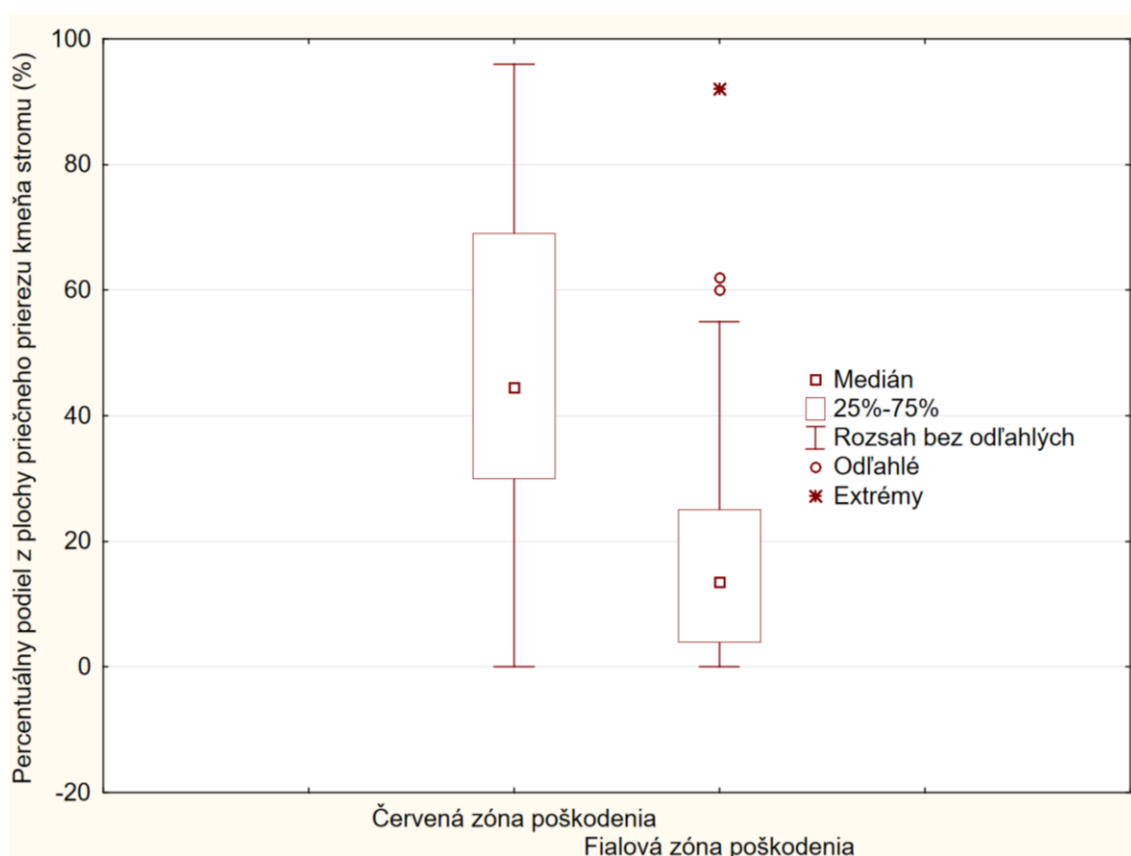
Obrázok 2. Vyhodnotenie dreveny dub prostredníctvom tomografu v softwérovom prostredí

Rýchlosť prechodu vybudenej akustickej vlny znázorňuje softwér farebným spektrom s piatimi farbami, kde zelená znamená vysokú rýchlosť prechodu akustickej vlny, a teda signalizuje pravdepodobne zdravé drevo bez defektov. Žltá a oranžová farba signalizujú tiež pomerne vysoké rýchlosti prechodu, a teda tiež neporušené drevo. Červená a fialová farba

signalizujú pomalší prechod, čím indikujú pravdepodobný výskyt defektu (obrázok 2). Na výslednú interpretáciu sú preto potrebné aj určité skúsenosti hodnotiteľa, ktorý musí ovládať základné poznatky o fyziológii jednotlivých druhov drevín, správne rozvrhnúť umiestnenie senzorov a následne správne vyhodnotiť ponúknutý obraz.

### 3.2 Výsledky meraní a možnosti využitia

Meranie tomografom bolo testované na stojacich stromoch drevín dub, lipa a borovica. Taktiež bolo testované meranie tomografom na menších výrezoch vyťaženého dreva ihličnatých a listnatých druhov drevín. Celkovo bolo tomografom diagnostikovaných 130 stromov. Pre určenie percentuálneho podielu poškodenej zóny (červená a fialová farba) bol použitý softvérový prostriedok ImageJ. Výsledky hodnotiacej analýzy sú na obrázku 3. Stredná hodnota poškodenia určeného červenou farbou predstavovala 44,5 % a fialovou farbou 13,5 %. Pri červenej farbe nevieme s určitosťou potvrdiť výskyt poškodenia, pri fialovej farbe už môžeme o poškodení hovoriť takmer s istotou. Fialová zóna poškodenia podľa výsledkov zaberala oveľa menšie plochy z priečného prierezu a vyskytovala sa u nižšieho počtu analyzovaných jedincov.



**Obrázok 3.** Vyhodnotenie dreviny dub prostredníctvom tomografu v softvérovom prostredí

V tabuľke 1 sú uvedené základné popisné štatistiky nameraných poškodení v zóne červenej a fialovej farby. Z vypočítaných percentilov je zrejmé, že pri červenej zóne bol plošný percentuálny podiel poškodenia do 12 % len u 5 % zo všetkých jedincov. Pri fialovej farbe

bolo v intervale od 0 do 13,5 % plošného podielu plochy prierezu detegované poškodenie len u polovice analyzovanej vzorky stromov.

**Tabuľka 1.** Základné popisné štatistiky percentuálneho rozsahu poškodení nameraného súboru stojacich stromov.

		Červená zóna poškodenia	Fialová zóna poškodenia
<b>N platných</b>		130	130
<b>Priemer</b>		48.0	16.7
<b>Medián</b>		44.5	13.5
<b>Modus</b>		Viacnás	0
<b>Minimum</b>		0.0	0.0
<b>Maximum</b>		96.0	92.0
<b>Percentily</b>	<b>1%</b>	0.3	0.0
	<b>5%</b>	12.0	0.0
	<b>50%</b>	44.5	13.5
	<b>95%</b>	89.0	50.0
	<b>99%</b>	95.0	62.0
<b>Rozptyl</b>		567.8	273.0
<b>Sm.odch.</b>		23.8	16.5

V práci GEJDOŠ, M. et al. 2023 sme tiež analyzovali možnosti využitia tomografu pre analýzu vnútorných znakov na vyťaženom dreve – výrezoch. Celkovo bolo analyzovaných 10 vzoriek výrezov v dĺžkach od 30 cm do 1,2 m (dreveniny smrek, buk, jaseň a dub). Identifikované kvalitatívne znaky boli opäť vyhodnotené na základe plošného rozsahu v zmysle STN EN 1309-3. Výstupy z tomografu boli analyzované prostredníctvom softvéru ImageJ a následne každý znak bol analyzovaný ručným meraním v zmysle normy. Výsledky obidvoch prístupov merania boli následne porovnané. Vo väčšine prípadov bol plošný podiel znaku z reálneho merania mierne vyšší ako podiel znaku identifikovaného z obrazu vytvoreného akustickým tomografom. Vyšší plošný podiel znaku z obrazu vytvoreného tomografom bol len pri štyroch vzorkách. Identifikované rozdiely však ani pri jednej vzorke nepresiahli 5 %, čo môžeme pripísať subjektívnej chybe ľudského faktora pri ručnom vyhodnocovaní obrazovej analýzy v softwéri ImageJ. V priemere predstavoval rozdiel medzi plochou znaku z reálneho fyzického merania a obrazu vytvoreného akustickým tomografom na úrovni 0,97 %. Na základe toho môžeme konštatovať, že akustický tomograf poskytoval pomerne presné výsledky hodnotenia kvalitatívnych znakov v porovnaní s ich reálnym rozsahom na základe obrazovej analýzy a ručného merania.

## 4 Záver

Využitie akustického tomografu potvrdilo dobrú úroveň presnosti identifikácie kvalitatívneho znaku aj na výrezoch vyťaženého dreva, hoci je primárne určený pre kvalitatívne hodnotenie stojacich stromov. Pevné spojenie hodnotenej časti kmeňa so zemou a s koreňovým systémom zásadne neovplyvňuje presnosť hodnotenia prostredníctvom tomografu.

V budúcnosti bude využívanie týchto metód kvalitatívneho hodnotenia stromov a lesných porastov čoraz dôležitejšie. Presné poznanie kvalitatívnej štruktúry stromov v lesných porastoch je dôležité najmä pre manažérske plánovanie z pohľadu uplatňovaných zásahov, plánovanej ťažby a realizácie odbytu a obchodu. V kombinácii s pozemným laserovým skenovaním môže analýza akustickým tomografom priniesť zásadný pokrok v oblasti automatizovaného kvalitatívneho hodnotenia sortimentov na stojacich stromoch a v lesných

porastoch pred tým, než budú vyťažené. To zlepši úroveň manažmentu a obchodu s drevom v podmienkach lesníckej prevádzky.

## Podakovanie

Príspevok vznikol na základe podpory grantových agentúr Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky – Kultúrna a edukačná grantová agentúra; a Agentúry na podporu výskumu a vývoja; v rámci výskumu riešeného v projektoch KEGA 004TU Z-4/2023 Inovatívne metódy hodnotenia kvalitatívneho potenciálu lesných porastov; APVV-22-0001 Optimalizácia hlavných zdravotných a bezpečnostných rizík pri využívaní lesnej biomasy na energetické účely.

## Literatúra

GEJDOŠ, M., MICHAJLOVÁ, K., GRETSCH, D. 2023. The use of the acoustic tomograph and digital image analysis in the qualitative assessment of harvested timber – case study. In *Central European Forestry Journal*, 2023, roč. 69, č.2, s. 106-111.

ONDREJKA, V. et al. 2020. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. In *Central European Forestry Journal*, 2020, roč. 67, č. 1, s. 3-13.

ÖSTERBERG, P., 2009. Wood quality and geometry measurements based on cross section images. Dissertation thesis. Tampere: Tampere University of Technology. Publication 807, 192 s.

REINPRECHT, L., HRIVNÁK, J. 2012. Ultrazvuková a vrtaniu odporová defektoskopia ihličnatej a listnatej guľatiny. In *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 2012. roč. 54, č. 1, s. 43-54.

SIMON, J., MACHAR, I., BRUS, J., PECHANEC, V. 2015. Combining a growth-simulation model with acoustic-wood tomography as a decision-support tool for adaptive management and conservation of forest ecosystems. In *Ecological Informatics*, 2015, č. 30, s. 309-312.

WANG, X., WIEDENBECK, J., LIANG, S. 2009. Acoustic tomography for decay detection in black cherry trees. In *Wood and Fiber Science*, 2009, roč. 41, č. 2, s. 127-137.

## Summary

**Use of Acoustic Tomograph in the Conditions of Forestry Praxis.** The economic functioning of forestry is primarily influenced by the sale of timber and its quality. The qualitative evaluation of wood, especially from the point of view of its processing and use, is mainly based on a system of qualitative and quantitative features. Acoustic methods are among the oldest methods of evaluating wood properties. The acoustic velocity spreads through the material in the form of transient elastic waves generated by the sudden release of energy. The source is an acoustic impulse, such as a hammer blow or an actuating acoustic signal (sound). The Arbotom acoustic tomograph belongs to the group of impulse tomographs that allow a real two-dimensional or three-dimensional image of the internal state of the trunk and root system of standing trees or extracted logs. Tomograph measurement was tested on standing oak, linden, and pine trees. Tomograph measurement was also tested on smaller sections of harvested timber of coniferous and non-coniferous tree species. A total of 130 trees were diagnosed by tomograph. The possibilities of using the tomograph on extracted sections were also analyzed. The use of an acoustic tomograph confirmed a good level of accuracy in the identification of quality features even on cut-outs of harvested timber. Combined with ground-based laser scanning, acoustic tomograph analysis can bring

fundamental progress in the field of automated qualitative assessment of assortments in standing trees and forest stands before they are harvested. This will improve the level of management and wood trade in the conditions of the forestry praxis.

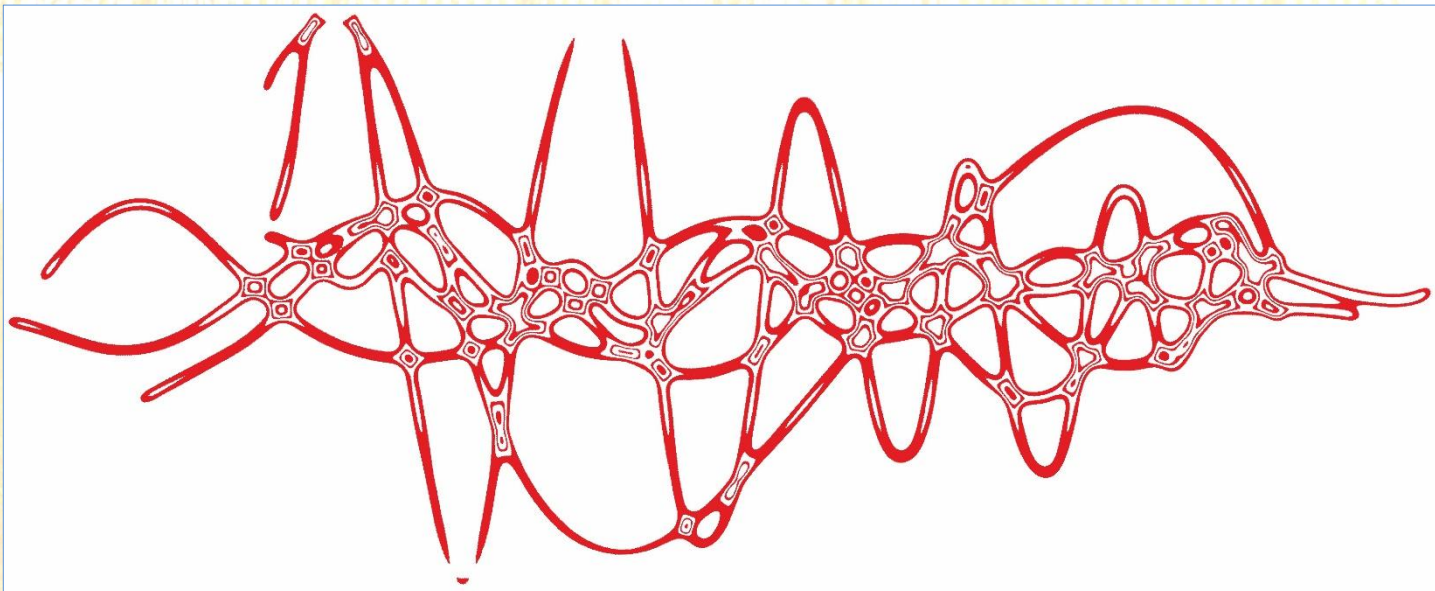
### **Keywords**

Acoustic tomograph; Qualitative features; Wood quality; Image analysis; Qualitative sorting of wood; Forestry praxis.

### **Kontaktne adresy**

Miloš Gejdoš  
Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií (KLŤLM)  
Lesnícka fakulta  
Technická univerzita vo Zvolene  
T.G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen, Slovak Republic  
Tel. +421455206283  
gejdos@tuzvo.sk

Katarína Michajlová  
Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií (KLŤLM)  
Lesnícka fakulta  
Technická univerzita vo Zvolene  
T.G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen, Slovak Republic  
michajlovakatarina@gmail.com



# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## MOŽNOSTI VYUŽITIA 3D CT TECHNOLOGIE PRI DETEKcii VNÚTORNÝCH CHÝB DREVA NA ŠPECIÁLNE VYUŽITIE

Radovan Gracovský, Tomáš Gergel

### 1 Úvod

Centrum excelentnosti LignoSilva je zamerané na optimalizáciu, digitalizáciu a automatizáciu v lesnícko-drevárskom sektore za použitia inovačných technológií. Implementáciou infraštruktúrneho projektu prináša vytvorenie modelových a prototypových pracovísk a kľúčových technologických celkov pre výskumné a demonštračné účely v oblasti produkcie dreva, detekcie kvality dreva, energetického a celulózo-papierenského spracovania dreva.

Jedným z pracovísk je Biotechnologický park Stráže, pod vedením Lesníckeho výskumného ústavu NLC vo Zvolene.

Významným technologickým vybavením centra je 3D CT skenovacia linka guľatiny dreva, ktorej súčasťou je počítačová tomografia. Táto technológia umožňuje vytvoriť 3D model každej guľatiny dreva a zobrazíť jej vnútorné chyby. Tento model následne slúži na optimalizáciu rezných plánov za účelom maximalizácie výťažnosti. Na svete je v súčasnosti inštalovaných 14 CT skenerov guľatiny a práve náš 15-ty na svete je umiestnený v Biotechnologickom parku Stráže na vedecko-výskumné účely.

### 2 3D CT skenovacia linka guľatiny dreva

Skenovacia linka pozostáva z viacerých úsekov (Obrázok 1). Na vstupe linky sa nachádza zásobník guľatiny, kde sa hydraulickou rukou na zásobník guľatina vyloží. Následne sa rozjednocovacím dopravníkom guľatina dopraví na navaľovacie rameno, ktoré guľatinu naloží na reťazový dopravník. Ten dopravuje guľatinu priamo na gumový pásový dopravník, ktorý je priamo súčasťou CT skenera. Reťazové dopravníky tejto linky majú vyššiu pracovnú rýchlosť ako samotný pás CT skenera z dôvodu skrátenia a šetrenia času potrebného na presun guľatiny.



Obrázok 1. Sústava dopravníkov a 3D CT skener (kontajner).



Rýchlosť pásového dopravníka je dôležitá, pre správne zobrazenie CT snímok ide o synchronizáciu otáčok portálu a rýchlosti pásového dopravníka. Guľatina po naskenovaní, prechádza do ďalšej časti linky, kde sa nachádza kapovacia píla, ktorá slúži na priečne delenie guľatiny (Obrázok 2).



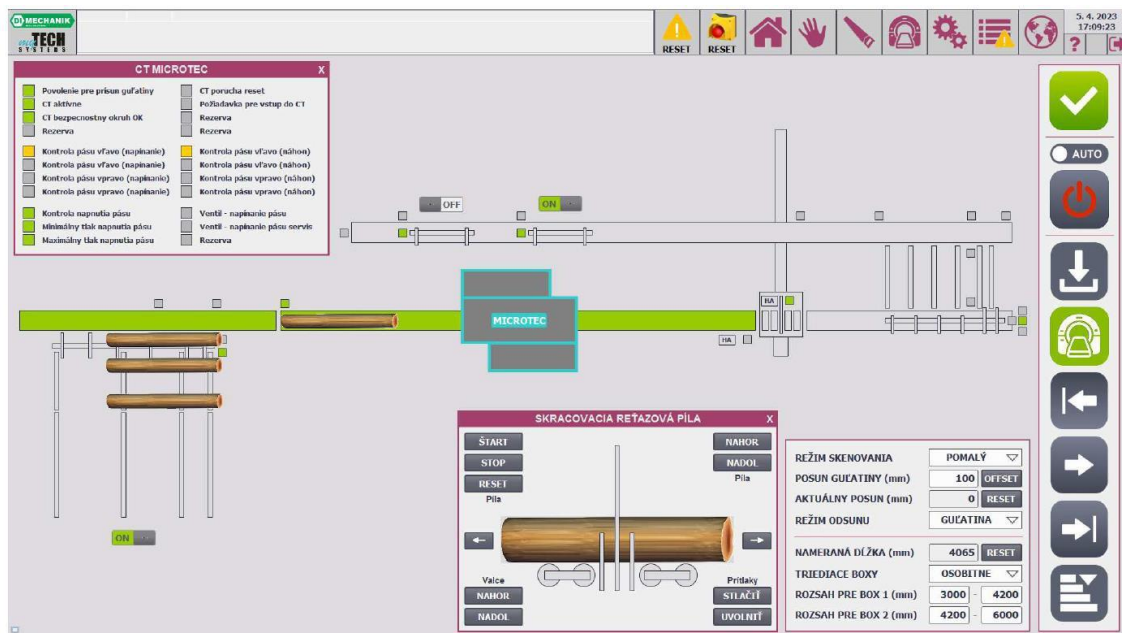
Obrázok 2. Kapovacia píla - súčasť linky.

V prípade, že tento rez nie je potrebný guľatina smeruje sústavou reťazových dopravníkov do zásobníkov, z ktorých je guľatina pripravená na naloženie a následne export.

Na úspešné vytvorenie 3D snímky s rozpoznávanými vnútornými chybami dreva sú využívané viaceré softvéry spoločnosti Microtec, ktoré na seba vzájomne nadväzujú.

### 2.1 Ovládanie linky – pohyb guľatiny CT skenerom

Spúšťanie, ovládanie a nastavovanie 3D CT skenovacej linky guľatiny sa vykonáva z velína prostredníctvom vizualizačného softvéru nainštalovanom na pracovnej PC stanici. Prioritnou linky je dopraviť guľatinu uloženú v zásobníku do aktívnej zóny CT skenera, získané 3D snímky analyzovať, konfrontovať ich štruktúru realizáciou rezov vo forme úzkych kotúčov a zostatkové výrezy odsunúť dopravníkmi do triediacich boxov. Povelý pre vykonávanie jednotlivých prevádzkových funkcií sa realizujú prostredníctvom tlačidiel v ovládacom menu na pravej strane prehľadovej obrazovky (Obrázok 3).



Obrázok 3. Hlavná obrazovka ovládania pohybu guľatiny a kapovacej píly.

Hlavná, prehľadová obrazovka obsahuje technologickú schému linky, kde farebné vyobrazenie jednotlivých zariadení informuje obsluhu o ich aktuálnom stave. Súčasťou technologickej schémy je takisto indikácia stavu nainštalovaných snímačov či popisné označenie všetkých motorov. Na prehľadovej obrazovke sa taktiež nachádza ovládacie menu pre vykonávanie funkčných povelení ako aj parametrizačná tabuľka pre zadávanie vstupných parametrov. Integrované je ovládanie reťazovej píly na uskutočňovanie priečných rezov.

### 3 Softvérové produkty Microtec

Ide o softvérové produkty, ktoré sú súčasťou CT skenera od spoločnosti Microtec. Sú spustené na troch samostatných pracovných staniách, umiestnených v klimatizovanom boxe (Obrázok 4).

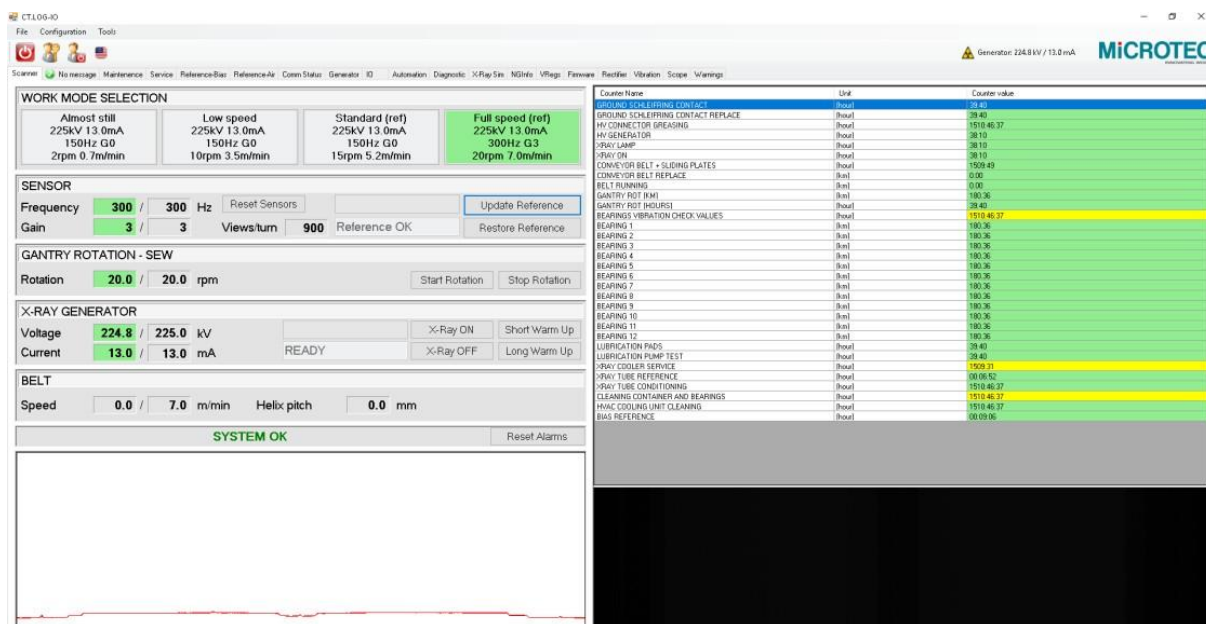


Obrázok 4. Umiestnenie troch pracovných staníc v klimatizovanom boxe.

### 3.1 CT IO

Softvér CT IO uskutočňuje správu hardvéru CT skenera (senzory, vysokonapäťový zdroj, chladenie, rotačný portál, röntgenová lampa) a predbežné spracovanie surových údajov prichádzajúcich z röntgenového sensorového poľa. Výstupom je surový obraz intenzity, ktorý predstavuje signál prečítaný röntgenovými senzormi.

Tento obraz je predpracovaný odčítaním posunu obrazu určením pri vypnutom röntgene a vydelený obrazom výduchu, určením ako signál pri zapnutom röntgene bez prítomnosti kmeňa v skenery. Signál je nakoniec upravený dolnopriepustným filtrom, aby sa znížil šum vo funkcii intenzity signálu.

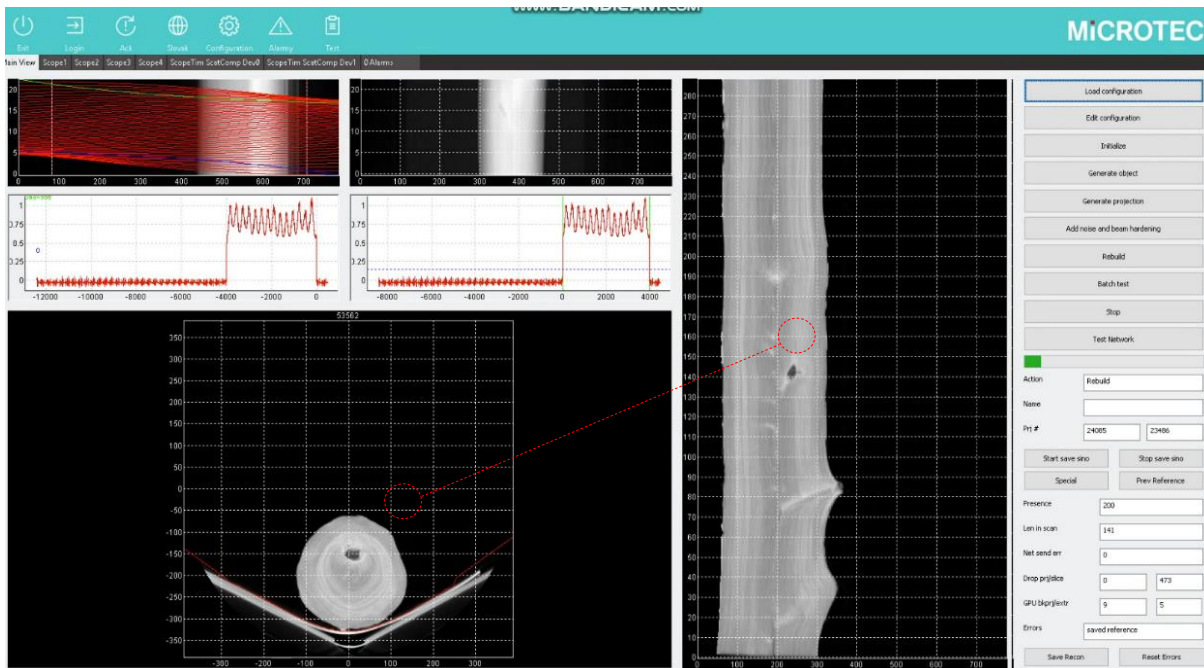


Obrázok 5. Hlavné okno softvéru CT IO.

Toto okno zobrazuje ovládacie prvky pre činnosti, ktoré operátor môže vykonávať. Operátor zapína alebo vypína otáčanie portálu okolo skenovaného telesa a zapína alebo vypína zdroj röntgenového žiarenia. Označenie „SYSTEM OK“, označuje pripravenosť CT skenera na skenovanie. Rovnako sú zobrazované údaje manažmentu údržby.

### 3.2 CT Recon

Prijíma, predbežne spracúva a ukladá surové dáta z CT skenovania. Prostredníctvom tohto programu je možné vidieť skenovanie kmeňa v reálnom čase (Obrázok 6).

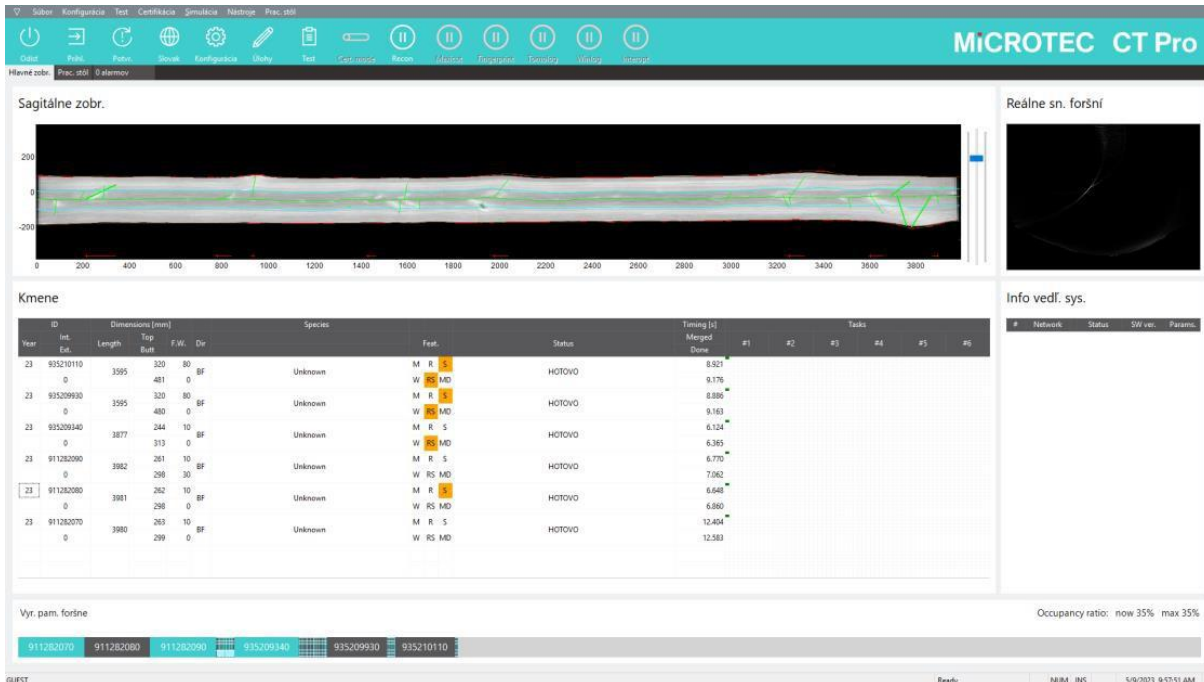


Obrázok 6. Okno programu CT Recon (Vnútna chyba – nezdravá hrča, vľavo zobrazená v pričnom reze, vpravo viditeľná v pozdĺžnom reze).

### 3.3 CT Pro

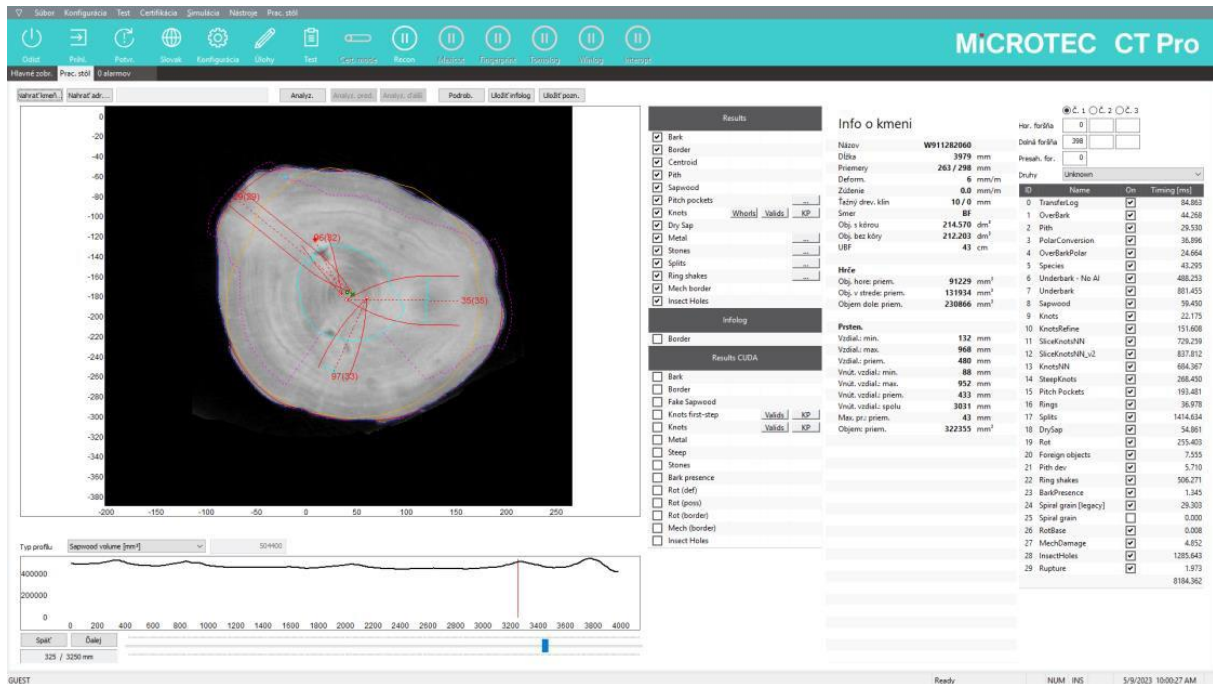
Softvér CT Pro prijíma vstupy z CT Recon, analyzuje ich a identifikuje zoznam znakov a vlastnosti skenovanej guľatiny. Výsledok výpočtu sa odosiela cez sieť ďalším softvérom, ktoré majú o výsledok záujem podľa príslušného protokolu.

V hlavnom okne (Obrázok 7) sa nachádza sagitálne zobrazenie (pozdĺž stržňa kmeňa) naskenovanej guľatiny, zoznam naskenovanej guľatiny a CT snímky guľatiny v pričnom reze.



Obrázok 7. Hlavné okno softvéru CT Pro.

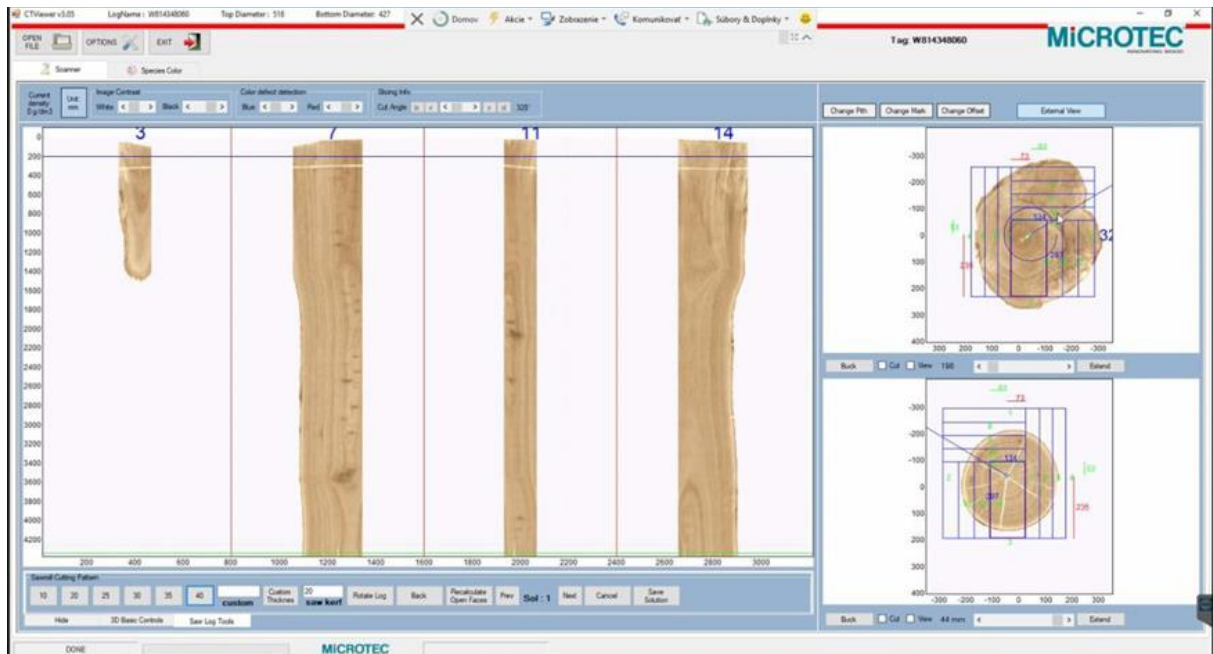
Vo vedľajšom okne (Obrázok 8) programu „CT Pro“ môže užívateľ uskutočniť automatickú detekciu chýb dreva. Rozsah analyzovaných chýb je voliteľný. Výsledkom sú snímky v priečnom reze s vyznačenými chybami dreva a analýza tvaru skenovanej guľatiny.



Obrázok 8. Vedľajšie okno softvéru CT Pro s detekovanými chybami skenovanej guľatiny.

### 3.4 CT Viewer

CT Viewer (Obrázok 9) prijíma vstupy z CT Pro. Umožňuje uskutočniť vizuálne hodnotenie guľatiny a simuláciu rezných plánov v 2D alebo 3D prostredí.



Obrázok 9. Okno softvéru CT Viewer.

Po načítaní naskenovanej guľatiny, je možné navrhnuť rezný plán a ten následne vizualizovať ako 2D obraz, kde je každá strana reziva zobrazená jednotlivo alebo je možné jednotlivé kusy reziva zobrazovať aj ako 3D modely (Obrázok 10).



Obrázok 10. 3D model zobrazujúci guľatinu a vybrané rezivo v danom výreze.

#### 4 Vyhodnotenie guľatiny a jej certifikácia na základe vnútorných chýb

V súčasnosti je guľatina triedená na základe vonkajších znakov dreva najčastejšie okulárou metódou. Tento spôsob je lacný no do veľkej miery závisí od subjektívneho posúdenia hodnotiteľa. Zmena prístupu – certifikácia kvality guľatiny na základe naskenovaných vnútorných znakov odstráni ľudský faktor a možnú vnesenú neistotu. Riešením problému je úprava okrajových podmienok identifikovaných znakov dreva s ohľadom na druh spracovaného dreva a účel použitia (rozmery, estetické požiadavky, požiadavky na pevnosť). Chyby dreva majú svoje špecifiká v závislosti na druhu dreva. Na základe účelu použitia dreva, parametrov vnútorných znakov dreva (vzájomne vzdialenosť, poloha, veľkosť, orientácia, prítomnosť) bude vypracovaná metodika certifikácie kvality guľatiny dreva na základe vnútorných znakov. Zavedenie takejto certifikácie má veľký význam pri exporte guľatiny, aukciách s výrezmi, predaji guľatiny na estetické účely, pri výrobe špeciálnych výrobkov z dreva, ako sochy, sudy, hudobné nástroje. Uplatnenie je jednoznačné pri požiadavkách na výrobu nosných konštrukcií z dreva. Zároveň vznikne efektívny nástroj na garanciu kvality guľatiny dreva.

##### 4.1 Vnútorné chyby dreva zobrazené 3D CT skenovaním

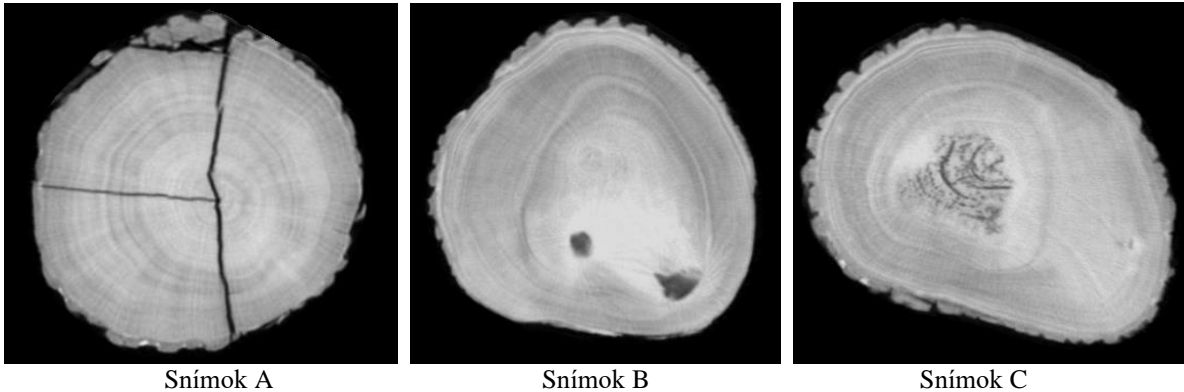
CT skenovanie je zásadným prvkom v drevo spracovateľskom reťazci, prináša detailné informácie o rozmeroch, objeme, krivosti, vonkajších a v vnútorných znakov guľatiny. Je identifikovaná poloha, rozmery jednotlivých znakov (chýb) a ich kategória.

##### 4.2 Príklad zobrazenia vnútorných chýb v CT snímkach

3D model guľatiny je zrekonštruovaný z CT snímkov, ktoré CT skener realizuje ako priečne rezy zložené z voxelov s rozmermi 2 mm x 2mm x 10 mm. To znamená, že guľatina dlhá 4000 mm je zložená zo 400 kusov snímkov, ktoré predstavujú jednotlivé rezy. Nasledovný

Obrázok 11 je výberom takýchto CT snímok, ktoré zobrazujú príklady rozrazenia vnútorných znakov guľatiny dreva.

Snímok A zobrazuje prasklinu vo výreze dubu, snímok B zobrazuje nezdravú hrču vo výreze dubu, snímok C zobrazuje mäkkú hnilobu vo výreze dubu.



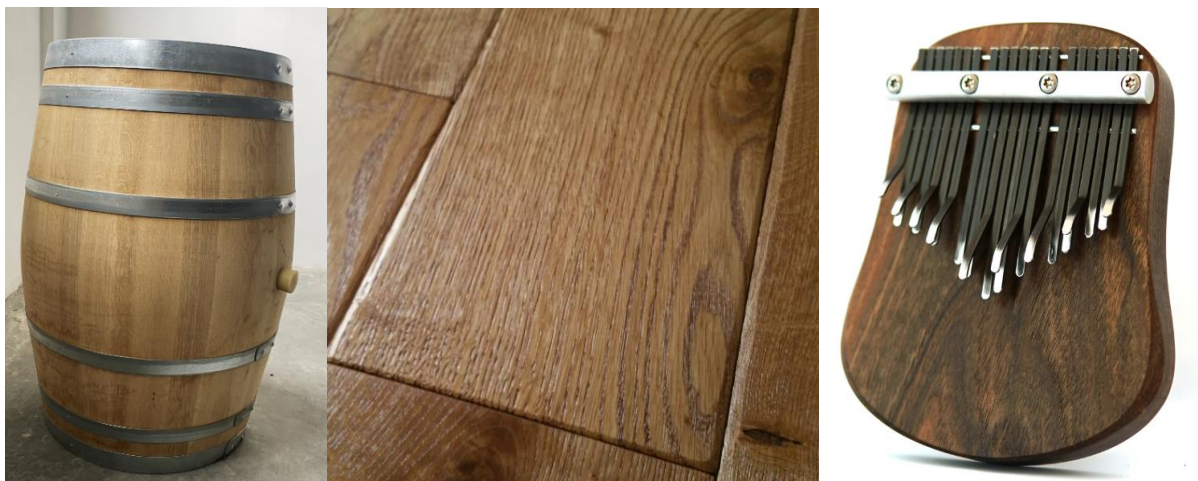
Obrázok 11. CT snímky rôznych druhov vnútorných chýb dreva.

#### 4.3 Kvalitatívne hodnotenia dreva určeného na špeciálne využitie

Výroba takýchto predmetov vyžaduje individuálny prístup (Obrázok 12), dôkladne vymanipulovanie tých najcennejších výrezov, následne opracované. Drevo ako materiál, ktorý je určený na špeciálne využitie má charakteristické vlastnosti, ktoré ho predurčujú k výrobe:

- dekoratívnych dých,
- hudobných nástrojov,
- časti strelných zbraní – pažby,
- výrobu sudov,
- podláh, obkladov a nábytku.





Obrázok 12. Príklad využitia dreva na špeciálne výrobky.

## PodĎakovanie

"Táto práca bola podporená z kontraktu NLC s MPRV SR v rámci projektu výskumného zámeru NLC 2022-2026 Digiwood" a Agentúrou na výskum a vývoj v rámci projektu APVV-20-118 "Detekcia 3D CT a optimalizácia výťažnosti bukovej guľatiny".

## Summary

Software equipment of the 3D CT scanning line. This paper describes in more detail the software equipment of the 3D CT scan line. The first part describes the software that is part of the CT scanner itself and is used to start the CT scanner or stop its operation. Subsequently, the software is described, which allows to reconstruct a 3D CT scan of the log based on the signal of the X-ray sensor field. It includes a software for visualization of 3D CT scans and cutting plans. The software for controlling the movement of the log with the CT scanner is described separately.

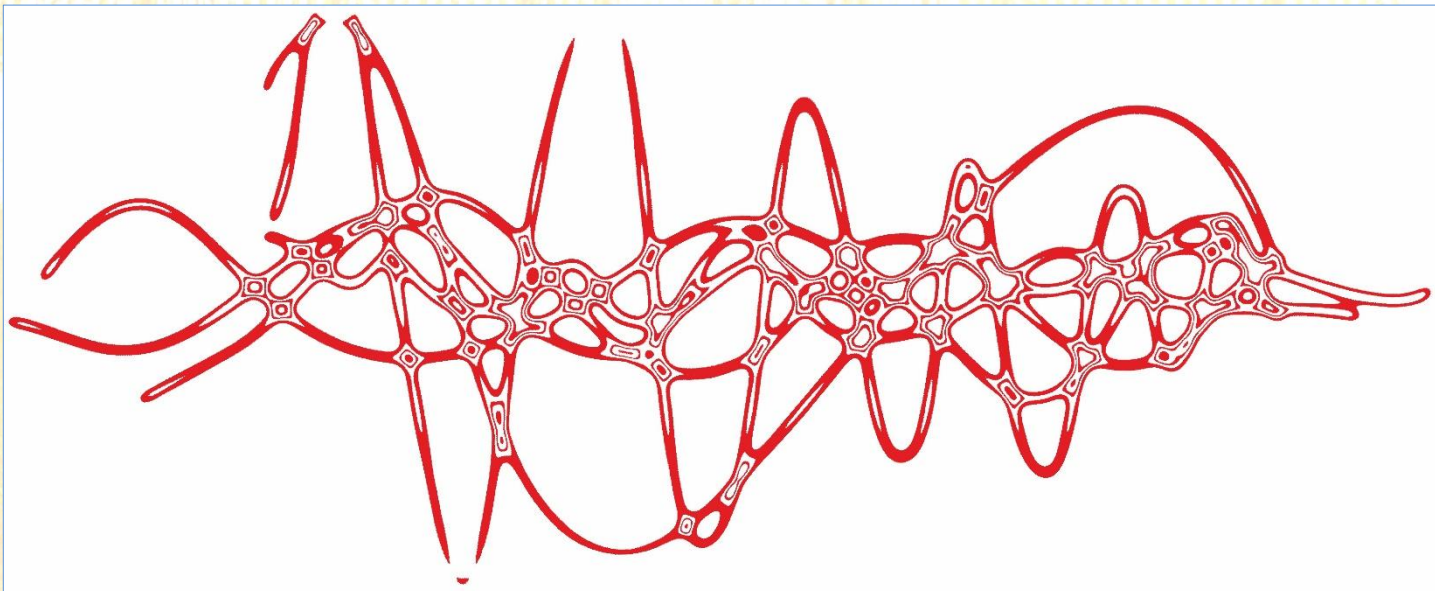
## Keywords

Computed tomography; detection; snapshot; X-ray; software.

## Kontaktné adresy

Ing. Radovan Gracovský, PhD.; Ing. Tomáš Gergel', PhD.  
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu  
Lesnícky výskumný ústav Zvolen  
Národné lesnícke centrum  
T.G. Masaryka 2175/22  
960 01 Zvolen, Slovak Republic  
radovan.gracovsky@nlcsk.org, tomas.gergel@nlcsk.org





# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



# VPLYV ŠTRKOVEJ VRSTVY NA VLHKOSTNÉ VLASTNOSTI PLOCHEJ JEDNOPLÁŠŤOVEJ STRECHY NA BÁZE DREVA S PAROZÁBRANOU ALEBO PAROBRZDNOU FÓLIOU S PREMENLIVOU DIFÚZNOU HRÚBKOU – NUMERICKÁ ANALÝZA DYNAMICKÉHO ŠÍRENIA VLHKOSTI

Martin Haladej, Jozef Štefko

## 1 Úvod

Pri navrhovaní jednoplášťových plochých striech na báze dreva s klasickým poradím vrstiev nad vykurovaným priestorom je nevyhnutné navrhnuť a zrealizovať konštrukciu strechy tak, aby nedochádzalo k nadmernému transportu vlhkosti z interiéru do strešnej konštrukcie a aby sa zabránilo hromadeniu vlhkosti v strešnej konštrukcii. Nadmerná vlhkosť v stavebných materiáloch na báze dreva zvyšuje ich náchylnosť na napadnutie plesňami a drevokaznými hubami spôsobujúcimi hnilobu (VIDHOLDOVÁ A SPOL., 2016). Pri návrhu sa snažíme navrhnuť konštrukciu spôsobom, aby sme nevytvorili vhodné podmienky pre vznik plesní a drevokazných húb spôsobujúcich hnilobu (VIITANEN a RITSCHKOFF, 1991), (WANG a MORRIS, 2010), (ALEV A KALAMEES, 2016).

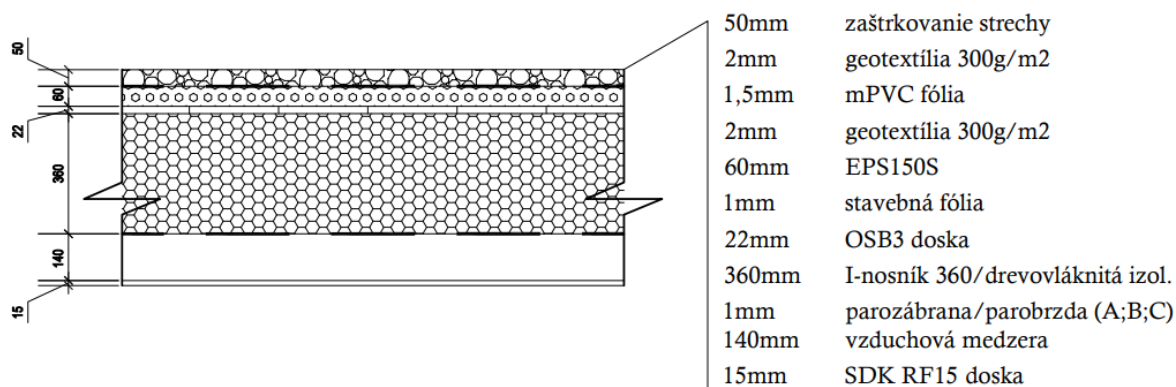
V praxi sa najčastejšie používajú pri jednoplášťových plochých strechách parozábrany, ktoré pri správnej realizácii výrazne zlepšujú vlhkostné vlastnosti fragmentu strechy (NUSSER A SPOL., 2010). V prípade, že sa počas realizácie stavby zabuduje do konštrukcie nadmerná vlhkosť, nastáva zvýšené riziko nesprávneho fungovania fragmentu strechy, pretože zabudovaná vlhkosť sa nemá z konštrukcie ako dostať. Z tohto dôvodu boli do jednoplášťových plochých striech projektantami navrhované parobrzdne fólie s variabilnou difúznou hrúbkou, ktoré mali zabezpečiť počas letných mesiacov presušenie fragmentu strechy tým, že prepustia vlhkosť, ktorá je tlačaná v letných mesiacoch pri otočení difúzneho toku v konštrukcii na parotesnú vrstvu. Každým rokom stúpajú počas letných mesiacov exteriérové teploty a tým sa zvyšuje teplotné zaťaženie stavebných konštrukcií. Najviac exponovanými sú práve strešné konštrukcie, ktoré sú vystavené priamemu slnečnému žiareniu najdlhšiu dobu počas dňa. Aj z dôvodu eliminovania prehrievania plochých striech budov sa v praxi začalo používať štrkovanie striech. Prvým dôvodom štrkovania striech bola ochrana hydroizolačnej fólie pred priamym slnečným žiarením, čím je zvyšovaná jej životnosť. Druhým dôvodom bolo zlepšenie teplotného zaťaženia konštrukcie plochej strechy a predlžovanie fázového posunu teplotného kmitu konštrukcie strechy, čím sa v mnohých prípadoch eliminovalo prehrievanie stavieb. Zaštrkovaním strechy sa ale zmení aj vlhkostné fungovanie strešnej konštrukcie, takže popri riešení tepelných vlastností nesmieme zabúdať na vplyv na vlhkostné vlastnosti konštrukcie.

V súčasne platných slovenských a európskych technických normách STN 73 0540-2+Z1+Z2 a EN322 sa šírenie vlhkosti najčastejšie hodnotí podľa zjednodušenej grafickej metódy - Glasserovej metódy (GLASSER, 1959). Metóda popisuje šírenie vlhkosti konštrukciou len ako šírenie vodnej pary konštrukciou v závislosti od faktoru difúzneho odporu  $\mu$  [-]. Softvér WUFI (Warme und Feuchte instationär) – metóda dynamického hodnotenia bola vytvorená na základe dizertačnej práce H.M. Künzela (KÜNZEL, 1995) a vychádza zo systému diferenciálnych rovníc, kde jedinou neznámou je teplota alebo relatívna vlhkosť.

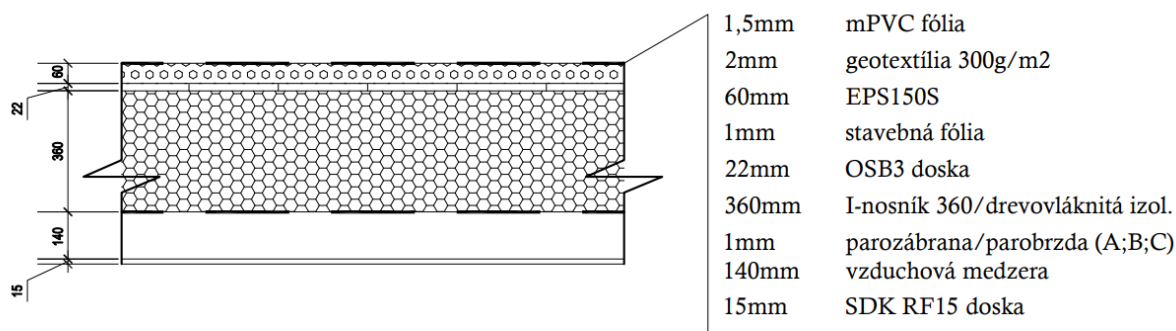
## 2 Metódy

### 2.1 Analyzované konštrukcie jednoplášťových plochých striech

Pri analýze vplyvu zaštrkovania strechy na vlhkosťné vlastnosti jednoplášťových plochých striech na báze dreva bolo vytvorených šesť typov skladieb konštrukcie. Navrhnuté skladby konštrukcií sa líšia použitím vo vrstve parotesnej fólie a v tom či sú, alebo nie sú zaštrkované (tienené). V skladbách sú použité parozábrana s vysokou difúznou hrúbkou ( $S_d = 300$  m), parobrzdna fólia s premenlivou difúznou hrúbkou s veľkým rozsahom hodnôt difúznej hrúbky ( $S_d = 0,5-30$  m), alebo parobrzdna fólia s premenlivou difúznou hrúbkou s malým rozsahom hodnôt difúznej hrúbky ( $S_d = 0,3-5$  m), pričom každá z týchto verzií bola v analýze uvažovaná v dvoch prevedeniach. Prvý variant je so štrkovým zásypom, druhý je bez vrstvy štrkového zásypu na exteriérovej strane konštrukcie. Hrúbka štrkového zásypu je v analýze uvažovaná 50 milimetrov. Táto hrúbka zásypu je dostatočná na úplný zásyp bez oslnenia hydroizolačnej fólie slnkom a v praxi je táto hrúbka zásypu bežne používaná. Najdôležitejším krokom bol výber zostáv bežne používaných v reálnych národných podmienkach pre jednoplášťové ploché strechy na báze dreva. Konštrukčné a materiálové riešenie jednotlivých zostáv jednoplášťových plochých striech s označením S1A, S1B, S1C a S2A, S2B, S2C použitých v analýze, je znázornené na Obrázku 1. a Obrázku 2. (mPVC – hydroizolačná fólia z mäkkého polyvinylchloridu, EPS – expandovaný polystyrén, OSB – orientované trieskové dosky, SDK – sadrokartón). Na numerickú analýzu bol zvolený softvér WUFI – Wärme Und Feuchte Instationär, ktorý patrí medzi odporúčaný softvér na analýzu dynamického šírenia tepla a vlhkosti v konštrukciách (HILL, 2003). V programe WUFI bolo vymodelovaných šesť fragmentov jednoplášťových plochých striech. Tieto fragmenty boli modelované s dĺžkou 1500 mm.



**Obrázok 1.** Skladba konštrukcie jednoplášťovej plochej strechy na báze dreva so štrkovým zásypom, verzie S1A-C (S1A- parozábrana  $S_d=300$ m; S1B- variabilná parobrzdna fólia  $S_d=0,3-5$ m; S1C- variabilná parobrzdna fólia  $S_d=0,5-30$ m).



**Obrázok 2.** Skladba konštrukcie jednoplášťovej plochej strechy na báze drevo bez štrkového zásypu, verzie S2A-C (S2A- parozábrana  $S_d = 300$  m; B- variabilná parobrzdna fólia  $S_d = 0,3-5$  m; C- variabilná parobrzdna fólia  $S_d = 0,5-30$  m).

## 2.2 Okrajové podmienky

Pre vnútorné okrajové podmienky boli nastavené nasledovné hodnoty. Vnútorná teplota osciluje medzi 20°C (zimné obdobie) a 22°C (letné obdobie), priemerná vnútorná teplota je 21°C. Relatívna vlhkosť vzduchu v interiéri sa pohybuje medzi 40% (zimné obdobie) a 60% (letné obdobie), priemerná relatívna vlhkosť je 50%. Tieto vnútorné okrajové podmienky boli vybrané na základe aktuálne platnej slovenskej technickej normy STN 73 0540-2+Z1+Z2 (2019) a STN EN ISO 13788.

Vzhľadom na to, že databáza vonkajších okrajových podmienok v programe WUFI 2D v.4.1. aktuálne neobsahuje údaje z územia Slovenska, boli vybrané klimatické údaje z lokality Viedeň - Rakúsko, ktoré sú súčasťou databázy znázornenej na Obrázku 3. Pre vonkajšie okrajové podmienky sú namerané hodinové hodnoty nasledovných veličín: teplota, relatívna vlhkosť, množstvo zrážok, smer a sila vetra, krátkovlnné a dlhovlnné žiarenie.



**Obrázok 3.** Vonkajšie okrajové podmienky (WUFI Databáza - Fraunhofer IBP).

### 2.3 Nastavenie numerickej analýzy

Po vymodelovaní geometrie fragmentov jednoplášťových plochých striech a určení jednotlivých materiálov v ich skladbách boli do výpočtu zadané údaje pre výpočtovú sieť. Modelovaný fragment bol rozdelený na 20 prvkov po šírke (os X) a 30 prvkov po výške (os Y) s tým, že každá vrstva kompozície, aj tá najtenšia (parozábrana alebo parobrzdna fólia), pozostáva z aspoň dvoch prvkov. Údaje z databázy WUFI boli určené ako počiatočné podmienky pre jednotlivé materiály uvedené v Tabuľke 1., ktorá obsahuje počiatočné údaje o teplote ( $^{\circ}\text{C}$ ), obsahu vody v materiáloch ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) a relatívnej vlhkosti (-).

**Tabuľka 1.** Počiatočné podmienky zakomponovaných materiálov (WUFI Databáza - Fraunhofer IBP).

Materiál	teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )	obsah vlhkosti ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	rel. vlhkosť (-)
SDK doska RF	20	6,3	0,8
Vzduchová medzera 140 mm	20	0	0,8
Parozábrana/parobrzdna f.	20	0	0,8
Drevovláknitá izolácia	20	5,9	0,8
OSB3	20	90	0,8
PE membrána	20	0	0,8
EPS 150S	20	1,8	0,8
Geotextília $300\text{g}/\text{m}^2$	20	5,9	0,8
SIKA Sikaplan G-15	20	0	0,8

Numerická analýza vplyvu zaštrkovania jednoplášťovej plochej strechy bola nastavená na 43800 časových krokov (hodín), čo zodpovedá piatim kalendárnym rokom s dátumom začiatku analýzy 1. októbra 2017. Výpočet bol zámerne spustený pred zimnou sezónou vzhľadom na náročnejšie vonkajšie okrajové podmienky, ktorým je fragment vystavený počas zimného obdobia. Päťročné časové obdobie bolo zvolené z dôvodu potreby dostatočného časového úseku vystavenia modelovaných fragmentov okrajovým podmienkam.

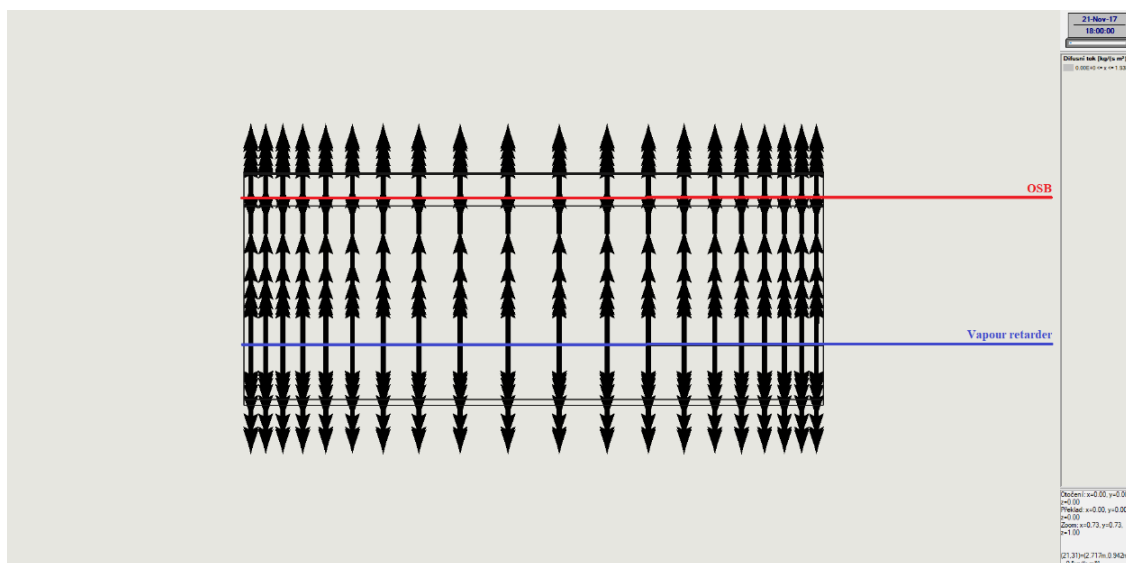
Pred vyhodnotením numerickej analýzy uvažujeme o nasledovných hypotézach:

- 1) V skladbách konštrukcií jednoplášťových plochých striech s použitím parozábrany S1A, S2A bude najmenšia zmena vlhkosti počas ročných cyklov v kritických vrstvách (OSB záklop, dutina vyplnená drevovláknitou izoláciou).
- 2) V skladbách s použitím parabrzdnej fólie s premenlivou hodnotou  $S_d$ , bez štrkového zásypu S2B a S2C dôjde počas letných dní k dostatočnému prehrievaniu konštrukcie, otočeniu difúzneho toku v konštrukcii a jej presušaniu. V skladbe S2A bude vlhkosť vyššia ako v skladbách S2B a S2C z dôvodu použitia parozábrany a tým obmedzenej možnosti presušania konštrukcie počas letných mesiacov.
- 3) V skladbách s použitím parabrzdnej fólie s premenlivou hodnotou  $S_d$  a so štrkovým zásypom S1B a S1C nedôjde k dostatočnému prehrievaniu konštrukcie počas letných dní a efekt variabilnej difúznej hrúbky  $S_d$  sa nebude dostatočne prejavovať. Zároveň bude v zaštrkovaných konštrukciách S1B a S1C najvyššia vlhkosť v kritických vrstvách – OSB a tepelná izolácia.

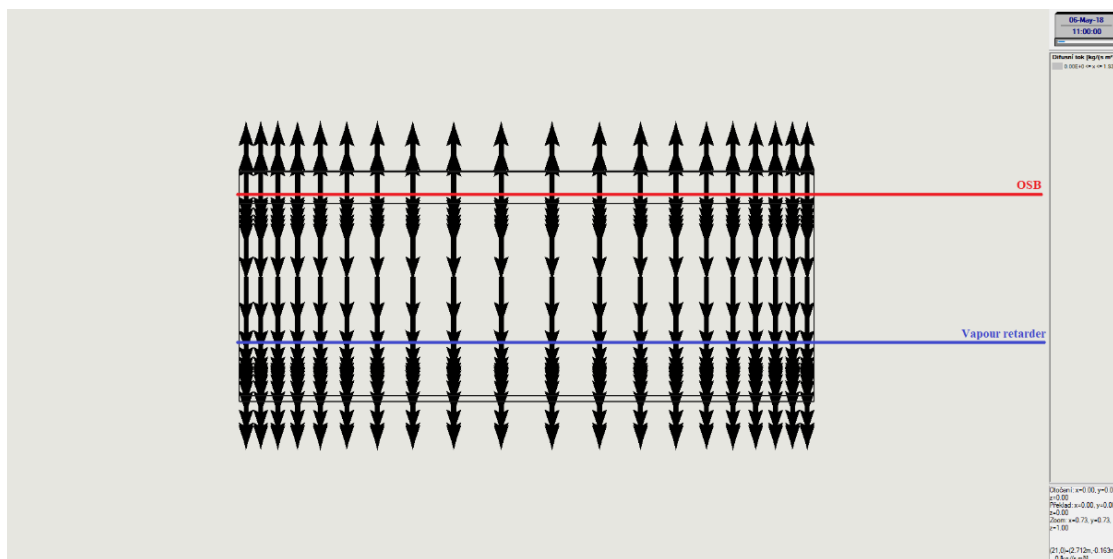
### 3 Výsledky a diskusia

Tabuľka 2. Hmotnostný obsah vlhkosti (M.-%) po 1.roku analýzy.

	Gypsum board	Vapour barrier/retarder	Steico Zell insulation	OSB	EPS
S1A	0.497	0.0005	13.490	16.122	5.411
S1B	0.499	2.926	12.806	15.969	5.403
S1C	0.498	0.0005	13.279	16.075	5.409
S2A	0.497	0.0006	15.659	14.000	4.108
S2B	0.499	2.952	11.159	15.418	4.086
S2C	0.498	0.0005	13.054	15.596	4.101



Obrázok 4. Smer difúzneho toku v konštrukcii v mesiaci November (WUFI2DMotion).



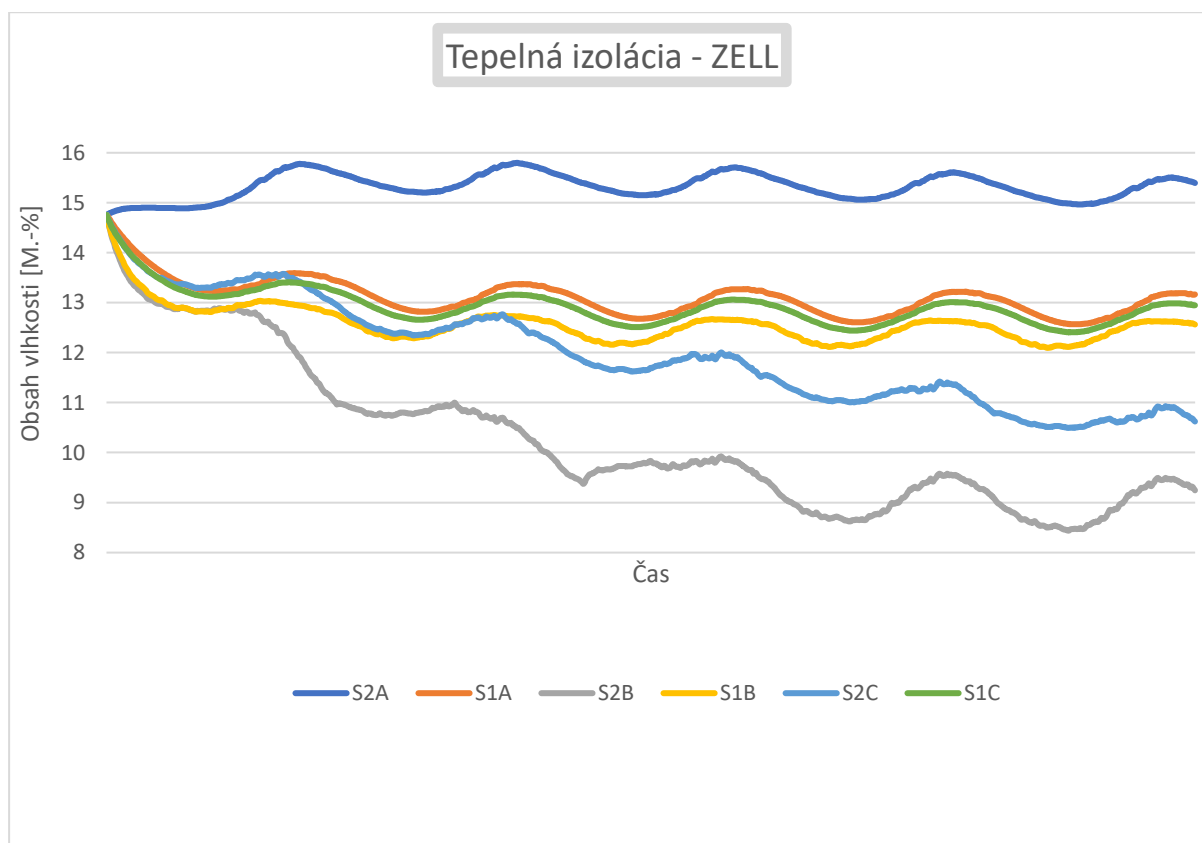
Obrázok 5. Smer difúzneho toku v mesiaci Máj (WUFI2DMotion).

**Tabuľka 3.** Priemerný obsah vlhkosti v OSB záklope v sledovanom období (M.-%).

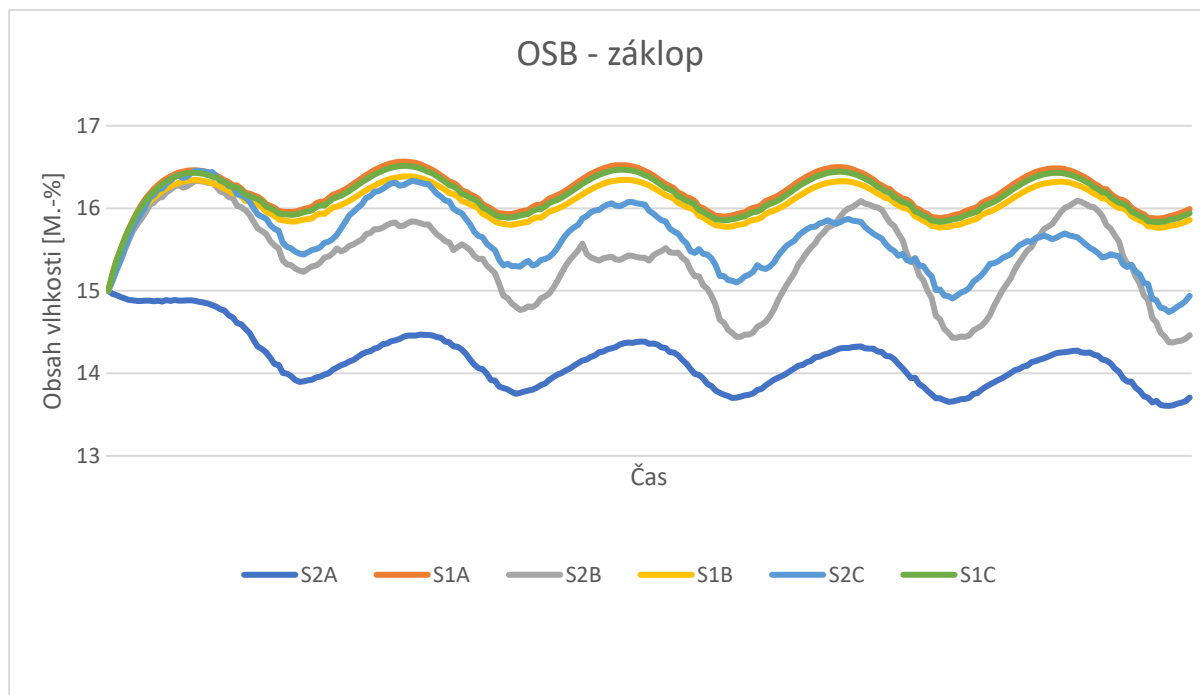
	S2A	S1A	S2B	S1B	S2C	S1C
1.rok	14.570	16.117	15.818	16.018	15.949	16.090
2.rok	14.170	16.264	15.459	16.111	15.875	16.217
3.rok	14.088	16.227	15.170	16.076	15.663	16.176
4.rok	14.032	16.204	15.329	16.062	15.479	16.154
5.rok	13.981	16.192	15.298	16.056	15.343	16.143

**Tabuľka 4.** Priemerný obsah vlhkosti v drevovláknitej izolácii (M.-%).

	S2A	S1A	S2B	S1B	S2C	S1C
1.rok	15.174	13.585	12.780	13.095	13.541	13.445
2.rok	15.465	13.123	10.750	12.546	12.560	12.943
3.rok	15.407	12.988	9.721	12.435	11.827	12.802
4.rok	15.314	12.918	9.059	12.397	11.210	12.735
5.rok	15.217	12.881	8.919	12.383	10.677	12.702



**Obrázok 6.** Obsah vlhkosti v drevovláknitej tepelnej izolácii v analyzovaných fragmentoch.



**Obrázok 7.** Obsah vlhkosti v OSB záklope v analyzovaných fragmentoch.

Hodnoty vonkajšej teploty vzduchu a relatívnej vlhkosti vzduchu boli zadané do numerického výpočtu podľa Obrázku. 3. Teplota vzduchu v interiéri bola  $21 \pm 1$  °C a relatívna vlhkosť vzduchu  $50 \pm 10$  %, podmienky zodpovedali obsadenosti ľuďmi v súlade s národnou normou.

V žiadnej z analyzovaných skladieb konštrukcií nedochádza k hromadeniu vlhkosti, pri opakujúcich sa ročných cykloch a posudzované fragmenty jednoplášťových plochých striech časom vysychajú. Skladby konštrukcií so štrkovým zásypom (S1A; S1B a S1C) dosiahnu vlhkosťnú rovnováhu už po dvoch rokoch. Skladby bez štrkového zásypu a s parobrzdnou fóliou s premenlivou hrúbkou difúzie v prvých rokoch výrazne vysychajú, no ani po piatich rokoch nedosahujú tieto skladby stav vlhkosťnej rovnováhy a objem vlhkosti každým rokom ďalej klesá. Najväčšie množstvo vlhkosti a tým aj riziko s najväčšou pravdepodobnosťou biodegradácie materiálov sa sústreďuje v záklope z orientovanej drevotrieskovej dosky – OSB a v drevovláknitej tepelnej izolácii, čo je možné vidieť v Tabuľke 2. Rozborom výsledkov sa preto budeme detailnejšie zaoberať v týchto vrstvách (orientovaná drevotriesková doska - OSB a drevovláknitá izolácia). Na Obrázku 6 a Obrázku 7 môžeme sledovať priebeh objemu vlhkosti v jednotlivých fragmentoch jednoplášťových plochých striech v drevovláknitej tepelnej izolácii a v OSB záklope.

Z týchto obrázkov je zrejмый vplyv štrkovania striech na vlhkosťné správanie konštrukcie, ktorý je porovnateľný s vplyvom tienenia na vlhkosťné vlastnosti (NUSSER A SPOL. 2010) a BACHINGER A SPOL., 2016). Fragmenty so štrkovým zásypom S1A, S1B, S1C dosiahli vlhkosťnú rovnováhu už počas prvého roku výpočtu a vlhkosť najviac namáhaných materiálov kolíše v ročných intervaloch bez výraznejších zmien. V skladbách bez štrkového zásypu S2A, S2B a S2C dochádza v letných mesiacoch k väčšiemu prehrievaniu konštrukcie. Dôsledkom tohto prehrievania konštrukcie je otočenie difúzneho toku vlhkosti v konštrukcii v oblasti OSB a parozábrany resp. parobrzdnej fólie znázornenej na Obrázku 4, Obrázku 5. V prípade použitia parobrzdnej fólie s variabilnou difúznou hrúbkou (S2B, S2C), oproti použitiu parozábrany (S2A) dochádza k zníženiu vlhkosti drevovláknitej tepelnej izolácie. Vysychanie, ktoré prebieha vo



vrstve tepelnej izolácie, je najvýraznejšie pri konštrukciách S2B, kde je použitá parobrzdná fólia s premenlivou hrúbkou difúzie s nízkym rozptylom hodnôt (0,3-3m). Rozdiely možno porovnať s meraniami „IN-SITU“ (LANGEROCK A SPOL., 2017).

V Tabuľke 3 môžeme vidieť, že priemerná vlhkosť OSB dosiek časom klesá vo všetkých skladbách. Tabuľka 4 nám ukazuje výrazný pokles priemernej vlhkosti drevovláknitej tepelnej izolácie Zell. Po piatich modelovaných rokoch je najvyššia vlhkosť v skladbách s použitím parozábrany S1A a S2A.

Z výsledkov modelovania a analýzy vlhkosti v drevovláknitej tepelnej izolácii Zell na Obrázku 6 a OSB záklopu na Obrázku 7 je možné vyvodiť nasledovné závery. V žiadnej z verzií analyzovaných fragmentov jednoplášťovej plochej strechy a ani v žiadnej vrstve z týchto fragmentov nedochádza k akumulácii vlhkosti. Zároveň v žiadnej vrstve analyzovanej jednoplášťovej plochej strechy vlhkosť nedosiahne kritickú hodnotu presahujúcu 20 %, čím sa nedosiahne podmienka pre zvýšené riziko biodegradácie plesňami a drevokaznými hubami. (VIITANEN A RITSCHKOFF 1991, VIITANEN A SPOL. 2003, WANG A MORRIS 2010, ALEV A KALAMEES 2016).

Prvá hypotéza, ktorá hovorí o najmenšej zmene vlhkosti v analyzovanom časovom období v kritických vrstvách fragmentov z pohľadu vlhkosti (OSB záklop a izolácia Zell) s použitím parozábrany S1A a S2A je na základe prevedenej analýzy a jej výsledkov zobrazených na Obrázku 6 a Obrázku 7 vyvrátená. Najmenšie zmeny vlhkosti v kritických vrstvách fragmentov nastávajú pri zaštrkovaných konštrukciách S2A, S2B a S2C bez výraznejšieho vplyvu použitej parotesniacej vrstvy na zmeny vlhkosti.

Druhá hypotéza, ktorá hovorí o fragmentoch s použitím parobrzdnej fólie s premenlivou hodnotou  $S_d$  bez štrkového zásypu S2B a S2C a ich prehrievaniu počas letných období a tým spôsobenému presušaniu konštrukcií je analýzou vlhkosťného správania sa potvrdená. Najvýraznejšiu schopnosť letného presušania majú fragmenty bez zaštrkovania s použitím parobrzdnej fólie Obrázok 6 a Obrázok 7.

Prvá časť tretej hypotézy, ktorá hovorí o nedostatočnom prehrievaní fragmentov so zaštrkovaním a o vymazanom efekte parobrzdnej fólie s variabilnou difúznou hrúbkou je potvrdená. Použitie zaštrkovania výrazne ovplyvňuje schopnosť jednoplášťovej plochej strechy s použitím parobrzdnej fólie presušať sa počas letného obdobia. Druhá časť tretej hypotézy je analýzou určených fragmentov vyvrátená. Najvyššiu vlhkosť v drevovláknitej tepelnej izolácii bude mať fragment S2A a teda fragment s použitím parozábrany a zaštrkovania. Najnižšiu vlhkosť v drevovláknitej tepelnej izolácii bude mať fragment S2B, fragment s parobrzdnu fóliou s nízkym rozptylom hodnôt difúznej hrúbky ktorý nie je zaštrkovaný. Čo sa týka OSB záklopu, tam budú mať najvyššiu vlhkosť fragmenty, ktoré sú zaštrkované. Najnižšiu vlhkosť v OSB záklope bude mať fragment S2A a teda fragment bez zaštrkovania s použitím parozábrany.

#### 4 Záver

Na základe cieľa príspevku overiť vplyv zaštrkovania jednoplášťovej plochej strechy na báze dreva je možné prezentovať nasledovné výsledky:

- Analýza WUFI ukázala, že vplyv zaštrkovania jednoplášťovej plochej strechy alebo jej iného zatienenia (fotovoltaika, technológia vetrania, použitie zelenej strechy) je významný z hľadiska prúdenia vlhkosti v konštrukciách. Verzie bez štrkového zásypu vykazujú po piatich ročných cykloch nižšiu vlhkosť v najviac rizikových vrstvách, v porovnaní s rovnakými konštrukčnými skladbami, ktoré boli štrkované.

- Vplyv štrkovania významnejšie ovplyvňuje vlhkosť fungovanie konštrukcie ako výber parotesnej fólie. V prípade štrkovania konštrukcie jednoplášťovej plochej strechy sa pridaná hodnota parobrzdnnej fólie s variabilnou difúznou hrúbkou  $S_d$  výrazne znižuje a preto je potrebné sa pri návrhoch skladieb jednoplášťových plochých striech zamerať na skutočnosť, či exteriérová strana konštrukcie bude zaštrkovaná, prípadne tienená iným, už vyššie spomenutým spôsobom.
- Ukázalo sa, že v prípade použitia parotesných fólií s premenlivou hodnotou difúznej hrúbky  $S_d$  majú jednoplášťové ploché strechy bez zaštrkovania schopnosť počas letnej sezóny výraznejšie vysychať a tým znižovať riziko tvorby plesní a húb.

## Pod'akovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu IPA č.6/2023 „Vplyv parozábranových fólií s rôznym typom faktoru difúzneho odporu v skladbách jednoplášťových plochých striech na vlhkosť vlastnosti a priebeh vlhkostí v skladbe drevených stavebných konštrukcií“ a vďaka spolupráci Katedry drevených stavieb DF TU vo Zvolene s firmami M-House, s.r.o. a TEPORE s.r.o.

## Literatúra

ALEV, Ů., KALAMEES, T., Avoiding mould growth in an interiorly insulated log wall. *Build. Environ.*105, 104-115, 2016.

BACHINGER, J., NUSSER, B., BEDNAR, J., TEIBINGER, M., Influence of an unvented air cavity at the cold side of the insulation in sun exposed wooden flat roofs, *World Conference on Timber Engineering Vienna - Austria*, August 22.-25.2016, 2016.

GLASER, H., *Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen*, *Kaltetechnik*, s. 345.355, 1959.

KÜNZEL, H.M., *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters*, PhD Thesis, Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 65s., 1995.

LANGEROCK, CH., TILMANS, A., DE METS, T., LONCOUR, X., NGUYEN, E., CHARRON, S., MICHAUX, B., *Hygrothermal behaviour of compact roofs in wood frame constructions through on-site measurements*. 11th Nordic Symposium on Building Physics, Technology and Industry, Trondheim, Norway, 11-14 June 2017, 2017.

NUSSER, B., TEIBINGER, M., BEDNAR, J., *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung*, *Bauphysik*, 2010 – Wiley Online Library, 2010, <https://doi.org/10.1002/bapi.201010016>.

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

STN EN ISO 13788, *Tepelno-vlhkosťové vlastnosti stavebných dielcov a konštrukcií. Vnútorňa povrchová teplota na vylúčenie kritickej povrchovej vlhkosti a kondenzácie vnútri konštrukcie – Výpočtové metódy*, Bratislava: STN, 2013.

VIDHODLOVA, Z., REINPRECHT, L., KROKOŠOVÁ, J., *Náchylnosť dreva na mikrobiálnu kontamináciu baktériami a plesňami*, *In Proceedings of the International Conference CSTI 2015 Conservation Science*, Technology and Industry, Bratislava, Slovakia, 7-9 October 2016, s. 307-314, 2016

VIITANEN, H., RITSCHKOFF, A.C., Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature, Uppsala: Swed Univ Agric Sci Dept Forest Prod, 1991.

VIITANEN, H., SALONVAARA, M., Failure Criteria. In H.R.Trechsel (Ed), *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 66-80s., 2001.

WANG, J., MORRIS, P.-I., A review on conditions for decay initiation and progression. *The International Research Group on Wood Protection*. Biarritz – France. IRG/WP 10-204444, 10p, 2010.

## Summary

**The Effect of a Gravel Layer on the Moisture Properties of a Compact Flat Roof based on Wood with Vapor Retarder or Vapor Barrier with Variable Diffusion Thickness – Numerical Analysis of Dynamic Diffusion of Moisture.** The contribution is focused on the numerical verification of the influence of the compact flat roof grouting in the external boundary conditions of Central Europe (Vienna - Austria), the internal boundary conditions of the analysis met the conditions for human habitation. WUFI 2D software was used to analyse compact flat roof structures using a vapor barrier and a vapor retarder with a variable diffusion thickness with a low variance of values and a vapor retarder with a variable diffusion thickness with a high dispersion of values. Each of these three compositions was assessed in versions without shading and with shading of the surface (gravel coating of the roof from the exterior side). The length of the analysed period was 5 years, and the main goal was to verify the moisture behaviour of the structure in its critical layers and the effect of grouting on moisture events in a fragment of a compact flat roof structure. The results of the measurements showed the different functioning of compact flat roofs based on wood depending on the grouting, as well as other conclusions for the design and implementation of the composition of compact flat roofs.

## Key words

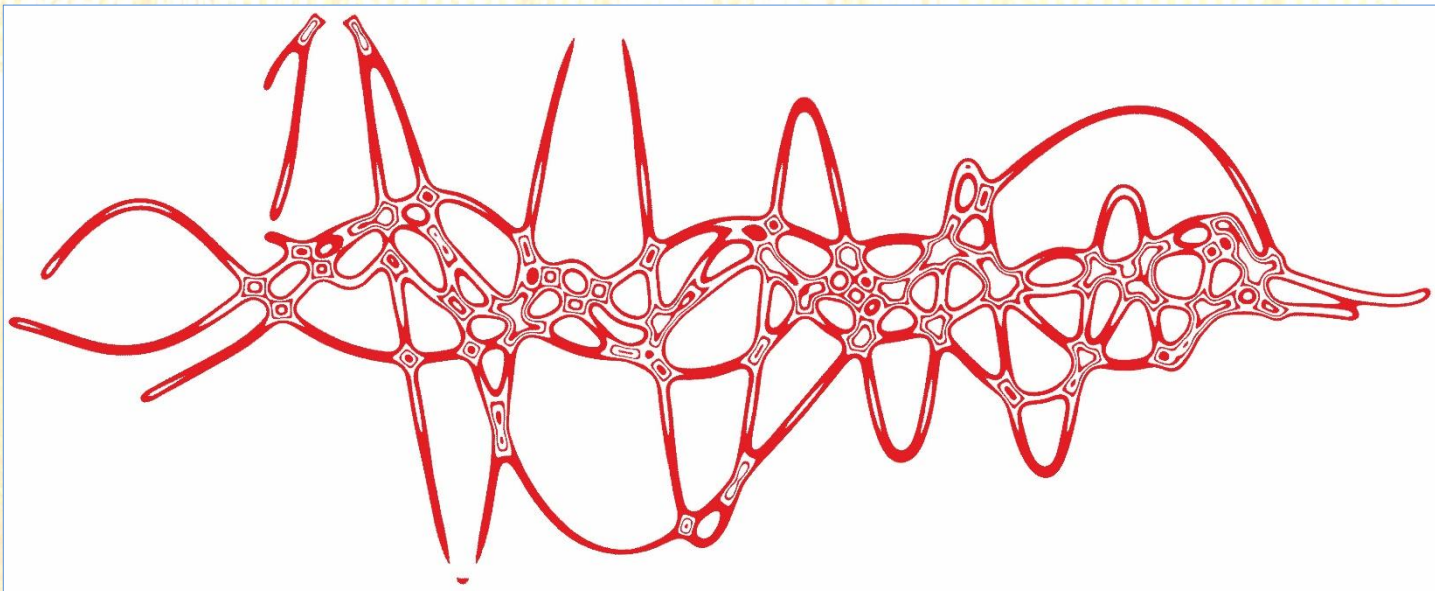
Dynamic moisture evaluation; compact flat roof; moisture content; WUFI 2D software; vapour barrier; vapour retarder.

## Contact Address

Ing. Martin Haladej  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Sciences and Technology  
Technical University in Zvolen  
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovakia  
xhaladejm@is.tuzvo.sk  
haladej.martin20@gmail.com  
<https://kds.tuzvo.sk/>

M-House, s.r.o.  
Hranicna 18  
825 05 Bratislava  
Slovakia  
haladej@mhouse.sk  
<https://mhouse.sk/>

prof. Ing. Jozef Štefko, CSc.  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Sciences and Technology  
Technical University in Zvolen  
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovakia  
stefko@tuzvo.sk  
<https://kds.tuzvo.sk/>



# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## THREE PRINCIPLES OF THE EUROPEAN 12-TET SYSTEM APPLIED TO ORGANS OF THE CONSTANT MENSURE

Ján Haluška

### 1 Introduction

From a scientific point of view, tones in music are material objects of great complexity. All theoretical concepts are applied with respect to pre-specified accuracy, which indicate pre-determined compromise corridors (e.g., psycho-acoustical, mathematical, physical, material, spiritual, art-historian, natural-scientific). As well as concerning other tuned European instruments, there are three psychological phenomena on which is based the present prevailing the 12-tone equally tempered tone system (shortly: 12-TET) in the present time, concerning organ in particular, cf. [27]. They are: Pythagorean Comma, Octave Equivalence, and Equal Timbre of all tones in the audio diapason of the stop. Dealing with whole Fourier tone decompositions, the infinite object lifts the notion 12-TET to a higher level of mathematical abstraction; it became a part of functional analysis. The traditional 12-TET was constructed on Fourier series of truncated three first partials of the tone.

### 2 Pythagorean Comma and the European music

The Pythagorean Comma notion is rather commonly known from the history of mathematics and music.

In the psychical word we are use usually additive form of a description of results of operations. On the other hand, speaking in the physical material world we are often working in multiplicative group. So it is in the musical acoustics. Commonly understood in music, under the term *interval* (of tones), we understand a tone which is a division of two tones but showing which tones create this interval.

In the sixth century B.C., the Greek scholar Pythagoras studied vibrations of strings. He had defined the octave and fifth intervals of two tones. He created a sequence (of tones) that is now called the *Pythagorean Circle*, which eventually led to the more general *Circle of Fifths*. Note that musical intervals of *pure octaves*, *pure fifths*, and *pure quarters* are clearly recognizable by human healthy hearing. So, Circle of Fifths has naturally become a very foundation of the present Western music harmony theory.

When creating the **fifth model of 12-TET**, we start with the observation that the set of tones mathematically forms a group. E.g., arbitrary two tones (intervals) can be conjugated and we obtain a third tone (interval) as a result; there are neutral and inverse elements; etc. To distinguish the notions interval (in the classical meaning in an additive group), and interval in music (a notion in a multiplicative group), we will use an clarifying additive, i.e. we speak about musical intervals.

The tone system 12-TET is a discrete disambiguation of the space of tones via duodecimal numbers.

Let us start from any arbitrary chosen tone. Let us denote a musical interval  $\alpha$  which be a conjunction of a sequence of 12 pure fifth intervals, where a beginning lower tone of each interval is an end tone of the next higher one.

Let another musical interval  $\beta$  be created similarly, but as a sequence of 7 pure octaves. Let the starting tones of intervals  $\alpha$  and  $\beta$  be identical.

The numerical discrepancy of the resulting tones  $\alpha$  and  $\beta$  expressed in ratio of frequencies is known as the

**Definition 1** *Pythagorean Comma interval*

$$\pi \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\alpha}{\beta} = \frac{(3/2)^{12}}{2^7} = 1.0136 \dots > 1.$$

Now, we *psychologically* identify tones which are ends of intervals  $\alpha$  and  $\beta$ . To obtain an equality, all pure fifths have to be slightly diminished (= equally tempered). The tempering can be satisfactorily exact physically done by hand with counting beams of vibrating tones.

Next, all obtained 12 tones are shifted into one chosen octave, see the following principle of 12-TET, *Octave Equivalence*. As a result, there are 12 equally tempered tones (intervals of tones) in one octave.

Using the Octave Equivalence notion, but in the opposite direction, the done tempered one octave is epimorphically extended to all tones (to the whole audio diapason). More precisely, we created the first frequencies of all tones in 12-TET with respect to a starting tone.

**Remark 1** *Any arbitrary fixed tone could be claimed to be a basic tone in the beginning to create 12-TET, it is a so called Camertone. In 12-TET, Camertone defines frequencies of all tones as well as their timbre. Organ builders agreed to use as Camertone the first partial tone frequency of Great C, 261,63 Hz. Other instruments mainly use as a Camertone frequency 440 Hz for the first harmonic of A in the one-prime octave.*

Contrary to the previous fifths model, a **quarter model of 12-TET** is derived from 60 music pure quarter intervals (i.e., from 61 tones of quarters). We obtain an interval  $\gamma$  and conjunction of 5 octaves yield an interval  $\delta$ . Again, having the first (starting) tones of both models the same.

The difference between the two 12-TET models consists of that the reverse Pythagorean Comma interval is divided as follows: 5 pure octaves are divided into 12 equal quarter intervals. To obtain an equality, we need slightly enlarge (temper) quarters,

$$\frac{1}{\pi} = \frac{\delta}{\gamma} = \frac{2^5}{(4/3)^{12}} = 0.9865 \dots < 1.$$

After the epimorphic procedure with surjective Octave Equivalence enlargement analogous to the first kind model (from one octave to all octaves in the audio diapason), we obtain the same result. So, the following theorem holds:

**Theorem 1** *The fifth and quarter models of 12-TET are equivalent.*

**Remark 2** *The fifth model is statistically preferred by manual tuners since using of 85 tones technically gives a more accurate result.*

The previous theorem leads to the following definition:

**Definition 2** *If all tempered tones have the same timbre in the whole sound diapason, we say that the given tone system is a 12-TET.*

**Remark 3** *This way of tempering of fifths or quarters via Pythagorean Comma is typical and characteristic for European music. More about we can find in the next section.*

The notion "the same timbre in the whole sound diapason" will be more explained in the third section and precised mathematically for pipes of Principal and other constant measure registers in the fourth section.

### 3 Octave Equivalence, a mechanism of octave circularity of tones in the brain

Considering intervals  $\alpha$  and  $\beta$  in the previous section, we can temper (identify psychologically) either the interval  $\beta$  (conjugated fifths) and fix the interval  $\alpha$  (conjugated octaves) in the fifth model of 12-TET, or, vice versa, we can temper (identify psychologically) either the interval  $\beta$  (conjugated octaves) and fix the interval  $\alpha$  (conjugated fifths) in the fifths model of 12-TET. The same holds for The quarter model of 12-TET.

In European music, we accept the first way when defining 12-TET and make linear the set of tones. Octave Equivalence is the second pillar of European music. In this section of paper, we write also about other important psychological reason why in European music prefer pure octaves and deal with tempered fifths and not vice-versa.

After the unison, octave is the simplest interval in European music due to closely related first and second harmonics. If the first and second partials produced with the same instrument is compared with the octave interval produced with two different instruments, human ear tends to hear both tones as "*being the same.*" The musical interval between two first partials of a tone is so natural to humans that when men and women are asked to sing in unison, they typically sing in octave, cf. [18]. For this reason, tones an octave apart are given the same tone name in the Western system of music notation, e.g., the name of a tone an octave above the tone **A** is also a tone **A**. This psychological phenomenon is called *Octave Equivalence*. The assumption, that pitches one or more octaves apart are musically equivalent in many ways, is leading to the convention that *scales are uniquely defined by specifying the intervals within an octave*, cf. [6, 8, 13, 16, 17, 18].

Note that Octave Equivalence is a part of most advanced musical cultures, but it is far from universal in primitive and early music, cf. [9]. The languages in which the oldest extant written documents on tuning are written, Sumerian and Akkadian texts), have no known word for *octave*. However, it is believed that a set of cuneiform tablets that

collectively describe the tuning of a nine-stringed instrument (believed to be a Babylonian lyre) describe tunings for seven of the strings, with indications to tune the remaining two strings are octave from two of the seven already tuned strings. cf. [15, 9].

A property of complex harmonic sounds, such as animal calls, vowels, or violin tones, is that they easily become octave ambiguous. If one of partials 1, 3, or 5 has a low amplitude in the sound spectrum, partials 2, 4, 6 and 8 can be mistaken by the pitch extracting mechanism as partials 1, 2, 3, and 4 of a different complex sound, whose pitch is one octave higher. This is the reason why even experienced musicians easily make octave errors. Apparently octave errors were irrelevant during the evolution of hearing. However, animals gained in pitch stability within a one-octave frame by simply collapsing all simultaneous pitch candidates, as determined in the auditory midbrain, onto one single and general octave frame at a subsequent stage of processing in the auditory thalamus.

The mechanism of octave circularity in the brain. Before 2004 it was unknown whether the human brain (auditory brainstem response) is hard-wired for the perception of octave circularity. In all advanced musical cultures the names for tones in scales are repeated, when the octave interval (frequency ratio 1:2) is reached. For example, in the European music system, the octave-spaced tones of 110, 220, and 440 Hz are all called **A**. Only in technical descriptions an additional octave number is added (like  $A_{-2}$ ,  $A_{-1}$ , or  $A_0$ ). The universal practice of tone name circularity indicates an equally universal circularity in pitch perception. Octave circularity in pitch perception was also observed in the monkey and parrots, cf. [11, 19].

It had earlier been known from the cat and the rabbit that the ventral division of the medial geniculate nucleus (MGN) of the thalamus is an only part in the auditory brain of mammals that has an octave architecture. Here, stacked neuron layers show a frequency mapping that progresses in jumps of one octave across layers and in a fine-graded scaling along layers.

The fiber network between the neuron layers is such that all signals triggered by octave-spaced tones (such as  $A_2$ ,  $A_3$ , and  $A_{-2}$ ) are likely to be pooled. They could then be trans-coded into an additional signal for a general **A**. This would explain why all tones called **A**, regardless from which octave, have a common pitch quality, a so-called pitch chroma. Thus, the auditory thalamus can be considered as the anatomical basis of our internal chroma map.

Data on pitch shift caused by the medical drug carbamazepine and on statistics of inner-ear tones (SOAEs) now revealed the first physiological evidence of hard-wired octaves in the human brain, cf. [7, 10].

**Remark 4** *Also the second approach has its right to exist. In Pacific region, there is known music more territorially extended than the fifth model of 12-TET, which is based on lowered and highered octaves and the pure quarters. Even animals uses these shifted octaves (bird natural singing, monkey screeching) but pure fifths, music instruments are mostly gongs. Partial tones of gong sound has another Fourier decomposition of partials as vibrating strings or air columns in pipes. Gamelan music uses two tuning systems: slendro and pelog. Slendro is composed of a five-note scale with each pitch is roughly equidistant from the next, while pelog is a seven-note scale from which five-note modes are constructed.*

**Remark 5** *One of the main functions of Octave Equivalence is "to cut up" the continuous diapason of tones to individual tones, to produce a discrete subset of tones 12-TET.*

**Remark 6** *The first three tone partials are important when developing European tone systems, the 12-Tone Equal Temperament, in particular. Who works with children choruses knows that children for until some age feel as equivalent tones in the pure fifths intervals (sounding the tone and the tone who is the third partial of this tone). This ability is lost after about a year, usually after some musical education training. Small children clearly distinguish the pure fifth and the tempered ones, cf. [7, 10, 14].*



## 4 Equal timbre of pipes in a given stop

The third assumption of 12-TET construction consists in that all 12-TET tones of a given stop, or, a music instrument has the same timbre, which is characteristic for this stop (instrument).

In European music, there are two basic different kinds of generators which have tuned tones (setting the frequency) having the same timbre in the all audio diapason. They are string and pipe instruments with the transverse and longitudinal wave generated sound, respectively. We do not deal with problems how to reach equal timbre of the sequence of strings in this paper.

**Remark 7** *Concerning pipes, it is general known, that we distinguish three basic types of the organ pipe stop timbres: flutes, principals, and strings. It is implied from the pipe construction that there are three basic factors defining pipe timbre with respect to the pipe length: an area (diameter) of the across cut, the highness and brightness of the cut (together so called labium). Then there are also further less important factors (material thickness of walls, acoustics of space, etc.*

For simplicity and making a primordial mathematical global imagination of an organ sound, we will deal only with an equal timbre function when the pipe diameter depends only on the pipe length.

It is observable by experience that a simple minification of a pipe does not give the same timbre as the entire pipe produces. A consequence from the Fourier theory is that the property *to have the same timbre* is countervailing for tones with different frequencies of the first partial. The commonly known Chladni figures in physics confirm this claim visually. Every two tones having different pitch are individual because we cannot synchronize higher partials of them. As a result, we consciously construct a tone system which is the second (after Pythagorean Comma) psycho-acoustical compromise satisfying our human senses.

**Example 1** *When comparing sets  $P(C_2)$  and  $P(C_3)$  containing harmonics of tones  $C_2$  and  $C_3$ , respectively, it is implied from the Fourierov decompositions of tones, that  $G_3 \in P(C_2)$  but  $G_3 \notin P(C_3)$ . These concern also further many harmonics in  $P(C_3)$  in comparing with  $P(C_2)$ . Although structures of these tones may be isomorphic, we must their equal timbre set up artificially.*

From energetical reasons, individual harmonics of the Fourier decomposition of every material tone have a decreasing loudness which provides a finite convergence of this sequence.

Let us bring a finite (truncated) table of diameters in [mm] of cylindrical pipes of the standard Principal stop, cf. [21], p. 84, in the form of the tuning triangle for open pipes in  $\Omega_N$ ,  $N = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , in other words - equivalently, in  $16', 8', 4', \dots, 1/16'$  octaves, where  $1' = 30$  cm (one feet). The quantity  $f_1(X^{[N,k]})$  denotes a frequency of the first harmonic of the corresponding tone  $X^{[N,k]} \in T_{12}$ , where  $N \in \mathbb{Z}$  and  $k = 0, 1, 2, \dots, 11$ .

$\Phi(X^{(N,h)})$	16'	8'	4'	2'	1'	1/2'	1/4'	1/8'	1/16'
$f_1(C_N)$	261.5	155.5	92.4	54.9	32.6	19.3	11.5	6.8	4.0
$f_1(C_N^\sharp)$	250.4	148.9	88.5	52.6	31.3	18.6	11.0	6.5	3.9
$f_1(D_N)$	239.8	142.6	84.7	50.4	29.9	17.8	10.5	6.3	3.7
$f_1(D_N^\sharp)$	229.6	136.5	81.1	48.2	28.7	16.9	10.1	6.0	3.6
$f_1(E_N)$	219.0	130.7	77.7	46.2	27.4	16.3	9.7	5.7	3.4
$f_1(F_N)$	210.6	125.2	74.4	44.2	26.3	15.6	9.3	5.5	3.3
$f_1(F_N^\sharp)$	201.6	119.9	71.3	42.3	25.2	14.9	8.8	5.2	3.1
$f_1(G_N)$	193.1	114.8	68.2	40.5	24.1	14.3	8.5	5.0	3.0
$f_1(G_N^\sharp)$	184.9	109.9	65.3	38.8	23.1	13.7	8.1	4.8	2.8
$f_1(A_N)$	177.1	105.3	62.6	37.2	22.1	13.1	7.8	4.6	2.7
$f_1(A_N^\sharp)$	169.5	100.8	59.9	35.6	21.1	12.6	7.4	4.4	2.6
$f_1(B_N)$	162.7	96.5	57.4	34.1	20.2	12.0	7.1	4.2	2.5

**Remark 8** *An evaluation of tone frequencies in 12-TET is standard, e.g.,  $f_1(A_0) = 440$  Hz (at  $20^0$  C, etc.). In the 19th century was done a spontaneous global retuning of all playable organs from practical reasons.*

## 5 12-TET definition for the Principal stop (and partial tones are not truncated)

Let a number  $N$  be a number of octave,  $h$  ne a number of tone in the  $N$ th octave. A real number  $k_0 > 0$  depends on Camertone and vice-versa.

**Definition 3** Let  $\mathbb{T}$  be a set of tones, let  $j = [N, h] = 12N + h \in \mathbb{Z}$  be integer numbers written in the duodecimal position system,  $h = 0, 1, 2, 3, \dots, 11$ . Let

$$\mathbf{T}_{12} = \{X^j(t) = X^{[N, h]}(t) \in \mathbb{T} \mid j \in \mathbb{Z}\}$$

denote a space of real Fourier sequences of tones

$$\mathbf{X}^{[N, h]}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \tau_k^j(t) \in \mathbb{R},$$

with partials

$$\tau_k^j(t) = \tau_k^{[N, h]}(t) = a_k \cos \left[ 2^N + \sqrt[12]{2}^h \right] k_0 t + b_k \sin \left[ 2^N + \sqrt[12]{2}^h \right] k_0 t,$$

where  $a_k \in \mathbb{R}, b_k \in \mathbb{R}, k_0 > 0$ .

**12-tone equally tempered tone system for the Principal stop** is defined as a couple of sequences  $(\mathbf{X}^j, \Phi(\mathbf{X}^j))$ ,  $j \in \mathbb{Z}$ .

**Example 2** Small organs in the Eastern Slovak region Gemer, historical wooden positives equipped with covered pipes (usually stops Copula 8' and Copula 4') which tones have theoretically no even harmonics. This very simplifies to compute their truncated 12-TET to three harmonics. For informatuin, let us name some instruments from the list of the positives in the churches on the UNESCO list: Chyžné, Kameňany, Rákoš, Šivetice, Mokrú Lúka, Štítnik.

In the music theory, there is used another equivalent denotation of tones:

$$\mathbf{T}_{12} \stackrel{def}{=} \bigcup_{N \in \mathbb{Z}} \Omega_N,$$

where the  $N$ th octave of tones,  $N \in \mathbb{Z}$ , is

$$\Omega_N \stackrel{def}{=} \{\mathbf{T}_{12} \ni \mathbf{X}^{(N, h)} = \mathbf{C}_N, \mathbf{C}_N^\sharp, \mathbf{D}_N, \mathbf{D}_N^\sharp, \mathbf{E}_N, \mathbf{F}_N, \mathbf{F}_N^\sharp, \mathbf{G}_N, \mathbf{G}_N^\sharp, \mathbf{A}_N, \mathbf{A}_N^\sharp, \mathbf{B}_N \mid h = 0, 1, 2, \dots, 11\}.$$

**Example 3** For a truncated to three partials 12-TET system  $\mathbf{T}_{12}(a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)$ , where  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3 \in \mathbb{R}$ , the tone  $\mathbf{X}^{[2, 4]}$  is equivalently denoted as  $\mathbf{E}_2$ , where

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_2(t) &= a_1 \cos(4\sqrt[3]{2} k_0 t) + b_1 \sin(4\sqrt[3]{2} k_0 t) \\ &+ a_2 \cos(8\sqrt[3]{2} k_0 t) + b_2 \sin(8\sqrt[3]{2} k_0 t) \\ &+ a_3 \cos(12\sqrt[3]{2} k_0 t) + b_3 \sin(12\sqrt[3]{2} k_0 t) \in \mathbf{T}_{12}. \end{aligned}$$

Since parameters  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  are the same for all  $j \in \mathbb{Z}$ , we see that tones

$$\dots, (\mathbf{E}_{-1}, \Phi(\mathbf{E}_{-1})), (\mathbf{E}_0, \Phi(\mathbf{E}_0)), (\mathbf{E}_1, \Phi(\mathbf{E}_1)), (\mathbf{E}_2, \Phi(\mathbf{E}_2)), \dots$$

have the same music colour.

## Concluding remarks

A naturalness of 12-TET consists of the relevancy with the psycho-physical Weber-Fechner Law, which asserts approximately, that if a physical phenomenon acts exponentially, than the human psychology perceived it linearly (with respect to Pythagorean Comma and "saving timbre").

Due to the specifics of the organ machine (a tone transmission mechanism called the tracture), the tone parameter called loudness [a (scalar  $\times$  vector)- type multiplication operation] in 12-TET is touched only marginally. But we can introduce vector structures for dynamic keyboards. This way we can introduce structures of Hilbert space, etc., on the static 12-TET. How to do this, it is shown in the book [27], Ch. 3. is written by the author of this paper.

## Acknowledgements

The paper is supported with Grant VEGA 2/0134/23 (Influence of materials on acoustic properties of historical single-manual pipe organs in Slovakia).

## References

### *Fourier decomposition of sound vibration*

- [1] Yu. A. DROZD V. V. KIRICHENKO: Finite Dimensional Algebras. Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [2] J. HALUŠKA: The mathematical theory of tone systems. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton London - N. Y. 2018 (the second edition); the first published: Marcel Decker, New York 2004, pp. 375.
- [3] M. HAZEWINKEL N. M. GUBARENI N. GUBARENI V. KIRICHENKO: Algebras, rings and modules. (2004) Springer, ISBN 978-1-4020-2690-4.
- [4] P. I. ROMANOWSKI: Fourier series, Field theory, Analytic and special functions, Laplace operator, (a textbook, in Russian), Fizmatgiz, Moskow 1959.
- [5] M. REED B. SIMON: Methods of Modern Mathematical Physics, Academic Press, New York London 1972, (Chapt. , II.4: Tensor products of Hilbert spaces).

### *Octave Equivalence in European music*

- [6] H. R. BLACKWELL H. SCHLOSBERG: Octave Generalization, Pitch Discrimination, and Loudness Thresholds in the White Rat. Journal of Experimental Psychology 33(1943),407 419.
- [7] M. BRAUN: A retrospective study of the spectral probability of spontaneous otoacoustic emissions: Rise of octave shifted second mode after infancy. Hear. Res. 215(2006), 39-46.
- [8] E. M. BURNS: Intervals, Scales, and Tuning. In: Diana Deutsch (ed.). The Psychology of Music, 2nd ed. Academic Press. San Diego (1999), p. 252. ISBN 0-12-213564-4.
- [9] G. CLINT: Flutes of Gilgamesh and Ancient Mesopotamia. Flutopedia (2012). Archived from the original on 2012-06-28. Retrieved 2012-01-08.
- [10] M. V. CHALOUPKA: Carbamazepine induced pitch shift and octave space representation. Hear. Res. 210(2005), 85-92.
- [11] J. CYNX: Neuroethological Studies on How Birds Discriminate Song. In: Neuroethology of Cognitive and Perceptual Processes, eds.: C. F. Moss and S. J. Shuttleworth, Boulder: Westview Press 63(1996).
- [12] L. F. DEMANY: The Perceptual Reality of Tone Chroma in Early Infancy. Journal of the Acoustical Society of America 76(1984), 57 66.
- [13] D. DEUTCH R. C. BOULANGER: Octave equivalence and the immediate recall of pitch sequences, Music Perception, 2:1 (1984): Fal, 40-51.
- [14] R. W. DUFFIN: How equal temperament ruined harmony : (and why you should care). First published as a Norton paperback. ed., New York: W. W. Norton. (2008) p. 163. ISBN 978-0-393-33420-3. Archived from the original on 5 December 2017. Retrieved 28 June 2017.

- [15] L. CRICKMORE: New Light on the Babylonian Tonal System. ICONEA 2008, 24(2008), 11-22. Proceedings of the International Conference of Near Eastern Archaeomusicology, Held at the British Museum, December 4-6, 2008.
- [16] H. J. KALLMAN: Octave equivalence as measured by similarity ratings. *Perception & Psychophysics* 32(1)(1982), 37-49.
- [17] P. PEDERSEN: The Perception of Octave Equivalence in Twelve-Tone Rows. *Psychology of Music*, 1975; *Psychology* 33(1975), 407-419.
- [18] E. PROUT D. FALLOWS: All'ottava. In: S. Stanley and J. Tyrrell (eds.). *The New Grove Dictionary of Music and Musicians* (2nd ed.). Macmillan, London 2001.
- [19] B. WAGNER D. C. MANN Sh. AFROOZEH G. STAUBMANN M. HOESSCHALE: Octave equivalence is not linked to vocal mimicry: budgerigars fail standardized operant tests for octave equivalence. *Behaviour* 156(2019), 479-504.
- [20] S. WHITNEY: *Vibrations of Cantilever Beams: Deflection, Frequency, and Research Uses*. University of Nebraska Lincoln 1999. Retrieved 9 November 2011.

### *Equal timbre of organ stops*

- [21] W. ADELUNG: *Orgelbau*, (Organ Building, in German). VEB Breitkopf & Härtel Musikverlag, Leipzig 1972, pp.243 + 32 photos of organs.
- [22] E. ASUTAY: Physical measurements and subjective characterization of pipe organ mechanical key action. Chalmers University of Technology. Gothenburg 2013, ISSN 1652-9146.
- [23] ŠTAFURA, Andrej, Martin ČULÍK a Štefan NAGY. Základné determinanty organologického výskumu historických organov: drevené organové registre : vedecká monografia <The> basic determinants of organological research of historical pipe organs : wooden organ stops : scientific monograph. Revúca: OZ Quirinus, 2018. ISBN 978-80-972541-1-7.
- [24] H. von HELMHOLTZ, *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*, Longmans, Green, and Co. London New York, 1895, 576 pp.
- [25] M. S. HAN H. BENARYOVA T. WEI (1999): Dynamics of Transversely Vibrating Beams Using Four Engineering Theories. *Journal of Sound and Vibration*. 225 (5)(1999), 935-988.
- [26] A. LEUTHOLD: *Die Berechnungsgrundlagen der Orgelpfeifen Messuren in Renaissance und Barock. Methoden zu ihrer Rekonstruktion und Systematisierung, Teil 1,2.* (The calculation foundations of the organ pipe measures in Renaissance and Baroque. Methods for their reconstruction and systematization, Part 1.,2., in German), Pape Verlag, Berlin 2005, 2nd print, pp 260, ISBN 3-921140-3.
- [27] A. ŠTAFURA et al., *Historical Positive Organs within the Territory of Slovakia*, Quirinus, Revúca 2022, pp. 112, Chap. 3.(J. Haluška: From the system 12-TET to a linear variety of ordered commutative algebras  $W_{12}$  for pipe organs, 51-91).

## Summary

**Three Principles of the European 12-TET System Applied to Organs of the Constant Measure.** The present paper is a modified version of Chapter 3 of the book [27] showing that 12-TET series spaces have been studied in the functional analysis. In the paper we deal with whole Fourier series decompositions (timbres) of tones in the definition of 12-TET. For mathematical acoustic generalities, cf. [24].

## **Keywords**

Timbre of tone; Organ pipe; Sound.

## **Contact Address**

Ján Haluška  
MÚ SAV  
Grešákova 6  
040 00 Košice, Slovakia  
jhaluska @ saske.sk

## ROZVÍJANIE MANUÁLNYCH ZRUČNOSTÍ VYUŽITÍM AKUSTICKÝCH EXPERIMENTOV V STEM VZDELÁVANÍ

Peter Hockicko

### 1 Úvod

V dňoch 10.7. - 14.7. 2023 sa uskutočnil 19. ročník Žilinskej detskej univerzity (ŽDU) v prezenčnej forme. Na ŽDU 2023 sa prihlásilo 82 detí, absolvovalo ju 77 detí (45 pre kurz Bakalárik, 32 pre kurz Inžinierik).

Týždňový program detí na ŽDU 2023 v čase od 8:00 do 16:00 h. vypĺňali v doobedňajšom čase prednášky (celkovo 15 prednášok pre „bakalárikov“ a 14 pre „inžinierikov“), po obede deti absolvovali cvičenia v laboratóriách Žilinskej univerzity v Žiline (UNIZA) (9 cvičení pre „bakalárikov“ a 6 pre „inžinierikov“), „bakalárikovia“ navštívili radnicu mesta Žilina a „inžinierikovia“ letisko v Dolnom Hričove.

Celkovo bolo pre 5 skupín detí (3 skupiny „bakalárikov“ a 2 „inžinierikov“) odučených 75 hodín prednášok (46 hodín prednášok pre bakalárikov, 29 pre inžinierikov) a 34 hodín cvičení (22 hodín cvičení pre bakalárikov, 12 pre inžinierikov), 2 hodiny diplomového seminára, 2 hodiny trvali obhajoby diplomových prác inžinierikov, dohromady 113 vyučovacích hodín. Na ŽDU 2023 spolupracovalo v rámci prednášok a cvičení 45 pedagógov, 4 doktorandi, 1 študent UNIZA a pripravovalo ju 5 administratívno-technických pracovníkov, deti sprevádzalo 10 študentov.

Projekt ŽDU, ktorý sa organizuje každoročne v čase letných prázdnin na UNIZA a je určený pre deti navštevujúce základnú školu je zameraný na riešenie aktuálnej problematiky - nedostatočnej úrovni manuálnych zručností a intelektuálnych spôsobilostí študentov prichádzajúcich študovať na univerzity technického zamerania. V rámci riešenia tejto problematiky chceme motivovať žiakov na ZŠ k štúdiu prírodných a technických vied experimentovaním v prostredí univerzity a neskôr študentom SŠ ponúknuť odborné prednášky a umožniť im experimentovať v laboratóriách. Týmto aktivitami chceme pomôcť študentom prichádzajúcim na univerzitu prekonať nedostatky (miskoncepce), s ktorými prichádzajú študovať STEM (Science – Technology – Engineering – Mathematics) predmety na univerzitu.

### 2 Akustické experimenty na ŽDU

Ako ukázali naše predchádzajúce výskumy z dotazníkov vyplnených deťmi po absolvovaní letných aktivít ŽDU počas 15 rokov, deti navštevujúce ZŠ by boli radi, keby sa výučba viedla hravejšou formou, aby sa prezentovali praktickejšie ukážky a experimenty a chceli by pracovať na viacerých experimentoch v laboratóriách s vlastnou činnosťou [1].

Akustické experimenty sú vhodným nástrojom, ktorý je možné použiť už od prvých rokov ZŠ na rozvoj prírodovednej gramotnosti, ktorá je chápaná ako jedna z kľúčových kompetencií v štúdiu PISA. Už v mladom školskom veku je možné prilákať deti k vede a technike tým, že im na ich vedomostnej úrovni vysvetlíme princípy činností prístrojov, s ktorými sa stretávajú. To dáva deťom príležitosť stať sa aspoň na chvíľu vedcami, aby mohli experimentovať, objavovať a skúmať zariadenia a javy, na ktorých stroje dnes fungujú. Zároveň experimentovaním zlepšujú svoje manuálne zručnosti a rozvíjajú svoje intelektuálne spôsobilosti.

Jednoduché akustické experimenty realizované na ŽDU 2023 (Obrázky 1, 2) je možné vhodne začleniť do vyučovacieho procesu na ZŠ ako demonštračné experimenty, ktoré oboznamujú študentov so základnými prírodnými princípmi na úrovni znalosť - vedomosť podľa Bloomovej taxonómie kognitívnych cieľov [2].

Vo vyšších ročníkoch ZŠ a neskôr aj na technických univerzitách je možné pomocou týchto experimentov pripraviť problémové úlohy, či už s dobre definovaným problémom alebo neúplne definovaným problémom. V takom prípade budú úlohy riešené na vyšších úrovniach Bloomovej taxonómie poznávacích cieľov - analýza, syntéza alebo hodnotenie.

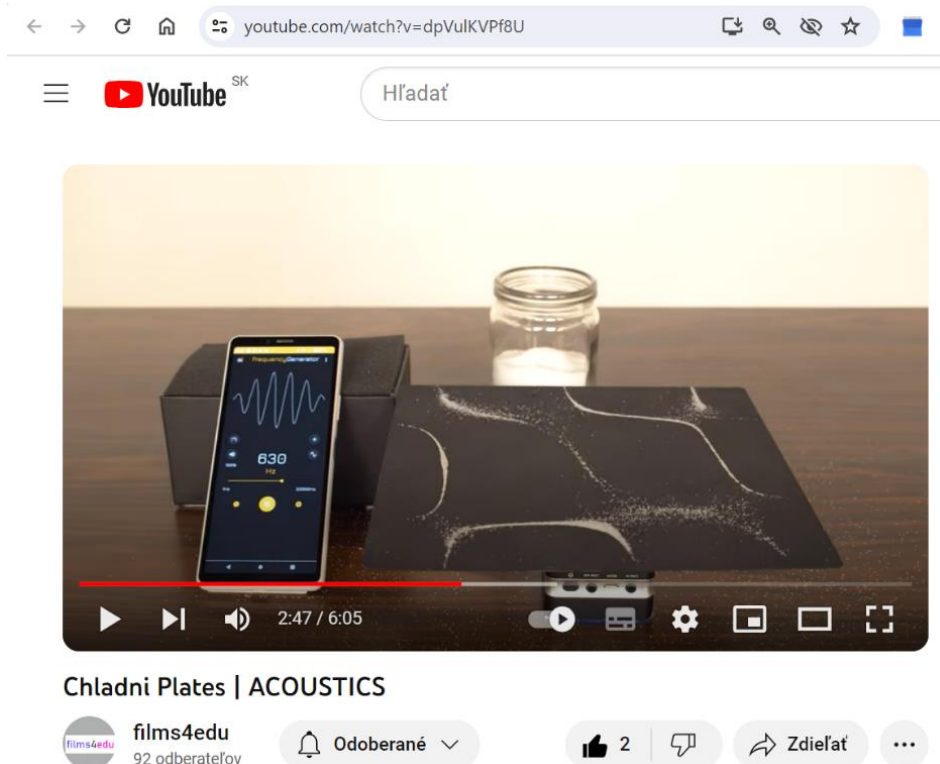


Obrázok 1. Interaktívne akustické experimenty na cvičení: Fyzika hrou.



Obrázok 2. Interaktívne akustické experimenty - Chladniho obrazce na cvičení: Zvuk a ultrazvuk.

Pre tých, ktorí by si radi pozreli a vyskúšali experimentovanie doma, pripravili sme v spolupráci so zahraničnými partnermi a univerzitami sadu experimentov, ktorá je prístupná na kanáli YouTube: <https://www.youtube.com/@films4edu607/videos>. Na danom kanáli je možné nájsť video: Chladni Plates | ACOUSTICS: <https://youtu.be/dpVulKVPf8U> (Obrázok 3). Pre učiteľov ZŠ a SŠ sme pripravili na USB skripta [3], na ktorých okrem spomínaných videí pripravených na UNIZA nájdú aj scenáre a popis a vysvetlenie princípov a fyzikálnych zákonov k jednotlivým experimentom.



Obrázok 3. Chladniho obrazce – video prístupné cez YouTube vytvorené v rámci projektu Films4edu.

### 3 Záver

Jedným zo spôsobov, ako môžeme mladých ľudí motivovať, je realizácia detských univerzít ako formy motivácie mladých ľudí pre budúce štúdium vedy a techniky. Mladí ľudia očakávajú široké využívanie informačných a komunikačných technológií vo vzdelávaní. Sú ochotní aktívne pracovať a realizovať svoje vlastné nápady. Deti do 10 rokov majú nepochybne skutočný, ale skrytý záujem o prírodné a technické vedy, chcú sa stať vedcami a bádateľmi. Po niekoľkých rokoch vzdelávania na základnom stupni sa však situácia úplne mení.

Pozeranie reálnych videí s fyzikálnymi koncepciami, ich následná videoanalýza a aktívna diskusia so žiakmi majú pozitívny vplyv na rast vedomostí a zlepšenie pochopenia Newtonovej mechaniky.

Jednoduché akustické experimenty zaradené do výučby od najnižších úrovní vzdelávacieho systému stimulujú deti od raného detstva k poznávaniu a vedú od počiatočného hrania sa k následnému experimentovaniu a objavovaniu nových poznatkov. Počiatočné hravé experimentovanie, ktoré zahŕňa viac detských zmyslov (sluch, zrak a hmat) stimuluje k experimentovaniu v čase primárneho vzdelávania, neskôr v čase sekundárneho a terciárneho



vzdelávania na technických univerzitách motivuje k analyzovaniu a hodnoteniu na vyšších úrovniach poznávacích cieľov podľa Bloomovej taxonómie.

## Acknowledgements

Táto práca bola podporovaná Slovenskou grantovou agentúrou KEGA 023ŽU-4/2021 a projektom Erasmus + project: Agreement n° 2020-1-PL01-KA226-SCH-096354.

## References

- [1] HOCKICKO, P., TARJÁNYIOVÁ, G., 2020. Lab-based learning in university for primary school students focused on acoustics, In *Akustika* 37, s. 15-19, ISSN 1801-9064 DOI:10.36336/akustika20203714, Corpus ID: 230564662
- [2] HOCKICKO, P. 2010. Nontraditional Approach to Studying Science and Technology, In *Communications* 3, s. 66-71, 2010. ISSN:1335-4205
- [3] HOCKICKO, P., TARJÁNYIOVÁ, G., KÚDELČÍK, J., UHRINA, M., BIENIK, J., 2023: Interaktívne úlohy z fyziky [electronic] - 1. vyd. - Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, 86 s., 2023. ISBN 978-80-554-1984-8
- [4] Films4edu: <https://www.youtube.com/@films4edu607/videos>

## Summary

**Developing Manual Skills by using Acoustic Experiments in STEM Education.** One of the ways we can motivate young people is by implementing Children's Universities as a form of motivating young people for future studies in science and technology. Young people expect a wide use of information and communication technologies in education. They are eager to work actively and implement their own ideas. Children up to the age of 10 undoubtedly have a real but hidden interest in natural and technical sciences, they want to become scientists and explorers. However, after a few years of education at the primary level, the situation changes completely. Simple acoustic experiments included in the teaching from the lowest levels of the education system stimulate children from early childhood to explore and lead from initial play to subsequent experimentation and discovery of new knowledge. Initial playful experimentation that involves multiple child senses (hearing, sight and touch) stimulates experimentation at the time of primary education and later at the time of secondary and tertiary education in technical universities motivates analysis and evaluation at higher levels of cognitive goals according to Bloom's taxonomy.

## Keywords

STEM education; Motivation to study; Acoustic experiments.

## Contact Address

doc. PaedDr. Peter Hockicko, 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 2364

[peter.hockicko@uniza.sk](mailto:peter.hockicko@uniza.sk)

## AKUSTICKÝ POTENCIÁL DŘEVA PŘÍPRAVNÝCH DŘEVIN

Petr Horák, Vlastimil Borůvka, Jan Kozel

### 1 Úvod

Každý z nás se denně setkává s reprodukováným zvukem, tím pádem s reproduktory a reprosoustavami. Mnoho lidí je využívá jako nepostradatelné přístroje ve svém zaměstnání ve velkém množství různých pracovních odvětví. A pro mnoho dalších se jedná o zdroj zábavy, bez kterého si lze jen obtížně dnešní život představit.

Součástí těchto zařízení mohou být vyrobeny z velkého množství různorodých materiálů. Pokud se budeme bavit pouze o reproduktorových skříních neboli ozvučnicích, mají významné zastoupení dřevo a materiály na jeho bázi. Zejména pak aglomerované materiály jsou pro své homogenní vlastnosti často využívány. Masivní dřevo by ale nemělo být opomíjeno. Nejen z důvodu svého jedinečného vzhledu, ale také pro svůj čistě přírodní charakter, což je v dnešní době velmi důležité. Cena obvykle využívaných dřevin však v posledních letech stoupá, a to dává prostor pro využití potenciálu mnohdy podceňovaných přípravných (pionýrských) dřevin.

Zvukové výstupy reprosoustav mohou být ovlivněny ztvárněním ozvučnic, a to jak zvoleným tvarem, tak i materiálem a jeho vlastnostmi. Ozvučnice známých tvarů z používaných materiálů jsou velmi časté, ale nemusí mít nejlepší účinky na výstupní zvuk. Právě na téma designu ozvučnic v kombinaci s využitím dřeva pionýrských dřevin a jeho modifikací se tento příspěvek zaměřuje. Vliv uvedených faktorů na výstupy reprosoustavy není rozebírán ve velkém množství vědeckých publikací, a i proto je toto téma vhodným předmětem pro další bádání.

Tato práce je návazností na předešlý výzkum, ve kterém KOZEL (2021) zkoumal akustické vlastnosti inovovaných tvarů ozvučnic a jejich designovou atraktivitu pro veřejnost, která je shrnuta v marketingovém dotazníku. Zde se však pokoušíme využít kromě břízy i další pionýrské dřeviny pro vytvoření nového designu ozvučnic při zachování optimálních akustických vlastností.

### 2 Metodika experimentů

U nativního a modifikovaného dřeva přípravných dřevin (bříza, osika, olše, vrba a jeřáb) se na relevantních zkušebních vzorcích stanoví akustické parametry, tj. akustická konstanta, akustický vlnový odpor, logaritmičtý dekrement tlumení a rezonanční frekvence. Po vyhotovení designových návrhů reproduktorů pro strojovou a ruční výrobu, budou ozvučnice fyzicky vyrobeny a následně budou stanoveny a analyzovány akustické parametry (impedanční a frekvenční charakteristiky, činitele jakosti –  $Q_{es}$ ,  $Q_{ms}$ ,  $Q_{ts}$ ).

Pro měření rezonančních charakteristik na každé reprosoustavě bude použita impulsová odezva, přičemž se předpokládá použití metody přeladovaného harmonického signálu neboli „přeladovaný sinus“, či „Sine Sweep“ (SAUTHER, 2013). Při této metodě je soustava buzena harmonickým signálem, jehož frekvence se v čase zvyšuje (v tomto případě exponenciálně) a odezva soustavy bude zaznamenávána. Následně lze impulzovou odezvu získat filtrací inverzním filtrem vstupního signálu, nebo oddělením ve spektrální oblasti. Při postupu touto metodou je výhodou například oddělení harmonického zkreslení.

V neposlední řadě bude proveden i marketingový průzkum trhu s ohledem na aktuální preference a finanční možnosti potencionálních zákazníků.

## 2.1 Měření fyzikálních a mechanických vlastností dřeva

U zkoumaných materiálů je hlavním cílem stanovit výše vzpomenuté akustické parametry. Zároveň bude stanovena hustota vzorků, rychlost šíření zvuku, dynamický modul pružnosti, a pro porovnání i statický modul pružnosti.

### 2.1.1 Určování hustoty

Stanovení hustoty je podstatné pro další výpočty. Měření probíhá na již klimatizovaných tělesech. Nejprve budou naměřeny příčné rozměry elektronickým posuvným měřítkem s přesností na 0,01 mm a s rozlišováním radiálního a tangenciálního směru, kvůli následujícím zkouškám. Dále se naměří délka vzorků pomocí pevného měřidla s přesností na 1 mm. Z těchto rozměrů bude vypočten objem. Poté se tělesa zváží na laboratorních vahách s přesností 0,01 g. Naměřené a vypočtené hodnoty budou zadány do vzorce (1):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1)$$

kde  $m_w$  je hmotnost při vlhkosti  $w$  [kg], a  $V_w$  je objem dřeva při stejné vlhkosti [ $\text{m}^3$ ] (ČSN 490108).

### 2.1.2 Zjišťování rezonanční frekvence

Princip je založen na zjišťování frekvence kmitů, které prochází tělesem za jednotku času.

Tyto pokusy probíhají na tělesech o délce 600 mm, čímž jsou splněny požadavky na jejich minimální délku 0,5 m nebo i minimálně pětinasobek šířky. Délka  $l$  v metrech se využívá pro výpočet předpokládané frekvence  $f$  podle vzorce (2):

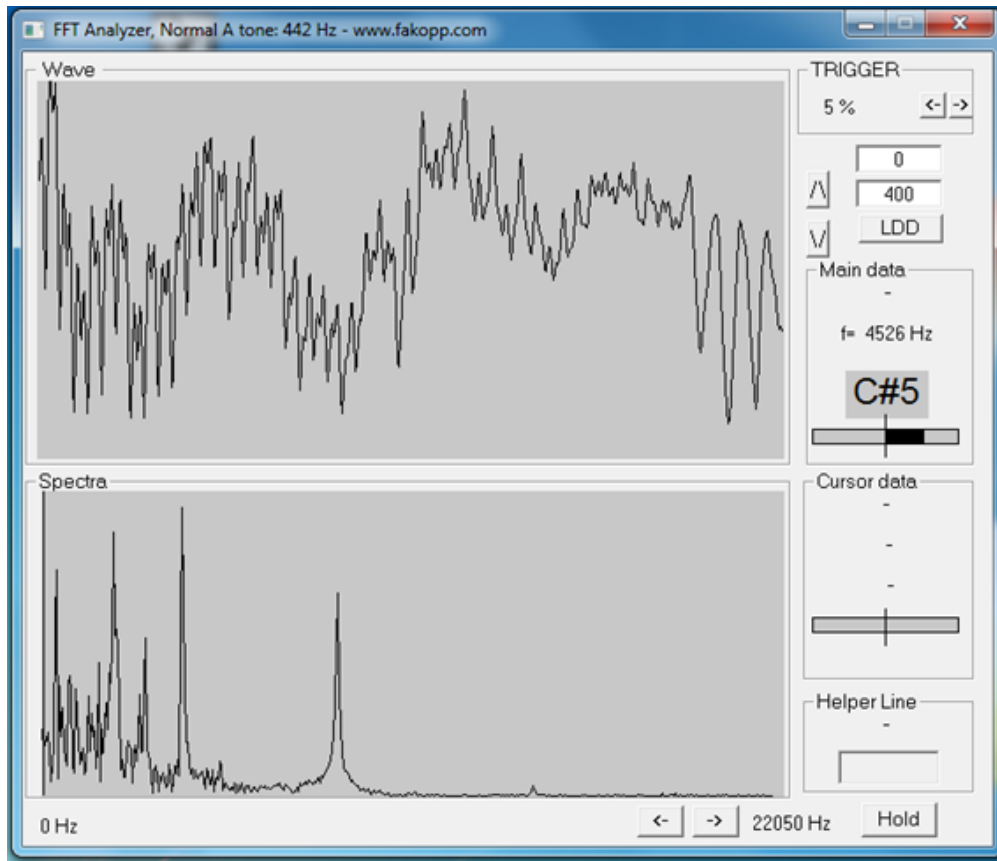
$$f = \frac{2500}{l} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

Každé zkušební těleso je při měření uloženo na tlumících podložkách, aby signál nebyl nijak ovlivněn. Vzdálenost podložky od čel vzorku je 132 mm, jelikož má splňovat předepsanou hodnotu 0,22  $l$ . Snímací aparát je tvořen mikrofonem (Behringer ECM 8000) propojen se zesilovačem (Steinberg UR22 MK2), který je dále napojen na notebook s potřebným softwarem (Fast Fourier Vibration analyzer), viz Obrázek 2. Jako úderný předmět použijeme ocelové kladívko, které iniciuje vznik vlnění. Hmotnost kladívka musí odpovídat hodnotě 0,5 – 5 % hmotnosti zkoušeného vzorku. Před úderem se snímací mikrofon umístí těsně k jedné čelní ploše vzorku (ale ne tak, aby se jej dotýkal) a do druhé se udeří. Hodnota frekvence by se měla pohybovat u masivního dřeva v rozmezí 20 % od hodnoty získané z předešlého vzorce. Tato hodnota se zobrazí v softwaru na notebooku (Obrázek 1.), ale je zobrazena pouze do zachycení dalšího signálu, který může být velmi slabý. Proto se zpravidla udeří do tělesa vícekrát, aby bylo jasné, která hodnota je správná. Měření provádějí dva lidé, jeden zajišťuje úder a druhý odečítá a přepisuje hodnoty (Fakopp Enterprise Bt.).

Z naměřených hodnot je možné vypočítat rychlost šíření akustické vlny  $c$  ve dřevě v podélném směru podle vzorce (3):

$$c = 2 \cdot l \cdot f \text{ [m/s]} \quad (3)$$

kde  $l$  – je délka tělesa [m],  $f$  – rezonanční frekvence [Hz].



Obrázok 1. Rezonanční frekvence materiálu (KOZEL, 2021).



Obrázok 2. Snímací aparát rezonanční metody.

### 2.1.3 Měření času průchodu ultrazvukové vlny

Jak z názvu vyplývá, budou měřeny časy průchodu vln v různých vzdálenostech na tělesech. Zkouška probíhá na tělesech o rozměrech 20 x 20 x 300 mm (h x b x l). Jako měřicí soustava je zde použit přístroj FAKOPP Ultrasonic Timer, který se skládá z dvou piezoelektrických sond a samotného přístroje (Obrázek 3). Sondy jsou ručně přikládány k povrchu tělesa, ze kterých je iniciován ultrazvukový impuls a tím se spustí měření času. Vlna musí projít skrze materiál do druhé sondy a tím se měření času zastaví.

Vzdálenosti měření se předpokládá 60, 100, 140, 180 a 220 mm. Na každý vzorek se narýsují v těchto místech značky, aby sondy byly přikládány, co nejpřesněji.

K výpočtu rychlosti šíření vlny ve dřevě bude použita pouze vzdálenost 140 mm. Zbylé časy jsou využity k výpočtu korekce nulové vzdálenosti sond. Z těchto parametrů již bude možné získat hodnotu dynamického modulu pružnosti  $E$  podle vzorce (4):

$$E = c^2 \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (4)$$



Obrázek 3. Měřicí aparatura ultrazvukové metody.

Jelikož je již známá hodnota dynamického modulu pružnosti, je možné zjistit hodnotu akustické konstanty  $K_A$ , kterou lze vyjádřit vzorcem (5):

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad [\text{m}^4/\text{kg} \cdot \text{s}] \quad (5)$$

kde  $E$  je dynamický modul pružnosti [Pa],  $\rho$  hustota materiálu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Podle identických vzorců lze samozřejmě stanovit dynamický modul a akustickou konstantu i pro rezonanční metodu.

### 2.1.4 Určování statického modulu pružnosti

Tato zkouška probíhá podle normy ČSN 49 0116. Určenými tělesy jsou hranolky o rozměrech 20 x 20 x 300 mm. Jedná se o stejné vzorky, které jsou použity na předchozí měření průchodu UZ vlny.



**Obrázek 4.** Zkouška modulu pružnosti jako součást experimentu statické pevnosti v ohybu.

Těleso je volně položeno na dvou podporách vzdálených od sebe osově 240 mm. Působí na něj zatížení dvěma dalšími body vzdálenými od podpor z každé strany 60 mm, od sebe jsou tedy vzdáleny 120 mm (Obrázek 4). Mezi dvěma body, kterými se těleso zatěžuje, vzniká zóna čistého ohybu. Ohybová síla musí směřovat kolmo na radiální plochu, a tedy v tangenciálním směru. Zatěžování probíhá rovnoměrnou rychlostí do porušení tělesa (asi 1,5 minuty) a tím výraznému poklesu jeho pevnosti. Zkušební stroj je propojen pomocí softwaru s počítačem, který po ukončení zkoušky zobrazí požadované výstupy. Těmi výstupy jsou hodnoty zatížení a deformace při počátku a konci lineární části grafu zobrazujícího zatížení a deformaci (průhyb). Přístroj tedy musí být vybaven průtahoměrem.

Výsledky jsou dosazeny do vzorce (6):

$$E = \frac{11 \cdot \Delta F \cdot l}{64 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta f} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

kde  $l$  – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],  $b$  – šířka tělesa [mm],  $h$  – výška tělesa [mm],

$\Delta F$  – rozdíl mezi silami (10 a 40 % z maximální síly) [N],  $\Delta f$  – rozdíl průhybu při daných silách [mm].

Statický modul pružnosti slouží spíše jen pro srovnání s dynamickými moduly pružnosti, které budou získány prostřednictvím rezonanční a ultrazvukové metody, tj. nedestruktivními metodami.

## 2.2 Měření frekvenčních charakteristik reprosoustav

### 2.2.1 Měřicí metoda

Existuje mnoho metod pro přímé nebo nepřímé měření frekvenčních charakteristik. Některé metody vyžadují specifické vybavení (např. bezodrazovou místnost) nebo mají určitá omezení. Velmi rozšířenou a dostupnou metodou získání frekvenční charakteristiky je její výpočet pomocí Fourierovy transformace z impulsové odezvy reprosoustavy.

Impulsová odezva je odezva soustavy, která musí být časově invariantní na nekonečně krátký puls s nekonečnou amplitudou. Impulsová odezva soustavu plně charakterizuje a Fourierovou transformací lze získat přenosovou funkci soustavy – frekvenční charakteristiku. Vzhledem k tomu, že praktická realizace nekonečně krátkého a vysokého pulsu není možná, existuje řada metod, jak lze impulsovou odezvu získat.

Pro měření impulsové odezvy reprosoustavy bude použita metoda přeladovaného harmonického signálu (neboli „přeladovaný sinus“ či „Sine Sweep“) v softwaru REW – room acoustics and audio analysis software. Soustava je buzena harmonickým signálem, jehož frekvence se v čase zvyšuje (v našem případě exponenciálně) a odezva soustavy je zaznamenávána. Následně lze impulsovou odezvu získat filtrací inverzním filtrem vstupního signálu, nebo dělením ve spektrální oblasti (s omezeními). Výhodnou vlastností této metody je např. oddělitelnost harmonického zkreslení.

Kromě zařízení obsažených v řetězci se v impulsové odezvě projeví i vliv prostoru, ve kterém je měření provedeno.

Notebook a kabely (krátká délka) vnášejí do měření minimální chybu, přenosová funkce zvukové karty je kompenzována kalibrací karty, stejně tak frekvenční charakteristika měřicího mikrofону je kompenzována kalibrační křivkou. Zbývají tedy 3 prvky, které se zásadněji projeví do výsledné odezvy – reprosoustava, místnost a zesilovač.

### 2.2.2 Měření impedančních charakteristik reprosoustav

Impedance je komplexní veličina, která popisuje frekvenčně závislý zdánlivý odpor a informaci o fázi. Analýzu reprosoustavy lze také použít např. pro pozorování vlastních rezonancí.

Pro měření impedanční charakteristiky bude rovněž použit software REW s měřicím přípravkem s přesným rezistorem 100  $\Omega$ , na který byl software nastaven. Následně je buzena soustava opět přeladovaným harmonickým signálem, a ze zaznamenaného signálu je na základě změny amplitudy se znalostí odporu referenčního rezistoru dopočítávána impedance.

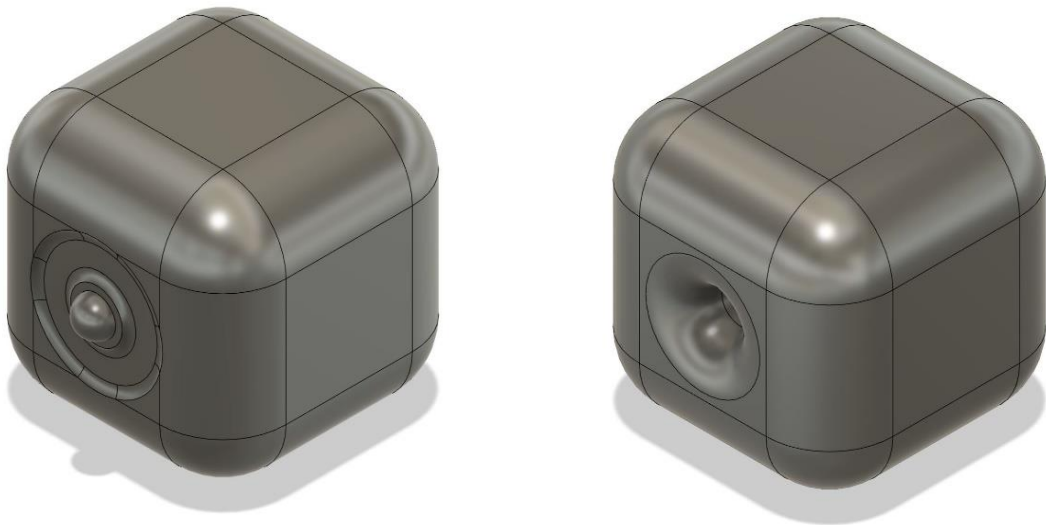
## 3 Designové návrhy ozvučnic reproduktorů

Na Obrázku 5 můžeme vidět model navržené ozvučnice, jejíž design je velice minimalistický. Jedná se zdánlivě o krychli, avšak nenajdeme na ni jediný ostrý roh. Absence rohových spojení je záměrem právě z důvodu, že v rozích ozvučnic, zejména na přední straně, kde je ukotven měnič, dochází k difrakčnímu efektu. Jeho vlivem pak dochází ke zpožděnému příchodu zvukové vlny a její obrácené polaritě. Tyto dvě okolnosti zjevně vedou k možnosti

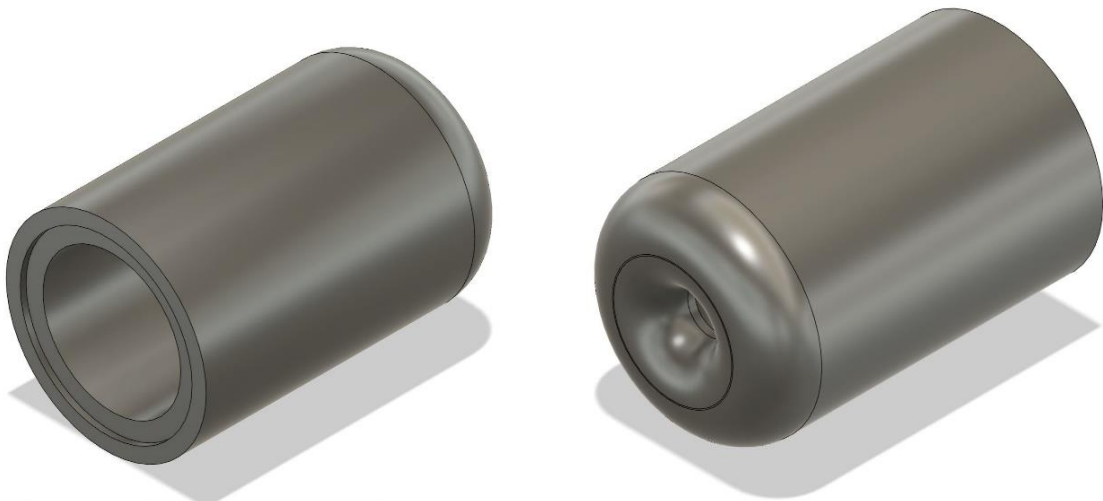
interference mezi primární vlnou a difrakční vlnou. To má za následek degradaci v kmitočtové odezvě (UNRUH, 2020).

Na zadní straně modelu vidíme otvor, takzvaný bassreflex. Ten má za úkol „uvolnění“ hlubokých, basových frekvencí z vnitřního prostoru ozvučnice a následkem toho pak nedochází k rozvibrování skříně právě vlivem basových frekvencí.

Ozvučnice bude vyrobena technologií ohýbaných a lisovaných švarten, případně dých, které budou lisovány pomocí patrice a matrice. Tímto principem bude vytvořen středový pás, na který se napojí přední a zadní deska. Ta bude vyprofilována za kusu masivního dřeva pomocí CNC obrábění. Celkově bude tedy konstrukce ozvučné skříně velmi tuhá, a to zabezpečí její rezistenci vůči nežádoucímu rozvibrování.



**Obrázok 5.** Modelové zobrazení navrhovaného designu pro strojovou výrobu.



**Obrázok 6.** Modelové zobrazení navrhovaného designu pro ruční výrobu.



Na Obrázku 6 je model ozvučnice, která má jednoduchý válcovitý tvar. Ten je navrhnutý vzhledem k technologii výroby soustružením, a to z důvodu možnosti využití i menších průřezů přípravných dřevin, jako například jeřáb. Díky tomu bude možná maximální výtěž z kulatiny a bude alespoň částečně zachována kontinuita letokruhů.

Vzhledem k válcovitému tvaru vnitřku ozvučnice, bude ale zcela jistě docházet k vytváření stojatého vlnění uvnitř ozvučnice a bude docházet i k interferencím, a tudíž k degradaci kmitočtové odezvy. Řešením tohoto problému by mohl být alespoň částečně bassreflex otvor v zadní části ozvučnice, který má však primárně jiný význam, viz předchozí model. Případně by bylo řešením přidání vatové výplně, nebo jiného akustického absorbentu (NEWELL ET AL. 2007).

### 3.1 Modifikace přípravných dřevin

Jelikož konstrukce ozvučnic by měla být tuhá a těžká, aby nedocházelo k jejímu nežádoucímu rozvibrování a následně zvukovému zkreslení, bude žádoucí využití vhodné modifikace, jelikož dřevo pionýrských dřevin má povětšinou nízkou hustotu. V úvahu připadají dvě možnosti, jak dosáhnout vyšší hustoty, a tudíž vhodnějšího materiálu pro stavbu ozvučné skříně. Dalším důvodem pro modifikaci dřeva je jeho vzhled. Světlé dřevo pionýrských dřevin, bez kresby není příliš zajímavým, a proto se nabízí využití termické modifikace (i za cenu nepatrného snížení hustoty dřeva), jako ideálního způsobu pro dosažení tmavších odstínů u uvažovaných druhů dřevin.

#### 3.1.1 Zhušťování

První uvažovanou modifikací je zhušťování. K tomu by docházelo při výrobě prvního z návrhů (obrázek 6) a to při plastifikaci a lisování švarthen ve vyhřívaném hydraulickém lisu (FANG ET AL. 2012). Následkem by byla samozřejmě vyšší hustota, ale i předpokládaná tuhost potřebná k eliminaci nežádoucích vibrací. Výsledek tohoto způsobu by se mohl následně otestovat pomocí Chladního obrazců na zhuštěných a referenčních destičkách (STANCIU ET AL. 2020).

#### 3.1.2 Plastinace

Druhým uvažovaným způsobem modifikace dřeva je jeho plastinace za pomoci polymerů, jako jsou epoxydové pryskyřice nebo silikon (Kürtül et al. 2012). Tato technologie je vhodná hlavně v případě návrhu na obrázku 7, jelikož zhustit celý průřez kmene lisováním by vyžadovalo velké síly. Navíc pokud se celý kmen plastinuje, vyplní se tak jeho póry a stabilizuje se, takže nebude docházet k dalšímu praskání, bobtnání nebo sesychání. Obráběcí soustružnické práce tak budou jednodušší a bude reálné obrábět celý kmen, aniž by se rozletěl na více kusů. Plastinace bude prováděna v autoklávu do kterého se vloží přířezy připravené na obrábění. Následně se tlakově nahustí vybraným polymerem a přířez se tak stabilizuje, zvýší se jeho hustota a stává se tak vhodnějším pro výrobu ozvučnice reproduktoru.

#### 3.1.3 Termická modifikace

Dřevo přípravných neboli pionýrských dřevin je u většiny druhů světlé, roztroušeně pórovité a pro oko zákazníka mnohdy nikterak zajímavé. Jak uvádí například BORŮVKA ET AL. (2021), nebo GONZÁLEZ-PEÑA (2009), termicky modifikované dřevo je esteticky a hapticky příjemnější než dřevo nemodifikované a má tak ve výsledku pozitivní dopad na zákazníka. Pro náš účel výroby ozvučnic plánujeme termicky modifikovat při relativně nízkých teplotách (cca 170 °C). Jak je vidět na obrázku 8, dřevo výrazně tmavne, a dá se předpokládat, že tento odstín bude pro zákazníka zajímavější, a navíc je tmavší barvy dosaženo bez použité chemie,

nátěrů či mořidel. Zároveň bude testován vliv termické modifikace na akustické vlastnosti dřeva přípravných dřevin.



Obrázok 7. Termicky upravené dřevo topolu (vlevo) a jeřábu (vpravo).

#### 4 Výsledky a shrnutí

Tento příspěvek je pokračováním předešlého výzkumu Kozel (2021), který posuzoval, jak ovlivňují ozvučnice reproduktoru různých tvarů a materiálového provedení zvukové výstupy reprosoustav. Porovnávalo se mezi dřevem javoru (*Acer pseudoplatanus*), břízy (*Betula pendula*) a MDF, a to při dvou variantách tvarů viz Obrázek 8 a 9. Za použití totožné metodiky bylo zjištěno, že ačkoliv materiály dosahují jiných akustických a rezonančních hodnot, frekvenční a impedanční křivky reprosoustav se výrazně neliší, jak lze vidět na Obrázku 10.

Dá se proto předpokládat, že využití dřeva pionýrských dřevin pro výrobu ozvučnic reproduktorů může být vhodné jako vstupní materiál, ač by se to tak na počátku nemuselo zdát. Navíc pokud předpokládáme zvýšení jejich hustoty prostřednictvím plastinace nebo zhušťování, dostáváme tak materiál, který může být pro výrobu reproduktorů dokonce ideální.

Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím výstupní zvuk reproduktorů se jeví samotný design, tj. vnitřní a vnější tvar ozvučnice. Jak je vidět na Obrázku 10, viditelné rozdíly jsou pouze mezi tvary, nikoliv mezi materiály. V tomto případě však plynulejší křivku vykazuje klasická kvádrová konstrukce.

Plánovaným výstupem této práce tak bude vyladit rezonančně impedanční charakteristiky nově navržených designů tak, aby jejich křivky byly pokud možno co nejplynulejší a nově navržené a zhotovené reprosoustavy tak nabízely nejen neotřelý vzhled a materiály, ale také kvalitní zvuk, za který by se nemusely stydět ani renomované firmy. Zároveň bude těchto

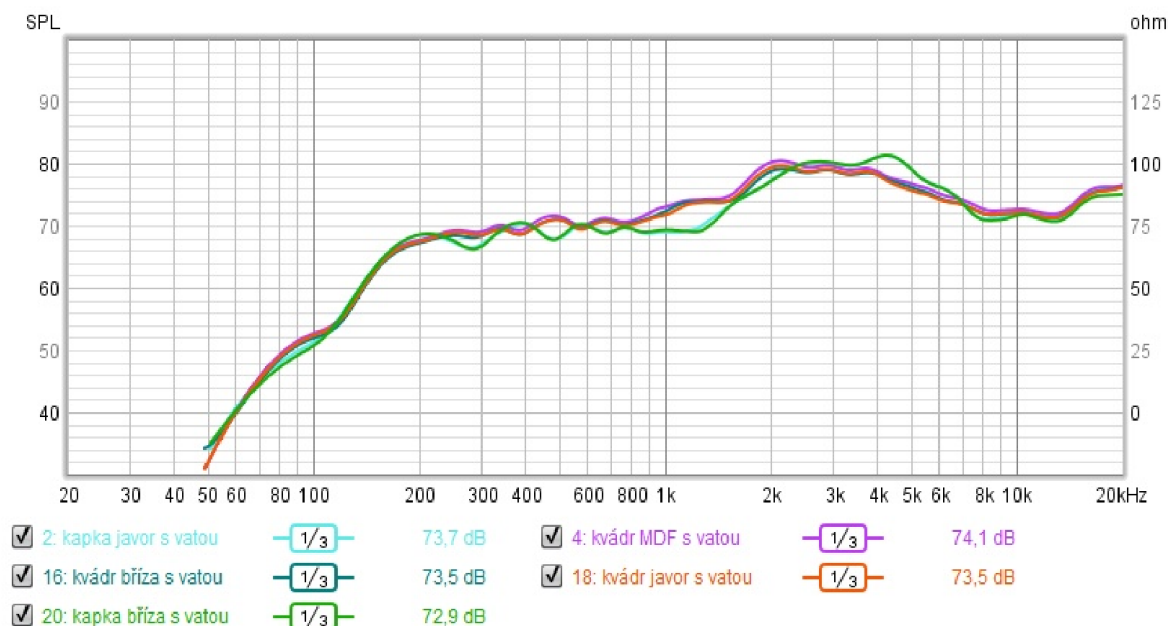
vlastností dosaženo za použití dřeva mnohdy podceňovaných dřevin a bude mu takto dodána přidaná hodnota, a tudíž i cena výsledného produktu bude zajímavější pro obě strany.



**Obrázok 8.** Ozvučnice z březového dřeva tvar „kapka“ (KOZEL, 2021).



**Obrázok 9.** Ozvučnice z MDF kvádr (KOZEL, 2021).



Obrázok 10. Porovnaní tvarů a materiálů ozvučnic s výplní (KOZEL, 2021).

## Zdroje

Borůvka, V., Šedivka, P., Novák, D., Holeček, T., Turek, J. Haptic and Aesthetic Properties of Heat-Treated Modified Birch Wood. *Forests*. 2021; 12(8):1081. <https://doi.org/10.3390/f12081081>

ČSN 49 0108: Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993.

ČSN 49 0115: Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979.

ČSN 49 0116: Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982.

Fakopp Enterprise Bt. 2019. Fakopp Localization Page. Fakopp Bt - UltraSonic Timer. [Online] 2019. [Citace: 24. 8 2023.] <https://fakopp.com/en/product/ultrasonic/>.

Fang, C. H., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A., & Blanchet, P. (2012). Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1), 155.

González-Peña, M. & Hale, M. (2009). Colour in thermally modified wood of beech, Norway spruce and Scots pine. Part 1: Colour evolution and colour changes. , 63(4), 385-393. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.078>

Kozel, J. 2021. Analýza akustických parametrů ozvučnic reproduktorů na bázi dřeva [Diplomová práce] Praha 2021 - Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Kürtül, I., Hammer, N., Rabi, S., Saito, T., Böhme, J., & Steinke, H. (2012). Oblique sectional planes of block plastinates eased by Sac Plastination. *Annals of Anatomy-Anatomischer Anzeiger*, 194(4), 404-406.

Newell, P., & Holland, K. (2018). *Loudspeakers: for music recording and reproduction*. Routledge. ISBN 978-1-315-14920-2

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. 1993. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

Sauther, E. 2013 Sine sweep vibration testing for modal response primer. Department of Optical Sciences, University of Arizona, Tuscon, 2013.

Stanciu, M. D., Coşereanu, C., Dinuličă, F., & Bucur, V. (2020). Effect of wood species on vibration modes of violins plates. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78, 785-799.

## Summary

**Acoustic Potential of Pioneer Woody Plants.** This work deals with the problematics of the use of wood from pioneer woody plants as an input material for the production of loudspeaker enclosures for commercial use. Here, the methodical procedure for determining the resonance and acoustic properties of wood is discussed, and then the "sine sweep" measuring method is proposed and described for the manufactured loudspeakers.

The work includes a description of proposed loudspeakers designs that will be manufactured and tested. There are two variants, one designed for CNC machining and the other for manual production using a lathe.

The contribution is a proposal for the continuation of the previous research of KOZEL (2021) and at the same time a consideration of the expected outputs and results.

## Keywords

Pioneer woody plants; loudspeaker enclosure; sound; acoustic parameters; design.

## Kontaktní adresa

Ing. Petr Horák

doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD., Dipl. Mgmt.

Ing. Jan Kozel

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Fakulta lesnická a dřevařská

Česká zemědělská univerzita v Praze

Kamýcká 129

165 00 Praha – Suchdol

Česká republika

e-mail: horakp@fld.czu.cz

## DIELEKTRICKÁ SPEKTROSKOPIA POLYMÉRNÝCH NANOKOMPOZITOV

Jozef Kúdelčík, Štefan Hardoň

### 1 Úvod

Mnohé priemyselné odvetvia sa zapájajú do skúmania využitia polymérnych nanokompozitov. Hlavným dôvodom takého záujmu je, že moderné riešenia v oblasti nanokompozitov poskytujú možnosť výrazne zlepšiť kľúčové vlastnosti materiálu. Tieto vlastnosti sú široko skúmané vedeckými metódami s odhaľovaním nových zaujímavých a užitočných funkcií a potenciálnych aplikácií. Začlenenie nanočastíc a/alebo nanorúriek zvlášť spevňuje polymérne matrice, ktoré sú technologicky zaujímavé z dôvodu ich súboru jedinečných vlastností. Nanokompozitné dielektrické materiály majú potom široké uplatnenie v rôznych priemyselných odvetviach ako je elektroenergetika, elektronika, doprava, letecký a kozmický priemysel atď. Jedným z najjasnejších príkladov sú elektromechanické motory a zariadenia. Zlepšenie izolačných vlastností má mimoriadny význam v modernej silovej elektrotechnike, kde prevádzková spoľahlivosť priamo závisí od účinnosti izolačných vlastností. Životnosť točivých aj netočivých zariadení s tepelným, mechanickým a elektrickým namáhaním závisí od stavu ich izolačných systémov.

Ďalšie široké využitie spočíva vo výnimočnej biokompatibilite a chemickej stabilite čo robí nanokompozitnú technológiu veľmi vhodnou pre rôzne oblasti medicíny. To zahŕňa intravenózne podávanie liekov, lekárske zobrazovanie, genetický prenos, biomolekulárnu detekciu, tkanivové inžinierstvo atď. V oblasti elektronických zariadení zohrávajú nanoštruktúrované organické polyméry a organické/anorganické hybridné materiály kľúčovú úlohu vo vývoji biologických senzorov, diód vyžarujúcich svetlo, pamäťové zariadenia a solárne články.

Termosetové polyméry, vrátane epoxidových živíc, polyesteramidov a polyuretánov sú cenovo výhodné, ľahké materiály s relatívne vysokou mechanickou pevnosťou. Majú potrebné vlastnosti, ako je nízke zmrštenie po vytvrdnutí, odolnosť proti nárazu, odolnosť proti vniknutiu vlhkosti, chemická odolnosť a vysoká tepelná stabilita. V tejto štúdii je použitý dvojzložkový polyuretán VUKOL N22 (ďalej v texte PUR), vyrábaný spoločnosťou VUKI. Tento materiál sa bežne používa na zalievanie alebo zalievanie rôznych elektrických zariadení, vrátane transformátorov, kondenzátorov, cievok, elektroniky, autobaterií atď. Vďaka vysokej ťažnosti tohto materiálu je vhodný na zalievanie materiálov s rôznymi koeficientmi tepelnej rozťažnosti. Navyše nízka viskozita zlúčenín, ktoré tento materiál obsahuje, im umožňuje efektívne vyplniť úzke medzery alebo dutiny.

Zavedením nanočastíc do polyuretánov zlepšuje ich elektrické vlastnosti. Nanočastice majú viaceré fyzikálne a chemické vlastnosti, ktoré ovplyvňujú základné vlastnosti polymérnej matrice. Tieto modifikácie vyplývajú z rôznych faktorov spojených s nanočasticami. Po prvé, ich malá veľkosť umožňuje lepšiu disperziu v polyuretánovej matrici, čo vedie k homogénnejšej distribúcii. Po druhé, každá nanočastica má veľkú aktívnu plochu vo vzťahu k veľkosti, čo dostatočne zvyšuje interakciu s okolitým materiálom matrice. Ďalej sú to účinky kvantovej veľkosti spojené s nanočasticami, čo vedie k ďalším vlastnostiam spojenými s novými možnosťami prepojenia s polyuretánmi. Výberom veľkosti nanočastíc s rôznym povrchom, kvantovými efektmi a vhodného typu nanočastíc ako by sa aplikácia polyuretánov mohla ďalšej rozšíriť.

## 2 Komplexná permitivita

V striedavom elektrickom poli sa komplexná relatívna permitivita  $\varepsilon^*$  zapisuje pomocou vzťahu:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega), \quad (1)$$

kde  $\varepsilon'(\omega)$  je frekvenčne závislá reálna časť a  $\varepsilon''(\omega)$  je zase frekvenčne závislá imaginárna časť komplexnej permitivity a  $\omega = 2\pi f$ . Reálna časť komplexnej permitivity, ktorá je mierou kapacitného charakteru dielektrika, zodpovedá relatívnej permitivite. Imaginárna časť je mierou strát (vodivostných, polarizačných, medzifázových, elektrónových, ...), ktoré vznikli v dielektriku namáhanom striedavým elektrickým poľom (tzv. stratové číslo). Pomer imaginárnej a reálnej časti komplexnej permitivity zodpovedá stratovému činiteľu:

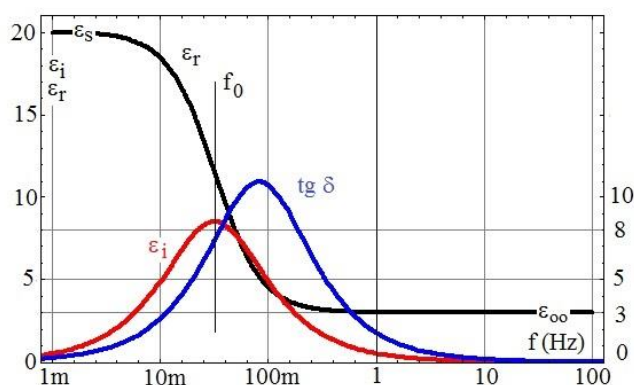
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (2)$$

kde uhol  $\delta$  je mierou dielektrických strát a nazýva sa stratovým uhlom.

### 2.1 Debyeova rozdelenie

V nepolárnych dielektrikách má komplexná permitivita len reálnu časť, ktorá je frekvenčne nezávislá. Pri polárnych dielektrikách prebiehajú rôzne polarizačné javy s rôznymi relaxačnými dobami  $\tau$ , za ktoré dôjde k ustáleniu, resp. zániku stavu polarizácie po zapnutí, či vypnutí vonkajšieho elektrického poľa. Pre komplexnú permitivitu v slabo polárnych kvapalných dielektrik s jedným relaxačným mechanizmom Debye [51, 54] odvodil vzťah (tzv. Debyeova rovnica):

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}. \quad (3)$$



**Obrázok 1.** Dielektrikum s jedným relaxačným procesom  
 ( $\varepsilon_s=20$ ,  $\varepsilon_\infty=3$ ,  $\tau_0=5$ ,  $f_0 = 2\pi/\tau$ ,  $f_\delta = (2\pi/\tau_0)\sqrt{(\varepsilon_s/\varepsilon_\infty)}$ ).

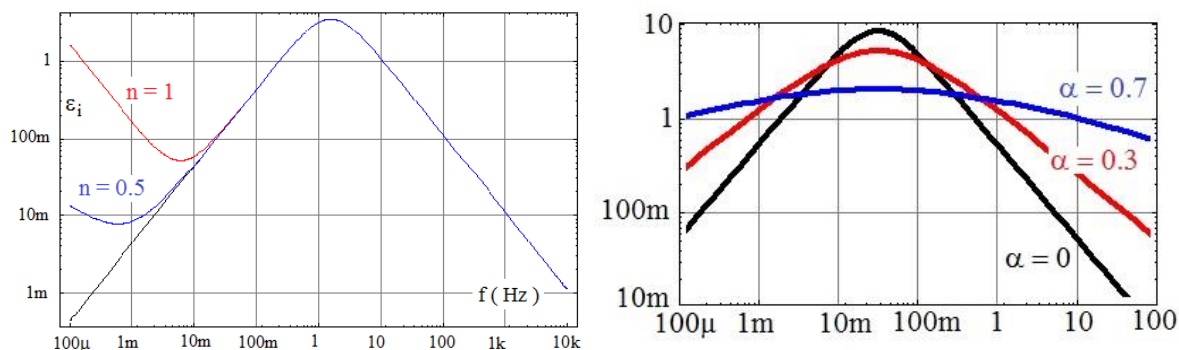
Názorný priebeh zložiek komplexnej permitivity a  $\operatorname{tg} \delta$  zobrazený pri použití dvojitéch logaritmických súradníc je na Obrázok 1. V prípade nízkych frekvencií dipól stíha reagovať na zmenu smeru poľa a reálna permitivita dosahuje maximum -  $\varepsilon_s$  (v statickom elektrickom poli zodpovedá  $\varepsilon_r$ ). S narastajúcou frekvenciou postupne klesá a pri vysokých frekvenciách reálna permitivita dosahuje svoje minimum  $\varepsilon_\infty$ , kedy už dipóly nestíhajú reagovať na zmeny elektrického poľa. Imaginárna permitivita dosahuje svoje maximum pri uhlovej frekvencii  $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\tau$ . Stratový činiteľ dosahuje svoje maximum  $\operatorname{tg} \delta_{\max}$  pri kruhovej frekvencii  $\omega_d$

$$\omega_d = \frac{1}{\tau} \sqrt{\frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_\alpha}} \quad \text{tg } \delta_{max} = \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\alpha}{2 \sqrt{\varepsilon_S \cdot \varepsilon_\alpha}}. \quad (4)$$

Popri polarizačných dejoch prebiehajúcich v reálnom dielektriku dochádza, aj k vodivostným stratám, ktoré sú spôsobené pohybom voľných nosičov náboja. Vodivostné straty vznikajú pri interakcii voľných nosičov náboja s kmitajúcimi časticami tvoriacimi dielektrikum. Polarizačné straty vznikajú, keď vonkajšie elektrické pole čiastočne prekonáva a usmerňuje chaotické tepelné pohyby častíc. Dôsledkom týchto strát je čiastočná premena energie elektrického poľa na teplo. Vodivostná zložka strát sa prejavuje najmä pri nízkych frekvenciách, kde polarizačné straty nie sú také výrazné. Vzťah popisujúci priebeh vodivostných strát má tvar:

$$\varepsilon''_{vod} = \frac{\sigma}{\omega^n \varepsilon_0} = A \omega^{-n}, \quad (5)$$

kde  $A$  a  $n \in (0,1)$  sú koeficienty charakterizujúce dielektrikum a  $\sigma$  je jednosmerná vodivosť. Vplyv vodivostných strát na frekvenčnú závislosť stratového čísla je znázornená na Obrázku 2a. Z grafu je jednoznačne vidieť, že vodivostné straty sa prejavujú hlavne pri nízkych frekvenciách a ich vplyv narastá s koeficientom  $n$ .



**Obrázok 2.** Frekvenčná závislosť stratového čísla podľa bez strát (čierna krivka) a rôzne vodivostné straty charakterizujúce parametrom  $n$  a pre Cole-Cole rozdelenia pre rôzne hodnoty parametra  $\alpha$  ( $\varepsilon_S=20$ ,  $\varepsilon_\alpha=3$ ,  $\tau_0=5$ ,  $A=10^{-4}$ ).

Na popis dielektrickej relaxácie bolo odvodených niekoľko rôznych empirických funkcií. Používané funkcie vychádzajú z experimentálne zistených priebehov zložiek komplexnej permitivity v závislosti od frekvencie alebo analogicky z priebehov vybíjacieho či nabíjacieho prúdu v závislosti od času. Tieto empirické funkcie obsahujú niekoľko parametrov a v dielektrickej relaxačnej spektroskopii sa študuje závislosť týchto parametrov od vonkajších faktorov. Medzi najvýznamnejšie patria teplota, vlhkosť, intenzita elektrického poľa a po novom aj UV žiarenie.

## 2.2 Cole – Cole rozdelenie

Reálne dielektriká majú však viacero variácií dipólových molekúl v rôznom usporiadaní, čo spôsobuje, že ich relaxačné časy sú rozdielne. Keďže ide o jeden typ molekúl, tak potom ich relaxačné časy sa dajú popísať podľa vhodnej distribučnej funkcie, kde najpravdepodobnejšia relaxačná doba bude  $\tau_0$ . Diagram Cole-Cole rozdelenia je tiež kruhový, avšak jeho stred leží na symetrále pod reálnou osou, s ktorou spojnica stredy a  $\varepsilon_\infty$  zvierá uhol  $\alpha \pi/2$ . Výsledný vzťah pre komplexnú permitivitu [55] má tvar:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_S - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau_0)^{(1-\alpha)}}. \quad (6)$$

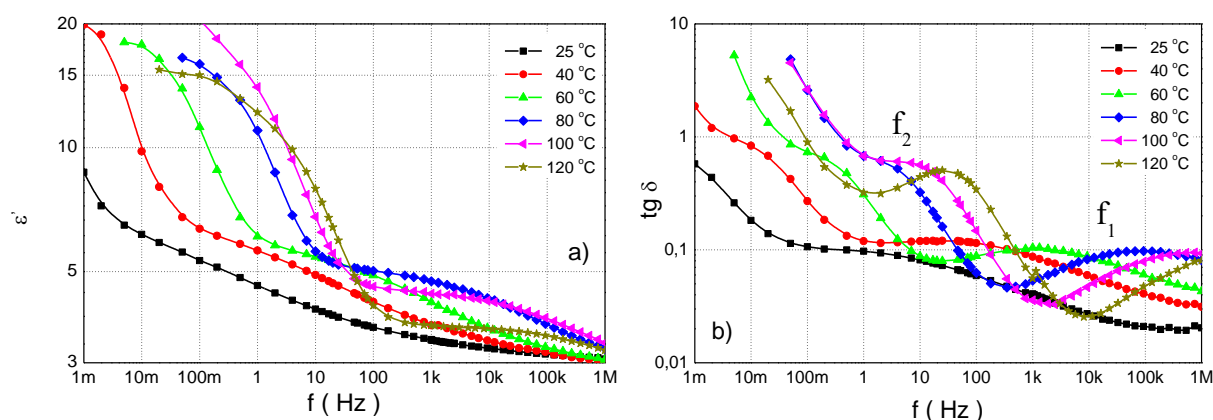


Parameter  $\alpha$  vyjadruje mieru sploštenia frekvenčných závislostí stratového čísla (Obrázok 2b) a nadobúda hodnoty v intervale (0,1). V prípade, že  $\alpha = 0$ , ide o vzťah totožný s Debyeovým vzťahom (3).

Dielektrickú relaxáciu možno opísať aj niekoľkými ďalšími empirickými funkciami (Cole-Davidson alebo Havriliak-Negami). Tieto funkcie sú odvodené z experimentálne určených priebehov komplexnej permitivity v závislosti od času alebo frekvencie. V týchto empirických funkciách je obsiahnutých niekoľko parametrov a dielektrická relaxačná spektroskopia určuje, ako sú ovplyvnené vonkajšími podmienkami. V rámci všetkých možných ovplyvňujúcich faktorov sú najdôležitejšie teplota, vlhkosť a intenzita elektrického poľa.

### 3 Experimentálne výsledky

Do polyuretánu (PUR) VUKOL N22 s tvrdidlom Vukit M od VUKI a.s. boli zamiešané rôzne koncentrácie MgO nanočastíc a následne bol študovaný ich vplyv na relaxačné procesy a komplexnú relatívnu permitivitu. Dielektrická frekvenčná spektroskopia bola použitá na meranie závislosti reálnej a imaginárnej časti komplexnej relatívnej permitivity vo frekvenčnom rozsahu 1 mHz až 1 MHz a v teplotnom rozsahu od +25 °C do +120 °C. Na základe meraní sa dá rozlíšiť aj vplyv segmentovej dynamiky polymérneho reťazca v závislosti od hodnoty koncentrácie nanočastíc (NČ) v polyméri.

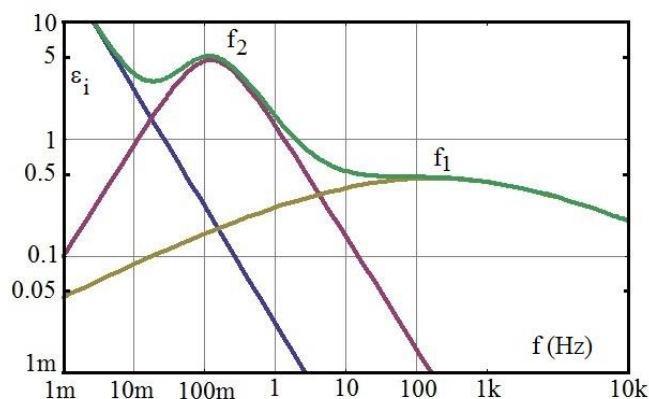


**Obrázok 3.** Frekvenčná závislosť relatívnej permitivity a stratového činiteľa PU s 1% hm. koncentráciou MgO nanočastíc v závislosti od teploty.

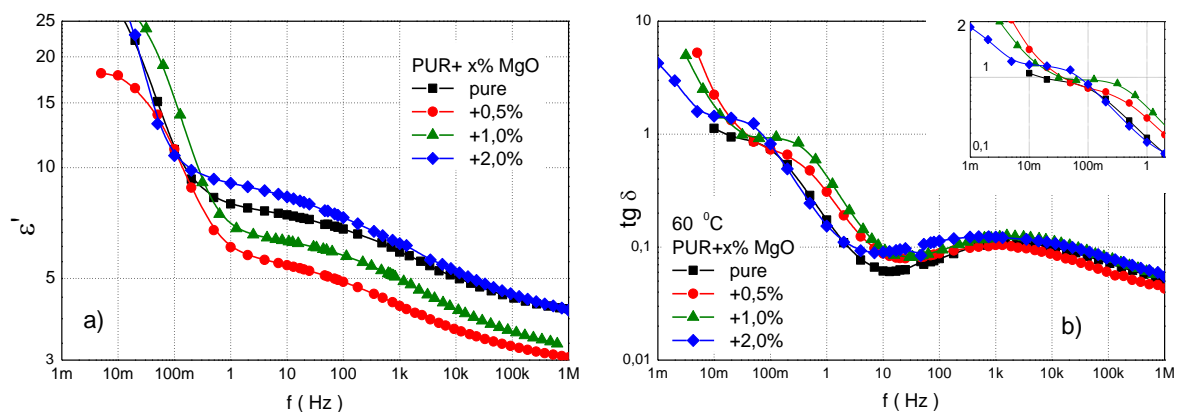
Zmeny reálnej časti komplexnej permitivity  $\epsilon'$  a disipačného faktora  $\text{tg } \delta$  PUR s 0,5 % hmotn. nanočastíc MgO ako funkcia frekvencie ( $1 \text{ mHz} \leq f \leq 1 \text{ MHz}$ ) pri rôznych teplotách ( $25 \text{ °C} \leq T \leq 120 \text{ °C}$ ) sú znázornené na Obrázku 3. Pri teplote 25 °C sa  $\epsilon'$  pomaly narastá z hodnoty 3 pri 1 MHz na 9 pri 1 mHz. V oblasti nízkych frekvencií  $\epsilon'$  sa výrazne narastá, keď sa zvyšuje teplota. Pri vyšších teplotách pozorujeme nízko-frekvenčné maximum. Na frekvenčnej závislosti  $\text{tg } \delta$  od teploty možno pozorovať dve lokálne maximum. Pri teplote 20 °C je pozorované len jedno lokálne maximum okolo 1 Hz a s teplotou sa mierne rastie a posúva sa do vyšších frekvencií. Keď teplota stúpne na 40 °C a viac, pozorujeme znova nízko-frekvenčné lokálne maximum. Celé frekvenčné závislosti skúmaných dielektrických veličín sa s rastom teploty posúvajú do vyšších frekvencií. Namerané priebehy boli fitované pomocou Cole-Coleho modelu s dvomi relaxačnými procesmi a získané hodnoty sú uvedené v Tabuľke 1.

**Tabuľka 1.** Parametre Cole-Cole modelu pre PUR s 0.5% MgO pri rôznych teplotách ( $\sigma(10^{-12} \text{ S/m})$  je jednosmerná vodivosť, ostatné parametre pri rovnici (3)).

T (°C)	25	40	60	80	100	120
$\Delta\epsilon_1$	5,02	5,74	3,82	2,09	1,09	0,56
$\epsilon_\infty$	3,0	2,8	2,8	2,9	3,1	2,9
$\tau_1$ (s)	3,17	0,175	0,093 $\mu$	3,91n	0,74n	0,18n
$f_{01}$ (Hz)	0,05	0,91	171	40,7k	215k	905k
$\alpha_1$	0,24	0,23	0,30	0,45	0,70	0,94
$\sigma$	0,19	1,91	25,2	220	271	310
$\Delta\epsilon_2$	-	13,6	10,0	11,5	19,3	13,4
$\tau_2$ (s)	-	33,7	1,39	0,25	0,11	0,012
$f_{02}$ (Hz)	-	4,7m	120m	0,6	1,45	16,1
$\alpha_2$	-	0,06	0,04	0,22	0,38	0,04



**Obrázok 4.** Cole-Cole fit (5) imaginárnej časti komplexnej relatívnej permitivity pre PUR s 0,5 % MgO pri teplote 60 °C (zelená čiara), vodivosťné straty (4) (tmavo modrá čiara),  $\alpha$ -proces (fialová) a IDE proces (tmavožltá čiara) - distribučné funkcie dvoch relaxačných procesov.



**Obrázok 5.** Frekvenčná závislosť (a) reálnej a (b) imaginárnej časti komplexnej permitivity pre PU s rôznou koncentráciou MgO nanočastíc pri teplote 60 °C.

Vplyv polarizačných procesov a vodivostných strát na imaginárnu časť komplexnej permitivity je znázornený na Obrázku 4. Fit nameraných dát bol spravený podľa Cole-Cole modelu (rov. 5) pre 2% prímies MgO v PUR pri teplote 60 °C. Z vodivostný strát (modrá krivka) je zrejme, že sú hlavne pri veľmi nízkych frekvenciách. Relaxačný  $\alpha$  proces ( $f_2$ ) je znázornený modrou krivkou, pričom je zrejme, že proces prebieha pri nízkych frekvenciách a je sústredený okolo hlavného maxima, na čo poukazuje i malá hodnota koeficientu  $\alpha_2$  (Tabuľka 1). Relaxačný proces IDE (stredný dipolárny efekt) má maximum pri vyššej frekvencii ( $f_1$ ) a jeho vplyv je v širokom rozsahu frekvencií.

Porovnanie  $\epsilon'$  a  $\text{tg } \delta$  pri teplote 60 °C pre čistý PUR a nanokompozit s rôznou koncentráciou MgO je znázornené na Obrázku 5. Pre frekvencie nad 10 Hz je  $\epsilon'$  menšie prípadne podobné (Obrázok 5a) pre nanokompozitné vzorky s 0,5 % hm. a 1,0 % hm. ako pre čistý PUR [13, 14]. V prípade vyššej koncentrácie MgO (2,0 % hmotn. ) pozorujeme zase nárast permitivity nanokompozitu. V prípade nižších frekvencií už vplyv koncentrácie nie je taký jasný. Vplyv veľkosti koncentrácie na polarizačné procesy je prezentovaný formou disipačného faktora vzhľadom na posun lokálnych maxím (Obrázok 5b) a pomocou parametrov z Cole-Cole modelu v Tabuľke 2. Poloha odpovedajúca IDE procesu ( $f_{01}$ ) s prímiesou MgO posúva mierne do nižších frekvencií. V prípade a procesu ( $f_{02}$ ) to závisí na veľkosti prímiesi, pri 0,5 a 1% koncentrácie MgO spôsobujú posun do vyšších frekvencií. Vyššia koncentrácia MgO nanočastíc už spôsobuje posun do nižších frekvencií, čo teda odpovedá dlhšiemu relaxačnému času a s tým spojenou nižšou pohyblivosťou polymérnych reťazcov.

**Tabuľka 2.** Parametre modelu Cole-Cole pre PUR a jeho zmes s teplotou MgO pre teplotu 60°C.

Type	PUR	+0.5% MgO	+1% MgO	+2% MgO
$\Delta\epsilon_1$	3,85	3,82	3,43	5,86
$\epsilon_\infty$	3,92	2,82	3,13	3,69
$\tau_1$ ( $\mu\text{s}$ )	0,13	0,093	0,0713	0,351
$f_{01}$ (kHz)	1,22	0,171	2,23	0,45
$\alpha_1$	0,39	0,30	0,41	0,31
$\sigma$	14,3	25,2	44,4	16,2
$\Delta\epsilon_2$	25,6	10,0	24,3	11,48
$\tau_2$ (s)	6,37	1,39	1,32	15
$f_{02}$ (mHz)	25	114	122	11
$\alpha_2$	0,21	0,04	0,13	0,13

## 4 Experimentálne výsledky

Na nameraných frekvenčných závislostiach komplexnej permitivity a disipačného faktora sú jasne viditeľné dve lokálne maximá. S rastom teploty sa poloha lokálnych maxím posúva (pozri Obrázok 3) do vyšších frekvencií. Charakteristické parametre dielektrík boli určené pomocou Cole-Cole modelu (Rov. 5) s dvoma relaxačnými procesmi ( $\tau_1$  a  $\tau_2$ ), pretože nanokompozity sú komplexné systémy obsahujúce polymérové reťazce a nanočastice s medzifázovými vrstvami. Tento model vo veľkej miere využívajú aj iní autori [17, 18, 19, 20]. Výsledky sú sumarizované v Tabuľkách 1 a 2. Pri izbovej teplote (25 °C) bolo pozorované len jedno maximum, ktoré zodpovedá vysokofrekvenčnej relaxácii s relaxačným časom  $\tau_1$ . Toto maximum súvisí s IDE-relaxáciou a súvisí s rotáciou alebo orientáciou polárnych bočných skupín okolo väzby C-C.

Obrázok 4 ukazuje, že prítomnosť nanočastíc MgO viedla len k miernemu poklesu frekvencie. Zdá sa, že kvázimobilné náboje v nanokompozitoch majú rovnaké obmedzenia pohybu ako náboje v čistej polyuretánovej živici, pretože relaxačná charakteristická frekvencia je mierne ovplyvnená nanoštruktúrou (pridaním nanočastíc do polyuretánovej matrice). Druhé lokálne maximum sa vyskytuje pri nízkych frekvenciách a je pozorované pri vyšších teplotách. Tento druhý proces  $\alpha$ -relaxácie (relaxačný čas  $\tau_2$ ) sa týka mikro-Brownovho pohybu celých reťazcov polyuretánu. Relaxačný proces súvisiaci s čistým polyuretánom je posunutý do vyšších frekvencií lokálnym elektrickým poľom okolo nanočastíc.

Z meraní vyplývajú zmeny v hodnotách  $\epsilon'$ , čo sa dá vysvetliť pomocou viacjadrového modelu. V prípade 1% koncentrácií a nižších pozorujeme všeobecný pokles  $\epsilon'$  oproti čistému PUR pre frekvencie na 1 Hz. Oxid MgO má vysokú relatívnu permitivitu, ale efekt viazaných vrstiev prevažuje nad permitivitou MgO. Dôvodom tohto poklesu je teda prítomnosť vysoko imobilných polymérnych reťazcov v medzifázových oblastiach, pretože boli pevnejšie naviazané na nanočastice. Väčší počet MgO nanočastíc pri vyššej koncentrácii (2,0 % hmotn.) má za následok zmenšenie vzdialenosti medzi susednými nanočasticami alebo dokonca prekrytie prechodových oblastí medzi susednými nanočasticami. Keďže nanočastice MgO majú relatívnu permitivitu 7,8, ktorá je vyššia ako v polyuretánu, nanokompozit má vyššiu relatívnu permitivitu.

## 5 Záver

Na štúdium polyuretánu a jeho nanokompozitu bola použitá dielektrická spektroskopia vo frekvenčnom rozsahu od 1 mHz do 1 MHz. V tomto frekvenčnom rozsahu bola pozorovaná priama korelácia medzi teplotou a reálnou časťou komplexnej relatívnej permitivity a disipačného faktora. Nárast teploty zvyšuje vnútornú energiu, čo spôsobuje, že dielektrické maximá sa presúvajú do vyšších frekvencií. V rozsahu takmer všetkých diskutovaných frekvenčných a teplotných spektier viedla prítomnosť vysoko imobilných polymérnych reťazcov okolo nanočastíc k zníženiu reálnej permitivity nanokompozitu s nanočasticami MgO. Na charakterizáciu vlastností vzorky z hľadiska dielektrických vlastností bola použitá Cole-Cole metóda. V realizovaných meraniach boli identifikované vplyvy  $\alpha$ - a IDE-relaxačných procesov.

## Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Slovenskou grantovou agentúrou KEGA 023ŽU-4/2021 a APVV-21-0078.

## References

- AHMAD, Z. 2012. *Polymer Dielectric Material*, intechopen. ISBN 978-953-51-0764-4. DOI: 10.5772/50638
- SOULINTZIS, A., KONTOS, G., KARAHALIOU, P. et al. 2009. Dielectric relaxation processes in epoxy resin—ZnO composites, In *Journal of Polymer Science Polymer Physics B*, roč. 47(4), s. 445. <https://doi.org/10.1002/polb.21649>
- TANAKA, T., KOZAKO, M., FUSE, N., OHKI, Y. 2005 Proposal of a multi-core model for polymer nanocomposite dielectrics, In *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, roč. 12(4), s. 669-681. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1511092.

KÚDELČÍK, J., HARDONĚ, Š., TRNKA, P., MICHAL, O., HORNAK, J. 2021. Dielectric Responses of Polyurethane/Zinc Oxide Blends for Dry-Type Cast Cold-Curing Resin Transformers. In: *Polymers*, roč. 13(3), s. 375.

YU, G. CHENG, Y. DUAN, Z. 2022. Research Progress of Polymers/Inorganic Nanocomposite Electrical Insulating Materials, In *Molecules*, roč. 27, 7867. <https://doi.org/10.3390/molecules27227867>

HORNAK J. 2021. Synthesis, properties and selected technical applications of magnesium oxide nanoparticles: A review, In *Int. J. Mol. Sci.*, roč. 22, 12752.

MALLAKPOUR, S., BEHRANVAND, V. 2016. Polymeric nanoparticles: Recent development in synthesis and application, In *Express Polym. Lett.*, roč. 10, 895–913. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2016.84>

HARDONĚ, Š., KÚDELČÍK, J., BARAN, A., MICHAL, O., TRNKA, P., HODNAK, J. 2022. Influence of Nanoparticles on the Dielectric Response of a Single Component Resin Based on Polyesterimide, In *Polymers*, roč. 14, 2202.

COLE, K.S., COLE R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics, In *Journal of Chemical Physics*, roč. 9, 341-351.

NAGARAJU, G. SARATHI, R. 2021. Investigation on the impact of nano MgO addition on dielectric properties and space charge behavior of epoxy resin AlN nanocomposites, In *IOPSciNotes*, roč. 2, 014402. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2633-1357/abe364/pdf>

## Summary

**Dielectric Spectroscopy of Polymer Nanocomposites.** The influence of the presence of various weight percent of MgO nanoparticles in the polyurethane sample on the development of the complex relative permittivity and dissipation factor were studied. The real relative permittivity was smaller for weight  $\leq 1.0$  wt% in comparison to pure PUR. The case with weight  $> 1.0$  wt%, on the contrary, showed the opposite effect at frequencies above 1 Hz. The capacitance method within the frequency range between 1 mHz and 1 MHz to determine the dependence of the dielectric parameters on frequency was used. The complex relative permittivity of polyurethane and nanocomposite was analyzed with the Cole-Cole model and its various parameters was determined at different temperatures. The  $\alpha$ -relaxation and intermediate dipolar effect of relaxation processes were observed during temperature measurements.

## Keywords

Dielectric; spectroscopy; materials; temperature.

## Contact Address

prof. 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.kudalcik@feit.uniza.sk](mailto:jozef.kudalcik@feit.uniza.sk)

Ing. Štefan HardonĚ, PhD. (KF, FEIT, UNIZA)  
Tel. +421 41 513 2334; [hardon@fyzika.uniza.sk](mailto:hardon@fyzika.uniza.sk)

## APLIKÁCIA SUBJEKTÍVNYCH A OBJEKTÍVNYCH METÓD HODNOTENIA PRI HODNOTENÍ KVALITY ZVUKU

Kristián Pástor, Miroslav Badida

### 1 Úvod

Tradičný dizajn aktívnej regulácie hluku má za cieľ hluk tlmiť. Na uspokojenie požiadaviek v niektorých aplikáciách je však potrebné zachovať zvyškový hluk a nie ho len tlmiť. V posledných rokoch sa tak aktívny zvukový dizajn (ASD) stal jednou z najdôležitejších výskumných tém v oblasti technológie aktívneho riadenia a kvality zvuku.

Priemyselný hluk, ktorý je čoraz zreteľnejší so zvyšujúcim sa počtom priemyselných zariadení, ovplyvňuje zdravie ľudí, ľudský sluch, tráviaci systém, nervový systém, endokrinný systém atď. Ľudia pochopili škodlivosť znečistenia hlukom a krajiny na celom svete sformulovali prísne normy pre kontrolu hluku. V týchto normách sa na meranie hluku zvyčajne používa akustický výkon a hladiny hluku, ale tie nie sú adekvátne na charakterizáciu vnímania poslucháča. Základným konceptom kvality zvuku je presné určenie ľudského vnímania a navrhol ho Blauert v roku 1994. Charakter zvuku, ktorý súvisí s prijatím, sa nazýva kvalita zvuku, ktorá zohráva veľkú úlohu pri určovaní spokojnosti poslucháča.

S rozvojom technológií monitorovania hluku si výskum kvality zvuku, ktorý sa zameriava na to, ako ľudia rozpoznávajú a hodnotia zvuk, získal pozornosť, najmä v oblasti automobilového priemyslu, dopravy a priemyslu elektrických spotrebičov na celom svete.

Intenzívne teoretické a experimentálne práce s ľudským vnímaním kvality zvuku v automobilovom priemysle vykonali spoločnosti ako Honda, Delphi, Ford, GM atď. Mnohé automobilky optimalizovali dizajn svojich produktov na základe týchto výskumných údajov. Výskumníci tiež diskutujú o vplyve kvality zvuku v lietadlách, vlakoch a vlakoch Maglev. Štúdie sú zamerané aj na klimatizácie, chladničky, práčky, mobilné telefóny a pod.

### 2 Hodnotenie kvality zvuku

Koncept kvality zvuku naznačuje, že regulácia hluku sa zameriava len na zníženie tlakovej hladiny zvuku, ale čo je dôležitejšie, produkty sa dajú prispôbiť subjektívnemu pocitu spotrebiteľov. Známe prístupy zamerané na určenie zvukovej kvality produktu možno v zásade rozdeliť do dvoch oblastí: subjektívne a objektívne hodnotenie. Prvý z nich zdôrazňuje, že zvuk môže byť pre človeka subjektívny a ten druhý vyjadruje zvuk v zmysle objektívnej číselnej hodnoty, ako je fyzikálna akustika a psychologická akustika. Okrem frekvencie a intenzity je potrebné zväžiť ďalšie psychoakustické faktory.

#### 2.1 Objektívne hodnotenie

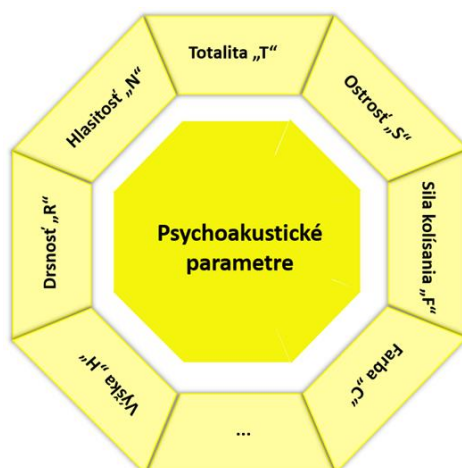
Psychoakustické parametre sa používajú na opis rôznych zvukov spôsobených rôznymi subjektívnymi pocitmi o objektívnych fyzikálnych veličinách. V objektívnom teste existuje viacero parametrov. Objektívne metódy hodnotenia psychoakustickej kvality zvuku založené na hodnotení binaurálnych záznamov sa vykonávajú špeciálnymi meracími prístrojmi. Tieto zariadenia sa nazývajú umelé hlavy resp. Psychoakustické hlavy (Obrázok 1.) a následné softvérové vyhodnotenie zvukového signálu vedie k určovaniu rôznych psychoakustických parametrov.



Obrázok 1. Psychoakustická hlava.

Človek je schopný lokalizovať zdroj hluku trojrozmerné v horizontálnej, frontálnej a mediálnej rovine. Lokalizácia sa vykonáva automaticky na základe časového oneskorenia a rôznej úrovne akustických signálov dopadajúcich na obe uši. Binaurálne vnímanie nie je možné simulovať jednoducho použitím dvoch mikrofónov, ako náhradného ucha. Takéto záznamy je možné použiť len po aplikácii akustického filtra, ktorý zohľadňuje vlastnosti a geometriu ľudskej hlavy, uší a ramien. Umelá hlava je simuláciou ľudskej hlavy a ramena, nielen čo sa týka tvaru, ale aj povrchových vlastností, ktoré zodpovedajú vlastnostiam ľudskej kože. Táto forma umelej hlavy umožňuje modifikovať zvukové pole tak, ako v skutočnosti, a tak rozpoznať rozdiely ako ľudské ucho. V uchu sú umiestnené mikrofóny, ktoré sa používajú na nahrávanie zvukových signálov. Umelá hlavica umožňuje nahrávanie a následné prehrávanie zvukov, ako keby ich počul, ako by bol v čase merania na mieste, kde je umiestnená umelá hlava.

Rôznorodé pocity sa môžu zobrazit' pomocou spomínaných psychoakustických parametrov. Psychoakustické parametre, ako napr. drsnosť, hlasitosť, tonalita, ostrosť a sila kolísania sa označujú ako „klasické“ psychoakustické parametre. Sú známe aj ďalšie parametre, ktoré sa vzťahujú na sluch, ako napr.: výška, farba, subjektívna doba trvania a ďalšie (Obrázok 2).



Obrázok 2. Psychoakustické parametre.

## 2.2 Subjektívne hodnotenie

Test subjektívneho vnímania je základným postupom na získanie charakteru kvality zvuku zvukových udalostí a na vývoj parametrických modelov, ktoré popisujú veličiny kvality zvuku. Bežne sa používajú dve metódy. Metóda sémantického diferenciálu, ktorú vytvoril Osgood v roku 1957, ponúka rýchly spôsob merania postoja ľudí a emocionálnej konotácie pojmov. Študoval sa rad indexov sémantického diferenciálu, ktoré zahŕňajú bezpečný-nebezpečný, spokojný-nespokojný, tichý-hlučný, priateľský-nepriateľský, blízky-vzdialený a šťastný-smutný. Táto metóda bola aplikovaná na rôzne problémy v oblasti marketingu, merania osobnosti, klinickej psychológie, medzikultúrnej komunikácie a sluchového vnímania zvukových signálov. Metóda Paired Comparison, ponúka jednoduchý spôsob, ako prezentovať postoj ľudí pomocou postupnosti párov zvukov A a B. Pre každý pár sa ľudia musia rozhodnúť, ktorý zvuk uprednostňujú. Okrem týchto metód existuje aj mnoho ďalších (Tabuľka 1.).

Tabuľka 1. Subjektívne metódy hodnotenia.

	Meracia metóda	Charakteristika	Výhody metódy	Nevýhody metódy
Psychoakustické klasické metódy	Metóda minimálnych zmien	Pomáha definovať napr. prahové hodnoty absolútnej citlivosti a hodnoty diferenciálnej citlivosti, t.j. detekcia prahového vnímania najmenšieho rozdielu medzi dvoma podnetmi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá úloha hodnotiteľa,</li> <li>• široká použiteľnosť metódy.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tendencia ku skresľovaniu výsledkov.</li> </ul>
	Metóda konštantných podnetov	Ide o najpresnejšiu a najviac používanú meraciu metódu v psychoakustike. Touto metódou sa zisťujú absolútne prahy. Podstata meraní spočíva v tom, že sa volia fázy podnetov, z ktorých asi polovica má veľkosť nad očakávanou hodnotou absolútneho prahu a ostatné majú veľkosť pod očakávanou hodnotou absolútneho prahu, ktorý je potrebné zistiť. Každý z podnetov v ľubovoľnom poradí opakovane (50 – 200-krát) pôsobí na respondenta, ktorého úlohou je priradiť každému jednu z dvoch možností, či registruje daný podnet alebo nie.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• široká použiteľnosť metódy,</li> <li>• vysoká presnosť</li> <li>• jednoduchá úloha hodnotiteľa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• časová náročnosť,</li> <li>• relatívne pomalá metóda na vykonávanie.</li> </ul>
	Metóda prispôsobenia	Touto metódou možno určiť jak absolútnu tak aj diferenciálnu citlivosť. Testovanie prebieha nie v krokoch, ale spojitou. Testovaná osoba nastavuje vlastnosti podnetu a nie operátor testu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda,</li> <li>• metóda má mnoho variácií.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• možným problémom je, že testovaná osoba nastaví hodnoty podnetu väčšie ako v skutočnosti sú.</li> </ul>



	<b>Metóda sledovania</b>	Na tejto metóde je založená Békésyho audiometria. Prehrávaná hladina tónu sa postupne znižuje, kým testovaná osoba stláča tlačidlo. Po jeho uvoľnení sa zase zvyšuje. Lokálny priemer hladiny funkcie s frekvenciou sa považuje za absolútny prah sluchu subjektu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tendencia ku sľasľovaniu výsledkov.</li> </ul>
<b>Škálovacie psychoakustické metódy</b>	<b>Metóda párových porovnávaní</b>	Podstata metódy spočíva v postupnom porovnávaní každého zo všetkých n posudzovaných podnetov s každým zo všetkých ostatných podnetov. Výsledkom každého porovnávania je, že respondent označí jeden z dvoch porovnávaných podnetov za dominantnejší z hľadiska vopred zvoleného kritéria.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchlo pochopiteľná,</li> <li>• jednoznačná metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• veľký počet porovnávaní,</li> <li>• dĺžka testu.</li> </ul>
	<b>Metóda odhadu veľkosti</b>	Metóda sa často používa pri určovaní vzťahu medzi hlasitosťou (son) a hladinou hlasitosti. Hodnotiteľ pri odhade veľkosti číselne hodnotí napr. intenzitu vnemu od prezentovaného podnetu. Pri odhade produkcie sa jedná o inverznú úlohu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sústredenie hodnotiteľa.</li> </ul>
	<b>Nominálna škálovacia metóda</b>	Hodnotiteľ klasifikuje stimuly od určitej kategórie alebo skupiny na základe ich kvalitatívnych vlastností bez určenia ich veľkosti alebo poradia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sústredenie hodnotiteľa.</li> </ul>
	<b>Poradová škálovacia metóda</b>	Hodnotiteľ má za úlohu zoradiť zvukové podnety podľa sledovanej črty, napr. hlasitosti, výšky tónu a podobne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sústredenie hodnotiteľa.</li> </ul>
	<b>Intervalová škálovacia metóda</b>	Umožňuje hodnotenie zvukových podnetov prostredníctvom n – číselnej stupnice napr. 1 - 5, 1 – 7, 1 – 9 a pod. alebo pomocou semantického diferenciálu. Hodnotiteľ realizuje hodnotenie pomocou dotazníka.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sústredenie hodnotiteľa</li> </ul>
	<b>Pomerová škálovacia metóda</b>	Pri aplikovaní tejto metódy sa hodnotiteľovi prezentujú tri zvukové podnety A, B a C, pričom B musí ležať medzi A a C. Hodnotiaci osoba má za úlohu určiť vnímanie podnetu B tak, aby interval A – B a B – C zodpovedal jeho vnímaniu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednoduchá metóda,</li> <li>• rýchla metóda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžaduje sústredenie hodnotiteľa.</li> </ul>
	<b>Metóda multidimenzionálneho škálovania</b>	Multidimenzionálne škálovanie umožňuje analýzu viacerých črt súčasne. Možno ho považovať aj za určitý typ faktorovej analýzy, ktorá má za úlohu zistiť skryté rozmery medzi prezentovanými podnetmi. Pomáha pri vysvetľovaní rozdielov a podobnosti medzi zvukovými podnetmi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• umožňuje kvalitatívne hodnotenie komplexného zvuku,</li> <li>• umožňuje vysvetľovanie rozdielov</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• možno trochu náročnejšia metóda.</li> </ul>

			a podobnosti medzi zvukovými podnetmi, • široká aplikovateľnosť.	
Adaptívne psychoakustické metódy	Adaptívne schodové metódy	Používajú sa úlohy s núteným výberom. Hodnota testovaného atribútu sa mení podľa toho, či je odpoveď subjektu správna alebo nie. Metóda je často navrhnutá s klesajúcou veľkosťou kroku. Existujú viaceré varianty tejto metódy, ktoré sa líšia veľkosťou krokov pri pohybe nahor a nadol alebo si vyžadujú iný počet správnych alebo nesprávnych odpovedí skôr než sa zmení úroveň atribútu.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eliminujú účinky subjektívnej odchýlky,</li> <li>• prahová hodnota sa dá nájsť pri menšom počte testov.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• metóda nezaručuje konvergenciu,</li> <li>• musia sa starostlivo vybrať použité parametre,</li> <li>• nutné overenie či sú získané výsledky zmysluplné.</li> </ul>

### 3 Korelácia subjektívneho a objektívneho hodnotenia

Hodnotenie kvality zvuku je možné realizovať rôznymi možnými prístupmi, avšak ak je potrebné výsledky korelovať s objektívnymi metrikami kvality zvuku, odporúča sa vykonať kontrolovaný experiment, kde je možné kontrolovať konzistentnosť a opakovateľnosť hodnotiteľov a odpovedí. Paralelne sa kvalita zvuku subjektívne hodnotí vykonaním hodnotiteľských testov, pri ktorých sa respondentom prezentujú rôzne zvuky, od ktorých sa požaduje vyjadrenie preferencie alebo názoru. Pre dosiahnutie reálnych výsledkov psychoakustického hodnotenia kvality zvuku jednotlivých skupín produktov je vhodné hľadať prepojenia medzi týmito dvoma metódami. V praxi pôjde o korelačné experimentálne merania a stanovenie výsledkov psychoakustických parametrov vyhodnocovacím dotazníkom pre rovnaký zvuk. Na základe tejto korelácie bude navrhnutý matematický model, ktorý by bol schopný posúdiť kvalitu psychoakustického zvuku len na základe binaurálnej meracej technológie s následným stanovením psychoakustických parametrov.

### 4 Experimentálne merania

Cieľom meraní realizovaných pomocou binaurálneho meracieho zariadenia, tzv. psychoakustickej hlavy, bolo zistiť hodnoty vybraných psychoakustických parametrov v podmienkach rôznych rýchlostí automobile. Predmetom výskumu bol automobil značky Suzuki Vitara Hybrid (Obrázok 3.).

Psychoakustická hlava bola umiestnená v interiéri vozidla v polohe spolujazdca na prednom sedadle. Umiestnenie psychoakustickej hlavy v testovaných vozidlách je znázornené na Obrázku 4.

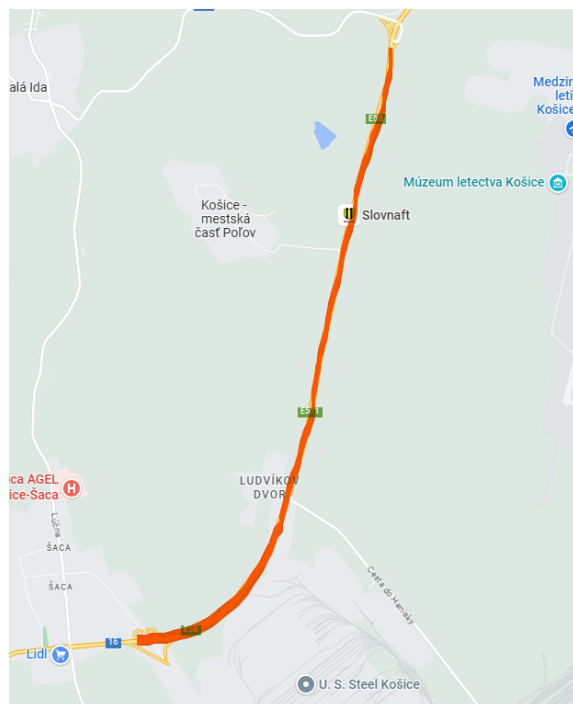


Obrázok 3. Suzuki Vitara Hybrid.



Obrázok 4. Umiestnenie Psychoakustickej hlavy.

Merania boli vykonávané pri rýchlostiach 30 km/h, 50 km/h, 90 km/h a 130 km/h a pri zrýchlení vozidla zo zastavenia. Úsek cesty kde boli merania realizované je znázornený na Obrázku 5.



Obrázok 5. Miesto realizácie merania.

## 5 Výsledky meraní

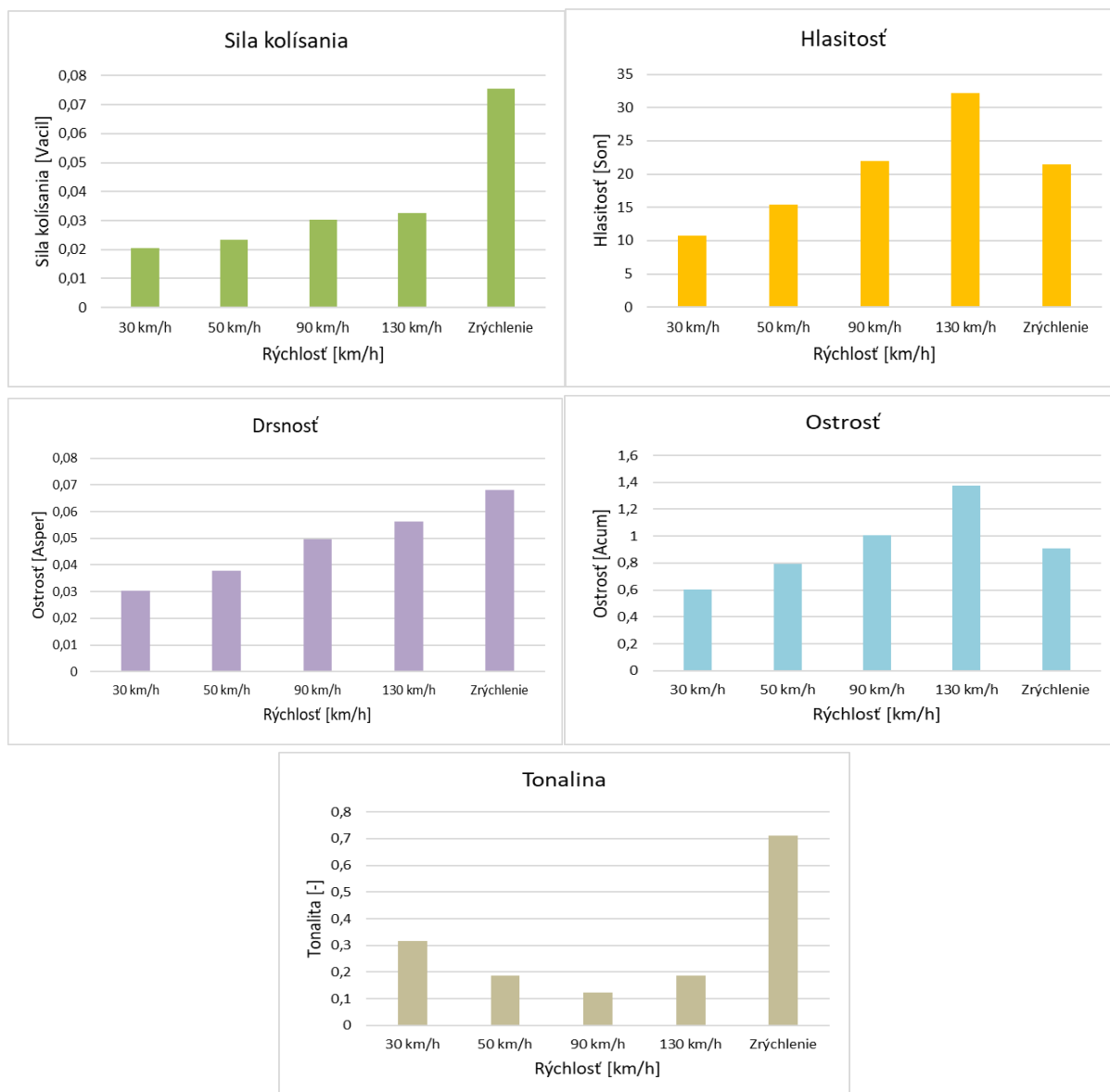
Získané výsledky meraní psychoakustických parametrov pri stanovených rýchlostiach pre pravé a ľavé ucho spolu s ich priemernými hodnotami sú uvedené v Tabuľke 2.

Tabuľka 2. Výsledky meraní psychoakustických.

Rýchlosť	Mikrofón	Sila kolísania		Hlasitosť		Drsnosť		Ostrosť		Tonalina	
			Priemer Ľ a P		Priemer Ľ a P		Priemer Ľ a P		Priemer Ľ a P		Priemer Ľ a P
30 km/h	Ľavý mikrofón	0,0199	0,02055	10,4	10,8	0,0302	0,03045	0,597	0,6015	0,245	0,3165
30 km/h	Pravý mikrofón	0,0212		11,2		0,307		0,606		0,388	
50 km/h	Ľavý mikrofón	0,0232	0,02335	15	15,45	0,0358	0,0379	0,789	0,791	0,222	0,1865
50 km/h	Pravý mikrofón	0,0235		15,9		0,04		0,793		0,151	
90 km/h	Ľavý mikrofón	0,0298	0,03035	21,2	22	0,0492	0,0495	0,968	1,009	0,15	0,12185
90 km/h	Pravý mikrofón	0,0309		22,8		0,0498		1,05		0,0937	
130 km/h	Ľavý mikrofón	0,032	0,03255	31,3	32,15	0,0541	0,0562	1,3	1,375	0,239	0,187
130 km/h	Pravý mikrofón	0,0331		33		0,0583		1,45		0,135	
Zrýchlenie	Ľavý mikrofón	0,077	0,07545	20,5	21,45	0,0599	0,06805	0,901	0,9095	0,852	0,7105
Zrýchlenie	Pravý mikrofón	0,0739		22,4		0,0762		0,918		0,569	

Výsledky ukazujú rozdiel v hodnotách medzi ľavým a pravým uchom, pričom hodnoty v pravom uchu boli vyššie ako hodnoty v ľavom uchu. Tieto rozdiely možno pripísať umiestneniu psychoakustickej hlavy vo vozidle, ktorá bola umiestnená na sedadle spolujazdca, a teda jej pravé ucho, v ktorom boli vyššie hodnoty, bolo bližšie k okolitému prostrediu ako ľavé ucho, ktoré smerovalo do interiéru vozidla.

Na Obrázku 6 môžeme vidieť grafy celkových hodnôt jednotlivých psychoakustických parametrov.



Obrázok 6. Priemerné hodnoty psychoakustických parametrov.

Na základe nameraných výsledkov vidíme že u väčšiny sledovaných parametrov hodnoty rástli s rastúcou rýchlosťou. Výnimkou v tomto prípade bol parameter Tonalita. Tu bola najvyššia hodnota nameraná pri najnižšej rýchlosti. Z hľadiska zrýchlenia tri sledované parametre dosahovali svoje najvyššie hodnoty práve pri zrýchlení a to sila kolísania, drsnosť a tonalita. Hlasitosť a ostrosť dosiahli najvyššie hodnoty pri rýchlosti 130km/h.

## 6 Záver

Pri posudzovaní celkovej kvality produktu je stále dôležitejšia zvuková kvalita produktu. Pre produkty od automobilov po ručné náradie je nielen hladina zvuku, ale aj kvalita zvuku aspektom, ktorý robí produkt atraktívnejším pre zákazníka. Tradičné objektívne metódy merania a analýzy nestačia na komplexnú analýzu zvuku produktu a na získanie správnych výsledkov je potrebné vykonať aj štúdie s objektívnymi metrikami. Pri aplikovaní objektívnych metód pri vykonanom experimentálnom meraní psychoakustických parametrov sa zistilo, že u

vozidla, ktoré bolo predmetom výskumu sú hodnoty psychoakustických parametrov ovplyvnené rýchlosťou vozidla. Pri väčšine parametrov sa hodnoty psychoakustických parametrov zvyšujú so zvyšujúcou sa rýchlosťou. Taktiež sú tieto hodnoty ovplyvnené aj umiestnením psychoakustickej hlavy vo vozidle, kedy možno vidieť rozdielne hodnoty medzi ľavým a pravým uchom.

## Acknowledgements

This contribution was created on the basis of the project KEGA 013TUKE-4/2022 Implementation of the results of scientific research into the elaboration of a modern university textbook "Psychoacoustics - sound quality and acoustic design of products" and the project VEGA No. 1/0485/22 Development of methods for increasing the acoustic quality of product sound by visualization and psychoacoustic methods.

## References

- JIGUANG, Jiang, YUN Li. *Review of active noise control techniques with emphasis on sound quality enhancement*: Applied Acoustics, Vol. 136, 2018, Pages 139-148, ISSN 0003-682X, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.02.021>.
- YUNTAO, Cao, et.al. *Sound Pressure Level Control Methods for Electric Vehicle Active Sound Design*: SAE International Vol. 5, Issue 2, 2021, Pages 205-226, ISSN: 2380-2162, doi: 10.4271/10-05-02-0014
- ROSSI F, NICOLINI A, FILIPPONI M. *An index for motor vehicle passengers acoustical comfort*: The 32nd international congress and exposition on noise control engineering Korea; 2003.
- BODDEN Markus. *Instrumentation for Sound Quality Evaluation*: ACUSTICA • acta acustica Vol. 83, 1997, 775 - 783
- FASTL, Hugo, ZWICKER, Eberhard. *Psychoacoustics. Facts and models*, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer-Heidelberg; 1999
- LIPAR, P, et.al. *Psychoacoustic approach used for developing the model of sound pleasantness of vacuum cleaners and suction units based on objective and subjective analysis*: 5th Congress of Alps-Adria Acoustics Association, September 2012,
- XIAOJUN, Lu, DENG FENG, Wang. *Infrasound test system and infrasound vs test means of human body physiology function effect*: Acta Acustica 2002, 27–32.
- NITHIN, George, GANAPATI, Panda. *Advances in active noise control: A survey, with emphasis on recent nonlinear techniques*. Signal Process 2013;93:363–77.
- DENG FENG, Wang, ZONG-WEI, Liu, JIE, Liang. *Subjective evaluation experiments and objective quantificational description of vehicle interior noise quality*: J Jilin Univ (Engineering and Technology) 2006; 2: 343–53.
- BLAUERT J. *Product-sound assessments: An enigmatic issue from the point of view of engineering*: Proc internoise94, Yokohama, Japan, vol. 2; 1994. p. 857–62.
- JEKOSCH U. *Meaning in the context of sound quality assessment*. Acta Acustica 1999
- JIAO FL, LIU K. *Sound quality in noise control: Subjective assessment*: Proceedings of 2003 national conference environmental acoustics; 2003.

DENGFENG, Wang, xueguang, Liu, ZONGWEI, Liu. *Layout experiment of secondary sound source for adaptive active noise control system in vehicle interior*. China J Highway Transport 2006;19(3):122–6.

MORAVEC, Marek. *Sound quality subjective and objective assessment methods of domestic appliances*: ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, 2019, p.91-94, ISSN 1584 - 2665

DONG-XING, Mao, BAO-LONG, Zhang. Performance of semantic differential method with an anchor stimulus in subjective sound quality evaluation: Technical Acoust 2006;25(6):560–7.

ALTINSOY, E, KANCA, G, BELEK, HT. A comparative study on the sound quality of wetand-dry type vacuum cleaner: The sixth international congress on sound and vibration, Denmark; 1999.

OSGOOD CE, TANNENBAUM PH, SUCI GJ. The measurement of meaning: Urbana: University of Illinois Press; 1957.

SCHULTE-FORTKAMP B. The quality of acoustic environments and the meaning of soundscapes: Proceedings of the 17th international congress on acoustics. Rome, Italy; 2001.

HASHIMOTO T, HATANO S. Effect of factors other than sound to the perception of sound quality: Proceedings of the 17th international congress on acoustics. Rome, Italy; 2001.

ZEITLER A, HELLBRÜCK J. Semantic attributes of environmental sounds and their correlations with psychoacoustic magnitudes: Proceedings of the 17th international congress on acoustics. Rome, Italy; 2001.

David HA. The method of paired comparisons, 2nd ed. London: Chapman and Hall; 1988

BADIDOVÁ, A: Návrh metodiky posudzovania kvality zvuku v interiéri automobilu psychoakustickými metódami, Dizertačná práca, 2020, 187s.

## Summary

**Application of Subjective and Objective Assessment Methods in Sound Quality assessment.** The sound quality of the product is increasingly important when assessing the overall quality of the product. For products ranging from automobiles to hand tools, not only the sound level but also the sound quality is an aspect that makes the product more attractive to the customer, and the right sound can lead to better sales. Traditional objective measurement and analysis methods are not sufficient for a comprehensive analysis of the sound of a product, and in order to obtain the correct results, it is also necessary to carry out studies with subjective metrics. Customer expectations and reviewer testing are also important factors in determining acceptable sound quality, as ultimately only the human ear can tell a designer if a product has the right sound.

## Keywords

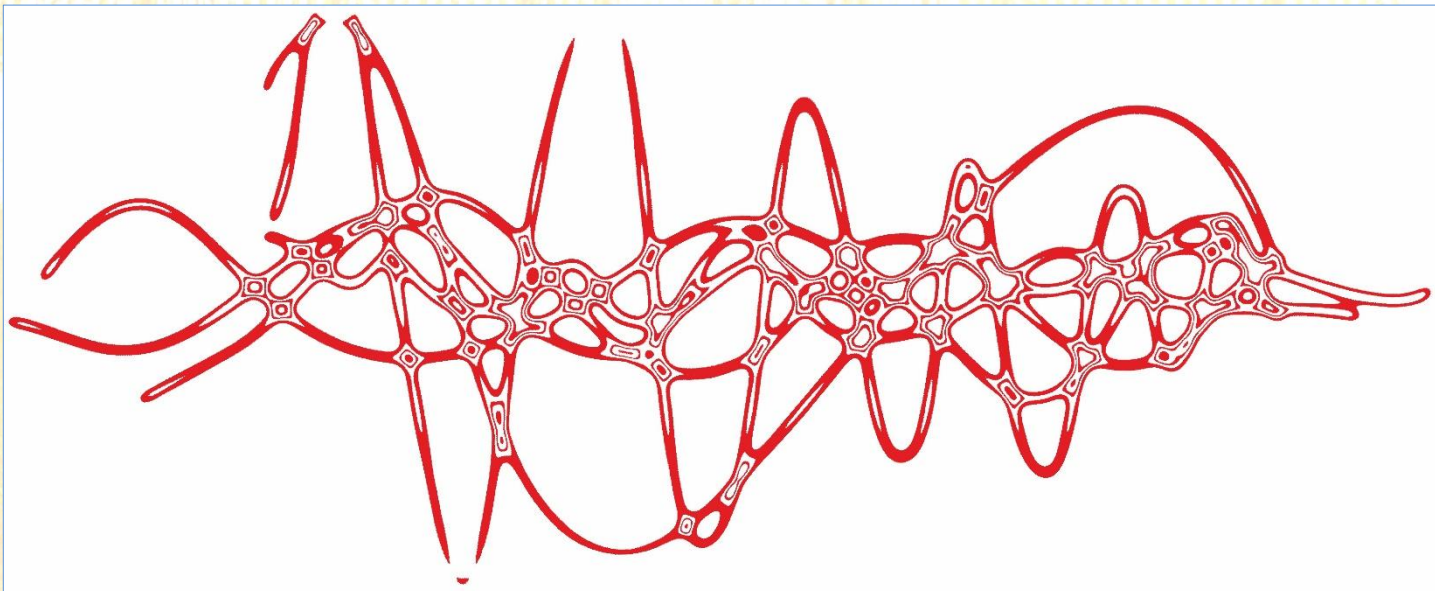
Sound quality; subjective evaluation; objective quantification.

## Contact Address

Ing. Kristián Pástor  
Department of Business Management and Environmental Engineering  
Faculty of Mechanical Engineering  
Technical University of Košice  
Park Komenského 5,  
042 00 Košice, Slovakia  
kristian.pastor@tuke.sk

Dr.h.c. mult. prof. Ing. Miroslav BADIDA, PhD.  
Department of Business Management and Environmental Engineering  
Faculty of Mechanical Engineering  
Technical University of Košice  
Park Komenského 5,  
042 00 Košice, Slovakia  
miroslav.badida@tuke.sk





# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko



## ZVUKOVÁ POHLTIVOSŤ PENOVÉHO HLINÍKA A AKUSTICKEJ DOSKY Z RECYKLOVANEJ TEXTÍLIE

Andrej Štafura, Martin Čulík, Miroslav Němec, Michal Kuriš

### 1 Úvod

Ak dopadne zvuková vlna na materiál (stenu), časť sa odrazí, časť je pohltená materiálom a zvyšok bude po prechode látkou postupovať ďalej. V každom uzatvorenom priestore teda dochádza ku absorpcii zvuku (premene zvukovej energie na energiu inú). Táto schopnosť priestoru absorbovať časť akustického výkonu zvukových vln sa nazýva „zvuková pohltivosť“ a veličina vyjadrujúca mieru absorpcie je koeficient zvukovej pohltivosti  $\alpha$  (–). So zvukovou pohltivosťou materiálov je potrebné z pohľadu akustiky počítať pri predikcii priestoru, návrhu deliacich konštrukcií, a aj celkového vybavenia interiéru budov a stavieb rôzneho druhu, spolu s ďalšími dôležitými parametrami ako je plošná hmotnosť, hustota, hrúbka a ohybová tuhosť materiálu, zloženie a poradie vrstiev skladby deliacej konštrukcie, geometrický návrh a iné (ČULÍK, DANIHELOVÁ, 2019).

Pri finálnom hodnotení akustiky v uzatvorenom priestore (akým je aj drevená stavba alebo umiestnená špeciálna konštrukcia), sa využíva veľké množstvo ďalších fyzikálnych veličín priestorovej akustiky (RYCHTÁRIKOVÁ, CHMELÍK, 2015).

Tvrdé alebo tuhé materiály, ako napr. betón, drevený masív či tehla budú zvuk vo všeobecnosti odrážať. Oproti tomu mäkké materiály s otvorenými pórami budú zase zvuk pohlcovať. Zvuk pohlcujúce materiály a prvky používame v praxi na skrátenie času dozvuku, elimináciu nechcených odrazov zvuku a zníženie hladiny akustického tlaku nielen v interiéri budovy (RYCHTÁRIKOVÁ A KOL., 2019).

Vyššie uvádzané fyzikálne princípy sa aplikovali na výskum zvukovej pohltivosti, pričom sme analyzovali penový hliník a akusticky vhodnú recyklovanú textíliu. Pozitívne výsledky sa dajú využiť v procese ďalšej implementácie skúmanej konštrukcie.

### 2 Metóda merania

#### 2.1 Penový hliník a jeho špecifikácia

Aktuálna doba je v oblasti materiálov a využívaných technológií charakteristická vysokou mierou pokroku, čo spôsobuje vysoké nároky na neustály vývoj a inovácie. Špecifické vlastnosti viacerých materiálov, a ich kombinácii najmä vo forme zliatin, sú nám už dnes v značnej miere známe. Preto je nutné nastaviť nové smery v oblasti vývoja, s nemenej dôležitým ohľadom na efektívne využívanie zdrojov, energií a životného prostredia. Predkladaný článok má za cieľ poukázať na možnosti kombinácie kovovej peny s riadenou pórovitosťou na báze  $\text{AlSi10TiH0.8}$ , pre sofistikovanejšie aplikácie, kde zaužívané materiály dosahujú svoje hraničné limity. Existuje niekoľko základných metód pre výrobu kovových pien, medzi ktoré patria:

- 1) Kovová prášková metalurgia: kovové prášky sa zmiešajú s napeňovacím činidlom (napr. hydrid titaničitý  $\text{TiH}_2$ , bikarbónat sodný  $\text{NaHCO}_3$ ), následne sa prášková zmes spracuje do primárneho materiálu. Vypeňovacia reakcia sa vybudí zahriatím polotovaru.
- 2) Vstrekovanie plynu: vstrekovanie plynu (dusík, argón) do roztaveného kovu, s cieľom tvorby bublín. Kov postupným tuhnutím zvyšuje odbor voči unikajúcemu plynu ktorý uviazne v štruktúre a vytvorí pórovitosť.

- 3) Liatie: reakčné soli poprípade pevné častice (ktoré sú nositeľmi určitej geometrie) sa zalejú roztaveným kov. Kov tuhne okolo bublín vytvorených napeňovacím činidlom poprípade pevných častíc, čím vznikne porézna kovová pena.
- 4) Elektrolýza: kovový plech sa pokryje vrstvou elektrolytu a na plech sa aplikuje elektrický prúd, vyvolávajúci rozpustenie kovu pričom sa na povrchu vytvorí vrstva bublín. Keď bubliny stúpajú na povrch, vytvárajú poréznu kovovú penu.
- 5) Chemická depozícia pary: na kov sa nanáša substrát pomocou chemického reakcie. Do komory sa zavedie kovová prekursorová látka spolu s redukčným prostriedkom a plynom. Redukčný prostriedok reaguje s prekursorovou látkou, formujúcou kovovú paru, ktorá sa ukladá na substrát a vytvára poréznu kovovú penu.

Vyššie spomenuté metódy sa môžu použiť na vytvorenie kovových pien s rôznymi veľkosťami, tvarmi a hustotami pórov, čo ich robí užitočnými pre rôzne aplikácie, ako sú napríklad ľahké konštrukčné materiály, tepelná izolácia, zvuková absorpcia či funkčný a ekonomicko-ekologický dizajn.

Pri tvorbe vložiek z penového jadra sa využila grafitová forma vyhotovená z lisovaného grafitu. Výhoda grafitovej formy spočíva vo výbornej tepelnej vodivosti grafitu spolu s tesnosťou vyvolanou lisovaním grafitu. Tým sa zabráni úniku naplyňovacieho média pri kontakte polotovaru forma. Proces vypeňovania spočíval v navážení vsádzky o hmotnosti 140 gramov. Proces vypeňovania sa vykonal v dvojplášťovom autokláve s nepriamym chladením vodným okruhom, kde došlo ku vypeňovaniu v ochrannej dusíkovej atmosfére pri nábehovom pretlaku 3 bar. Daný proces vypeňovania je charakteristický postupným rozpadom  $TiH_2$  na oxid titaničitý, ktorý je sprevádzaný únikom H. Pri vypeňovaní v riadenej pretlaku vypeňovacieho autoklávu, dochádza ku vzniku významného benefitu vo forme riadenej pórovitosti. Proces je charakteristický vyvákuovaním pecného priestoru, následným napustením  $N_2$  na požadovaný tlak (3 bar pričom sa vždy netlakuje na samotnú teplotu ale podľa nahriatia systému na tlak nižší pričom pri dosiahnutí vypeňovacej teploty sa vplyvom fyzikálnych javov dosiahne daný stav) a spustením ohrevu. Po dosiahnutí teploty okolo  $590^\circ C$  dochádza ku uvoľneniu tlaku z 3 bar na stabilizačný tlak 1.5 bar a čaká sa na schladenie systému pod  $570^\circ C$ . Na rozdiel od vypeňovania na otvorenej atmosfére, tu dochádza po prekročení teploty liquidu  $AlSi10$  zliatiny ku neriadenej tvorbe pórov. Pri vypeňovaní pod tlakom dochádza vplyvom protitlaku tu spomaleniu samotnej reakcie, čím sa zabezpečí zrovnomenenie prehriatia polotovaru a tým celého vypeňovacieho systému. Po uvoľnení tlaku dochádza ku rovnomernému nárastu pórov a od kvality pripraveného polotovaru ku tvorbe pórov o podobnej veľkosti v rozmedzí (60 až 90) %. V našom prípade sme dosiahli rovnomernú pórovitosť na úrovni 70 %. Treba však podotknúť, že vplyvom protitlaku dochádza ku zníženiu kinetiky vypeňovania.

Akustická doska typ Senizol sa používa ako izolačná vrstva v skladbách konštrukcií drevených stavieb spolu so smrekovým drevom, napr. pri CLT paneloch. Výskumu akustickej dosky samostatne a pri jej spájaní so smrekovými skúšobnými telieskami sa venoval GERGEL, 2017.

Na výskum sa použili skúšobné telieska s priemerom 100 mm – merania zvukovej pohltivosti na veľkej trubici. Označenie skúšobných telies v experimente pre porovnanie výsledkov je nasledovné:

- penový hliník meraný zo strany s pórovitou štruktúrou – AL;
- penový hliník meraný zo strany s tvrdou hladkou plochou – AL1 back;
- obyčajné smrekové drevo hrúbky 25 mm – SM 25;
- recyklovaná textília „Akustická doska typ Senizol AT XX2 TL hrúbky 60 mm“ – Senizol resp. Senizol 60.

## 2.2 Metóda určovania koeficienta zvukovej pohltivosti

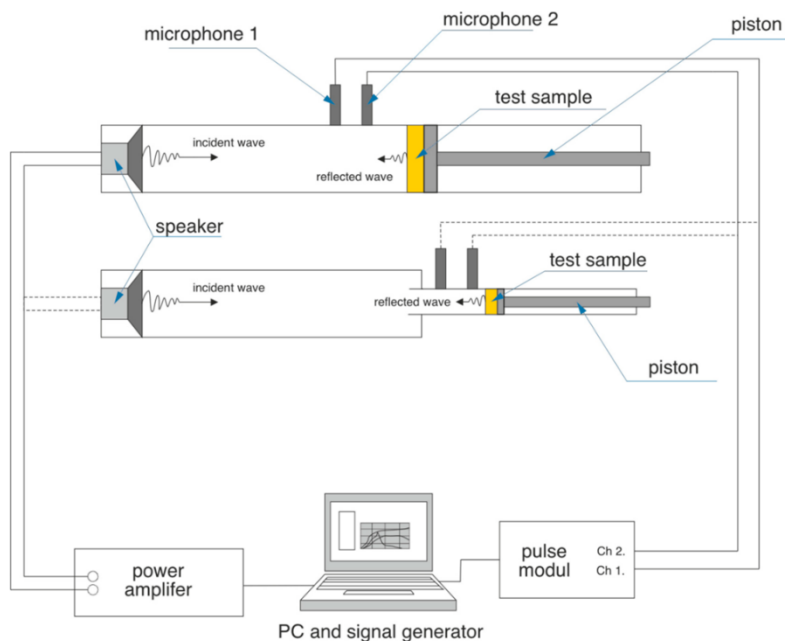
Koeficient zvukovej pohltivosti  $\alpha$  (ako materiálová charakteristika) je frekvenčne i smerovo závislý a je dôležitou charakteristikou ovplyvňujúcou čas dozvuku  $RT$  (s) v uzatvorenom priestore. Vzhľadom k tomu, že čas dozvuku závisí od frekvencie, je potrebné pri jeho výpočtoch uvádzať pre akú frekvenciu bol počítaný. Kritériom pre posúdenie miery absorpcie zvuku materiálom je koeficient zvukovej pohltivosti  $\alpha$  (-), ktorý je definovaný základným vzťahom (1):

$$\alpha = \frac{P_p}{P_d} \quad (1)$$

kde:  $P_p$  – akustický výkon pohltený materiálom vo W;  $P_d$  – akustický výkon dopadajúci zo zvukového zdroja na materiál vo W.

Akustická charakteristika, koeficient zvukovej pohltivosti sa určí podľa STN EN ISO 10534-2:2002, *Akustika. Určovanie koeficienta zvukovej pohltivosti a akustickej impedancie v impedančných trubiciach. Časť 2: Metóda transformačnej funkcie (ISO 10534-2:1998)*. Metóda je založená na budení rovinných vln v trubici (šumom alebo kľzavým tónom) a meraní akustického tlaku na dvoch miestach interferometra. Zo získaných hodnôt komplexného akustického tlaku sa počíta komplexná akustická prenosová funkcia. Z tej je možné určiť koeficienty zvukovej pohltivosti. Vypočítané veličiny sú funkciou frekvencie. Táto metóda umožňuje meranie pomocou jedného alebo dvoch mikrofónov, meranie s dvoma mikrofónmi je rýchlejšie a presnejšie. Postup pre jeden mikrofón je zdĺhavejší, vyžaduje špeciálne budenie. Pred začiatkom samotného merania je pri použití 2-mikrofónovej meracej metódy potrebné vykonať požadovaný kalibračný proces. Kalibrácia prebieha v súlade s normou STN EN ISO 10534-2:2002. Súprava Kundtovej impedančnej trubice sa skladá z trubice s priemerom 29 mm a s priemerom 100 mm, malá trubica na meranie parametrov vo frekvenčnom rozsahu od 500 Hz do 6,4 kHz, veľká trubica na meranie parametrov vo frekvenčnom rozsahu od 50 Hz do 1,6 kHz (PRODUCT DATA: IMPEDANCE TUBE KIT (50 Hz – 6.4 kHz) TYPE 4206, 2019). Prakticky je veľká trubica vhodná pre meranie koeficienta zvukovej pohltivosti pri nízkych frekvenciách a používa sa vo frekvenčnom rozsahu (0 až 1600) Hz. Malá trubica priemeru je vhodná pre meranie koeficienta zvukovej pohltivosti pri vyšších frekvenciách (0 až 6400) Hz. Výsledkom meraní sú frekvenčné závislosti koeficienta zvukovej pohltivosti pri frekvenciách od 0 Hz až 6400 Hz s frekvenčným krokom  $\Delta f = 2$  Hz.

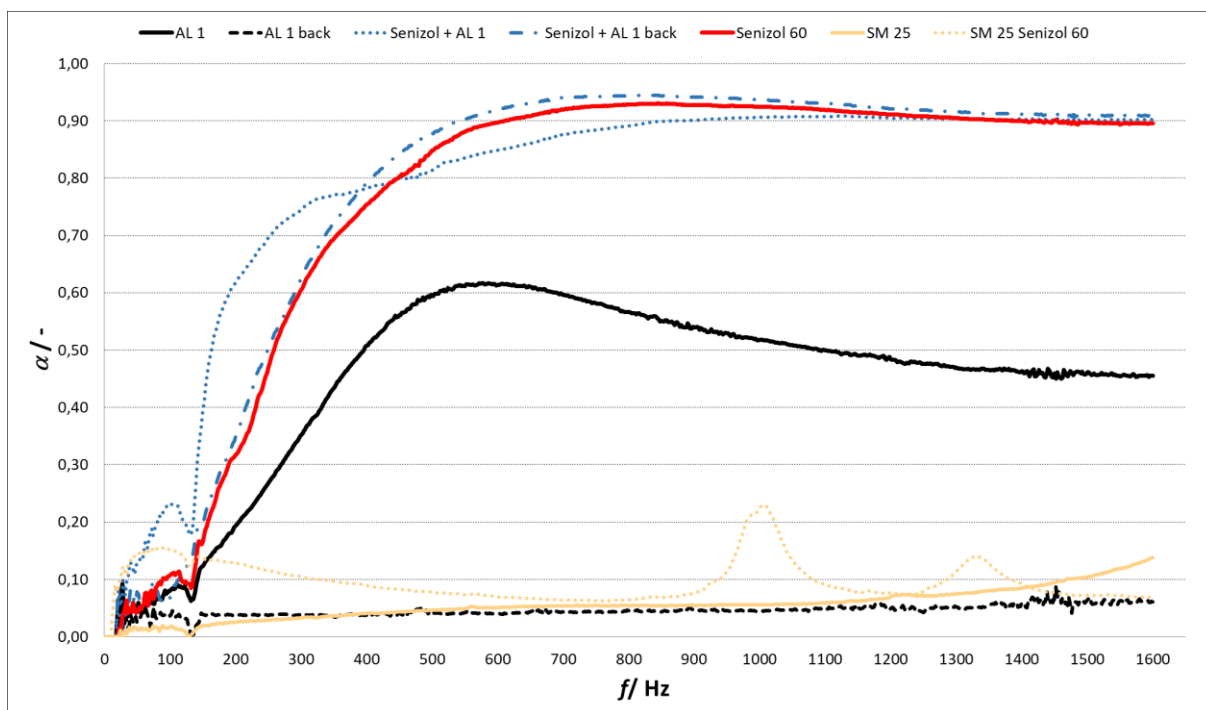
Schéma meracej aparatury na meranie koeficienta zvukovej pohltivosti je prezentovaná na Obrázku 1 a pozostáva z Kundtovej impedančnej trubice Bruel & Kjaer (50 Hz – 6,4 kHz) typ 4206 s veľkou trubicou, systému PULSE 14 a jedného modulu LAN-XI Brüel & Kjær typu 3050 s aktívnymi dvoma vstupmi a CPB analýzou, z 2 zhodných mikrofónov, zosilňovača a počítača so softvérom umožňujúcim zobrazenie a ukladanie nameraných dát ako aj generovanie budiaceho signálu (biely šum). Výsledky merania koeficienta zvukovej pohltivosti, zaznamenané do tabuľky alebo do grafov pri určených frekvenciách, sa získavajú pomocou programu „Acoustic Material Testing“, ktorý pracuje v prostredí LabShop systému PULSE s prepojením na Kundtovu trubicu (ČULÍK, DANIHELOVÁ, 2019).



**Obrázok 1.** Schéma zariadenia na meranie koeficientu zvukovej pohltivosti a odrazivosti (DANIHELOVÁ A KOL., 2021).

### 3 Výsledky a diskusia

V Tabuľke 1 sú uvedené hodnoty koeficientu zvukovej pohltivosti pri vybraných frekvenciách a na Obrázku 2 je prehľadne zaznamenaný priebeh koeficientu zvukovej pohltivosti v závislosti na frekvencii skúšobných telies skúmaných a porovnávaných materiálov.



**Obrázok 2.** Grafická prezentácia koeficientu zvukovej pohltivosti testovaných materiálov v rozsahu frekvencií 50 Hz – 1,6 kHz.

Ako vidno z grafu na Obrázku 2 a nameraných hodnôt koeficienta zvukovej pohltivosti z Tabuľky 1 dochádza pri spájaní materiálu recyklovanej textílie s penovým hliníkom k zvýšeniu zvukovej pohltivosti pri určitých frekvenciách.

**Tabuľka 1.** Zvuková pohltivosť skúmaných materiálov pri vybraných frekvenciách.

Materiál	AL 1	AL 1 back	Senizol + AL 1	Senizol + AL 1 back	Senizol 60	SM 25	SM 25 Senizol 60
$h/$ mm	30				60	25	
$\rho/$ kg.m <sup>-3</sup>	361				61	351	
NRC	0,45	0,05	0,85	0,80	0,80	0,05	0,10
$f/$ Hz							
50	0,05	0,02	0,13	0,08	0,04	0,01	0,14
125	0,08	0,03	0,19	0,12	0,09	0,00	0,13
200	0,19	0,04	0,62	0,35	0,32	0,03	0,13
250	0,27	0,04	0,70	0,50	0,47	0,03	0,12
500	0,60	0,04	0,81	0,88	0,85	0,05	0,08
800	0,57	0,04	0,89	0,94	0,93	0,05	0,06
1000	0,52	0,04	0,91	0,94	0,92	0,06	0,23
1500	0,46	0,06	0,90	0,91	0,90	0,10	0,07
1600	0,46	0,06	0,90	0,91	0,90	0,14	0,07

#### 4 Záver

Výsledky experimentálnych meraní dávajú jasný predpoklad na spájanie uvádzaných materiálov pri ich využití v oblasti priestorovej akustiky, ako napr. akustickej dosky Senizol hrúbky 60 a penového hliníka AL 1. Rovnako je zaujímavé ich využitie aj v oblasti muzikológie. V tejto oblasti je však potrebný ešte ďalší výskum, ktorý by ešte cielenejšie riešil niektoré oblasti využitia.

#### Podakovanie

Príspevok vznikol v rámci riešenia projektu VEGA 1/0714/21 "Výskum vybraných vlastností trvalo udržateľných izolačných materiálov s potenciálom využitia v drevostavbách" (33%), riešeného na DF TU vo Zvolene a projektu VEGA č. 2/0134/23 „Vplyv materiálov na akustické vlastnosti historických jednomanuálových organov na území Slovenska“ (33%), riešeného v Ústave materiálov a mechaniky strojov SAV Bratislava. Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Progresívny výskum úžitkových vlastností materiálov a výrobkov na báze dreva (LignoPro), kód ITMS: 313011T720 (34%), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

#### Literatúra

ČULÍK, Martin a Anna DANIHELOVÁ. *Fyzikálna analýza budov*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2019. ISBN 978-80-228-3170-3.

DANIHELOVÁ, Anna, Patrik ŠČENSNÝ, Tomáš GERGEL, Vojtěch ONDREJKA, Miroslav NĚMEC, Rastislav IGAŽ, Jozef ŠTEFKO a Iveta MITTEROVÁ. Influence of flame retardant impregnation on acoustic and thermophysical properties of recycled technical textiles with the potential for use in wooden buildings. *Polymers*. 2021, 13(2598). ISSN 2073-4360.

GERGEL, Tomáš. *Akustické charakteristiky panelov z lepeného dreva*. Zvolen, 2017. Školiteľ Anna Danihelová.

Product Data: Impedance Tube Kit (50 Hz – 6.4 kHz) Type 4206. In: *Sound & Vibration Measurement A/S* [online]. Nærum, Denmark: Brüel & Kjær, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné na internete: <https://www.bksv.com/media/doc/BP1039.pdf>

RYCHTÁRIKOVÁ, Monika, Vojtech CHMELÍK a Daniel URBÁN. *Akustika : stavebná a priestorová*. 1. vyd. Bratislava : Vydavateľstvo Eurostav, 2019. 236 s. ISBN 978-80-89228-62-1.

RYCHTÁRIKOVÁ, Monika a Vojtech CHMELÍK. *Architectural Acoustics. Room acoustics*. 1. vyd. Leuven : Acco, 2015. 140 s. ISBN 978-94-6292-266-2.

STN EN ISO 10534-2:2002, *Akustika. Určovanie koeficienta zvukovej pohltivosti a akustickej impedancie v impedančných trubiciach. Časť 2: Metóda transformačnej funkcie* (ISO 10534-2:1998).

## Summary

**Sound Absorption of Aluminium Foam and Acoustic Plate from Recycled Textile.** The physical principles of room acoustics were applied to sound absorption research, analysing foamed aluminium and acoustically suitable recycled textile. Positive results can be used in the process of further implementation of the researched construction. The results of the experimental measurements provide a clear prerequisite for joining the mentioned materials in their use in the field of room acoustics, such as acoustic plate Senizol (thickness 60 mm) and Aluminium foam (AL 1). Their use in the field of musicology is also interesting. However, further research is needed in this area, which would address some areas of use in a more targeted manner.

## Keywords

Aluminium foam; Recycled textile plate; Room acoustics; Sound absorption coefficient.

## Contact Address

Martin Čulík

Department of Wooden Constructions (KDS)

Faculty of Wood Science and Technology

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

[culik@acoustics.sk](mailto:culik@acoustics.sk)

<https://www.acoustics.sk>

Andrej Štafura a Michal Kuriš

Ústav materiálov a mechaniky strojov SAV

Dúbravská cesta 9/6319, 845 13 Bratislava, Slovenská republika

[andrej.stafura@savba.sk](mailto:andrej.stafura@savba.sk)

Miroslav Němec

Department of Physics, Electrical Engineering and Applied Mechanics (KFEAM)

Faculty of Wood Science and Technology, Technical University in Zvolen

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

[nemec@tuzvo.sk](mailto:nemec@tuzvo.sk)

## DESIGN OF A PROTOTYPE COMPOSITE TIMBER BEAM IN 4-POINT BENDING LOAD

Róbert Uhrín, Nadežda Langová, Patrik Štompf, Viliam Púček

### 1 Introduction

In current world increasingly defined by the urgent challenges of the climate crisis, such as greenhouse gas emissions, increasing average global temperature, negative environmental impact on biodiversity caused by urbanisation and quick population growth (ABED *et al.*, 2022), the pursuit for sustainable building practices has never been more critical. One among many solutions is the use of timber as a primary construction material.

Timber's advantage is the inherent strength due to high ratio between mechanical properties and low density, thermal insulation properties and good behaviour under fire loads, or great seismic performance of the structures made from timber. It also presents a significantly reduced carbon footprint compared to traditional materials like concrete, masonry, and steel. Disadvantageous properties, like flammability, hygroscopicity, which by improper design, leads to low durability, thermal inertia, and acoustic performance of the structures made of the timber, must be mentioned as well (PASTORI *et al.*, 2022).

In parallel with the rise of timber as a sustainable construction material, the incorporation of renewable natural insulations further enhances the ecological footprint of buildings. Blown-in insulations derived from natural sources, such as wood fibre, straw, hemp, cork, sheep wool, or recycled materials like newspaper-based cellulose, offer effective thermal performance of the structure comparable to the commercially available petrochemical and inorganic thermal insulations, while minimizing adverse environmental impacts (DURAKOVIC *et al.*, 2020).

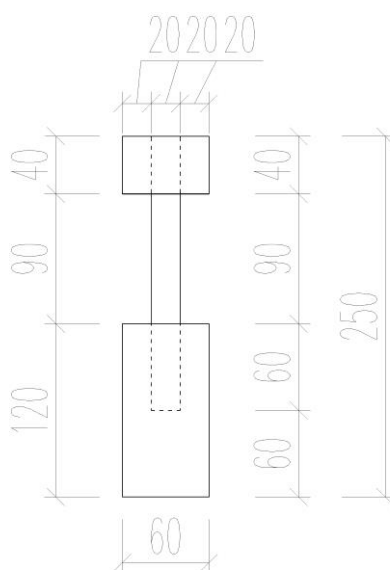
Structural integrity of a timber structure depends on its loadbearing components and the joints (ASDRUBALI *et al.*, 2016). Composite wood-based columns offer higher mechanical properties and reduce thermal bridges in the structure. The cross-section geometry influence on the mechanical properties of engineered wood beams was researched by Bahadori-Jahromi (BAHADORI-JAHROMI *et al.*, 2006).

This paper deals with the of prototype timber structure, with a specific focus on a composite timber beam design altered for renewable nature-based blown-in insulations. The aim is to verify mechanical properties of prototype beam under 4-point bending load. Proposed were 4 different flange-to-web joints, of which one was verified by a Finite Element Analysis (FEA) method in ANSYS software.

### 2 Methods

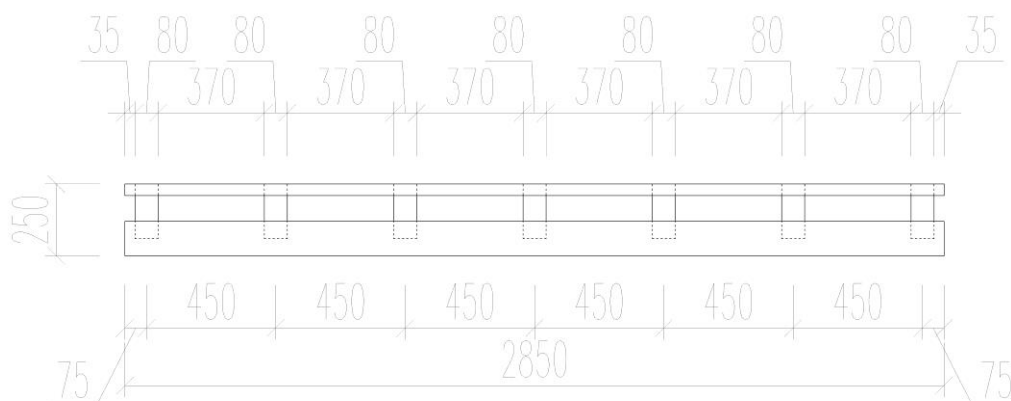
The prototype timber beam is designed for blown-in insulations, such as cellulose, wood fibre, hay, cork, glass mineral wool and other insulating materials applied into the structure by blowing. The prototype beam is considered a composite beam in accordance with European Assessment Document EAD 130367-00-0304. Flanges are made of strength graded solid structural timber, class C24, with dimensions of lower flange 60 by 120 mm and upper flange 60 by 40 mm, 2850 mm long.





**Figure 1.** Cross-section of the prototype timber composite beam.

Flanges are connected by a lattice web made of visually graded planks with dimensions 20 by 80 mm, 190 mm long. All timber materials used are made of Spruce (*Picea abies* Karst.).



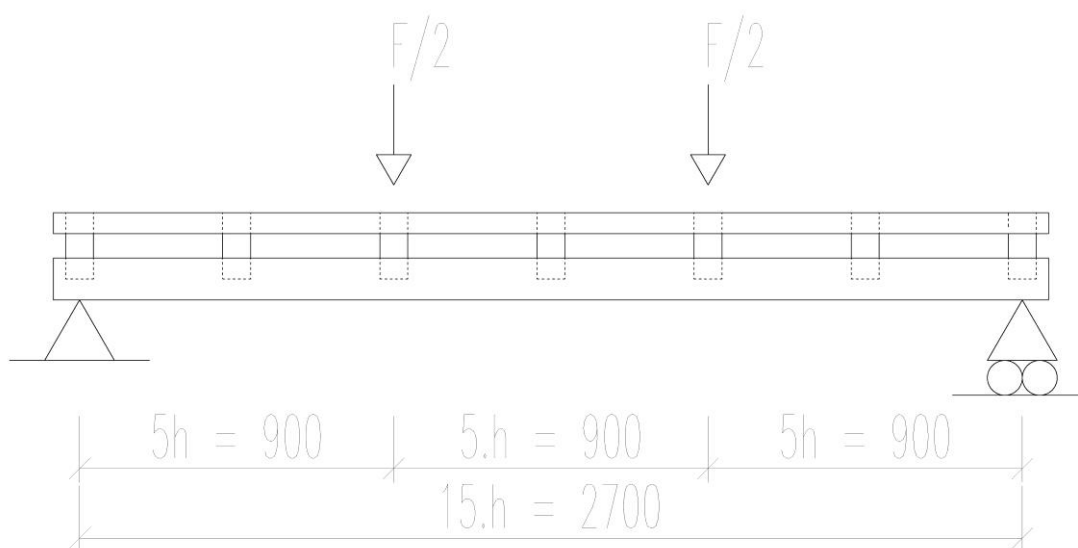
**Figure 2.** Prototype timber composite beam.

To further investigate mechanical properties of the prototype beam, flanges and lattice web were designed with different joints. Proposed were adhesively bonded, screw and dowel mortise and tenon and self-locking joint. Proposed joints will be tested experimentally. This paper deals with adhesively bonded joints only.

Adhesively bonded mortise and tenon joint was designed as a one component polyurethane (PUR) adhesive for loadbearing timber structures, conforming to the standard EN 15425.

Timber was kept in conditions of the service class 1, that is, air temperature 20°C and relative air humidity 50%, causing equilibrium moisture content of the softwood timber to be 12%.

To explore the properties of the prototype beam, it was at first modelled in ANSYS Mechanical, FEA software for structural engineering. 4-point bending loading scheme was used. The force applied was estimated at 6 000 N.



**Figure 3.** 4-point bending load of the beam.

Material properties were used as shown in the Table 1.

**Table 1.** Properties of materials in FEM analysis.

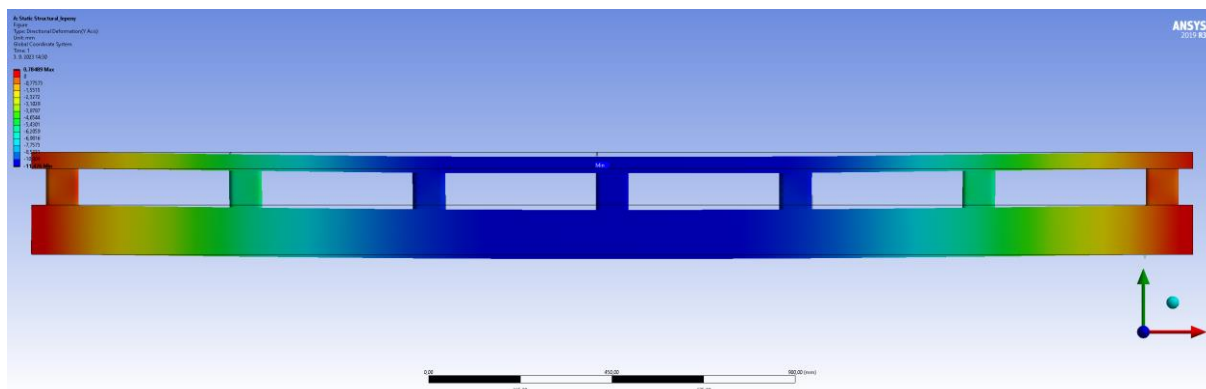
Property	Value	Units	Source
Density	420	[kg.m <sup>-3</sup> ]	STN EN 338
Young's Modulus, axis X	13 650	[MPa]	
Young's Modulus, axis Y	789	[MPa]	
Young's Modulus, axis Z	289	[MPa]	
Poisson's Ratio, axis XY	0,014	[-]	
Poisson's Ratio, axis YZ	0,687	[-]	
Poisson's Ratio, axis XZ	0,023	[-]	
Shear Modulus, axis XY	474	[MPa]	
Shear Modulus, axis YZ	53	[MPa]	
Shear Modulus, axis XZ	573	[MPa]	
Tensile Yield Strength	9,8	[MPa]	
Compressive Yield Strength	10,5	[MPa]	
Tensile Ultimate Strength	14	[MPa]	STN EN 338
Compressive Ultimate Strength	21	[MPa]	STN EN 338

Orientation of the grain in the flanges is parallel in the X axis, while Y and Z axis is perpendicular to the grain. Orientation of the grain in the webs is parallel in the Y axis. This fact had to be considered while modelling the properties of materials in the software. Compressive yield strength was set at 50% of compressive ultimate strength, while tensile yield strength was set at 70% of the tensile ultimate strength. These values were experimentally tested by Požgaj (POŽGAJ *et. al.*, 1997).

### 3 Results

Analysis of the prototype columns was done in ANSYS software. Deflection, distribution of normal and shear stresses was investigated.

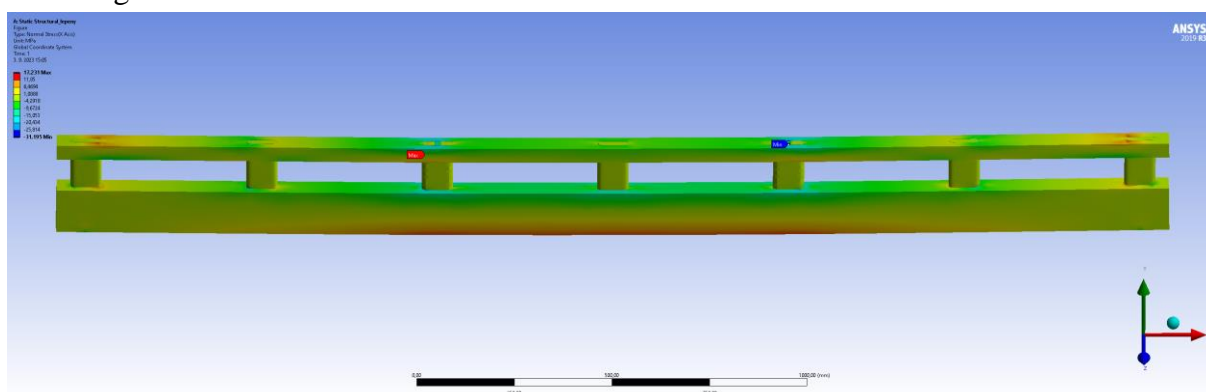
Deflection is considered a state of deformation after the load is applied. The deflection is shown in the Figure 4.



**Figure 4.** Deformation of the beam in Y axi.

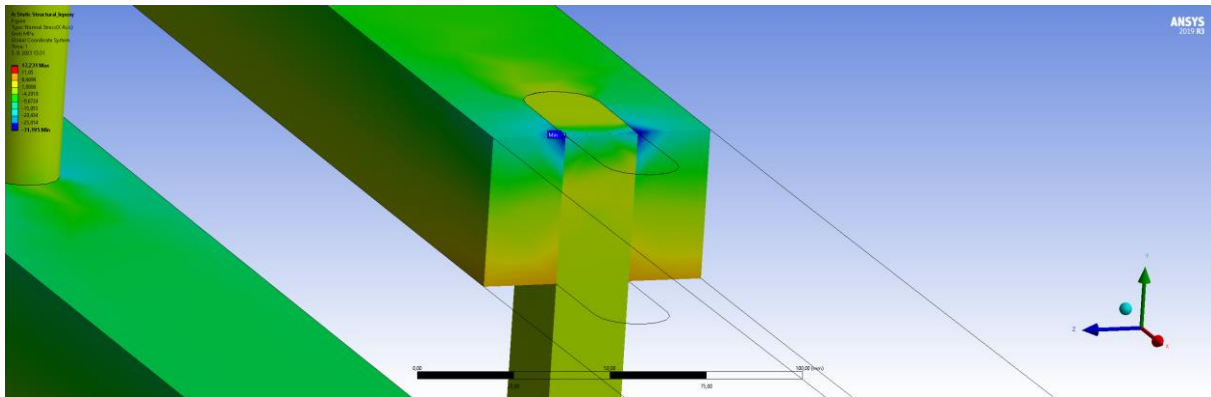
The greatest deflection was in the middle of a span of the beam. The instantaneous deflection was 11,5 mm in the Y axis. In comparison with STN EN 1995-1-1:2008, limit values of instantaneous deflection of the composite beam on two supports would be between 5,4 and 9 mm.

Normal stresses, represented as red tensile and blue compressive stress, in the beam are shown in the Figure 5.



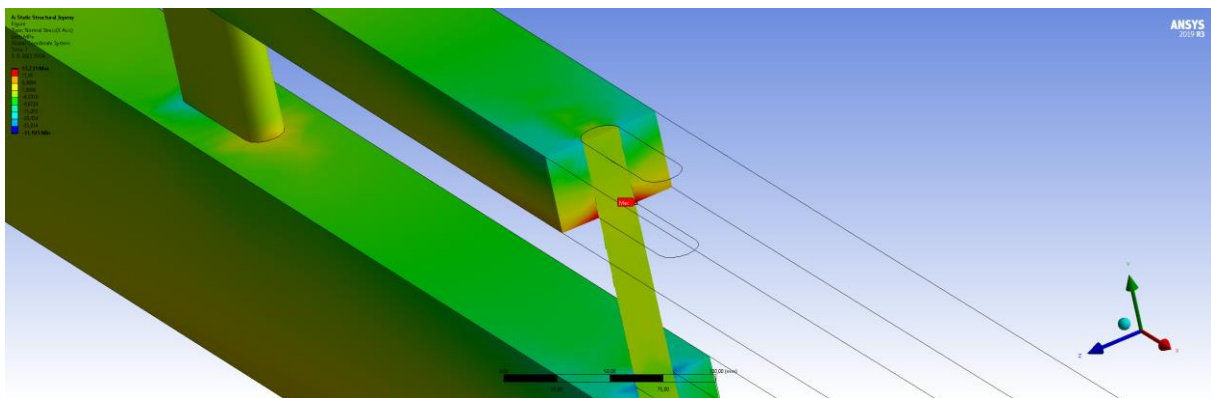
**Figure 5.** Distribution of normal stresses on the beam.

The greatest compressive stress is shown in the joint on the upper side of the flange. In this place the force is applied. Material failure is expected, due to low compressive strength of timber perpendicular to the grain, as well as failure of adhesively bonded joint. Local compressive stress reached 31,2 MPa, which is way beyond the ultimate strength of timber in compression perpendicular to the grain used in this model. Ultimate strength was used as characteristic strength 21 MPa for the strength along the grain and 2,5 MPa for the strength perpendicular to the grain, taken from STN EN 338 for timber strength class C24. However, characteristic strengths are a 5-percent fractile of statistical distribution and timber used for experiment may not always correspond to these values. Considering defects in timber, like knots, ruptures or abnormal wood may influence the strength properties in a negative way. On the other hand, high quality timber with low number of defects may possess increased properties in terms of strength.



**Figure 6.** Maximum compressive stress.

The greatest tensile stress is shown in the adhesive joint on the lower side of the flange. Local tensile stress reached 17,2 MPa. This value exceeds ultimate strength of the material used in software, specifically 14 MPa tensile strength along the grain and 0,4 MPa tensile strength perpendicular to the grain. In this place, material failure is expected due to the opening of the flange. Creating notches in flanges in engineered I beams is prohibited, concentrated stresses may cause structural damage (CHEN *et. al.*, 2021).



**Figure 7.** Maximum tensile stress.

These results suggest that failure occurs solely in the upper flange, which has smaller cross-section area. Mortises in the flange rectangular shaped, with curved edges, may cause stresses to concentrate. Critical for this failure could be the strength of material as well as adhesively bonded joint.

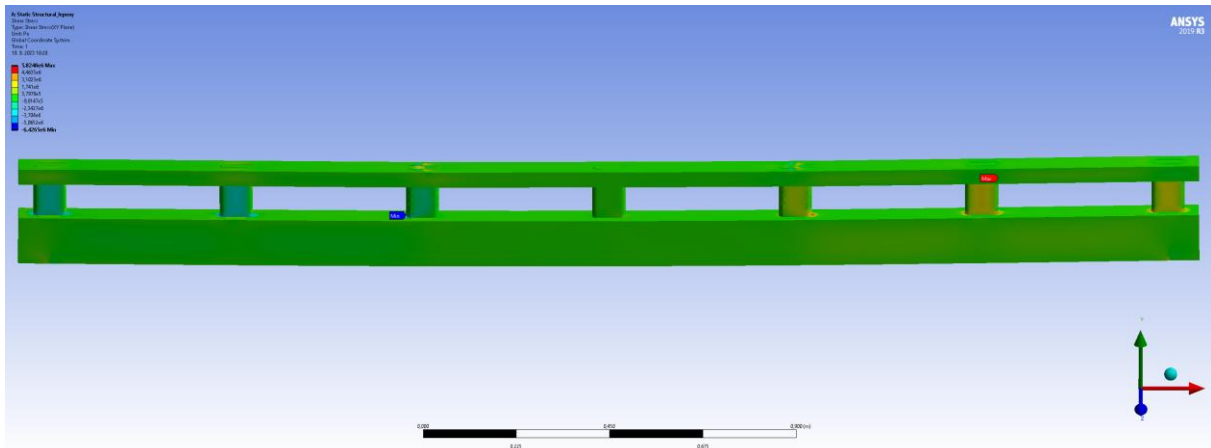


Figure 8. Shear stress on a prototype beam.

Shear stresses are notable in the lattice webs. Greatest reached values at the given load were 5,8 MPa and -6,4 MPa. Compared to the ultimate strength of material being the characteristic value of shear strength 4 MPa, both extreme values of shear stress exceed the shear strength of material.

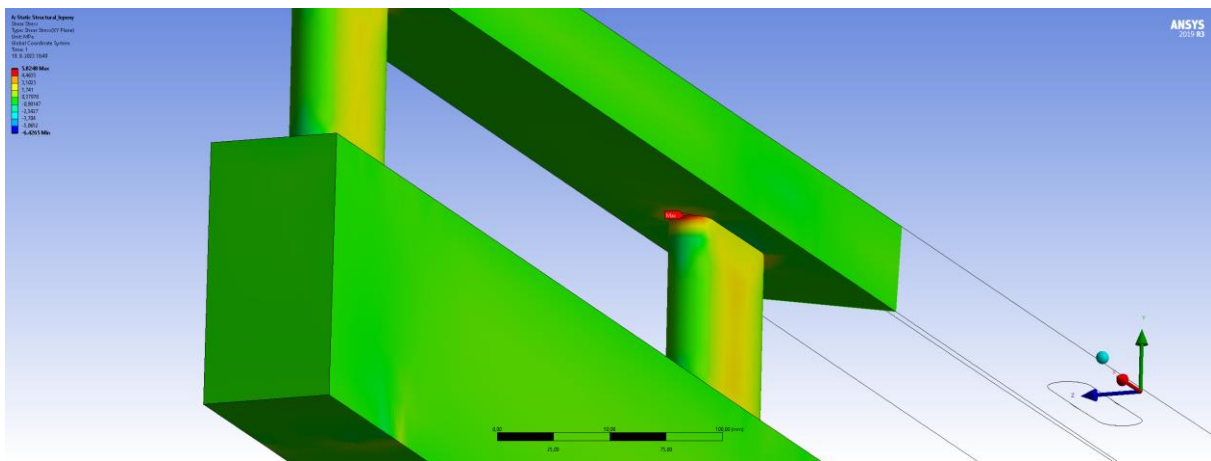


Figure 9. Extreme shear stress at the joint of upper flange.

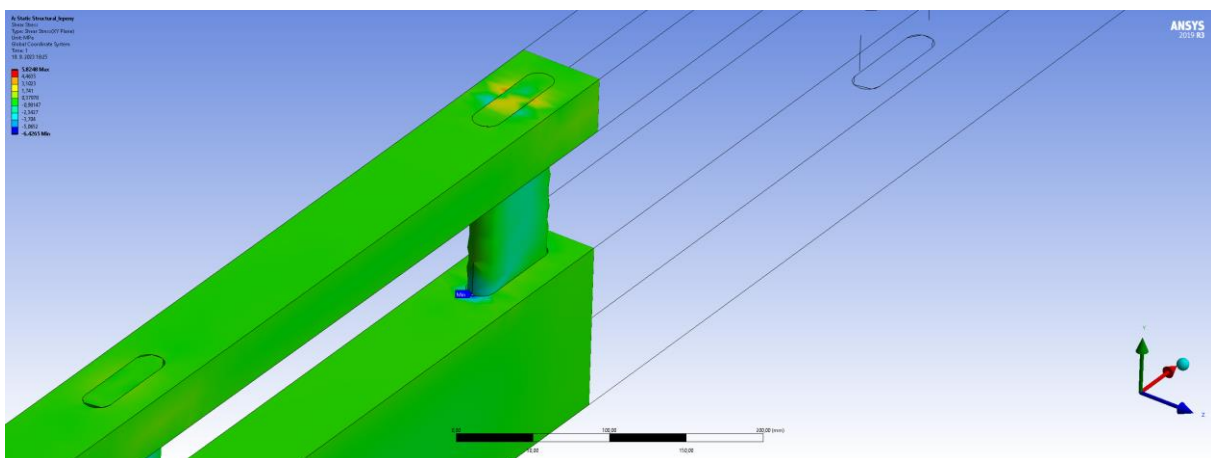


Figure 10. Extreme shear stress at the joint of the lower flange.

## 4 Conclusion

Given the results, the most critical place of the prototype composite timber beam are joints. Failure may happen in the material, in the adhesive layer, or in both at the same time. The quality of the adhesive joints will greatly define mechanical properties of the beam. Any irregularities in process of making adhesive joint will influence the strength of the joint. Another factor is material. Timber chosen for this experiment was dried and machine graded into strength classes. Declared properties are backed by certification. True strength of material may be influenced by defects in wood mentioned earlier. FEM analysis ought to be tested experimentally to confirm or disprove the results.

## Acknowledgements

This paper was created with support of the Slovak Research and Development Agency, project number APVV-17-0206 “Ultra-low Energy Green Building Based on Renewable Wood Material”, Department of Timber Structures, Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, Slovakia.

## References

- ABED Joseph, Scott RAYBURG, John RODWELL and Melissa NEAVE. A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*. 2022, 14, 5570. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.3390/su14095570>
- PASTORI Sofia, Enrico Sergio MAZZUCHELLI, Marita WALLHAGEN. Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*. 2022, Volume 359, 129505, ISSN 0950-0618, Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129505>
- DURAKOVIC Benjamin, Gokhan YILDIZ, Mohamed E. YAHIA. Comparative Performance Evaluation of Conventional and Renewable Thermal Insulation Materials Used in Building Envelops. *Tehnički vjesnik* 2020. 27 (1), 283-289. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.17559/TV-20171228212943>
- ASDRUBALI Francesco, Barbara FERRACUTI, Lidia LOMBARDI, Claudia GUATTARI, Luca EVANGELISTI, Gianluca GRAZIESCHI. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment* 2017. 114, 307 – 332. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- BAHADORI-JAHROMI Ali, Abdy KERMANI, Binsheng ZHANG, Annette M. HARTE, Karen BAYNE, John TURNER, Bryan WALFORD, Influence of cross-section on the strength of timber beams. *Proceedings of the institution of civil engineers - structures and buildings* 2006. 159, 103-114. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1680/stbu.2006.159.2.103>
- CHEN Guo, Chuang TAN, Wenqi YANG, Jing WU, Tong ZHOU, Hao JIANG, Yongxing ZHANG. Wood I-joists with web holes and flange notches: A literature review. *Journal of Building Engineering* 2021, Volume 38, 102224. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102224>
- POŽGAJ, Alexander. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydanie. Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4.

## Summary

**Design of a Prototype Composite Timber Beam in 4-point Bending Load.** This paper deals with a prototype composite timber beam for post and beam timber construction. The beam was designed to transfer vertical loads. Flanges are made of machine graded solid structural timber, while lattice web is made of visually graded spruce planks. Joints of flanges and web are adhesively bonded mortise and tenon. Before experimentally testing the prototype beam, a FEM analysis took place. Prototype beam was analysed in ANSYS Mechanical software and analysed were deflection, normal and shear stresses. Results indicate the adhesively bonded joints to be the critical place of the beam, where stresses exceeded characteristic strengths of material both along and perpendicular to the grain. Failure of material as well as adhesive is expected.

## Keywords

Prototype composite timber beam; loadbearing, adhesively bonded; fem analysis, post and beam.

## Contact Address

Róbert Uhrín  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Science and Technology  
Technical University in Zvolen  
T.G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen, Slovak Republic  
robert.uhrin@tuzvo.sk

Nadežda Langová  
Department of Furniture and Wood Products (KNDV)  
Faculty of Wood Science and Technology  
Technical University in Zvolen  
T.G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen, Slovak Republic  
langova@tuzvo.sk

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  
stompf@tuzvo.sk

Viliam Púček  
Department of Wooden Constructions (KDS)  
Faculty of Wood Science and Technology  
Technical University in Zvolen  
T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovak Republic  
xpucek@is.tuzvo.sk

## VPLYV KONŠTRUKCIE POŤAHOVÉHO MATERIÁLU NA PEVNOSŤ ŠITÉHO SPOJA ČALÚNENÉHO NÁBYTKU

Anna Vilhanová, Nadežda Langová, Marek Merčiak

### 1 Úvod

Pri zariaďovaní bytových a nebytových interiérov sa v prvom rade zohľadňuje funkčnosť nábytku a jeho estetické prevedenie. V poslednom období sa do popredia dostáva otázka kvality interiéru z hľadiska jeho akustických vlastností. Jedná sa najmä o kancelárske priestory v súčasnosti preferovaných zdieľaných kancelárií alebo tzv. open office. Miestnosti s veľkými plochami, pri ktorých sa používajú stavebné akusticky odrazivé povrchy, ako sú betónové podlahy, sklenené priečky a pod., môžu byť oveľa hlučnejšie. Keďže zvuk v týchto priestoroch absorbuje len veľmi málo povrchov, problém sa ešte zhoršuje. Pravidlá pre ochranu používateľov pred nadmerným hlukom v pracovnom prostredí sú formulované celosvetovo aj na národnej úrovni, navyše v Európe či Spojených štátoch amerických sú platnou súčasťou celkovej politiky bezpečnosti stavieb užívateľov od 50. rokov 20. storočia. V tejto oblasti je mimoriadne dôležité obmedzenie hluku, ochrana pred stratou sluchu a umožnenie zrozumiteľnosti reči pre všetkých zamestnancov pracujúcich v rôznych oblastiach. Samozrejme v súčasnosti existuje niekoľko technických riešení, najmä použitím stavebných zvukových izolácií, ktorými sa problém šírenia zvuku v interiéri môže riešiť. Ak sa na uvedený problém pozeráme z pohľadu interiérových dizajnérov a výrobcov nábytku, môžeme ho vyriešiť aj využívaním ľahčených, akusticky pohltivých, nábytkových konštrukčných materiálov alebo kreatívnym využitím a usporiadaním čalúneného nábytku v danom interiéri. Zvukové vlny sú absorbované polyuretánovými, textilnými alebo prírodnými materiálmi v čalúnenom nábytku, koberecoch, matracoch alebo vankúšoch pričom rozptyľujú ich energiu. Okrem zabezpečenia pohodlia a podmienok na činnosť, ktorá sa realizuje v danom interiéri, pomáha čalúnený nábytok riadiť zvuk dvoma spôsobmi: blokovaním a pohlcovaním. Nábytok má zvyčajne väčšie rozmery, takže je celkom účinný pri blokovaní zvukových vln obmedzením prenosu, pretože sa v dôsledku svojej konštrukcie a rozmerom nerozširuje. Podobne zvuk absorbuje aj čalúnený nábytok, pretože zvukové prvky vstupujúce do mäkkého materiálu sa nemôžu vrátiť do priestoru.

Z uvedeného vyplýva že nábytok je v interiéri významný prvok, preto jeho kvalita musí byť zabezpečená počas celej doby jeho používania a jeho životnosť by mala byť čo najvyššia. Medzi faktory, ktoré ovplyvňujú komfort a kvalitu používania čalúneného nábytku a komponentov, patria nielen hygienické a estetické vlastnosti, ale najmä mechanické vlastnosti predovšetkým poťahových textílií. Pevnosť poťahového materiálu, odolnosť voči oderu a žmolkovaniu patria popri charakteristikách komfortu čalúnenia medzi najdôležitejšie faktory kvality čalúneného nábytku. Materiály používané v čalúnnickej výrobe pre výrobu poťahov sú plošné materiály, ktoré je potrebné deliť podľa požadovaného strihového plánu a následne znovu spájať šitými spojmi. Konštrukcia a materiálové zloženie poťahového materiálu ovplyvňujú nielen kvalitu samotného poťahu ale aj mechanické a vzhľadové vlastnosti vytvorených spojov. Typ šitého spoja a jeho umiestnenie na poťahu čalúneného nábytku závisí aj od spôsobu a miesta zaťaženia nábytkovej konštrukcie. Pevnosť švu poťahovej látky je vždy nižšia v porovnaní s bezšvovými miestami. Kvalita a trvanlivosť textilného výrobku, najmä toho, ktorý znáša určité zaťaženie švov pri používaní, zvyčajne závisí od pevnosti a kvality šitého švu, ako aj od vlastností tkanín (GERMANOVA, PETROV 2008; BHARANI A KOL., 2012)

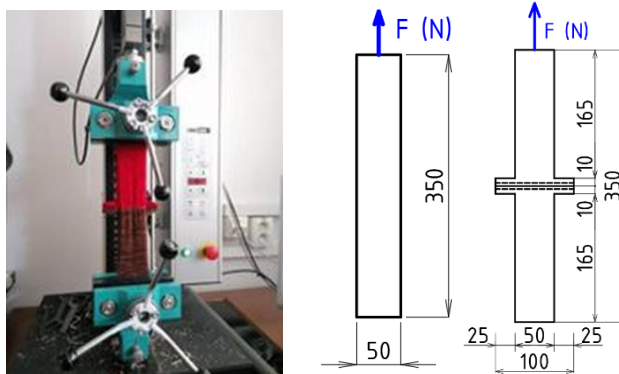


Kvalita poťahového materiálu je najdôležitejší prvok z pohľadu vzhľadu ale aj akustických vlastností čalúnenia. Je určená mechanickými vlastnosťami a je zrejmé, že tieto vlastnosti priamo ovplyvňujú vlastnosti spracovania poťahovej textílie. Je to zreteľné pri rôznych formách správania sa textílie pri zaťažení, ktoré sa vyskytuje pri šití (PAVLINIČ A KOL., 2006; GERSAK, 2003; ZAVEC A GERŠAK, 2000). Úloha vlastností textílie pri únosnosti šitého spoja a kvalite šva je zásadná, preto je dôležité pochopiť vplyv rôznych parametrov na vlastnosti šitia poťahových látok. Kvalita ekologickej tkaniny bola skúmaná v práci autorov ESI A BAYKAL (2020). V tejto štúdii boli recyklované polyesterové priadze získané recykláciou odpadových polyetyléntereftalátových fliaš a štandardné polyesterové priadze použité v strižových formách, bolo vyrobených 16 rôznych ženilkových priadzí pri rôznych výrobných parametroch. Na základe skúšok pevnosti v ťahu a štatistických analýz sa dospelo k záveru, že medza pevnosti v útku všetkých typov tkanín, ktoré majú v štruktúre útku ženilkové priadze zo 100% recyklovaného polyesteru, je v porovnaní s inými typmi mierne znížená, ale tento pokles nie je štatisticky významný. Funkčný výkon švu sa hodnotí účinnosťou, predĺžením, hustotou, sklzom, tuhosťou v ohybe a odolnosťou švu proti oderu. Základom pre vytvorenie kvalitného čalúneného poťahu je látka a šijacia niť, čo platí aj pre spoje odevných textílií (BHAVES, R. A KOL., 2018).

Cieľom nášho príspevku je stanovenie vplyvu plošnej hustoty a pevnosti vybraných typov poťahových materiálov na pevnosť šitých spojov vytvorených s použitím vybraného typu šijacej ihly a šijacou niťou typu SYNTON 30. Podstata skúšok spočívala v porovnaní pevnosti poťahového materiálu samotného a pevnosti vytvoreného šitého spoja.

## 2 Metodika

Pevnosť poťahového materiálu a pevnosť šitého spoja sa stanovuje podľa normy STN EN ISO 13935-1, 2001. Pevnosť šitého spoja je definovaná ako maximálna sila pri pretrhnutí šva zaťažovaného ťahom kolmo na šev. Podľa metódy STRIP sa skúšobná vzorka plošnej textílie (obr. 1) a so švom (obr. 2) napína kolmo na šev pri konštantnej rýchlosti až do pretrhnutia šva, pričom sa zaznamená maximálna sila potrebná na pretrhnutie šva.

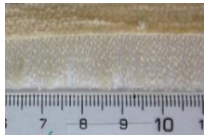















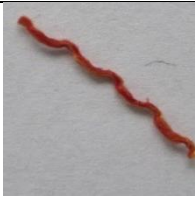


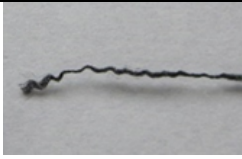



Obrázok 1. Princíp skúšky a veľkosť skúšobných vzoriek pre testovanie pevnosti textílií a šitých spojov.

### 2.1 Použité materiály

Pri spájaní skúšaných poťahových materiálov sme použili niť SINTON 30, ktorá je tvorená 100% polyesterovým vláknom (PES) a ihla od firmy GROZ-BECKERT 10 Nm 100/16 s hrotom R. Dĺžka stehov pri všetkých vzorkách bola 4 mm. V tabuľke 1 uvádzame prehľad použitých materiálov a ich fyzikálne vlastnosti.

Tabuľka 1. Použité skúšobné materiály ich zloženie a vybrané vlastnosti.

Poťahové textilie žinilkové				
Typ priadzí v osnove, v dostave na 1 cm		Materiál tkaniny	Plošná hustota (g/m <sup>2</sup> )	Dostava v osnove na 1 cm
Textília č. 1	  <p>28x Jednoduchá priadza</p>	Polyester, Akryl	570	28
Textília č. 2	  <p>17x Jednoduchá priadza</p>  <p>19x Jednoduchá priadza</p>  <p>14x Jednoduchá priadza</p>	Polyester, Akryl, Bavlna	580	50
Textília č. 3	  <p>14x Skaná priadza</p>  <p>6x Žinilková priadza</p>	Polyester, Akryl, Bavlna	487	20
Poťahové textilie listové				
Textília č. 4	  <p>2x Efektná priadza</p>  <p>2x Efektná priadza</p>  <p>1x Jednoduchá priadza</p>	Polyester, Akryl	423	15

Textília č. 5		 12x Jednoduchá priadza	Polyester	478	45
		 33x Jednoduchá priadza			
Textília č. 5		 21x Jednoduchá priadza	Polyester, Akryl,	305	21
<b>Poťahové textilie koženky</b>					
Koženka 1			Základná vrstva je polyesterová pletenina, vrchná vrstva je vytvorená kombináciou PVC a Polyuretánu	650 g/m <sup>2</sup>	
Koženka 2			Základná vrstva je polyesterová tkanina, vrchná vrstva je vytvorená kombináciou PVC a Polyuretánu	392 g/m <sup>2</sup>	
Koženka 3			Základná vrstva je polyesterová tkanina, vrchná vrstva je vytvorená kombináciou PVC a Polyuretánu	520 g/m <sup>2</sup>	

### 3 Výsledky

Pri používaní čalúneného nábytku sú spoje na funkčných plochách poťahových materiálov namáhané ťahom. Pre vyhodnotenie ťahových vlastností švov sme merali maximálnu silu pri pretrhnutí referenčných vzoriek nezošitej textílie  $F_{FLmax}$  (N) a maximálnu silu pri pretrnutí šva  $F_{Smax}$  (N) pri šitých vzorkách (tabuľka 1). Rozmery referenčných skúšobných vzoriek pre stanovenie pevnosti textílie mali rovnaké rozmery ako vzorky so šitými spojmi. Taktiež metodika zaťažovania a stanovenia maximálnej sily a poškodenia bola rovnaká. Prostredníctvom pevnosti textílie a šitého spoja sa vyhodnocuje taktiež účinnosť šitého spoja podľa rovnice (1) nasledovne:

$$P_S = \frac{F_{Smax}}{F_{FLmax}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde:  $F_{S_{max}}$  – pevnosť šitého spoja (N),  
 $F_{FL_{max}}$  – pevnosť textílie (N).

Tabuľka 2. Mechanické vlastnosti vybraných typov textílií a šitých spojov.

Druh textílie	Žinilkové textílie			Listové textílie			Koženky		
Plošná hustota textílie	Textília1 570 g/m <sup>2</sup>	Textília2 580 g/m <sup>2</sup>	Textília3 487 g/m <sup>2</sup>	Textília4 423 g/m <sup>2</sup>	Textília5 478 g/m <sup>2</sup>	Textília6 305 g/m <sup>2</sup>	Koženka1 650 g/m <sup>2</sup>	Koženka2 392 g/m <sup>2</sup>	Koženka3 520 g/m <sup>2</sup>
Pevnosť textílie (N)	748	1331	521	1262	2368	713	432	630	1008
Pevnosť spoja (N)	558	530	413	472	552	518	351	362	386
Účinnosť šitého spoja(%)	74,59%	39,81%	79,27%	37,40%	23,31%	72,65%	81,25%	57,46%	37,98%

Na základe experimentov je potvrdený predpoklad, že šité spoje sú kritickými miestom v poťahu čalúneného nábytku. Pri všetkých typoch poťahových textílií je dosiahnutá pevnosť šitého spoja  $F_{S_{max}}$  nižšia ako pevnosť textílie  $F_{FL_{max}}$ . Z hľadiska typu poškodenia šitého spoja, pri všetkých typoch textílií došlo k pretrhnutiu šijacej nite a spájaná textília ostala nepoškodená. V priemere najvyššiu účinnosť šitého spoja vykazujú žinilkové textílie (64,56%). V porovnaní s koženkami je účinnosť spojov žiniliiek vyššia o 8,77% a v porovnaní s listovými textíliami je účinnosť spojov žiniliiek vyššia o 31,14%. Z výsledkov vyplýva, že šijacia niť SYNTON 30, ktorá bola použitá na spájanie textílií je najvhodnejšia práve pre žinilkové textílie a pre koženky. Nie je vhodná pre listové textílie, pretože pevnosť listových textílií je natoľko veľká, že v šitom spoji dochádza k pretrhnutiu šijacej nite čo sa prejavuje aj najnižšou priemernou účinnosťou šitého spoja listových textílií 44,45%.

#### 4 Záver

Čalúnený nábytok je dôležitá súčasť nábytkového vybavenia interiéru, ktorá významne a pozitívne ovplyvňuje akustické vlastnosti najmä verejného, nebytového priestoru. Aby túto významnú funkciu mohol v interiery poskytovať, musí si zachovať svoju kvalitu z hľadiska funkčnosti a životnosti, to znamená že musí spĺňať vysoké nároky na mechanickú odolnosť. Poťahové materiály a ich šité spoje sú prvým hodnotiacim znakom kvality čalúneného nábytku. Preto je naša práca zameraná na skúmanie pevnosti poťahových textílií a šitých spojov v závislosti od konštrukcie a hustoty poťahového materiálu.

Stehy a typy švov sú veľmi dôležité pre kvalitu čalúnenia. Stehy sa používajú na spojenie vzorov čalúnenia a švy dávajú tvar a detail čalúnenia. Typy tkanín a ich štruktúrne vlastnosti majú významný vplyv na účinnosť šva. Pri použití umelých koží ako poťahových čalúnnických materiálov je potrebné z hľadiska účinnosti spoja a jeho poškodenia a defektov zohľadniť najmä typ týchto textílií.

Z výsledkov experimentov vyplýva že pri všetkých vybraných typoch textílií bola pri šitých spojoch zistená nižšia maximálna sila pri pretrhnutí v porovnaní s referenčnými, nešitými vzorkami bez spoja, čím sa potvrdzuje predpoklad, že aj šité spoje patria medzi kritické miesta z hľadiska namáhania. Pri zaťažovaní šitých vzoriek, pri všetkých druhoch materiálu došlo k pretrhnutiu šijacej nite, spájaný materiál ostal nepoškodený. Najvhodnejšími textíliami, ktoré sú vhodné pre spájanie niťou SYNTON 30 sú žinilkové textílie a koženky.

## References

- BHARANI, M., SHIYAMALADEVI, P.S.S., MAHENDRA Gowda, R.V. (2012). Characterization of Seam Strength and Seam Slippage on Cotton Fabric with Woven Structures and Finish. *Research Journal of Engineering Sciences*, 1, 41-50.
- BHAVESH, R, MADHURI K, SUJIT G, SUDHIR M, RAICHURKAR P. (2002). Effect of Sewing Parameters on Seam Strength and Seam Efficiency. *Trends Textile Eng Fashion Technol.* 4(1). dostupné na internete 21.3.2022
- ESI, B.; BAYKAL, P. D. (2020). Investigation of tensile strength and elongation properties of chenille upholstery fabrics including recycling polyester yarns. In *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* (Vol. 15, p. 155892502091604). SAGE Publications.
- GERMANOVA KRASTEVA, D. and PETROV, H. (2008), "Investigation on the seam's quality by sewing of light fabrics", *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 20 No. 1, pp. 57-64. <https://doi.org/10.1108/09556220810843539> .
- GERSAK, J. (2003). Investigations of the impact of fabric mechanical properties on garment appearance. *Tekstil*, 52(8), 368-379.
- PAVLINIĆ DZ, GERŠAK J, DEMŠAR J, BRATKO I. (2006). Predicting Seam Appearance Quality. *Textile Research Journal.* 76(3):235-242. doi:10.1177/0040517506061533
- STN EN ISO 13934 – 1: 2013 Textilie. Ťahové vlastnosti plošných textílií. Časť 1: Zisťovanie maximálnej sily a ťažnosti pri maximálnej sile metódou Strip.
- ZAVEC, D., and GERŠAK, J. (2000) Influence of Mechanical and Physical Properties of Fabrics on their Behaviour in Garment Manufacturing Processes 3rd International Conference, Innovation and Modelling of Clothing Engineering Processes–IMCEP 2000. October 11, 13, 115-119.

## Summary

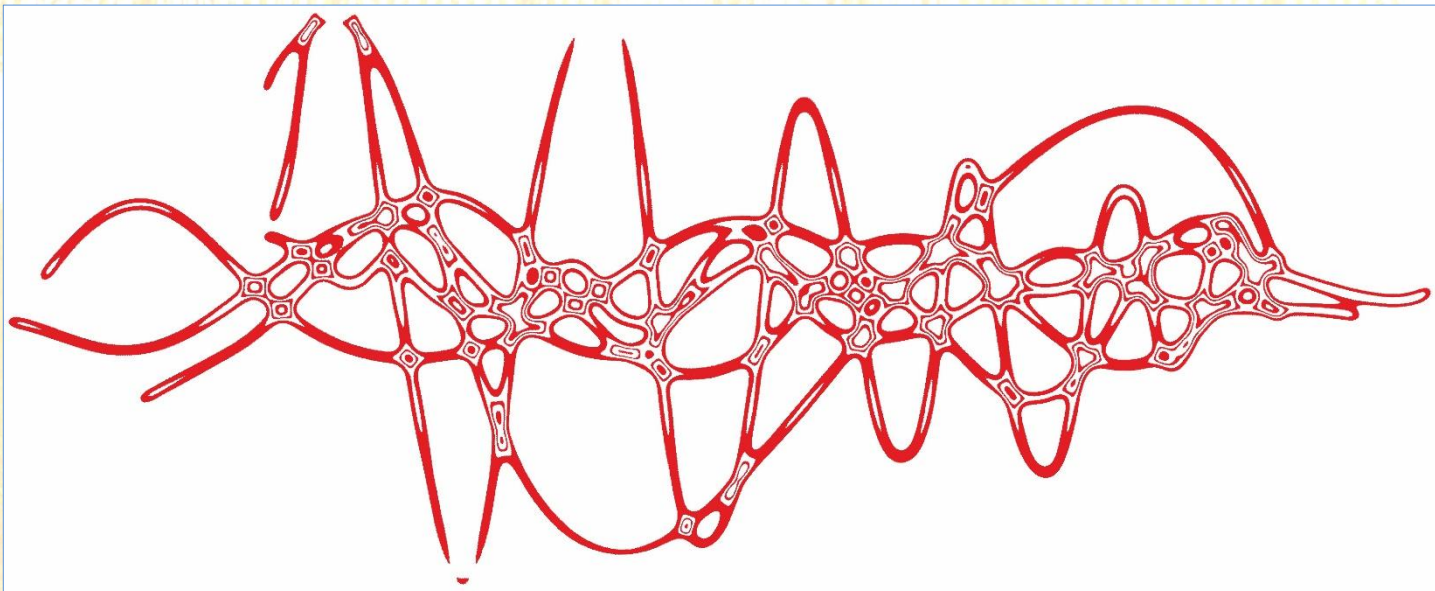
**The Effect of the Construction of Cover Material on Strength Sewed Joint of Upholstered Furniture.** Upholstery cover materials with their properties significantly influence the quality of upholstered products. These materials form the surface layer of upholstered furniture, any damage to this material is immediately visible to the user. We consider the sewn joints connecting the cover fabrics to be one of the critical points of the upholstered surface, therefore they must have the required strength. From the results of the experiments, it follows that for all selected types of textiles, a lower maximum breaking force was found for sewn joints compared to reference, non-sewn samples without a joint, which confirms the assumption that even sewn joints are among the critical points in terms of stress. When the sewn samples were loaded, with all types of material, the sewing thread broke, the joined material remained undamaged. The most suitable fabrics that are suitable for joining with SYNTON 30 thread are chenille fabrics and faux leather.

## Keywords

Upholstery fabrics; Stitched joints; Seam efficiency.

### **Kontaktná adresa**

Anna Vilhanová, Nadežda Langová, Marek Merčiak  
Katedra nábytku a drevárskych výrobkov (KDS)  
Drevárska fakulta  
Technické univerzita vo Zvolene  
T.G. Masaryka 24  
960 01 Zvolen, Slovenská republika  
vilhanova@tuzvo.sk, langova@tuzvo.sk  
<https://kndv.tuzvo.sk/sk>



# Acoustics.sk

Pracovisko fyzikálnej a hudobnej akustiky DF TU vo Zvolene, Slovensko

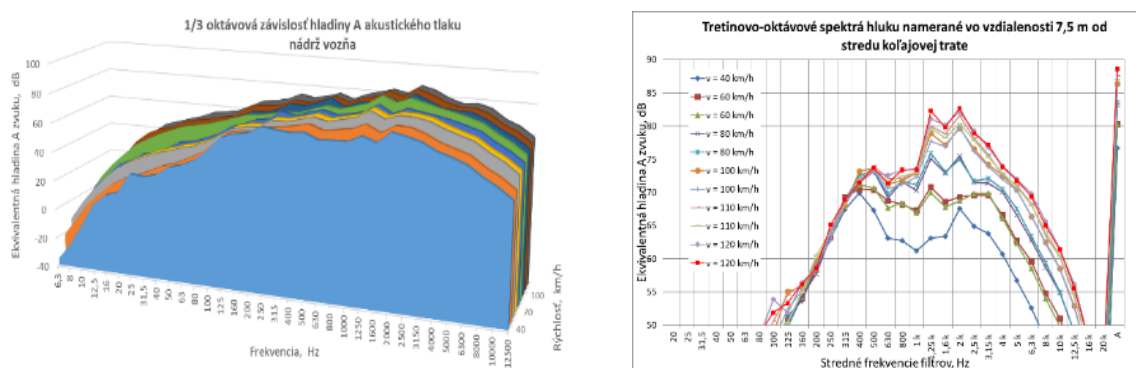


# MOŽNOSTI ZNIŽOVANIA PRENOSU ŠTRUKTÚRNEHO HLUKU PODVOZKU ŽELEZNIČNÉHO VOZŇA

Stanislav Žiaran, Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš

## 1 Úvod

Akustické vlnenie (zvuk, hluk) má v prevažnej miere pôvod v mechanickom kmitaní komponentov tuhého pružného prostredia, či už ide o komponenty strojových sústav ako sú napríklad podvozky železničných vozňov alebo hudobné strunové nástroje. Hluk generovaný mechanickým kmitaním podvozku vozňa je spravidla rozložený v nižšom (hladina Z) a strednom frekvenčnom pásme (obr. 1). Železničné vozne patria k najhlučnejším vozidlám dopravného prúdu, ktorých generovanie hluku závisí aj od uloženia koľajovej trate. Koľajové vozidlá generujú aj nadmerné amplitúdy nízko-frekvenčného kmitania šíriaceho sa do relatívne veľkej vzdialenosti, a to v závislosti od podložia (pozri obr. 4). Intenzita takéhoto kmitania ohrozuje zdravie a pohodlie človeka a životnosť stavebných konštrukcií [1, 13, 15, 16].



**Obrázok 1.** Tretinovo-oktávová analýza hladiny A hluku cisternového vozňa vo vzdialenosti 2,1 m s meraním v priestore dna cisterny (vľavo) a na stacionárnom stanovišti vo vzdialenosti 7,5 m (vpravo) v závislosti od rýchlosti.

S uplatňovaním európskych smerníc do praxe veľmi úzko súvisí aj kvalita výroby a s tým súvisiaca bezpečnosť prevádzky, údržba strojov, strojových zariadení, či už mobilných alebo stacionárnych s cieľom redukovať dynamické zaťaženie (kmitanie a hluk) nielen počas ich prevádzky, ale už pri ich návrhu, výrobe a montáži. Ich kvalita a životnosť sa zvyšuje, ak sa znižuje ich nežiaduce dynamické zaťaženie najmä od vlastných zdrojov kmitania a hluku. Znižovanie dynamického zaťaženia podvozku vozňa a jeho komponentov sa vzhľadom na okolité prostredie a človeka prejavuje zníženými imisiami a tým aj emisiami hluku a mechanického kmitania, teda zlepšovaním pracovného a životného prostredia [2, 3, 4, 5, 7]. V danom prípade ide o možnosti redukcie vibroakustickej energie podvozku cisternového a násypného vozňa, ktorých kmitanie a hluk sa meral na skúšobnom okruhu VUZ Velím (Obr. 2) [2, 3, 4, 5]. Prezentovanú metodiku sledujúcu znižovanie kmitania a hluku však možno aplikovať na rôzne typy podvozkov železničných vozňov.

Pre ciele hodnotenia hluku v akusticky chránenom prostredí sa nevyžaduje podrobný opis mechanizmu generovania hluku, ale dôležité sú tieto vlastnosti zvuku: intenzita, spektrálne rozloženie, impulznosť, rázovosť, prerušovanosť, premenlivosť, tónové zložky, drsnosť, ostrosť, trvanie, čas pôsobenia (akustická citlivosť na vykonávanú prácu a relaxáciu). Väčšinu z týchto vlastností zvuku obsahuje hluk železničných vozňov.





Obrázok 2. Koľajové vozidlá, ktoré boli predmetom meraní na skúšobnom okruhu vo VUZ Velím.

## 2 Ciele a vibro-akustické informácie k znižovaniu hluku podvozku

### 2.1 Ciele

Ciele v tomto článku sú zamerané na oblasť možnosti zníženia prenosu vibro-akustickej energie (štruktúrneho hluku a kmitania) generovanej jazdným profilom kolesa dvojkolesia koľajového vozidla, a to vibro-akustickými úpravami dvojkolesia a podvozku tohto vozidla s využitím kontaktných prikrýtok antivibračných vrstiev [12], materiálov s vysokým prenosovým útlmom [6], tlmiacimi vložkami [12], tlmičov v kolesách, konštrukčnými diskontinuitami na podvozku, antivibračnými nátermi. Zníženie dynamického zaťaženia mechanických sústav a ich častí sa vzhľadom na okolité prostredie a človeka prejaví zníženými imisiami a emisiami hluku a mechanického kmitania, teda zlepšovaním pracovného a životného prostredia, čo je aj požiadavka viacerých smerníc EÚ (2002/49/ES, 2002/44/ES, 2003/10/ES, 2001/16/ES) a zodpovedajúcich zákonov SR (napr. zákony NR SR 355/2007 Z.z a 312/2016 Z.z.).

### 2.2 Vibro-akustické informácie k znižovaniu hluku podvozku

Článok vychádza z už zrealizovaných projektov Strojníckou fakultou STU v Bratislave, a to z EP „Nová generácia nákladných železničných vozidiel“ v spolupráci s TATRAVAGÓNKU Poprad [2-4] a projektu „Dynamické zaťaženie čerpadiel HYDAC BIERI za pohybu vozňa“ pre firmu HYDAC Ltd. INTERNATIONAL Švajčiarsko a jej sesterskú firmu HYDAC s.r.o. Martin [5]. V prvom projekte jedným z hlavných cieľov bolo zníženie emisií hluku telesa cisterny prototypu koľajového vozňa a v druhom projekte bol cieľ analyzovať dynamické zaťaženie radiálneho piestového čerpadla pevne pripevneného na ložiskovú skriňu dvojkolesia podvozku výsypného vozňa pri definovaných rýchlostiach. Vykonali sa štyri nezávislé merania za pohybu železničných vozňov na skúšobnom okruhu koľajových vozidiel vo VUZ Velím v Česku. Počas meraní zrýchlenia kmitania a hluku priamo na koľajových vozňoch za pohybu, pri rýchlostiach od 40 km/h do 120 km/h, sa získalo veľa dôležitých informácií o prenose vibro-akustickej energie od primárneho zdroja, a to kontaktu jazdného profilu kolesa s koľajnicou, do telesa cisterny, resp. radiálneho piestového čerpadla. Namerané hodnoty a frekvenčné rozloženie zrýchlenia kmitania sa dosiaľ využili na redukciiu kmitania telesa cisterny a posúdenie dynamického zaťaženia radiálneho piestového čerpadla od kinematického budenia za pohybu. Meranie prenosu vibro-akustickej energie sa súčasne vykonalo aj vo vytýpaných

meracích miestach na podvozkoch železničných vozňov, a to na vstupe a výstupe primárneho vypruženia, na ložiskovej skrini, na krajnom pozdĺžniku a priečniku a v blízkosti guľového čapu a klznice (obr. 3) [4, 5, 14]. Získané a overené výsledky merania zrýchlenia kmitania a hluku za pohybu naznačujú reálne možnosti znižovania prenosu hluku podvozku železničného vozňa, keďže z doterajších meraní a výskumov vyplynulo, že dominujúci zdroj hluku je práve dvojkolesie s podvozkom koľajového vozidla a najväčšie dynamické zaťaženie je v mieste pripevnenia radiálneho piestového čerpadla, a to na ložiskovej skrini dvojkolesia.



**Obrázok 3.** Podvozok s dvojkolesím nákladných vozňov vyrábaný v Tatravagonke a podvozok výspyného vozňa s pripevneným radiálnym piestovým čerpadlom na podvozku nemeckej výroby.

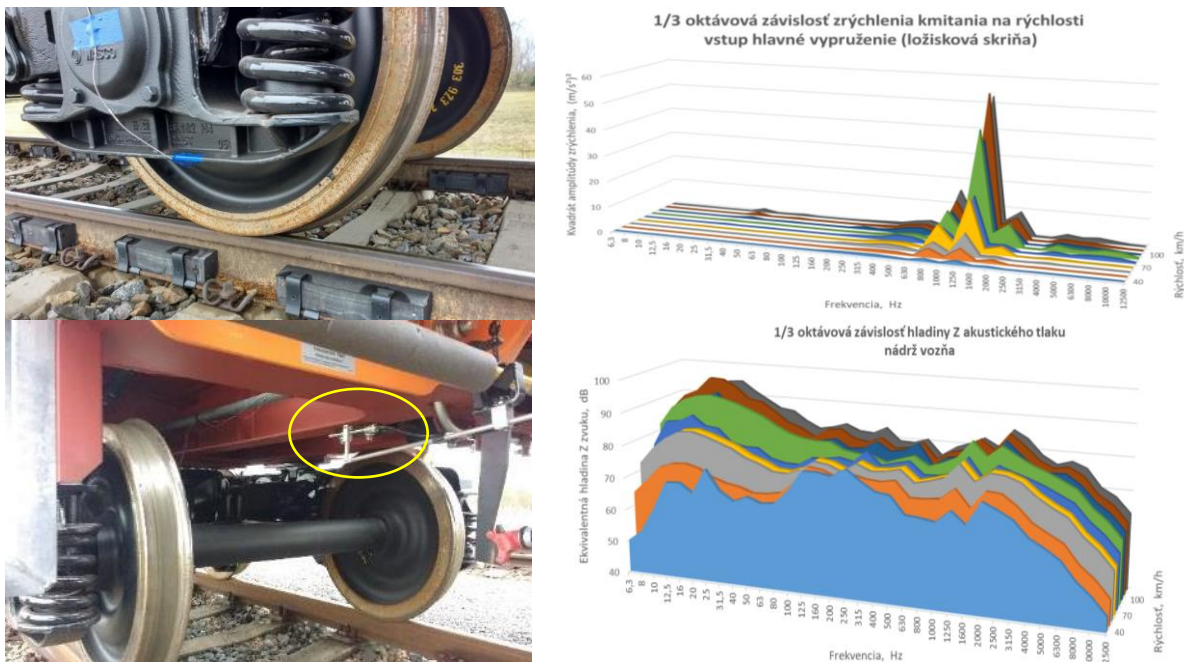
V súčasnosti musia koľajové vozidlá spĺňať limity stanovené v TSI (Technické špecifikácie pre interoperabilitu) Noise. Základom je Nariadenie komisie (EÚ) č.1304/2014. Dnes je limitná hodnota hladiny A 83 dB v TSI nastavená ako normovaná hodnota zahrňujúca do výpočtu aj vplyv vzdialeností a počet náprav vozňa. Očakávania v rámci Európskej únie z pohľadu znižovania hluku sú enormné, pohybujúce sa na maximálnej hladine A hluku 75 dB tak, že len použitím existujúcich riešení nebude možné tieto očakávané limity naplniť a tento článok naznačuje cesty ako tieto ciele naplniť.

### 3 Metodika postupov znižovania kmitania a hluku vozňov

#### 3.1 Metodika

Aby sa mohlo pristúpiť k zníženiu vibroakustickej energie koľajových vozidiel je vo všeobecnosti žiaduce analyzovať frekvenčné-amplitúdové-rýchlostné zaťaženie jednotlivých komponentov týchto strojových sústav od primárneho zdroja kinematického budenia, ktorým pre koľajové vozidlá je nie ideálny jazdný profil kolesa a koľajnice (obr. 4). Pre koľajové vozidlá je nevyhnutné sústrediť sa na redukciu prenosu mohutného dynamického zaťaženia, teda navrhnuť vibro-izolačné úpravy vedúce k zníženiu vibro-akustickej energie (štruktúrneho hluku) od primárneho zdroja na vstup do nadstavby koľajového vozidla cez jednotlivé hlavné bloky podvozku vozidla, a to cez primárne vypruženie s ložiskovou skriňou, rázsochu, krajný pozdĺžnik a priečnik, klznice, otočný guľový čap a brzdňú sústavu. Získané výsledky z meraní zrýchlenia kmitania brzdnej sústavy v uvedených projektoch potvrdili, že pri nedostatočnej vibro-izolácii tejto sústavy dochádza ku generovaniu výrazného hluku, ktorý zvyšuje výslednú hladinu A akustického tlaku podvozku [1, 12].

Zvýšenie hodnoty prenosového útlmu v bloku vypruženia ložiskovej skrine a rázsochy sa dosiahne v aplikácii materiálov s vyšším stratovým faktorom (prenosovým útlmom) a rozdielnou mechanickou impedanciou v kontaktných plochách medzi ložiskovou skriňou a rázsochou [6]. Zvýšenie hodnoty prenosového útlmu v oblasti guľového čapu sa dosiahne v odstránení vibro-akustických mostov, v aplikácii materiálov s vyšším stratovým faktorom a rozdielnou mechanickou impedanciou v kontaktných plochách medzi priečnikom rámu podvozku s guľovým čapom a kostrou vozňa [4, 12].

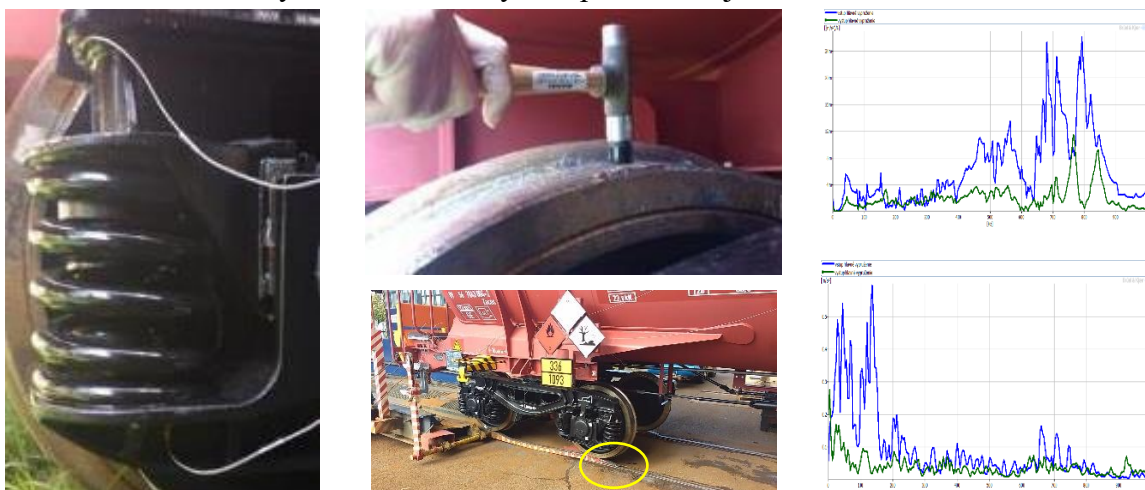


**Obrázok 4.** Výsledky merania reálnych hodnôt kmitania a hluku v priestore podvozku pri rôznych rýchlostiach vyjadrené frekvenčným-amplitúdovým-rýchlostným (3D) diagramom.

Kolesá dvojkolesia koľajových vozidiel a konštrukcia ich uloženia (podvozok) vzhľadom na nastavbu koľajových vozidiel sú v prevažnej miere z kovových komponentov, ktoré sú veľmi dobrým vodičom vibro-akustickej energie od zdroja (kontakt jazdného profilu kolesa s koľajnicou, kmitanie komponent brzdnej sústavy) až po nastavbu vozňa, vrátane nadstavby. V prípade, že nastavba je z kovového materiálu, táto energia sa prenáša aj na kovové teleso nadstavby, čím sa zvyšuje plocha vyžarovania zvukovej energie do okolitého prostredia, ktorá je najvýraznejšia pri zhode vlastných frekvencií vlastných tvarov kmitania nadstavby s budiacimi frekvenciami. Teda pre jednotlivé komponenty vozňa, od kolesa až na samotnú nastavbu, sú charakteristické vlastné frekvencie, ktoré pri zhode s budiacou frekvenčnou zložkou spôsobujú rezonanciu komponentu, a tým aj zvýšenie imisii hluku vyžarovaného do okolitého priestoru. Redukcia vibroakustickej energie generovaná valením jazdného profilu kolesa po koľajnici prenášaná do konštrukcie podvozku a nadstavby, vyžarovaná do priestoru ako nežiaduci hluk, si vyžaduje teoretickú, numerickú a experimentálnu analýzu generovania, prenosu a vyžarovania tejto energie do okolitého priestoru [14]. K efektívnemu riešeniu redukcie prenosu štruktúrneho hluku podvozkom je potrebné vykonať:

- konštrukčnú a materiálovú analýzu používaných podvozkov vrátane dvojkolesia;
- teoretickú analýzu generovania a prenosu mechanického kmitania (štruktúrneho hluku) konštrukciou podvozku koľajového vozidla a jeho vyžarovanie formou akustického vlnenia (hluku) do okolitého priestoru;
- návrh, príprava a realizácia experimentálneho skúšobného zariadenia na meranie prenosového útlmu a dynamických vlastností; vytypovanie vhodných konštrukčných materiálov s vysokým prenosovým útlmom a experimentálne overenie ich prenosového útlmu [6];
- z už nameraných výsledkov merania zrýchlenia kmitania a hluku priamo na vozňoch za pohybu vyhodnotiť frekvenčnú a modálnu analýzu jednotlivých komponentov s cieľom zistenia vlastných frekvencií vlastných tvarov kmitania [11]; analyzovať rázové namáhanie podvozku, generovanie a prenos nízkofrekvenčného kmitania [8, 9, 10];

- z hľadiska dynamiky modelovať bloky a komponenty podvozku koľajového vozidla, porovnať zhodu vlastných frekvencií komponentov s výsledkami experimentálnej modálnej analýzy s cieľom verifikácie matematického modelu [2, 4, 11]; následne pristúpiť k redukcii vibroakustickej energie preladením sústavy vhodnou úpravou vibro-izolačnými a pohltivými materiálmi a zmenou mechanickej impedancie;
- v mieste výroby a montáže vykonať sériu referenčných meraní na štatisticky významnej vzorke podvozkov;
- na mieste uloženia podvozku (vo výrobnom závode) vykonávať meranie kmitania vibroakusticky upravených komponentov podvozku vrátane generovaného hluku rázovým úderom a gravitačným rázom (obr. 5) s cieľom zistenia prenosového útlmu a porovnania získaných výsledkov kmitania a hluku s referenčnými výsledkami a výsledkami získanými z predchádzajúcich meraní realizovanými s inými vibro-izolačnými úpravami;
- z realizovaných vibroakustických meraní pomocou FFT analýzy, teda z frekvenčných spektier, stanoviť zmenu dominujúcich frekvencií, ktorých amplitúdy je možné redukovať a takto redukovať aj emisie hluku a rázové dynamické namáhanie pripojených strojných konštrukcií;
- na základe teoretických, numerických a experimentálnych výsledkov navrhnuť efektívne vibroakustické úpravy kolies a komponentov podvozku s cieľom maximálnej redukcie prenosu štruktúrneho hluku a dynamického zaťaženia pripojených strojných konštrukcií, ako sú napríklad čerpadlá;
- prenosový útlm väzkopružných, kompozitných či iných tlmiacich komponentov, navrhovaných k redukcii vibroakustickej energie (štruktúrneho hluku) merať a overovať experimentálne [12, 14];
- s využitím generátora kmitania za pokoja zmerať účinnosť navrhnutých vibroakustických opatrení na mieste výroby a montáže podvozkov;
- s využitím generátora kmitania, vo výrobnom a montážnom závode, vykonať meranie kmitania železničného vozňa s upraveným podvozkom vrátane generovaného hluku rázom s cieľom zistenia prenosového útlmu na jeho nadstavbu a porovnanie získaných výsledkov kmitania a hluku s výsledkami získanými z predchádzajúcich meraní.



Obrázok 5. Modálna analýza podvozku s využitím modálneho kladivka a gravitačného rázu.

Účinnosť navrhnutých opatrení možno zmerať aj použitím prenosného generátora kmitania v mieste montáže podvozkov. Z vibroakustických meraní na skúšobnej dráhe vo VUZ Velím sa od kinematického budenia podvozku cisternového vozňa pre rozsah rýchlostí od 120 km/h

do 40 km/h získal reálny signál a tento signál možno využiť aj v laboratórnych podmienkach. V stabilnom aj prenosnom generátore kmitania možno teda využiť reálny nasnímaný signál.

Frekvenčný-amplitúdový-rýchlostný 3D diagram umožní optimálne navrhnuť charakteristické parametre originálnych antivibračných konštrukčných prvkov a tlmičov rázovej energie generovanej kinematickým buđením. Do antivibračných opatrení patrí aj návrh a experimentálne overenie nových konštrukčných materiálov s vysokým prenosovým útlmom.

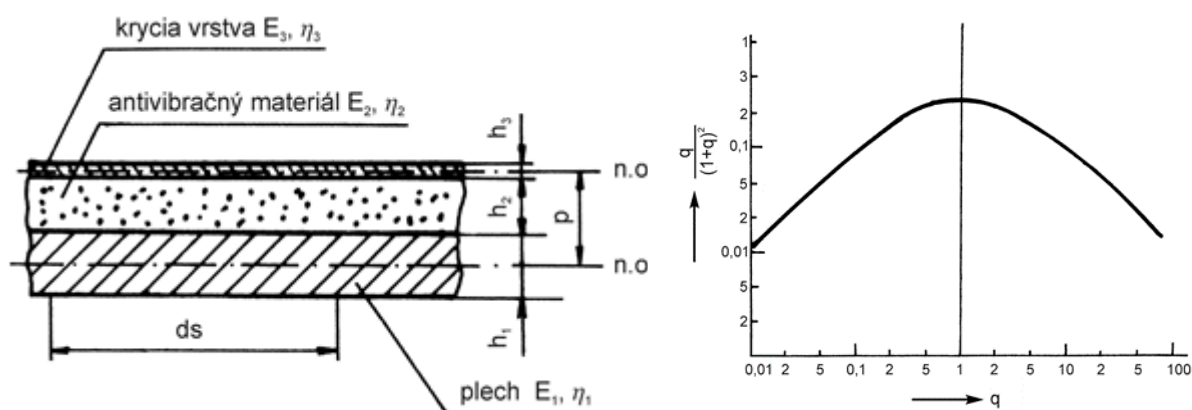
### 3.2 Využitie prikrytých antivibračných konštrukcií

V praxi sa často stretávame s konštrukciami vytvorených z hrubých plechov, ktoré sú typické aj pre podvozky vozňov. V takomto prípade existuje účinná úprava dvoma prídavnými vrstvami pevne spojenými so základným plechom. Takto vznikne vrstvená konštrukcia, ktorá pri ohybovom kmitaní vykazuje podstatne vyššie vnútorné tlmenie ako má samotný plech [12].

Praktické vyhotovenie takejto trojvrstvej konštrukcie je na obrázku 6, kde sa na základný konštrukčný prvok nanáša tlmiaca vrstva, ktorá sa prekryje dostatočne tuhou krycou vrstvou. Prikryté antivibračné vrstvy sú zložené z dvoch vonkajších vrstiev zvyčajne s vysokou ohybovou tuhosťou. Vonkajšie vrstvy sú oddelené tzv. mäkkým jadrom, ktoré má zanedbateľnú ohybovú tuhosť.

Sendvičové konštrukcie s mäkkým jadrom sa výrazne uplatnili vo vibro-izolačnej technike a pri znižovaní hlučnosti. Ukázalo sa, že útlm vibroakustickej energie či energie kmitania vo vrstvených konštrukciách (materiáloch) možno maximalizovať pre vyžadovanú frekvenciu dynamického pretvárania pomocou vhodnej konfigurácie vrstiev. Mechanizmus rozptyľovania energie v sendvičových sústavách je principiálne iný ako pri sústavách s voľnou tlmiacou vrstvou [12]. V trojvrstvej sústave premena vibroakustickej energie na tepelnú nastáva v dôsledku šmykového pretvorenia mäkkej vrstvy a veľkosť tejto deformácie v priebehu jednej periódy je priamou mierou mechanických strát v sústave. Z tohto hľadiska je sendvičová konštrukcia dobre navrhnutá vtedy, ak mäkké jadro umožňuje efektívne šmykové pretvorenie v porovnaní s vonkajšími vrstvami.

Technický prínos je treba vidieť v optimálnom návrhu prikrytej antivibračnej vrstvy (sendvičovej konštrukcie) v mieste dvojkolesia a podvozku, aby prenosový útlm dosiahol maximálnych hodnôt, pričom navýšenie hmotnosti vozňa je zanedbateľné.



Obrázok 6. Prikryté antivibračné konštrukcie s priebehom frekvenčnej závislosti tlmenia.

## 4 Záver

Záverom treba konštatovať, že zníženie prenosu vibro-akustickej energie (štruktúrneho hluku a kmitania) generovanej jazdným profilom kolesa dvojkolesia koľajového vozidla vibro-

akustickými úpravami dvojkolesia a podvozku tohto vozidla s využitím kontaktných prikrytých antivibračných vrstiev, materiálov s vysokým prenosovým útlmom, tlmiacimi vložkami napríklad aplikovaním do priečnika, konštrukčnými diskontinuitami na podvozku, antivibračnými nátermi je reálne a finančne nenáročné. Zníženie dynamického zaťaženia železničných vozňov vedie k zvýšeniu ich životnosti, k zníženiu hluku a kmitania, teda zlepšeniu pracovného a životného prostredia. Treba mať na zreteli, že každé zníženie hluku vedie k zníženiu výšky nákladov na riešenie zdravotných problémov človeka vibroakustickou energiou, ktoré sú v súčasnosti na druhom mieste.

Vibroakustickými úpravami sa zníži aj nežiadúce dynamické zaťaženie čerpadiel pripevnených na ložiskovej skrini. Z analýzy kmitania podvozku vyplynulo, že pri zaradení čerpadla do triedy 1 pre nameranú hodnotu mohutnosti kmitania 12,8 mm/s sa priraduje pásmo D, teda hodnoty kmitania v tomto pásme sa bežne berú do úvahy za neprípustné zapríčínujúce poškodenie stroja, teda dynamické zaťaženie môže v relatívne krátkom čase zapríčiniť poruchu čerpadla [12].

### Acknowledgements

The research presented in this paper is an outcome of the project No. APVV-19-0538 “Progressive hybrid high-speed spinning actuator” funded by the Slovak Research and Development Agency, 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 program Research and innovation financed from the European Regional Development Fund.

### Literatúra

- [1] Thompson, D.: *Railway-noise and vibration*. Printed and bound in Great Britain (2009).
- [2] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Mačák, L.: *Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 1.: Meranie vibroakustických vlastností cisternového vozňa*. Výskumná správa SjF STU v Bratislave, Trnava 2019, str. 73.
- [3] Žiaran, S., Chlebo, O., Musil, M., Úradníček, J., Mačák, L.: *Nová generácia nákladných železničných vozidiel. Časť 2.: Frekvenčná analýza zvuku podvozku cisternového vozňa*. Výskumná správa SjF STU v Bratislave, Trnava 2020, str. 31.
- [4] Žiaran, S., Chlebo, O., Petrák, P., Úradníček, J., Šooš, L., Mačák, L., Búry M.: *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.
- [5] Žiaran, S., Chlebo, O.: *Dynamické zaťaženie čerpadiel Hydac Bieri pri pohybe vozňa*. Výskumná správa, SjF STU v Bratislave (2021), str. 35.
- [6] Žiaran, S., Chlebo, O., Pokusová, M., Šooš, L., Úradníček, J., Túma, J., Mačák, L.: *Use of vibro-isolation and non-conventional materials for reducing noise of railway wagons*. ICSV27, Prague 2021.
- [7] Žiaran, S., Chlebo O., Šooš L.: *Influence of kinematic excitation on the dynamic load of rotary machines bearings mounted on a rail vehicle*. Vehicle and Automotive Engineering 4 Miskolc 2022, Springer, str. 835.
- [8] Žiaran, S.-Chlebo, O.-Čekan, M.: *Effects of the mounting of the 3D seismic exciter on the working environment and surrounding structures*. 25. kongres ICSV, Hirošima 2018.

- [9] Žiaran, S.-Chlebo, O.: *Effects of isolating machine vibrations on the transmission of structure-borne and air-borne sound energy*. In Proceedings of the 46th International congress and exposition on Noise Control Engineering. Hong Kong, pp. 6335-6344.
- [10] Žiaran, S., Cekan, M., Chlebo, O. and Musil, M.: *Analysis of seismic response on the excitation of support structures*. Proceeding of the 43nd international congress and exposition InterNoise, Melbourne, Australia, 16-19 November, (2014).
- [11] Žiaran, S.: *Using frequency and modal analysis to attenuate low frequency waves*. The 43nd international congress and exposition on Noise Control Engineering, Melbourne, Australia, 16.-19.11. 2014. - [S.l.]: International Institute of Noise Control Engineering, 2014. - CD-ROM, [10] p. ISBN: 978-0-909882-04-4.
- [12] Žiaran, S.: *Kmitanie a akustika. Znižovanie hluku a kmitania v priemysle*. Vedecká monografia. Vydavateľstvo STU Bratislava 2006, str. 330. ISBN 80-227-2366-5.
- [13] Žiaran, S.: *Kmitanie a akustika. Ochrana človeka pred kmitaním a hlukom*. Monografia. Vyd. STU Bratislava 2008, str. 264, ISBN 80-227-2799-0.
- [14] Žiaran, S.: *Technická diagnostika*. Vedecká monografia. Nakladateľstvo STU Bratislava 2013, str. 332, ISBN 978-80-227-4051-7.
- [15] Žiaran, S.: *Nízkofrekvenčný hluk a kmitanie*. Vedecká monografia. Nakladateľstvo STU Bratislava 2016, str. 316, ISBN 978-80-227-4536-9.
- [16] ISO 4866 *Mechanické kmitanie a otrasy. Kmitanie tuhých konštrukcií. Pokyny na meranie kmitania a hodnotenie jeho vplyvov na konštrukcie*.

## Summary

### **Options for Reducing the Transmission of Structural Noise of Railway Wagon Bogie.**

Based on the vibroacoustic measurements of three types of railway wagons while moving at different speed from 40 km/h to 120 km/h using experimental modal analysis, the article presents a methodology for reducing the transmission of vibro-acoustic energy through the components of the wagon bogie generated by the driving profile of the two wheelset. It is recommended to use contact covered anti-vibration layers, materials with high transmission loss, damping inserts, structural discontinuities on the bogie and anti-vibration layers to reduce the transmission of structural noise through the bogie of the rail vehicle.

## Keywords

Wagon; bogie; reduction; vibration; noise.

## Contact Address

Stanislav Žiaran (correspondent author), Ondrej Chlebo, Ľubomír Šooš  
Institute of Production Systems, Environmental Engineering and Quality Management  
Faculty of Mechanical Engineering Slovak University of Technology in Bratislava,  
Nám. slobody 17, 81231 Bratislava, Slovak Republic.  
stanislav.ziaran@stuba.sk; ondrej.chlebo@stuba.sk; lubomir.soos@stuba.sk



**NOVÉ  
TRENDY  
AKUSTICKÉHO  
SPEKTRA**  
New Trends of Acoustic Spectrum

---

Vedecký recenzovaný zborník  
Martin Čulík – Anna Danihelová  
2023

[www.acoustics.sk](http://www.acoustics.sk)

ISBN 978-80-228-3374-5

