

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ČESKÁ AKUSTICKÁ SPOLEČNOST

109. AKUSTICKÝ SEMINÁŘ

25.–27. května 2026

Vílanec



Redakce sborníku:

Marek Brothánek, Radka Svobodová

Sborník 109. akustického semináře

Redakce sborníku: Ing. Marek Brothánek, Ph.D.
Mgr. Radka Svobodová

Vytištěno pro potřeby 109. akustického semináře,
konaného ve dnech 25.–27. května 2026 ve Vílanci.

Příspěvky otištěné ve sborníku nebyly redakčně upravovány. Redakce neodpovídá za obsah jednotlivých příspěvků a nezasahuje do jejich znění, neprovádí jazykové ani stylistické úpravy.

Copyright © České vysoké učení technické v Praze, 2026

ISBN 978-80-01-07552-4

Vydalo: České vysoké učení technické v Praze

Zpracovala: Fakulta elektrotechnická

Kontaktní adresa: Ondřej Jiříček, Technická 2, 166 27 Praha 6

 +420 22 435 2310

Náklad 200 výtisků, počet stran 28, pořadí vydání 1.

Tisk: REPRO FETTERLE s. r. o., náměstí Na Santince 2440/5, 160 00 Praha 6

Obsah

Aneta Furmanová, Petr Honzík, Viktor Hruška Analytická aproximace vlastních frekvencí vetknutých destiček pro MEMS měniče	5
Petr Honzík Kondenzátorový mikrofon s dělenou pevnou elektrodou	11
Dušan Jargaš Eliminace rizik při realizaci vibroizolačních opatření	17
Jan Stěnička Vibroizolace strukturálního hluku se 100% zárukou	23



Analytická aproximace vlastních frekvencí vetknutých destiček pro MEMS měniče

Aneta Furmanová, Petr Honzík, Viktor Hruška

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,
Technická 2, 166 27 Praha 6

furmaane@fel.cvut.cz

Abstract Most modern Micro-Electromechanical Systems (MEMS) microphones operate on the principle of electrostatic transduction, usually featuring a movable electrode paired with a perforated backplate. This study investigates the structural dynamics of the electrode itself. Our main goal is to derive analytical approximations for the natural frequencies of square plates with clamped boundaries, covering both solid and perforated configurations.

1 ÚVOD

Většina moderních MEMS mikrofonů využívá principy elektrostatických měničů: typickými znaky jsou pohyblivá elektroda a perforovaná zadní deska v jednoduché nebo dvojité konfiguraci. Šimonová et al. [1] představili teoretický model vazby mezi akustickým polem a kmitáním čtvercových perforovaných pohyblivých elektrod vetknutých ve všech hranách. S přihlédnutím k této aplikaci se tato práce zaměřuje na nalezení analytické aproximace vlastních frekvencí ohybových vibrací pohyblivých elektrod.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

Analytické vzorce pro vlastní frekvence lze snadno odvodit pro membrány a prostě podepřené destičky. Vlastní frekvence pro mód (m,n) obdélníkové membrány upevněné po všech okrajích je

$$f_{mn} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}, \quad (1)$$

kde a, b jsou strany membrány a c je rychlost vlnění [2]. Ohybové módy desky se všemi vetknutými hranami jsou ovšem zcela jiný případ než napnutá membrána: zatímco napětí membrány T je dáno vnějšími silami a jejím počátečním

předpětím, vratná síla vetknuté destičky je určována především její ohybovou tuhostí D .

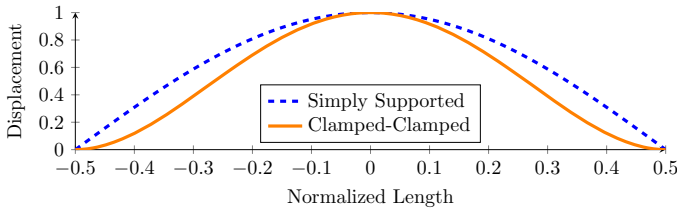
Vzorec pro vlastní frekvence destiček s prostým podepřením (tzn. bez vetknutí) se získá jako přesný analytický výsledek pohybových rovnic:

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad (2)$$

kde $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$ je ohybová tuhost, E je Youngův modul pružnosti, ν Poissonův koeficient a h tloušťka destičky.

U destiček se všemi hranami vetknutými musí být splněna další okrajová podmínka: kromě požadavku na nulovou výchylku musí být také nulová derivace výchylky (viz Obr. 1). S těmito omezeními je náročné najít přesná analytická řešení, která splňují pohybovou rovnici destičky a všechny okrajové podmínky [3].

Získání vlastních frekvencí pro vetknuté destičky proto zůstává na numerických simulacích nebo přibližných řešeních, jako je například Rayleigh-Ritzova metoda (viz [4]) nebo numerická řešení problému vlastních čísel (viz např. [5]). Cílem této práce je poskytnout analytickou aproximaci pro plné a perforované čtvercové destičky vetknuté ve všech hranách na základě fyzikálně podloženého strojového učení.



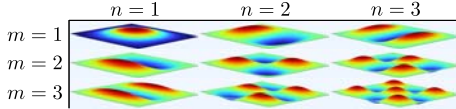
Obrázek 1: Výchylka v 1D, prostě podepřené (simply supported) vs. vetknuté hrany (clamped).

3 DESTIČKY BEZ PERFORACÍ

K nalezení aproximace vlastní frekvence neperforovaných vetknutých čtvercových destiček byla použita symbolická regrese. Pro implementaci použita open-source knihovna PySR ([6]).

Každý případ je definován Youngovým modulem E , Poissonovým poměrem ν , hustotou materiálu ρ a geometrickými parametry: stranou desky $2a$ a tloušťkou h . Pro zjednodušení uvažujeme pouze jeden materiál, a to křemík.

Dataset byl vytvořen pomocí modulu Solid Mechanics v programu COM-SOL Multiphysics 6.4., ve kterém je bez zanedbání řešena celá tenzorová pohybová rovnice pevného kontinua. Hodnoty materiálových vlastností byly následující: Youngův modul $E = 170$ GPa, Poissonův koeficient $\nu = 0,28$ a hustota materiálu $\rho = 2\,329$ kg.m⁻³. Destičky byly vygenerovány v následujících rozsazích geometrických parametrů: $a \in \{0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5\}$ mm, $h \in \{4; 7; 10; 13; 16\}$ μm. Celkem bylo vygenerováno 25 kombinací a, h s módy $m, n = 1, 2, 3$, viz Obr. 2.



Obrázek 2: Vlastní módy neperforované čtvercové destičky.

Při nastavení procesu symbolické regrese můžeme využít předchozích fyzikálních znalostí problematiky. Na základě vzorců pro vlastní frekvenci membrán (rovnice (1)) a prostě podepřených destiček (rovnice (2)) lze v hledaném výrazu očekávat následující operátory: +, -, *, /, ^ . Teoreticky bychom mohli zahrnout všechny možné operátory (např. trigonometrické funkce), ale tím by se vyhledávací prostor mohl exponenciálně zvětšit. Dále vzhledem k čtvercové geometrii očekáváme symetrii v m, n , a proto byla přidána dodatečná penalizace pro výrazy, které v m, n symetrické nejsou.

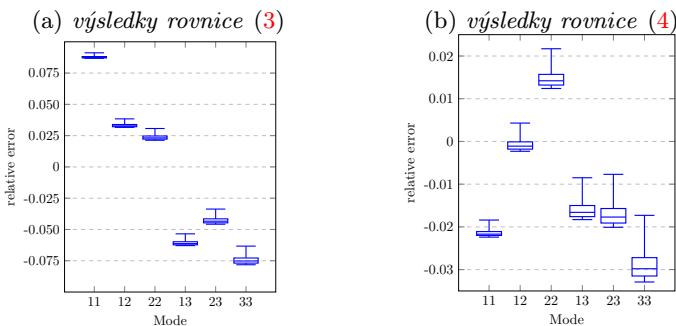
3.1 Výsledky

Výstupem symbolické regrese je list možných výsledků řazený od úsporně formulovaných, ale méně přesných modelů až po vysoce přesné, avšak těžko uchopitelné modely. Výběr optimálního vzorce z tohoto listu je kompromisem mezi přesností a interpretovatelností. Proto jsme přijali rozhodnutí poskytnout dvě aproximace vlastních frekvencí.

První výsledek se podobá vzorci pro prostě podepřené destičky (rovnice (2)):

$$f_{mn} = 0,228 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(\frac{h}{a}\right) \sqrt{m+n} \sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{a^2}} . \quad (3)$$

Koeficient 0,228 v rovnici (3) byl získán metodou nejmenších čtverců. Relativní chyby viz Obr. 3a. Pro všechny uvažované módy je medián relativní chyby 4,69 %, první kvartil 3,29 % a třetí kvartil 7,52 %. Jedná se bohužel o vyšší chybu než šířky intervalů uvedené v práci Leissa [4] (tabulky 4.24–4.27), které jsou nižší než 3 %.



Obrázek 3: Relativní chyby při použití uvedených rovnic.

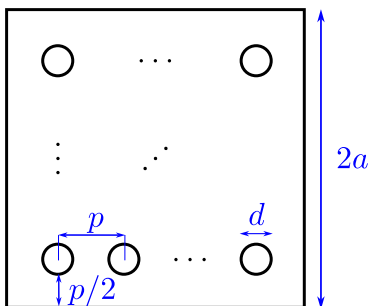
Druhý vzorec

$$f_{mn} = 0,0589 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(\frac{h}{a}\right) \sqrt{\frac{(m+n)^{5,6}}{(mn)^{1,16} a^2}} \quad (4)$$

dosahuje větší přesnosti: pro všechny uvažované módy činí medián relativní chyby 1,71 %, první kvartil 1,25 % a třetí kvartil 2,17 %.

4 PERFOROVANÉ DESTIČKY

Uvažujme nyní tu samou čtvercovou geometrii, a přidejme perforace: máme tedy čtvercovou perforovanou destičku o straně $2a$ s N čtvercovými otvory o straně d a rozteči p (viz Obr. 4). Počet otvorů je roven $N = 2a/p \times 2a/p$. Vlastní frekvence pro perforované destičky může být uvedena jako odchylka od případu bez perforací. K tomu byla použita normalizovaná vlastní frekvence, definovaná jako vlastní frekvence perforované desky dělená odpovídající vlastní frekvencí desky bez perforace.



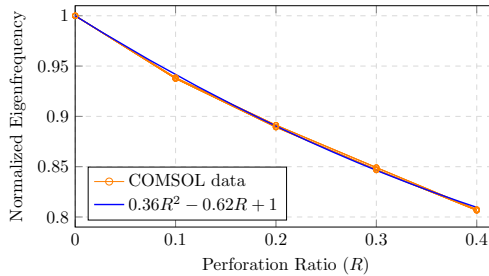
Obrázek 4: Schematický náčrt perforované destičky.

Perforace parametrizujeme pomocí poměru perforace $R = \frac{1}{4}\pi d^2/p^2$, což je poměr celkové plochy zabrané perforacemi vůči ploše destičky. Hodnoty R byly zvoleny jako $R \in \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$, průměr perforací se dopočítává z R jako $d^2 = \frac{1}{4}\pi R p^2$, kde rozteč je $p = 16 \mu\text{m}$.

V tomto případě nebylo nutné použít symbolickou regresi, protože se ukázalo, že postačí kvadratická aproximace:

$$f_{\text{norm}} = 0,36R^2 - 0,62R + 1, \quad (5)$$

s chybou menší než 0,3%. Numerická data a aproximace jsou znázorněny na obrázku 5.



Obrázek 5: Normalizované vlastní frekvence perforované čtvercové destičky, numerická data a polynomiální aproximace podle rovnice (5).

5 ZÁVĚR

Pro destičky s vetknutými hranami nejsou známa žádná exaktní analytická řešení, která by splňovala pohybové rovnice společně s okrajovými podmínkami a zároveň je bylo možné vyjádřit uzavřeným explicitním vzorcem. Cílem této práce bylo poskytnout analytické aproximace vlastních frekvencí neperforovaných a perforovaných čtvercových destiček. Pomocí symbolické regrese byly nalezeny dvě alternativní varianty pro destičky bez perforací. Predikce vlastních frekvencí perforovaných destiček byla nalezena jako korekce k vlastním frekvencím destiček bez perforací.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS25/136/OHK3/3T/13.

REFERENCE

- [1] ŠIMONOVÁ, K.; HONZÍK, P.: Modeling of MEMS Transducers with Perforated Moving Electrodes, In *Micromachines*, 2023, 14(5), 921.
- [2] GRAFF, Karl F.: Wave Motion in Elastic Solids, 1975.
- [3] XING, Y.; LI G.; YUAN Y.: A review of the analytical solution methods for the eigenvalue problems of rectangular plates, *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 221, 107171.
- [4] LEISSA, A. W.: Vibration of Plates, 1969.
- [5] ŠIMONOVÁ, K.; HONZÍK, P.; BRUNEAU, M.; GATIGNOL, P.: Modelling approach for MEMS transducers with rectangular clamped plate loaded by a thin fluid layer, In *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 473, 115246.
- [6] CRANMER, M.: Interpretable Machine Learning for Science with PySR and SymbolicRegression.jl, In *arXiv*, 2023.
- [7] JHUNG, M. J.; JEONG, K. H.: Free vibration analysis of perforated plate with square penetration pattern using equivalent material properties. In *Nuclear Engineering and Technology*. 2015, 47(4), 500–511.



Kondenzátorový mikrofon s dělenou pevnou elektrodou

Petr Honzík

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,
Technická 2, 166 27 Praha 6

honzikp@fel.cvut.cz

Abstract This paper investigates the directivity of an electrostatic condenser microphone with a circular membrane and a back-plate segmented into four parts. The operating principle is based on the non-axisymmetrical membrane displacement generated by an obliquely incident acoustic wave. By subtracting signals from opposite electrode segments, two bidirectional directional outputs perpendicular to each other can be obtained. A simplified analytical model of the membrane vibration and acoustic loading is briefly discussed and compared with measurements performed on an experimental microphone specimen in an anechoic chamber. The measured directional characteristics show good agreement with theoretical predictions in the main operating frequency range.

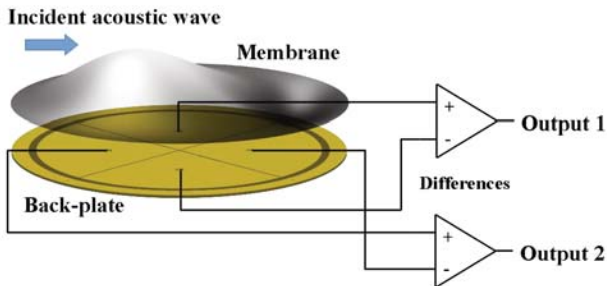
1 ÚVOD

Směrové mikrofony představují významnou oblast elektroakustiky již od počátků vývoje mikrofonní techniky [1]. Klasické konstrukce využívají kombinaci tlakové a gradientní složky nebo speciální akustické cesty vedoucí k zadní straně membrány [2]. V posledních letech se objevují také kompaktní MEMS směrové mikrofony a mikrofonní pole [3, 4, 5].

Tento příspěvek vychází z článku [6], kde byl detailně popsán analytický i numerický model kondenzátorového mikrofonu s dělenou pevnou elektrodou.

2 PRINCIP MIKROFONU

Studovaný mikrofon využívá kruhovou membránu a pevnou elektrodu rozdělenou do čtyř segmentů. Při dopadu rovinné akustické vlny vzniká osově nesymetrické rozložení výchylky membrány a průměrné výchylky nad jednotlivými segmenty se tak liší. Výstupní napětí z jednotlivých segmentů elektrody je úměrné průměrné výchylce. Rozdíl výstupních napětí na protějších segmentech elektrody (viz Obr. 1) vykazuje „osmičkovou“ směrovou charakteristiku.



Obrázek 1: Blokové schéma kondenzátorového mikrofonu s dělenou pevnou elektrodou.

3 TEORETICKÝ MODEL

Příchozí akustický tlak je uvažován ve tvaru rovinné vlny, v polárních souřadnicích (r, θ) jako

$$p_f(r, \theta) = p_{\text{inc}} e^{-jk_0 r \cos(\theta - \alpha)}, \quad (1)$$

kde p_{inc} je amplituda v Pa, α je úhel směru příchozí vlny a $k_0 = \omega/c_0$ je adiabatické vlnové číslo, ω je úhlová rychlost a c_0 adiabatická rychlost zvuku.

Pohyb kruhové membrány je popsán rovnicí pro výchylku $\xi(r, \theta)$ včetně okrajových podmínek

$$T \left(\partial_{rr}^2 + \frac{1}{r} \partial_r + \frac{1}{r^2} \partial_{\theta\theta}^2 + K^2 \right) \xi(r, \theta) = p_f(r, \theta) - p_b(r, \theta), \quad (2)$$

$$\xi(R_M, \theta) = 0, \quad \theta \in (0, 2\pi),$$

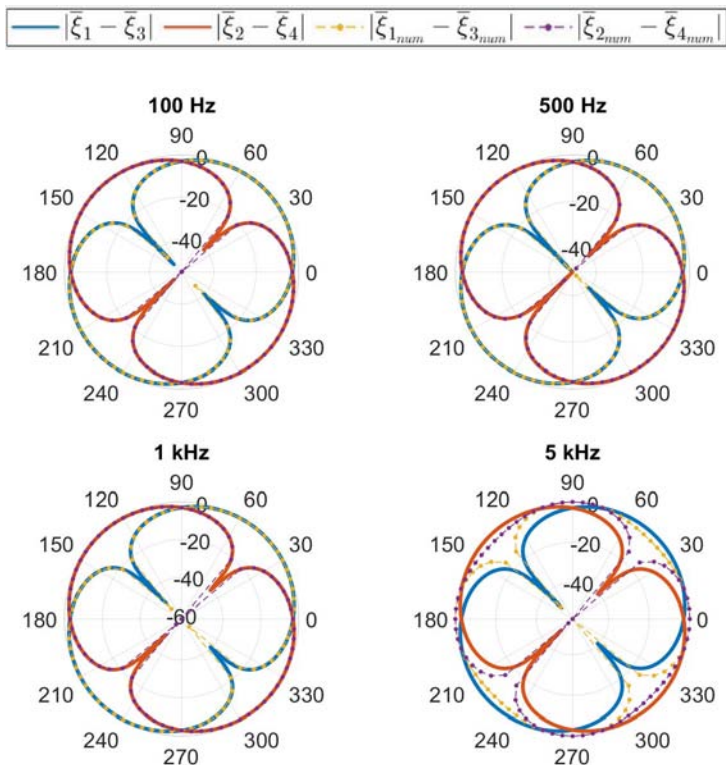
kde $K^2 = \omega^2 m_S / T$ je vlnové číslo na membráně, T je mechanické napětí a m_S plošná hustota membrány a $p_b(r, \theta)$ tlak ve vzduchové mezeře mezi membránou a pevnou elektrodou.

Řešení je hledáno ve tvaru rozvoje do vlastních funkcí kruhové membrány

$$\xi(r, \theta) = \sum_{mn\sigma} \xi_{mn}^{(\sigma)} \psi_{mn}^{(\sigma)}(r, \theta). \quad (3)$$

Konkrétní tvar vlastních funkcí $\psi_{mn}^{(\sigma)}(r, \theta)$ převzatých z [7] a způsob výpočtu koeficientů $\xi_{mn}^{(\sigma)}$ jsou detailně popsány v [6]. Tlak uvnitř mikrofonu může být považován za přibližně uniformní a řešen pomocí náhradních elektroakustických obvodů obdobně jako v [8, 9], nebo spočítán pomocí pokročilých analytických metod, které berou v úvahu vazbu mezi výchylkou membrány a neuniformním akustickým tlakem i pro vyšší módy membrány [7].

Na obr. 2 jsou uvedeny čistě teoretické směrové charakteristiky jednotlivých výstupů mikrofonu získané analytickým modelem pro oba výstupy mikrofonu (červená a modrá křivka) v porovnání s referenčním numerickým modelem (žlutá a fialová přerušovaná linka).

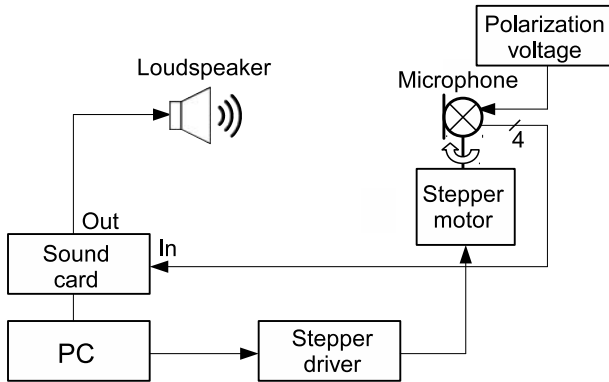


Obrázek 2: Teoretické směrové charakteristiky na obou výstupech mikrofonu.

4 EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Experimentální vzorek mikrofonu byl realizován s kruhovou vodivou membránou a pevnou elektrodou rozdělenou do čtyř segmentů. Výstupy jednotlivých segmentů byly vyvedeny samostatně, signály na těchto výstupech byly nezávisle zaznamenány a následně byly vytvořeny rozdílové výstupy. Membrána byla polarizována stejnosměrným napětím 162 V a výstupní signály byly digitalizovány pomocí externí zvukové karty a následně zpracovány v programu MATLAB.

Měření směrových charakteristik probíhalo v bezdrazové komoře. Mikrofon byl umístěn na otočný mechanismus umožňující změnu úhlu dopadu akustické vlny. Jako zdroj akustického signálu byl použit reproduktor umístěný ve větší vzdálenosti od mikrofonu tak, aby bylo možné aproximovat dopadající akustické pole rovinnou vlnou. Schematické znázornění měření je na obrázku 3.



Obrázek 3: Schéma měření směrových charakteristik mikrofonu v bezdrazové komoře.

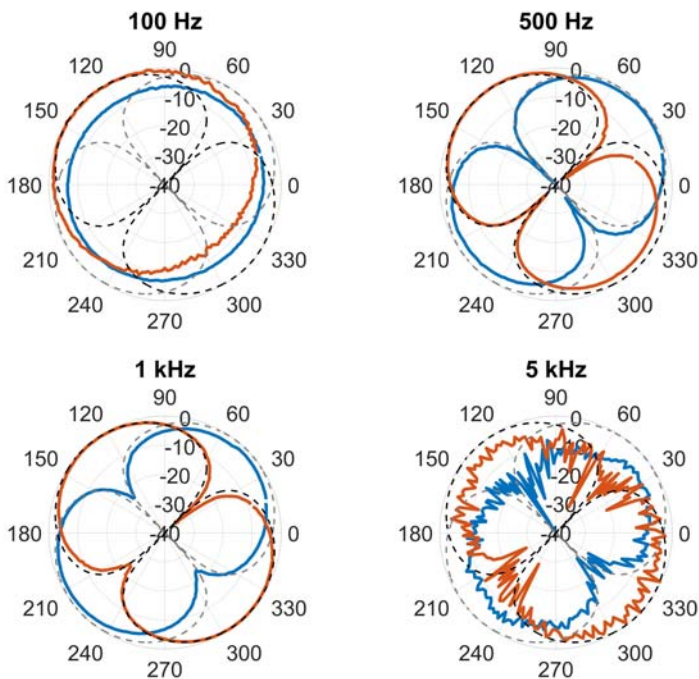
5 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Na obr. 4 jsou porovnány teoretické a experimentálně naměřené směrové charakteristiky pro několik frekvencí. V nízkofrekvenční oblasti jsou rozdíly mezi jednotlivými segmenty relativně malé, což vede k vyšší citlivosti výsledných rozdílových signálů na šum a drobné nepřesnosti experimentálního uspořádání. S rostoucí frekvencí se však osově nesymetrické složky kmitání membrány zvyrazňují a výsledné směrové charakteristiky vykazují očekávaný „osmičkový“ tvar.

Experimentální výsledky vykazují dobrou shodu s analytickým modelem zejména ve střední části přenášeného pásma. Odchytky pozorované při vyšších frekvencích mohou souviset s mechanickými nepřesnostmi realizovaného vzorku, tolerancemi segmentace pevné elektrody nebo zjednodušeními použitými v analytickém modelu.

6 ZÁVĚR

Príspevek popisuje koncept kondenzátorového mikrofonu s dělenou pevnou elektrodou umožňující realizaci „osmičkových“ směrových charakteristik pomocí jediné kruhové membrány. Byl uveden základní princip funkce, zjednodušený popis analytického modelu i experimentální uspořádání použité pro měření směrových charakteristik.



Obrázek 4: Porovnání teoretických a naměřených směrových charakteristik.

Experimentální výsledky potvrzují, že dělená pevná elektroda umožňuje realizovat směrové charakteristiky bez nutnosti použití dvojice samostatných membrán nebo složitých akustických kanálů. Dobrá shoda mezi teoretickými a experimentálními výsledky potvrzuje správnost použitého analytického modelu a naznačuje možnost využití této koncepce také pro jiné tvary směrových charakteristik.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem SGS26/086/OHK3/1T/13.

REFERENCE

- [1] J. Weinberger, H. F. Olson, F. Massa: “A Uni-Directional Ribbon Microphone”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 5, no. 2, pp. 139–147, 1933.
- [2] L. L. Beranek, V. T. Mellow: *Acoustics: Sound Fields and Transducers*, Elsevier, 2012.
- [3] S. Chowdhury, M. Ahmadi, W. C. Miller: “Design of a MEMS acoustical beamforming sensor microarray”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 2, no. 6, pp. 617–627, 2002.

- [4] R. N. Miles et al.: “A MEMS Low-Noise Sound Pressure Gradient Microphone With Capacitive Sensing”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 241–248, 2015.
- [5] I. Yoo et al.: “Development of Directional MEMS Microphone Single Module for High Directivity and SNR”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 7, 2022.
- [6] D. Ringsmuth, K. Šimonová, V. Jandák, P. Honzík: “Bidirectional Electrostatic Microphone with Segmented Back-Plate”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 16, 2024.
- [7] T. Lavergne, S. Durand, M. Bruneau, N. Joly and D. Rodrigues: “Dynamic behavior of the circular membrane of an electrostatic microphone: Effect of holes in the backing electrode”, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 128, no. 6, pp. 3459–3477, 2010.
- [8] Z. Škvor: “On the Acoustical Resistance Due to Viscous Losses in the Air Gap of Electrostatic Transducers”, *Acustica*, vol. 19, pp. 295–299, 1967.
- [9] K. Abramova, P. Honzík: “Experimental estimation of unknown parameters of equivalent circuits of low-cost electret microphones”, *Akustické listy*, 23(1–4), pp. 9–17, 2017.



Eliminace rizik při realizaci vibroizolačních opatření

Dušan Jargaš

Habrovany 54

jargas@seznam.cz

Abstract The protection of buildings from technical seismicity caused by external and internal sources of vibrations (transport, building services, elevator systems) presents a number of pitfalls. The author draws on his own experience and cases that had to be resolved either during negotiations with the investor or directly with construction companies for which workshop documentation of vibration isolation supports was prepared. In any case, it was very difficult to make any changes in these stages of documentation processing or project implementation that would lead to the elimination of errors in the building structure. The presence of an acoustics expert is therefore necessary from the beginning of the process of creating a new building, when there is a risk of exceeding the hygienic noise limits for internal protected spaces.

1 ÚVOD

Ochrana budov před technickou seismicitou způsobenou externími a interními zdroji vibrací (doprava, TZB, výtahové systémy) skýtá řadu úskalí, která pramení ze složitosti problematiky, složitosti a neúplné přesnosti matematických a fyzikálních modelů, z nezkušenosti architektů a projektantů, kdy je tendence vliv vibrací na hlučkové pozadí v chráněných prostorech staveb podceňovat, a z toho pak plynoucí neúčast akustiků již v zárodku projektování nových budov v problematickém prostředí městské zástavby. Autor se pokusí identifikovat většinu rizik a přispět tak k jejich eliminaci v návrhovém a realizačním procesu výstavby.

2 FÁZE PREDIKCE – EXPERTNÍ POSUDEK

Zcela zásadním krokem v návrhu optimální ochrany budov před vibracemi je prvotní návrh, nazvěme jej expertním posudkem, akustickou studií v oblasti vibrací atp. Návrh zpravidla vychází z měření a vyhodnocení spekter rychlostí nebo zrychlení

vibrací v zamýšlené zastavěné ploše budoucího objektu nebo v jejím okolí. Výsledkem tohoto posudku je definování vlastností vibroizolace. Je určen:

- způsob ochrany budovy před vibracemi
 - celoplošná vibroizolace včetně základové desky,
 - tzv. akustický řez – dvojitá vodorovná žb deska,
 - akustický řez – nosné trámy a stěny,
- vhodná tloušťka,
- požadovaný útlum a jeho frekvenční průběh.

Rizika spojená s predikcí jsou:

- odhad nejistot hladin vibrací v jednotlivých frekvenčních pásmech,
- odhad útlumu vibrací jednotlivých nadzemních podlaží,
- zahrnutí vlivu typu a materiálové skladby konstrukce budovy, podloží a jeho interakce se způsobem založení stavby.

3 FÁZE ARCHITEKTONICKO-STAVEBNÍ ŘEŠENÍ BUDOVY

Umístění budovy v zástavbě nebo krajinně má zásadní vliv na to, jak se budou vibrace v budově projevovat a zdali bude překročena hladina hluku L_{Amax} zpravidla překračovaná v nočních hodinách (dle NV 272/2011 a násl.). Na návrhu budovy je vhodné od počátku spolupracovat s akustikem.

Je nutné vzít v úvahu:

- umístění v krajinně vůči zdrojům hluku,
- umístění zdrojů hluku uvnitř budovy nebo na obv. pláštích, střecha, existují určitá pravidla minimalizace vlivu zdrojů hluku uvnitř budovy (umístění UPS, záložních generátorů atd.), je nutné pro tyto zdroje použít izolátorů vibrací,
- řešení schodiště a výtahu, systém box in box, často v reálu neúplně řešeno, velké množství otvorů, nevhodné umístění výtahové šachty vedle chráněné místnosti, dodatečné akustické mosty vznikající přídatnými technologickými šachtami,
- autovýtahy a zakladače, umístění autozakladače pod chráněnou místností, potřeba snížení doby dozvuku v šachtách základů,
- tronsole – použití pružného ukládání mezipodest a schodišťových ramen pomocí izolovaných kotev (tronsolí) nevede k ochraně před technickou seismicitou, tyto prvky jsou primárně určeny k ochraně před kročejevým hlukem,
- vhodný návrh plovoucí podlahy, konvenční řešení zpravidla těžké plovoucí podlahy je navrženo tak, aby byl splněn požadovaný útlum kročejevého zvuku dle normy. Zpravidla pak postačuje rezonanční frekvence pružného

uložení f_r cca 70 Hz a méně. To je určitým rizikem pro útlum vibrací v této oblasti zvukového spektra, kdy může dojít vlivem rezonančního převýšení ke zdůraznění a posléze k vyzáření akustického výkonu v tomto pásmu, doporučuje se tedy navrhovat plovoucí podlahy s ohledem na spektra vibrací vstupujících do budov s využitím poddajných vložek tlumících zvuk,

- technologické šachty a jejich umístění ve vztahu k chráněným místnostem. Útlum hluku vyzářeného z nechráněného prostoru do šachet lze eliminovat pohltivými nebo neprůzvučnými požárními ucpávkami, pružnými kompenzačními členy na potrubích, přenos hydraulickými cestami lze omezit jednosměrnými ventily,
- realizaci dodatečných nenosných příček v podlaží pod rovinou vibroizolace,
- vhodnou požární ochranu vibroizolace, která neohrozí její funkci,
- návaznost vnějšího zateplovacího systému – respektování vodorovných dilatačních spár,
- vstup inženýrských sítí do budovy přes vibroizolační opatření. Zařízení inženýrských sítí musí do budovy vstupovat před poddajné chráněné uložení. Je nutné použití poddajných členů zařazených do tras potrubí, elektrického vedení atd.

Riziko nižší účinnosti vibroizolace nebo její nulové účinnosti je nepřímo úměrné pečlivosti návrhu řešení respektujícího výše uvedená doporučení. Je nutné eliminovat veškeré akustické mosty a nežádoucí vazby, které mohou vzniknout konstrukčním návrhem budovy nebo jejího technologického celku.

4 VOLBA MATERIÁLU VIBROIZOLACE

Dalším krokem pro zajištění funkční vibroizolace budovy je vhodná volba materiálového složení vibroizolací. Existují dva hlavní směry izolace budov. Jedním z nich je použití diskrétních izolátorů na bázi ocelových vinutých pružin a další v praxi častěji používanou metodou je osazení konstrukčních bodů izolátory nebo použití plošné vibroizolace na bázi elastomerů (PU a pryže). Ve většině případů postačuje plošná vibroizolace provedená třemi výše zmiňovanými způsoby. Volba materiálu musí respektovat vliv tvarového faktoru na fyzikálně-mechanické vlastnosti elastomerů.

Zásadní parametry, které je nutné při volbě materiálu kontrolovat, jsou tyto:

- tlakové napětí pro smluvní deformaci (zpravidla 10 % celkové návrhové tloušťky),
- vhodná hodnota dynamické tuhosti a její frekvenční závislost,

- nasákavost, v případě požadované odolnosti proti tlakové vodě musí být dlouhodobá nasákavost materiálu do 2 hm%,
- vliv tvarového faktoru,
- dlouhodobý creep (tečení) v závislosti na uvažovaném zatížení.

Pro správnou realizaci složitějších řešení s velkými rozdíly tlakových napětí v místě dělení stavby je potřebné vypracovat dílenskou dokumentaci, tzv. kladečský plán, který zachycuje veškeré souvislosti stavby a okolního terénu z hlediska praktické aplikace vibroizolace. Realizace antivibračních opatření spočívá obecně v těchto krocích:

- příprava povrchu,
- pokládka vibroizolace v jedné nebo několika vrstvách,
- izolace proti zatečení technologických tekutin,
- související technologická opatření k zajištění účinnosti a v opatření v TZB,
- doplňková svislá a vodorovná vibroizolace.

Kladečský plán navrhuje většinou vibroakustik ve spolupráci s autorem statického řešení budovy. Rizika jsou zde zejména:

- v chybném odhadu působících tlakových napětí (různé digitální numerické výpočetní modely mohou dávat odlišné výsledky, zde pak platí, čím méně výpočetních bodů a méně konstrukčních uzlů, do kterých se soustřeďuje tlakové napětí, tím větší riziko chyby,
- chybný výběr materiálu, kdy je špatně vyhodnocen vliv tvarového faktoru.

Na straně realizace pokládky je pak celá řada rizik:

- nedodržení technologické kázně při pokládce,
- nerespektování kladečského plánu,
- perforace ochranných vodotěsných bariér,
- dodatečné zatečení vody do již hotového souvrství,
- nevhodně provedená požární ochrana, kritické zejména u nízkých tuhostí,
- vybudování nenosných příček, které nejsou důsledně oddělené od izolovaných konstrukcí,
- nevhodná ochrana proti vodě a technologickým tekutinám, která chemicky reaguje s elastomerem vlivem migrací změkčovadel nebo chemickou agresivitou asfaltových směsí.

5 TRENDY V NÁVRHU PLOŠNÉ VIBROIZOLACE

V posledních letech dochází ke změně způsobu vibroizolace budov. Původní řešení vibroizolace celé budovy včetně podzemních podlaží ustoupilo řešení plošné vibroizolace v jedné rovině pomocí dvojité žb desky, kdy vibroizolační (akustický) řez je zpravidla umístěn nad terénem. Tento způsob i přes své výhody dnes ustupuje zejména z hlediska ekonomických nákladů tzv. ukládání na trámy a nosné stěny, kdy je celoplošná vibroizolace realizována bodově nebo v pásech na sloupech, trámecích a nosných stěnách. Takové řešení má však svá úskalí.

Výhody celoplošného řešení:

- vyšší stavební neprůzvučnost na velmi nízkých frekvencích. I přes vyšší celkový základní rezonanční kmitočet, než by měla jednoduchá deska o prostém součtu hmotností obou desek díky hmotnostnímu zákonu, neprůzvučnost strměji stoupá se zvyšujícím se kmitočtem, neprojevuje se tolik propad na kritickém kmitočtu v případě dobře navržené kombinace tlouštěk obou desek. V kritické oblasti 31–63 Hz je tato soustava lepší volbou než jednoduchá žb deska,
- není potřeba dodatečné požární ochrany, vibroizolace je uzavřena mezi nehořlavými deskami, ochrana se omezuje na oblast průchoďů pro technologie,
- nižší potřeba vysoce únosných elastomerů, což snižuje náklady na vibroizolace a zlepšuje útlum vibrací odrazem na rozhraní materiálů s rozdílnými moduly pružnosti.

Nevýhody:

- vyšší ekonomické náklady na žb konstrukce,
- vyšší nároky na zakládání stavby,
- vyšší náročnost propojení s výtahovými šachtami a schodišti,
- v některých případech vyšší nároky na velmi málo únosné vibroizolace,
- řešení míst, kde není možné použití žádné vibroizolace, žb deska se pod vlivem zatížení „vzdouvá“.

Výhody trámového ukládání na pásy vibroizolace:

- menší náklady na množství vibroizolačního materiálu,
- lepší vizuální kontrola během realizace,
- možnost případné výměny v případě havárie nebo chybného umístění, desku lze vymrazit a štěrbinu vyheverovat a poté nahradit novou.

Nevýhody:

- nižší celková stavební neprůzvučnost na nízkých kmitočtech,
- nižší tuhost desky, potřeba výztuh a průvlaků, deska lépe vyzařuje nízké kmitočty,
- nutnost požární ochrany všech spár, kdy při chybném návrhu a realizaci může dojít vlivem tuhosti požární ucpávky ke zhoršení izolace vibrací,
- vyšší nároky na únosnost vibroizolace až 12 MPa vedou k použití dražích rohoží o vysoké obj. hmotnosti a velkém modulu pružnosti.

6 ZÁVĚR

Účelem příspěvku je upozornit na složitost realizace poměrně jednoduchých fyzikálních principů v praxi stavební reality, kdy malá chyba může zmařit velké investice. Je striktně důležité dodržovat technologickou a technickou kázeň při realizaci díla a následně ověřovat funkci vibroizolace měřením nejlépe již v době realizace hrubé stavby, což se téměř neděje.

REFERENCE

- [1] Stěnička, J.: *Hluk šířený konstrukcí*, SNTL Praha, 1989.
- [2] Stěnička, J.: *Pružné uložení budov v české republice, víze, čas.* Akustika, 11/2009.
- [3] www.cdm-stravitec.com: *Soil-Structure Interaction in Building Base (Vibration) Isolation*, webinar course 12/2024.
- [4] Nový, R.: *Hluk a chvění*, ČVUT Praha, 2009.



Vibroizolace strukturálního hluku se 100% zárukou

Jan Stěnička

Kozi 9, Praha 1

Abstract The purpose of the article is to eliminate uncertainties regarding the effects of vibration isolation for structural noise. More than 20 presentations at Acoustic Seminars between 1995–2015 dealt with the description of vibration transmission from predominantly rail sources into the internal protected spaces of residential buildings. Mostly, this concerned minimizing the vibration isolation area, separating the vibration source and the protected part of the building at column heads and junctions of load-bearing walls. The method was based on established traditional vibration isolation with elastic elements, which had to be complicatedly protected against fire and water. In particular, fire protection significantly reduced the effect on structural noise. Practical verification confirmed a high uncertainty of the desired attenuation, often trending toward zero. The main reason for the wrong approach was economic considerations. The article points towards comprehensive vibration isolation, separating the protected part of the building from the underlying unprotected.

1 ÚVOD

Je všeobecně známo, že vibrace způsobující strukturální hluk se liší od běžné vibroizolace frekvenčně i amplitudou. Zatímco klasická vibroizolace v budovách je používána od 30. let 20. století ve formě oddělených vibroizolátorů převážně v základech budov, tak strukturální izolace snižuje hluk v chráněných vnitřních prostorech budov. Proto začal být aktuální jako mechanicko-akustický systém s rozprostřenými parametry až v 80. letech 20. století.

Během pobytu autora tohoto příspěvku v PTB Braunschweig byl dopracován systém Sylomeru ve spolupráci s rakouskou firmou Getzner na půdě TU Mnichov. Po návratu do ČR a společenských změnách v r. 1989 byl z ekonomických důvodů vyvinut obdobný postup pro pryž na bázi recyklátu, známý jako Belar. Dosavadní mezinárodní praxe ukázala, že pouze 10 % vibroizolace v tomto směru si vyžádá materiál na bázi polyuretanu (první byl patent Sylomer).

Všeobecná ekonomická situace v ČR si vyžádala redukovat návrh těchto materiálů do izolačních ložisek na hlavicích sloupů a vrcholech nosných stěn („trámový

systém“, termín používaný Ing. Jargašem), neboť celoplošné vibroizolace jak v základech, tak v mezipatech mezi obytnou částí a zbytkem budovy pod vibroizolací byly významně dražší. Bohužel realizace prakticky ve všech případech v budovách selhává, viz ověřovací zkoušky.

2 POPIS METODIKY VÝPOČTU VIBROIZOLACE POUŽÍVANÉ DOPOSUD V ČR POMOCÍ ODDĚLENÝCH VIBROIZOLÁTORŮ

Během let byl vytvořen komplexní systém výpočtů přenosu vibrací takto:

1. Charakteristika zdrojů vibrací
2. Přenos vibrací geologií podloží
3. Imise vibrací v základech budov
4. Přenos vibrací konstrukcí budov od základů do chráněných vnitřních prostor staveb
5. Umístění vibroizolace v budovách:
 - a) **celoplošná** v základové jámě
 - b) **trámový systém** uvnitř budovy
6. Vyzařování vibrací v nejméně ohrožených chráněných vnitřních prostorech budov

Metodika byla dvojího druhu:

1. Výpočet přenosu vibrací na bázi metody konečných prvků (modelování celé budovy)
2. Fundovaný odhad na základě teoreticko-experimentálních poznatků, podložených dílčími výpočty části budov

Výsledky predikce u obou metod jsou prakticky srovnatelné v rámci chyb určení a nejistot kontrolních měření ($\pm 2-3$ dB).

3 VODOROVNÁ A SVISLÁ CELOPLOŠNÁ VIBROIZOLACE STRUKTURÁLNÍHO HLUKU

Při prvním pohledu jde o větší plošnou míru použitého vibroizolačního materiálu a rozhodnutí o nasazení vibroizolace plyne výhradně z výsledků měření vibrací v kontrolním bodě, který se nachází v bezprostřední blízkosti okolí půdorysu budovy ve směru ke zdroji vibrací. Tento bod zůstává jako výchozí před rozhodnutím, zda izolovat vibrace, nebo nikoliv, a také pro kontrolu v budoucnosti, protože velikost vibrací se mění s časem.

Při celoplošné vibroizolaci záleží na účelu využití místností, tj. zda jde o obytnou část, nebo komerční prostory. Odpadá požární ochrana, neboť materiál je vždy zabudován mezi dvě betonové desky. Horní deska se doporučuje jako 2/3 tloušťky spodní desky. Požární ochrana se omezí na fasádový krycí prvek.

Vlastní vibroizolační rohože budou ve třech volitelných tloušťkách:

1. 25 mm a více
2. 37,5 mm pro naměřené velikosti zrychlení vibrací v kontrolním referenčním místě nižším než 70 dB
3. 50 mm pro hladiny zrychlení 70–80 dB

V případě hladin nad 80 dB je zapotřebí použít dvojnásobnou celoplošnou vibroizolaci, např. v základové jámě + vodorovná dělicí rohož mezi byty a spodní částí budov.

Ve všech případech celoplošné vibroizolace je zapotřebí vytvořit vodorovný kladěčský plán, respektující rozložení kontaktního napětí (optimální síť je $0,5 \times 0,5$ m). Nepředpokládá se statický tlak vyšší než 1,2 MPa. Jedná se o větší plochu vibroizolační rohože, ale nižší ceny, neboť materiály pro vyšší tlaky jsou významně dražší, jsou tvrdší a tím snižují vibroizolační účinek.

Použití vibroizolačního materiálu na bázi polyuretanu se doporučuje pouze pro naměřené hladiny zrychlení vibrací vyšší než 70 dB, neboť očekávaný útlum je vždy o cca 10 dB vyšší než u recyklované pryže.

4 MINIMALIZACE ŘETĚZCE PŘENOSU STRUKTURÁLNÍHO HLUKU OD ZDROJE DO CHRÁNĚNÝCH VNITŘNÍCH PROSTOR PRO VÝPOČET

Protože metody výpočtu přenosu vibrací nebyly doposud zavedeny do praxe pro značnou komplikovanost, tak se návrh a kontrola vibroizolace po realizaci řídí pouze dle měření:

- **před návrhem vibroizolace** měřením vibrací na vrcholu zkušební referenčního vrtu
- **po realizaci** kontrola měřením v kontrované místnosti, tj. vibrací uprostřed podlahy, $L_{a,wT}$ a maximální hladiny akustického tlaku L_{Amax} .

Hladiny $L_{a,wT}$ a L_{Amax} jsou hodnoceny dle hygienických požadavků.

Poznámka:

Naměřená hladina zrychlení vibrací L_a s referenční hodnotou 10^{-6} m.s^{-2} v kontrolním referenčním měřicím bodu charakterizuje zdroj vibrací v oktávových pásmech (pro vlaky 63 Hz, pro tramvaje 125 Hz a pro automobilovou dopravu 250 Hz).

Pokud naměřená hladina L_a v kontrolním bodě bude v mezích 60–70 dB, tak lze použít vně budovy mezi zdrojem vibrací a budovou tzv. „dynamický Makovičkův filtr“, kdy lze očekávat útlum 10–12 dB [7].

5 NEZBYTNÁ MĚŘENÍ HLUKU A VIBRACÍ PRO NÁVRH A OVĚŘENÍ ÚČINNOSTI VIBROIZOLACE

Měření spočívá v kontrole velikosti vibrací, jak vně budovy na referenčním místě, tak na podlaze chráněné místnosti. Nejdůležitější je měření celého výsledku, tj. kontroly

L_{Amax} v chráněném prostoru, pokud byla předtím ověřena hladina L_{Aeq} přenášená vzdušnou cestou z okolí domu do chráněného prostoru, dle požadavku ČSN 73 0532 v posledním znění, tj. byl dodržen požadavek na vzduchovou neprůzvučnost.

6 ZÁVĚR

Během cca 20 let praxe v oblasti vibroizolace strukturálního hluku byly výsledky kontrolovány jen v ojedinělých případech, neboť se jedná o náročná měření z důvodu nefunkčnosti oken, nebo proto, že je podezření na vyřazení vibroizolace vůbec.

Subjektivním posouzením nelze hodnotit účinnost vibroizolace, protože je ekvivalentní hladina L_{Aeq} uvnitř místnosti přenášená z okolí budovy vzduchem často vyšší než 30 dB a maskuje strukturální hluk.

Prakticky se vibroizolace proti strukturálnímu hluku stává pouze alibismem v případech, kdy byla použita, ale vlastně nebyla zapotřebí, nebo proto, že její účinek nebylo možné prokázat.

Je zapotřebí významně redukovat rozsah požadavků hlukových studií na nejnutnější vibroizolaci strukturálního hluku v praxi odůvodněných případech a zajistit 100% prokazatelnou účinnost. To umožňuje právě jen celoplošná vibroizolace.

Ekonomické úspory jsou nasnadě a problematika vyžaduje spolupráci se specialisty na hluk šířený konstrukcí. Vůbec nezáleží na kvalitě různých způsobů zejména protipožární ochrany, která je u „trámového systému“ převážně naprosto likvidující pro celkový účinek útlumu.

Tzv. trámový systém neboli vibroizolace na oddělených ložiscích nebo v pruzích pro útlum strukturálního hluku vznikl původně jako inspirace z tradičního způsobu vibroizolace, pro útlum fyziologických vibrací.

REFERENCE

- [1] Stěnička, J.: *Hluk šířený konstrukcí*, SNTL Praha, 1989.
- [2] Dědič, P., Stěnička, J.: *Směrnice pro navrhování vibroizolace v pražském metru*, Metroprojekt, 1998.
- [3] Dolejší, F., Stěnička, J.: *Návrh směrnice použití vibroizolačních materiálů pro projektanty budov*, Sborník 81. akustického semináře, Jetřichovice u Děčína, 2001.
- [4] Kittnarová, O., Stěnička, J.: *Základy akustiky pro učitele hudební výchovy*, Pedagogická fakulta UK, 2013.
- [5] Jargaš, D.: *Využití materiálu Regutec pro vibroizolaci strukturálního hluku*, Regutec a.s., Němčičky, 2025.
- [6] Stěnička, J.: *Minimalizace metody návrhu a ověřování vibroizolace pro strukturální hluk*, Ekola Praha, 2026.
- [7] Makovička, D.: *Návrh a ověřování účinků dynamického „zemního filtru“*, Kutná Hora, 2025.