

Způsoby tlumení mechanického chvění

Hela Švarcová

Bakalářská práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Hela Švarcová**
Osobní číslo: **T17836**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Způsoby tlumení mechanického kmitání**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši dané problematiky na základě doporučené literatury.
2. Proměřte tlumení mechanického kmitání u vybraných typů materiálů.
3. Vyhodnoťte různé faktory, které mají vliv na tlumení vibrací a porovnejte tlumicí vlastnosti testovaných materiálů mezi sebou.
4. Citujte použitou literaturu.

Rozsah bakalářské práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Nový R.: Hluk a chvění, ČVUT v Praze, 2000.**
2. **Mišun V.: Vibration a hluk, VUT v Brně, Nakladatelství PC-DIR Real, s. r. o. Brno, 1998.**
3. **Vaňkova, M. a kol.: Hluk, vibrace a ionizující zařízení v životním a pracovním prostředí, část I. Skriptum VUT Brno, 1995.**
4. **Smetana, C. a kol.: Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika Praha, 1998.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2019**

Ve Zlíně dne 19. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Švarcová Hela

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávalečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

***nascannov

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část této bakalářské práce je věnována problematice mechanického chvění, jeho příčinám, souvisejícím akustickým jevům, ale především možnostem snížení negativního vlivu využitím konstrukčních metod tlumení či výběrem vhodných tlumících materiálů. V praktické části se zabývám měřením veličiny přenosového útlumu u vybraných materiálových vzorků s předpokladem tlumících vlastností a srovnáním konkrétních naměřených hodnot.

Klíčová slova: tlumení, mechanické vlnění, kmitavý pohyb, mechanické chvění

ABSTRACT

The theoretical part of this thesis is dedicated to the mechanical vibrations, their causes, corresponding acoustic effects, but most of all to the possibilities of a minimizing their negative impacts by using the diverse constructional methods of vibration's damping or by appropriate damping materials. The second practical part of this thesis evaluates the measured transfer damping function at particular materials with supposed damping features.

Keywords: damping, mechanical motions, oscillation, mechanical vibration

Tímto bych ráda poděkovala panu doc. Ing. Martinu Vašinovi Ph. D., za jeho velkou vstřícnost, trpělivé vedení a ochotu předávat své odborné znalosti při zpracování této bakalářské práce. Poděkování patří také mé rodině za jejich trvalou podporu a víru v mé odhodlání

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 VÝZNAM MECHANICKÉHO VLNĚNÍ.....	11
1.1 NEGATIVNÍ PROJEVY MECHANICKÉHO CHVĚNÍ.....	12
1.2 POZITIVNÍ PROJEVY MECHANICKÉHO VLNĚNÍ.....	13
2 URČUJÍCÍ VELIČINY A VLASTNOSTI KMITÁNÍ	14
2.1 KMITOČET	15
2.2 MAXIMÁLNÍ VÝCHYLKA HMOTNÉHO BODU.....	16
2.3 RYCHLOST A ZRYCHLENÍ HMOTNÉHO BODU.....	16
2.4 ENERGIE PERIODICKÉHO HARMONICKÉHO KMITÁNÍ	17
2.5 DRUHY KMITÁNÍ	17
3 DĚLENÍ MECHANICKÉHO VLNĚNÍ.....	20
3.1 AKUSTICKÉ VLNĚNÍ.....	22
3.1.1 Vlnová délka	23
3.2 MECHANICKÉ CHVĚNÍ.....	23
3.2.1 Intenzita chvění	24
3.2.2 Mechanická impedance.....	24
3.2.3 Hladina rychlosti chvění	24
3.3 MECHANICKÉ CHVĚNÍ TYČÍ.....	25
3.4 MECHANICKÉ CHVĚNÍ MEMBRÁN A DESEK	26
4 TLUMENÍ MECHANICKÉHO CHVĚNÍ.....	28
4.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY TLUMENÍ CHVĚNÍ.....	28
4.1.1 Součinitel přestupu	28
4.1.2 Přenosový útlum.....	28
4.1.3 Vložný útlum.....	29
4.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY TLUMENÍ	30
4.2.1 Konstrukční princip	30
4.2.1.1 Pružné elementy	30
4.2.1.2 Pružiny	31
4.2.1.3 Pružné vložky.....	31
4.2.1.4 Antivibrační tlumiče	31
4.2.1.5 Vrstvené konstrukce	32
4.2.1.6 Větvené konstrukce	32
4.2.1.7 Hradící hmoty.....	32
4.2.1.8 Antivibrační nátěry	33
4.2.1.9 Antivibrační fólie	33
4.2.2 Materiálový princip	33
4.2.2.1 PUR pěny	33
4.2.2.2 Kompozitní materiály	34
4.2.2.3 Pryže, pryžové granuláty	34

4.2.2.4	Tlumící silikonové pasty a gely	35
4.2.2.5	Slitiny s tvarovou pamětí	35
II	PRAKTICKÁ ČÁST	36
5	HODNOCENÍ TLUMÍCÍCH VLASTNOSTÍ.....	37
5.1.1	Vliv materiálového složení na tlumící účinky	47
5.1.2	Vliv frekvence na přenosový útlum.....	49
5.1.3	Vliv tloušťky materiálu na tlumící účinky	51
5.1.4	Vliv struktury materiálu na tlumící účinky	53
5.1.5	Vliv hustoty materiálu na tlumící účinky.....	54
5.1.6	Vliv zátěže na tlumící účinky.....	56
5.1.7	Vliv vrstvení materiálu na tlumící účinky	57
5.1.7.1	Dvouvrstvé konstrukce	57
5.1.7.2	Třívrstvé konstrukce	58
5.1.7.3	Čtyřvrstvé konstrukce.....	59
ZÁVĚR	62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	63
SEZNAM OBRÁZKŮ	66
SEZNAM TABULEK	68

ÚVOD

S mechanickým chvěním se v životě setkáváme zcela přirozeně, aniž bychom si ho vždy přímo uvědomovali, protože se projevuje formou pro nás běžných jevů. Od počátku naší existence je součástí přírodních procesů a stále častěji je spojeno s výsledky četné lidské činnosti. V oblasti průmyslu je jeho vliv jednou ze základních otázek při konstrukci výrobních zařízení a strojů. Výrazně ovlivňuje oblast stavebnictví a zpracování materiálů. Jeho projevy můžeme registrovat svými smysly či měřit pomocí citlivých přístrojů. Některé smyslové vjemy spojené s mechanickým chvěním, nejsou pro náš organismus příjemné a jiné ani bezpečné. U konstrukcí a zřízení je jeho negativní vliv patrný nejen v rovině funkčnosti, ale především v rovině finanční náročnosti. Z tohoto důvodu je pochopitelné, že se již od počátku, kdy jsme se s tímto jevem a jeho případnými negativními účinky setkali, snažíme o nalezení způsobu jeho úplné eliminace či alespoň vhodné regulace.

V současné době dochází ke stálému zlepšování a hledání nových technických řešení, jak dopady mechanického chvění snížit či ovlivnit jeho působení. Tlumení mechanického chvění je tedy významnou součástí mnoha oborů výroby a průmyslu obecně. Nové materiály umožňující tlumení, i přístroje zajišťující přesné měření a vyhodnocení dopadů mechanického chvění, představují tedy širokou škálu možností, jak se této problematice věnovat.

Abychom dokázali zvolit vhodný způsob tlumení mechanického chvění je zásadním předpokladem znát jeho skutečné působení a všechny určující hodnoty. Tedy od zjištění měření a vyhodnocení se odvíjí veškeré další kroky pro výběr vhodného konstrukčního či materiálového řešení. Tomuto úvodnímu kroku by tedy měla být věnována náležitá pozornost, jelikož může výrazně napomoci při snížení finanční náročnosti výroby spojené s následným odstraňováním negativních dopadů chvění. V době neustálé snahy o snižování nákladů a zvyšování výkonů toto může představovat jeden ze způsobů, jak dosáhnout optimálních výsledků.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VÝZNAM MECHANICKÉHO VLNĚNÍ

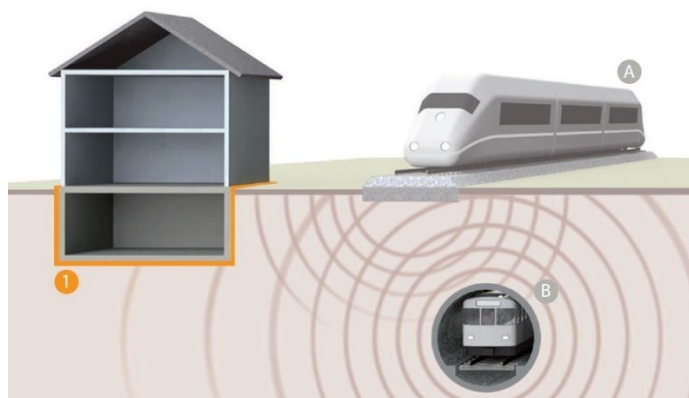
Kmitání představuje nejrozšířenější měřitelný pohyb, se kterým se můžeme obecně setkat v mnohých oblastech našeho života. Šíření kmitavého pohybu v různém prostředí nazýváme vlněním. Jeho nejběžnějším projevem, který můžeme sami pozorovat, je například zvuk či světlo. V současné době je nám známo a rozlišujeme tak vlnění elektromagnetické, gravitační, de Brogliho a mechanické.

Mechanické vlnění je tedy jev, při kterém dochází vlivem silového působení ke kmitání částic a šíření kmitavého pohybu ve stlačitelném či pružném prostředí. Tyto částice na sebe působí díky vazebným silám, kdy jejich prostřednictvím se může šířit i přenášená energie, nepřenáší se však hmota. (1)

Toto vlnění je možné nejen popsat, ale i měřit či odvodit ze známých vztahů. Díky tomu můžeme hodnotit dopady tohoto jevu, potlačit či naopak využít jeho vlastností.

Kmitavý pohyb jako nejčastější rozruch způsobující mechanické vlnění je určen, kmitočtem, amplitudou, rychlostí, zrychlením, časovým průběhem a směrem. Jeho projevy jsme schopni registrovat i smysly v konkrétním rozsahu.

Do rozsahu 1 Hz je možno kmity vnímat zrakem. Sluchový vjem vyvolaný kmitáním je možný nad 20 Hz. V dnešní době přicházíme do styku s mechanickým vlněním téměř denně a to díky rozrůstající se dopravě a průmyslu, které zahrnují nejčastější zdroje chvění, jak je patrné dle obr. 1, který představuje běžné dopravní prostředky jejichž chod vyvolává chvění, jenž může mít vliv na okolní budovy.



Obr. 1. Vliv mechanického chvění v dopravě

1.1 Negativní projevy mechanického chvění

Nežádoucí účinky vlnění jsou nejčastěji spojovány s působením na lidský organismus, ať již se jedná o zdraví škodlivou přemíru sluchového vjemu či nepříjemných pocitů vyvolaných přenosem kmitavého pohybu na části lidského těla (obr.2). Kmitání u hmotných soustav a konstrukcí má negativní vliv na jejich bezpečnost, životnost a funkčnost, respektive požadovaný výkon. U negativního působení je tedy snah o bezpečnou regulaci, kdy jeho přípustné limity jsou upraveny patřičnými normami. Také jsou předmětem neustálého bádání a diagnostikování, protože vlivem lidské činnosti přibývá negativních dopadů a s tím spojená rizika poškození zdraví. Značný podíl na stresujícím prostředí má právě mechanické vlnění, které člověk vnímá smysly a subjektivně vyhodnocuje zda jsou pro něj příjemné, neutrální či nepříjemné.



Obr. 2. Vzduchové bourací kladivo

1.2 Pozitivní projevy mechanického vlnění

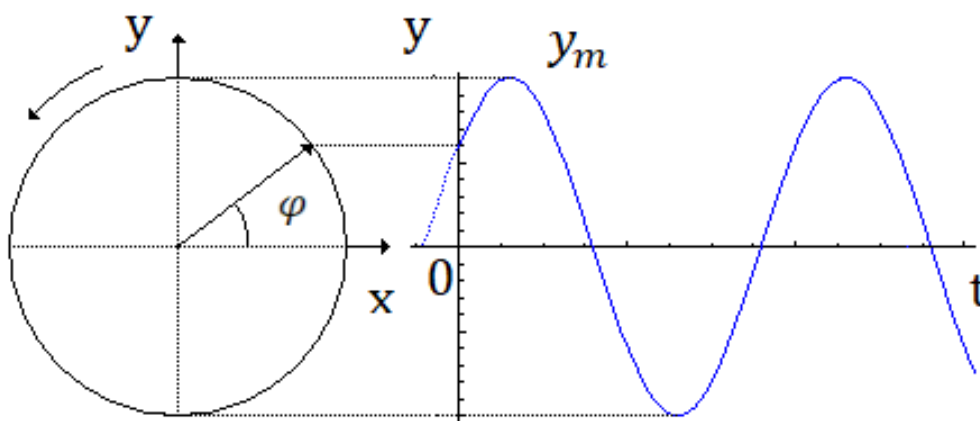
Mezi využitelné projevy těchto jevů řadíme regulované vibrace některých výrobních zařízení a nástrojů. Známe jsou především vibrační síta a dopravníky sypkých hmot, pýchovací či vibrační obráběcí stroje. (3) Kromě strojírenského a stavebního průmyslu je další oblastí, ve které vnímáme určité mechanické vlnění pozitivně, například lékařství. V dnešní době taktéž velmi oblíbené wellness centra nachází rozličné uplatnění vlnění ve vztahu k péči o tělo a relaxaci. A zcela jistě nejstarším a doposud nejrozšířenějším oborem, využívajícím pozitivní aspekty tohoto jevu, představuje umění hudby. Kdy v dnešní době dokonce vznikají nástroje, které jsou postaveny výhradně na mechanickém vlnění a vibraci.



Obr. 3. Pozitivní efekt hudby

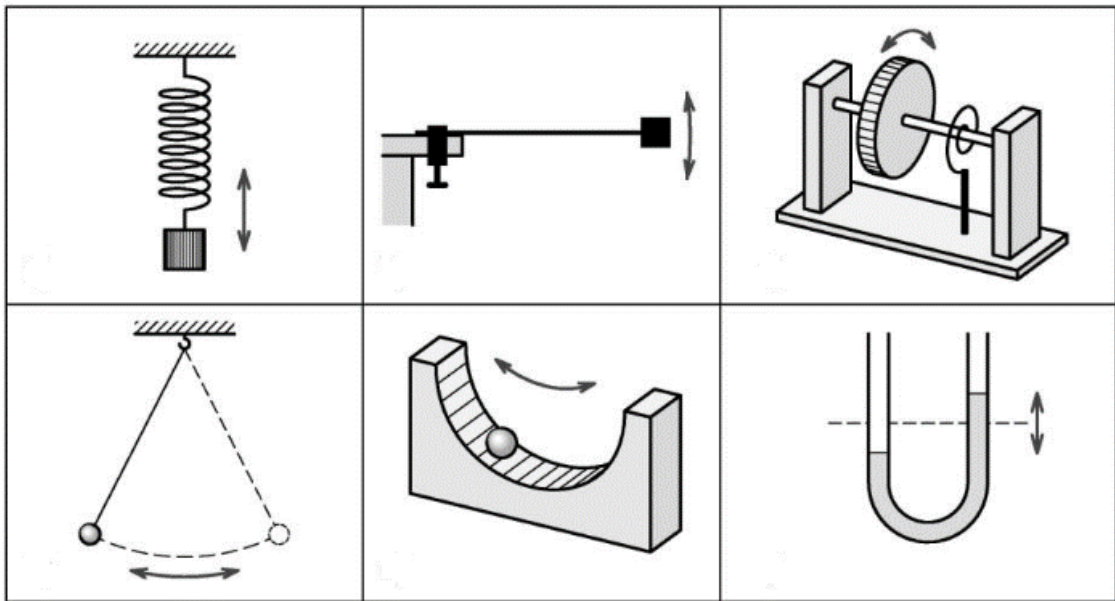
2 URČUJÍCÍ VELIČINY A VLASTNOSTI KMITÁNÍ

Kmitání jako základní pohyb je nevhodnější demonstrovat na zařízení, které volně kmitá bez vnějšího působení a nazývá se mechanický oscilátor. Pohyb způsobuje tíhová síla. Při vychýlení hmotného bodu z rovnovážné polohy působí výsledná síla, která vždy směřuje zpět do rovnovážné polohy. Kmitavý pohyb se v tomto případě periodicky opakuje. Výchylka je přímo závislá na čase podle funkce sinus, jak je patrné dle obr.4. grafickým vydřením je časový diagram kmitavého pohybu. V případě zmíněné sinusoidy tedy hovoříme o harmonickém kmitavém pohybu, který odpovídá průmětu pohybu rovnoměrného po kružnici do svislé roviny, jak vyplývá z obrázku obr. 4. (2)



Obr. 4. Časový diagram kmitavého pohybu (2)

Praktickým příkladem běžných mechanických oscilátorů jsou různé druhy kyvadel, pružiny s závažím či jen obyčejná kulička v misce, tak jak je ukázáno na obr. 5. Nejsou-li kmity ničím buzeny, díky odporu prostředí a vlastního vnitřního tření dochází k úbytku kinetické energie, výchylka se zmenšuje až pohyb postupně zcela ustane. Tento druh kmitání uvažujeme, jako nejjednodušší, a proto je vhodné prezentovat na něm všechny základní veličiny, popisující tento děj.



Obr. 5. Mechanické oscilátory (2)

2.1 Kmitočet

Periodický pohyb se po určitém čase opakuje, kdy dojde k maximálnímu vychýlení hmotného bodu a jeho návratu do rovnovážné polohy. Čas mezi dvěma sousedícími maximálními výchylkami je tehdy dobou kmitu T . Kmitočet f nám udává počet kmitů za sekundu. Vzájemný vztah těchto veličin je:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Jelikož harmonický kmitavý pohyb je průmětem rovnoměrného pohybu po kružnici (Obr. 4), tak lze uvažovat úhlovou frekvenci ω dle vztahu:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (2)$$

Úhel φ na obr.4, představuje úhel, který hmotný bod urazí za jednotku času a je závislý právě na čase t a úhlové frekvenci f :

$$\varphi = \omega t \quad (3)$$

2.2 Maximální výchylka hmotného bodu

Okamžitá výchylka hmotného bodu y je vyjádřena:

$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

kde veličina y_m je největší výchylka hmotného bodu z rovnovážné polohy, tedy amplituda. A φ jako fázový úhel představuje počáteční fázi kmitání.

2.3 Rychlost a zrychlení hmotného bodu

Rychlost pohybu v získáme první derivací okamžité výchylky podle funkce času:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega y_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

Zrychlení a opět analogicky dostaneme první derivací rychlosti podle času:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 y_m \sin \omega t \quad (6)$$

Z těchto rovnic lze získat výsledky, které jsou řešením diferenciální rovnice kmitavého pohybu, tedy pohybové rovnice níže.

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (7)$$

2.4 Energie periodického harmonického kmitání

Celková energie, kterou můžeme uvažovat při kmitavém pohybu je tvořena energií potenciální E_p a energií kinetickou E_k .

Kinetická energie je závislá na rychlosti kmitání, tedy po dosazení vztahu je:

$$E_k = \frac{1}{2} m y^2 \omega^2 \cos^2 (\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Potenciální energie má závislost na výchylce, proto pro ni platí:

$$E_p = \frac{1}{2} m \omega^2 y \sin^2 (\omega t + \varphi) \quad (9)$$

Tedy po dosazení do vzorce pro výpočet celkové energie, která je jejich součtem:

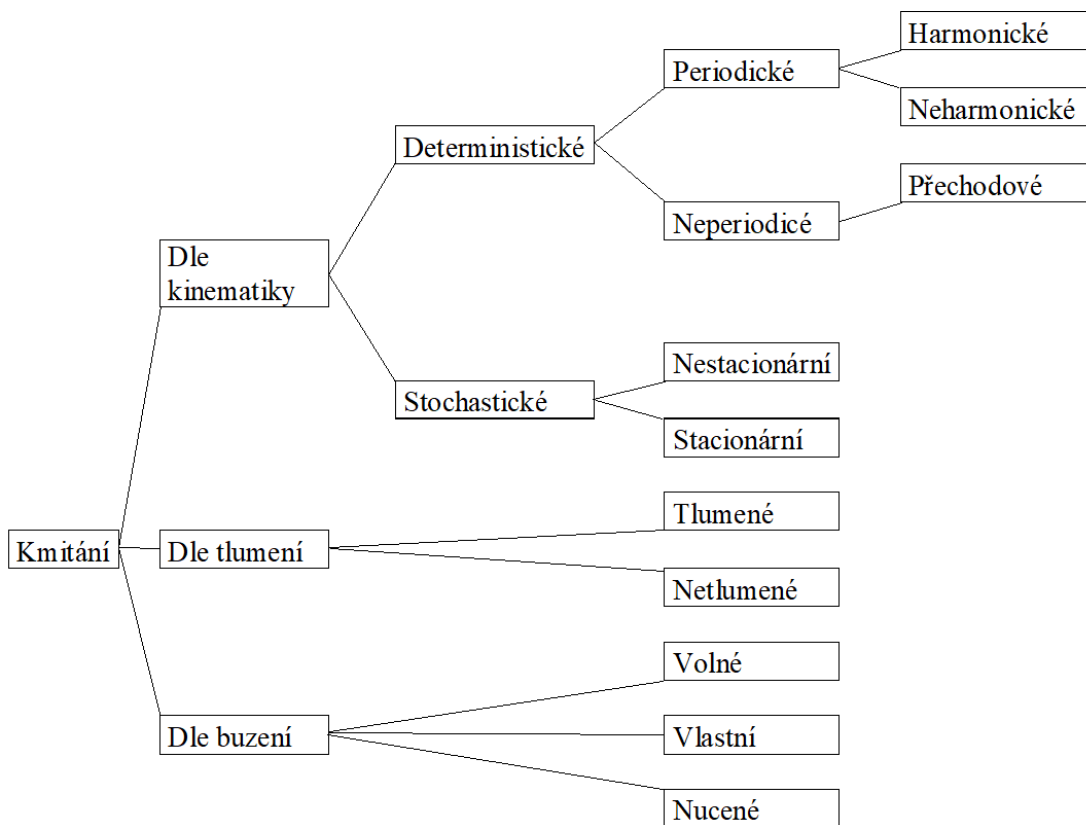
$$E = E_k + E_p, \quad (10)$$

bude její tvar následovný:

$$E = \frac{1}{2} m \omega^2 y^2, \quad (11)$$

2.5 Druhy kmitání

Kmitavý pohyb můžeme dělit z různých hledisek, jak je uvedeno dle obr.6. Nejčastěji z pohledu popisu pohybu, tedy dle kinematiky, dále dle tlumení nebo naopak buzení kmitů.



Obr. 6. Druhy kmitání

Deterministické periodické harmonické – přesně určené průběhem, opakující se, s pravidelným sinusovým pohybem.

Deterministické periodické neharmonické – přesně určené průběhem, opakující se, s jiným typem průběhu.

Deterministické neperiodické – přesně určené průběhem, neopakující se přechodové kmitý.

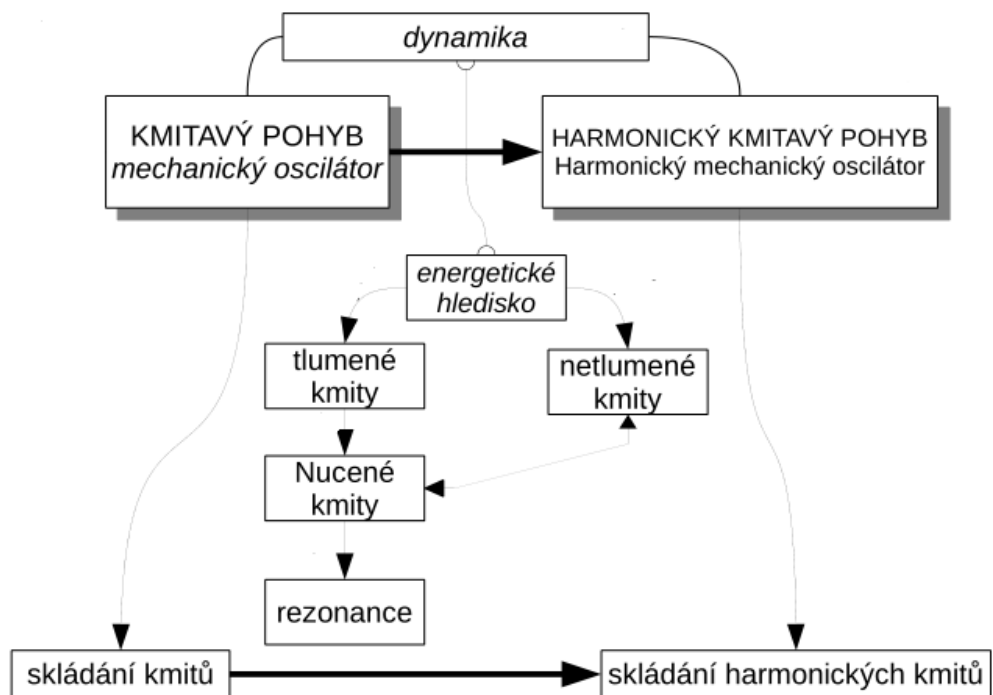
Sochastické neboli náhodné – nelze přesně určit jejich průběh

Tlumené – dochází k útlumu pohybu, kdy se část energie pohybu ztratí v důsledku tření.

Netlumené – nedochází ke ztrátě energie ani její přeměně.

Volné – kmitý vycházející z podstaty kmitající soustavy, jsou dané fyzikálními zákony

Nucené – při působení vnější síly dojde u tlumených kmitů k nahrazení energie v pravidelných intervalech

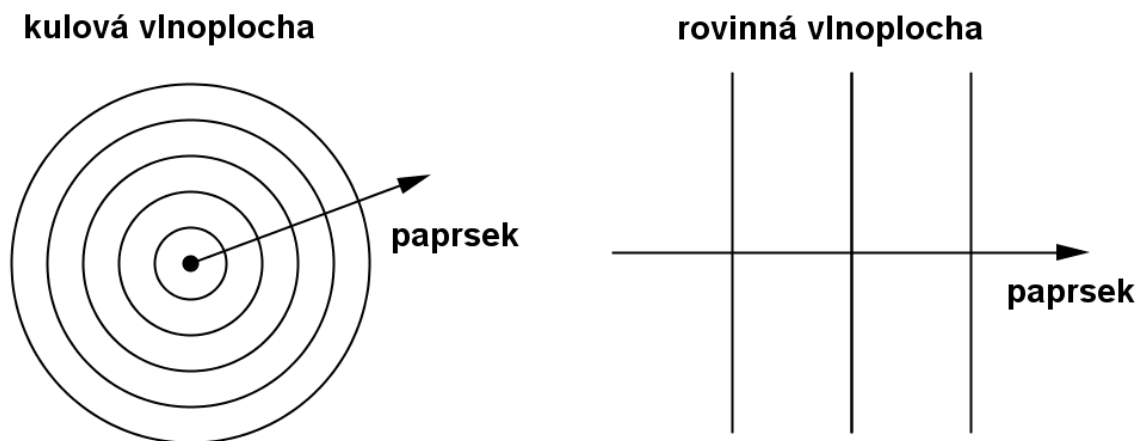


Obr. 7. Pojmová mapa kmitání

3 DĚLENÍ MECHANICKÉHO VLNĚNÍ

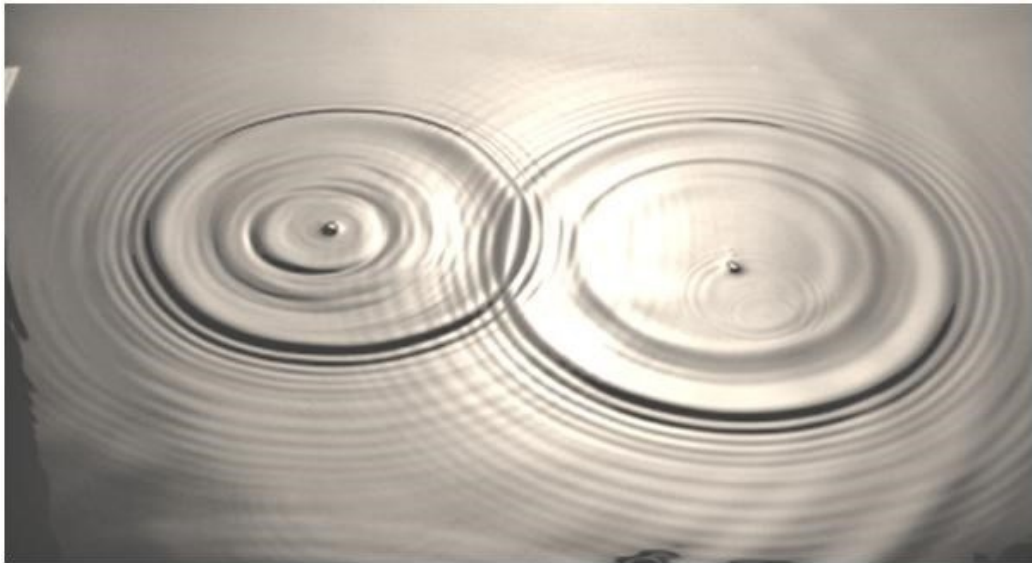
Mechanické vlnění je šíření rozruchu vyvolaného kmitáním v pružném prostředí. Prostředí výrazně ovlivňuje způsob šíření rozruchu od zdroje. Důležitý je taktéž způsob vlnění, zda kmitání je ve směru vlnění či naopak k němu kolmé. Vlnění určitou rychlostí postupuje od svého zdroje v řadě bodů, v rovině, či v prostoru.

V izotropním prostředí, které má ve všech směrech stejné vlastnosti, se šíří vlnění ze zdroje všemi směry stejnou rychlostí a tvoří tak vlnoplochu. Ve vlnoploše mají všechny body stejnou fázi kmitání. Směr šíření vlnění v daném bodě vlnoplochy, jak je patrné z obr. 8 určuje kolmice k vlnoploše, která se nazývá paprsek. (2)



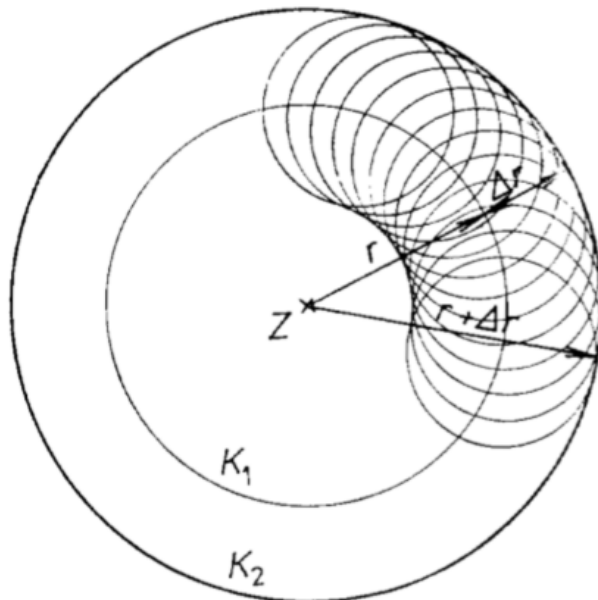
Obr. 8. Vlnoplocha v prostoru a rovině (3)

Způsob, jakým se vlnění šíří vysvětluje Huygensův princip, který uvádí, že každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch ve směru, v němž se vlnění šíří. Praktickým příkladem dle obr. 9 demonstrujícím tento princip přímo v přírodě, je šíření vln na hladině vody. (3)



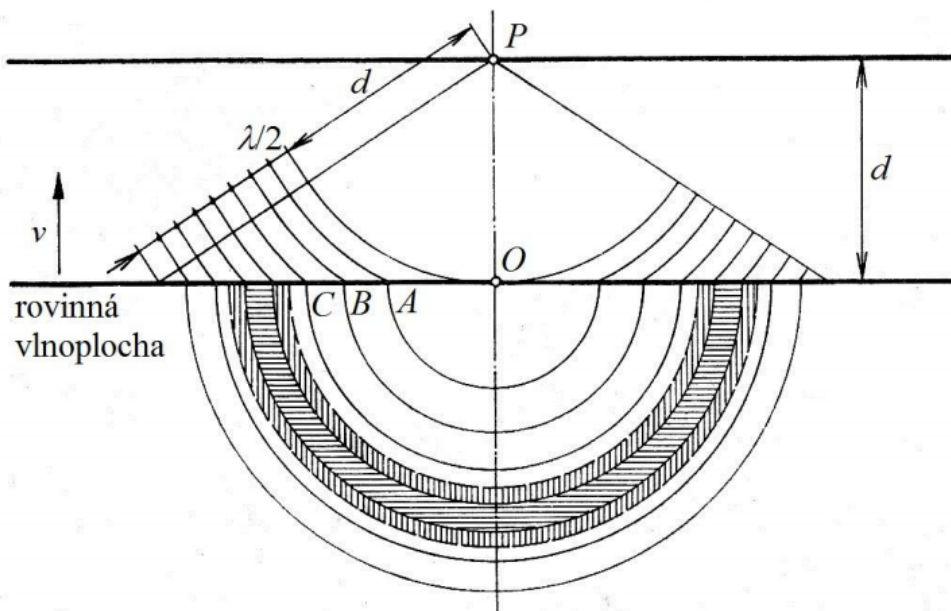
Obr. 9. Vlnění na vodní hladině

Tento princip vysvětluje dva důležité jevy. Prvním je odraz vlnění, ke kterému dochází v momentě, kdy vlnění narazí na nepropustnou plochu. Druhý představuje lom vlnění, který nastane, pokud vlnění narazí na propustnou plochu, tedy při přechodu z jednoho prostředí do odlišného, kdy se díky rozdílné rychlosti změni směr šíření.



Obr. 10. Huygensův prprincip (2)

Huygensův princip je postaven na přímočarém vlnění a vysvětluje tedy způsob šíření před překážkou. Byl rozšířen Fresnelem, protože zákon o přímočarém vlnění neplatí přesně, jak bylo prokázáno, a na překážkách tak vzniká ohyb vlnění, který je tím výraznější, čím je větší vlnová délka vlnění a čím větší je vzdálenost od překážky. (2)



Obr. 11. Ohyb vlnění (2)

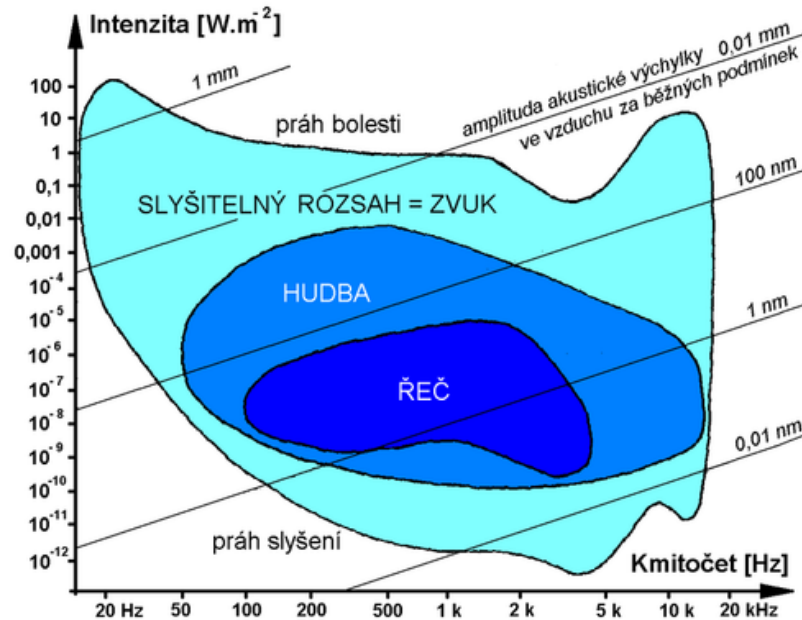
Dochází-li k prolínání, skládání dvou či více odlišných vlnění, nazýváme tento jev interferencí, kde uplatňujeme princip superpozice. Okamžitá výchylka výsledného kmitání určité částice se rovná součtu okamžitých výchylek kmitání způsobených šířením jednotlivých vlnění. (1)

3.1 Akustické vlnění

Akustické vlnění je v prostředí kapalin a plynů podélným vlněním, tedy se šíří hmotným prostředím tak, že částice tohoto prostředí kmitají ve směru šíření vlnění. Dochází tak k většímu zhuštění částic, a tedy i nárůstu tlaku p , v jiných místech naopak je tímto zhuštění menší. Rychlost šíření je konstantní a látka se nepřenáší.

Vzdálenost, kterou vlnění proběhne za jednu periodu T , představuje vlnovou délku λ . Vlnová délka je obecně vzdálenost kterýchkoliv dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází. Z důvodu velmi malých amplitud výchylek jednotlivých částic a splývání jejich směru se směrem šíření vlnění, ve většině případů nelze podélné vlnění pozorovat přímo. (3)

Praktický příklad podélného vlnění je přenos zvuku. Jedná se tedy o mechanické kmitání ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu. Rozsah pásma zvuku dělíme na slyšitelné pásmo, infrazvuk a ultrazvuk, jak je znázorněno na obr. 12.



Obr. 12. Rozsah zvuku

3.1.1 Vlnová délka

Vlnová délka λ je takéž určující veličinou. Představuje vzdálenost, kterou urazí vlna za dobu jednoho kmitu, kdy c značí rychlost šíření vlnění.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (12)$$

3.2 Mechanické chvění

Představuje podélné či příčné vlnění v pevných materiálech, kde již namísto akustického tlaku působí střídavé napětí σ a lze tedy pomocí něj, jako u akustického vlnění, určit další veličiny. U šíření mechanického chvění v pevných materiálech hraje roli i geometrie materiálu, což je zásadní rozdíl mezi akustickým vlněním, které se šíří prostředím bez určených rozměrů. Navíc v pružných tělesech vzniká chvění jen o určitých frekvencích. Tyto jsou vždy násobky základní frekvence, která je právě dána geometrií tělesa. Lze tedy říct, že

každé těleso má svoji vlastní frekvenci a pružná tělesa můžeme v podstatě pokládat za mechanické oscilátory. Proto veličiny určující periodické harmonické kmitání se užívají pro odvození vztahů mezi veličinami chvění. (1)

3.2.1 Intenzita chvění

Intenzita chvění I je vyjádřením množství energie, které prochází plošnou jednotkou za 1 s.

$$I = \sigma_{ef} v_{ef}, \quad (13)$$

kde:

I [Wm^{-2}] – intenzita chvění v tyči

v_{ef} [ms^{-1}] – efektivní rychlost chvění

σ_{ef} [Nm^{-2}] – efektivní napětí

3.2.2 Mechanická impedance

Určuje poměr mezi budící silou F a rychlostí chvění ve sledovaném místě. Na mechanickou impedance má především vliv změna průřezu nebo změna hustoty materiálu a modul pružnosti.

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{\sigma S}{v} \quad (14)$$

S [m^2] – průřez tyče

σ [Nm^{-2}] – napětí ve sledovaném řezu

Měrnou impedancí Z_s pak nazýváme poměr mezi napětím σ a rychlostí chvění v , která je analogií pro vlnový odpor prostředí.

$$Z_s = \frac{\sigma}{v} \quad (15)$$

3.2.3 Hladina rychlosti chvění

Je decibelová veličina a vyjadřuje za pomoci logaritmické stupnice poměr mezi efektivní hodnotou rychlosti chvění v a referenční hodnotou rychlosti chvění v_0 (10^{-8}ms).

$$L_v = 20 \log \frac{a}{v_0} \quad (16)$$

Hladina má své spektrum, proto je nutno určovat pro jaké kmitočtové pásmo byla určitá hladina chvění stanovena.

3.3 Mechanické chvění tyčí

Musíme rozlišovat, zda se jedná o podmínky, kdy kmitá samotné těleso nebo kdy dochází k pružným deformacím, které vyvolávají šířící se vlnění v tělese. Působí-li na těleso síla se stejnou frekvencí jaká je vlastní frekvence tohoto tělesa, dochází k jevu, který nazýváme rezonance. V praktické rovině je princip rezonance využíván v souvislosti s hudebními nástroji či v moderní ozvučovací technice u reproduktorů. V případě, že jeden rozměr tělesa mnohonásobně převyšuje ostatní rozměry, šíření vlnění pak také závisí na tom, zda je těleso uchyceno na konci či nikoliv. Postupné vlnění tedy prochází tyčí, kdy na jejím konci se vlna buď odrazí, a změní tak svou fázi na opačnou, toto v případě pevného uchycení, nebo se odrazí, a se stejnou fází se šíří směrem k opačnému konci. Rozlišujeme 4 základní případy uchycení tyčí, které jsou definovány pomocí konstanty K a představuje je volné uložení, vetknutí, podpěry na obou koncích a tyč vetknutá oboustranně. Pro volně uloženou tyč, kde vzniká stojaté vlnění, můžeme jeho vlastní frekvenci vypočítat ze vztahu:

$$f_n = n \frac{c}{2l} \quad (17)$$

$n[-]$ – celé kladné číslo

Při splnění nutné podmínky:

$$L \geq \frac{\lambda}{2} \quad (18)$$

Vlastní frekvenci tyčí můžeme určit pomocí modulu pružnosti v tahu E :

$$f = K \sqrt{\frac{EI}{l^4 m}} \quad (19)$$

$K[-]$ – konstanta uložení

$E[\text{Nm}^{-2}]$ – modul pružnosti v tahu

$I[\text{m}^4]$ – moment setrvačnosti

$l [\text{m}]$ – délka tyče

3.4 Mechanické chvění membrán a desek

U plošných těles s malou tloušťkou je těleso uchyceno po celém svém obvodě, pro toto uchycení tedy nehrají roli konstanty uchycení jako tomu bylo u tyčí. V místě upnutí je výchylka i rychlost kmitání rovna nule.

Pro pravoúhlou membránu o rozměrech $a \times b$ lze určit frekvenci následovně:

$$f_{mn} = \frac{c_M}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (20)$$

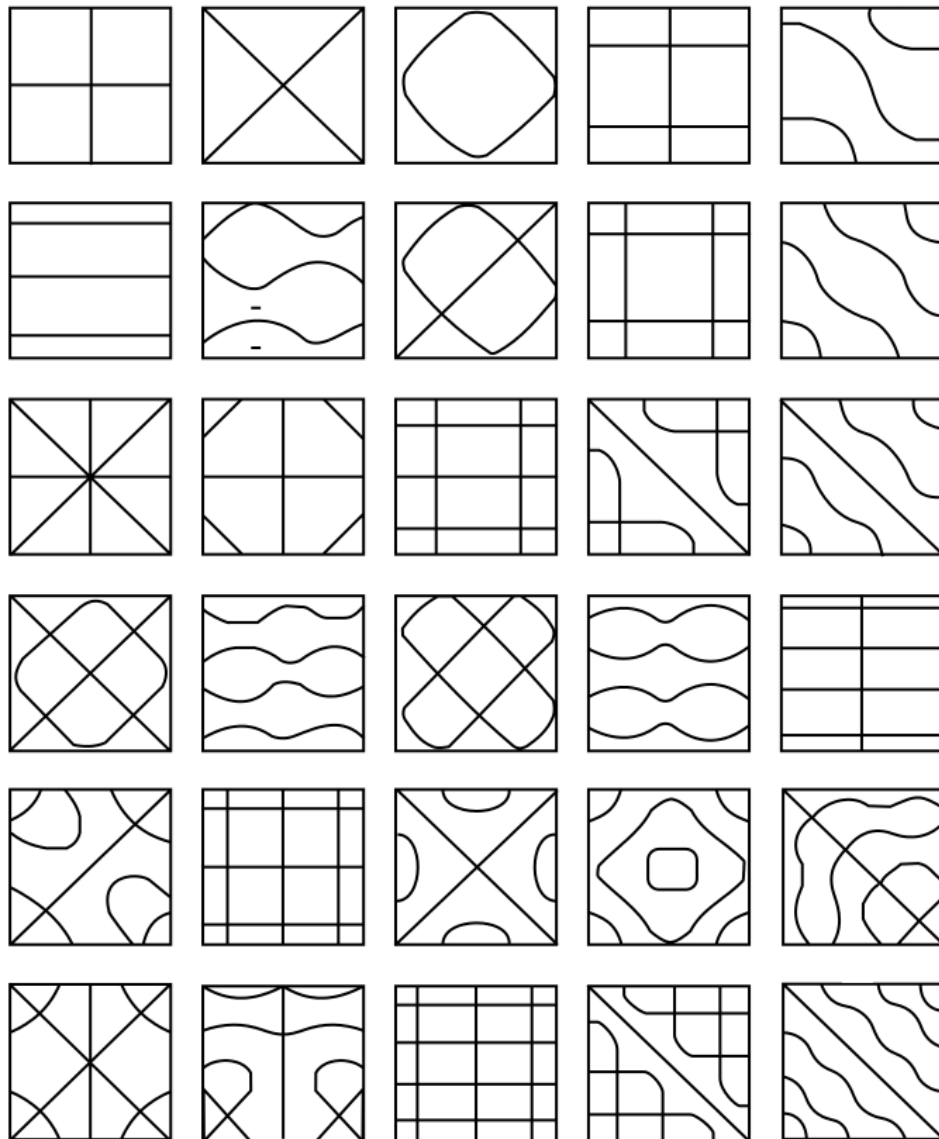
U těles s větší tloušťkou již hraje roli tuhost a okrajové podmínky tedy způsob uchycení. Na rozdíl od membrán je rychlost šíření vlny závislá na kmitočtech.

Volně položená deska má frekvenci dle vzorce:

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{m^n} \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right]}, \quad (21)$$

kde a a b jsou strany desky, m a n různá celá kladná čísla, B je ohybová tuhost desky ze vzorce pro výpočet tuhosti v ohybu.

Praktickou ukázkou chvění desek představují Chladniho obrazce, které vytváří při kmitání pohybující se sypký materiál, umístěný na desku. Zrnka jemného sypkého materiálu se shromažďí v uzlech a vzniknou charakteristické obrazce pro různé frekvence, základní výčet obrazců je patrný z obrázku.



Obr. 13. Chladniho obrazce

4 TLUMENÍ MECHANICKÉHO CHVĚNÍ

Pro tlumení mechanického chvění je mnoho praktických důvodů, od nežádoucího působení na pevnost materiálu po negativní vliv vibrací na organismus člověka. Tyto negativní dopady jsou známy, a proto se při konstrukci vždy zohledňují. Díky dostupným metodám jejich přesného určení, je možnost výrazného snížení či zavedení takových opatření, aby byla možná případná další regulace tohoto vlivu.

4.1 Základní veličiny tlumení chvění

Důležitým faktorem při tlumení chvění je odraz vlnění na koncových bodech tělesa, pomocí kterého dokážeme po dosazení součinitele přestupu vypočítat přenosový či vložný útlum.

4.1.1 Součinitel přestupu

Součinitel přestupu d , který vyjadřuje poměr mezi energií prošlou rozhraním a dopadající energií, která vzniká při dopadu a odrazu vlnění, který se používá pro výpočet přenosového útlumu D .

$$d = \frac{I_2}{I_+} \quad (22)$$

kde:

$I_2 [Wm^{-2}]$ – intenzita prošlého chvění,

$I_+ [Wm^{-2}]$ – intenzita dopadajícího chvění.

$$D = 10 \log \frac{1}{d} \quad (234)$$

4.1.2 Přenosový útlum

Přenosový útlum je veličina, která charakterizuje materiály z hlediska jejich schopnosti tlumit mechanické vibrace. Je závislý nejen na typu materiálu a jeho tloušťce, struktuře, teplotě a dalších vlastnostech, ale především na frekvenci mechanického kmitání, kdy vztah mezi amplitudou zrychlení na vstupu a výstupu do soustavy je dán vzorcem:

$$D_p = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (24)$$

Kdy právě hodnota D_p nám určuje, jaký ze tří možných případů kmitání nám vzniká.

$D_p < 0$ značí rezonanci.

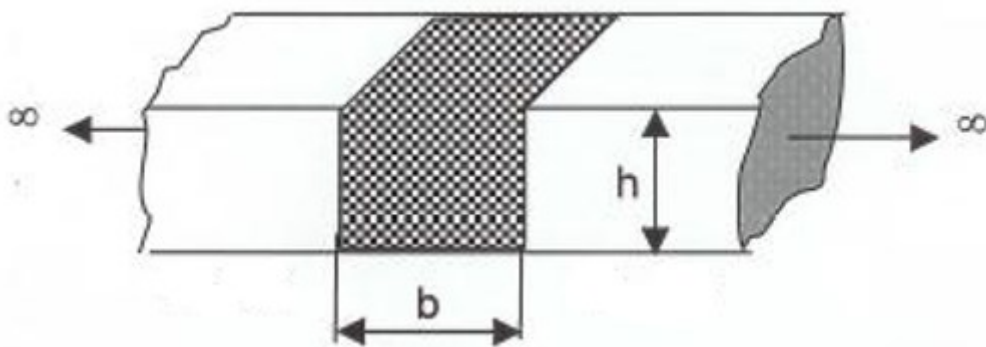
$D_p = 0$ nulový přenos tlumení

$D_p > 0$ tlumení mechanických vibrací

4.1.3 Vložný útlum

Vložný útlum představuje schopnost materiálu tlumit vibrace po jeho vložení do konstrukce. Díky principu odrazu v místě rozhraní lze vypočítat vložný útlum s pomocí vztahů pro impedanci prostředí. Tento obecný vzorec využijeme pro výpočty u kombinací konstrukčních materiálů jako je na obr.14.:

$$D = 10 \log \frac{(Z_1 + Z_2)^2}{4Z_1 Z_2} = 10 \log \frac{1}{d} \quad (25)$$



Obr. 14. Pružná vložka v konstrukci tyče

4.2 Základní principy tlumení

4.2.1 Konstrukční princip

Jedná se o řešení, která využívají konstrukční prvky a jejich výhody spolu s kombinováním materiálů s tlumícími vlastnostmi k posílení tlumícího účinku. Volí se vhodná geometrie, opracování i uložení.

4.2.1.1 Pružné elementy

U hmotných strojů se dříve využívalo k jejich ukotvení mohutných podstavců, kdy základna vyrovnávala stabilitu celého zařízení. V dnešní době je mnohem využívanější variantou využití různých typů pružných podložek s upevňovacími kolíky či klínových podložek.



Obr. 15. Pružné podložky

4.2.1.2 Pružiny

Využití pružin pro absorpci chvění je jeden z nejrozvinutějších způsobů tlumení především díky oblasti automobilového průmyslu, kde byly tyto prvky používány nejdříve. Mohou být nejčastěji šroubovitého tvaru nebo u trapézových listových pružin také v podobě lamel.



Obr. 16. Listová pružina trapézová

4.2.1.3 Pružné vložky

Slouží k prokládání materiálů, které nemají dobré tlumící vlastnosti a díky principu odrazu vlnění na rozhraní materiálů umožňují snížení chvění. Většinou se jedná o porézní materiály, které využívají vnitřních vzduchových výplní k tlumení. Může se jednat i o kompozitní materiály.



Obr. 17. Pružná tlumící vložka

4.2.1.4 Antivibrační tlumiče

Zajímavým řešením tlumení chvění nástrojů nabízí například konstrukční prvek držáku nástroje od výrobce SECO a jejich produktová řada Steadyline, která využívá pasivně dyna-

mický systém pro tlumení vibrací. Tento systém sestává z tlumicí hmoty vyrobené z materiálu s vysokou hustotou (pro minimalizaci rozměrů), který je pomocí radiálních absorpčních prvků uložený uvnitř nástrojového držáku. Tlumič absorbuje vibrace vznikající na pracovní části nástroje a zamezí jejich přenosu do tělesa držáků.



Obr. 18. Tlumicí držáky

4.2.1.5 Vrstvené konstrukce

Pokud nelze zhotovit konstrukce z materiálů, které mají tlumicí vlastnosti, je účinné využít více přídatných vrstev pevně spojených, tedy tlumicí i krycí materiál se spojí lepením v jeden kompaktní celek.

4.2.1.6 Větvené konstrukce

Princip tlumení pomocí větvení konstrukcí vychází z předpokladu, že místo, kde se konstrukční prvek lomí či větví je diskontinuitou, tedy dochází zde k odrazu vln a to se projeví snížením hladiny chvění, protože přenášená energie je tlumena odrazem.

4.2.1.7 Hradící hmoty

Mají význam především u svařovaných strojních konstrukcí, kdy se ke konstrukci připojí hradící hmota. Důležité je zajistit plné spojení, aby tak význam útlumu ohybového kmitání byl co nejvyšší.

4.2.1.8 Antivibrační nátěry

Běžné konstrukční materiály podléhající chvění lze opatřit vrstvou materiálu, který vykazuje lepší vlastnosti tlumící vlastnosti. Tyto fungují na principu zvýšeného činitele vnitřního tlumení, přičemž činitel vnitřního tlumení konstrukce je frekvenčně nezávislý.

4.2.1.9 Antivibrační fólie

Jedná se o alternativu nátěrové hmoty, která využívá nejčastěji vlastností elastomerů k tlumícímu účinku.

4.2.2 Materiálový princip

Využívá vlastností konkrétních materiálů či jejich směsí pro zajištění tlumícího účinku, kdy je zajištěno omezení chvění vlivem tření. Tyto vlastnosti mají především materiály vyznačující se porézností či materiály vláknité, kdy je v obou přítomen vzduch ve vnitřní výplni.

4.2.2.1 PUR pěny

Mají velmi dobrou trvalou elasticitu při vysokém zatížení. Jsou odolné proti mechanickému namáhání a mají dobré izolační vlastnosti. Kromě nízké hmotnosti umožňují tvarovou variabilitu.



Obr. 19. Sortiment PUR pěnových podložek

4.2.2.2 Kompozitní materiály

Jedná se o vícesložkové materiály, které kombinují vlastnosti jednotlivých komponent, kdy se většinou porézní materiál mísí s vláknitým, čímž se zvýší odolnost a nesníží tlumící účinek. Nebo například dva odlišně pórovité materiály jako v případě kompozitu z kaučuku a korku.



Obr. 20. Kompozitní materiál

4.2.2.3 Pryže, pryžové granuláty

Nejvyužívanější materiál pro jeho všestranné vlastnosti. Vykazuje výraznou odolnost a pevnost. Vyrábí se vulkanizací, dříve z přírodního, dnes již většinou syntetického kaučuku, a velkou výhodou je pružnost tohoto materiálu.



Obr. 21. Tlumící podložka pryžová

4.2.2.4 Tlumící silikonové pasty a gely

Jedná se většinou o silikonové elastomery s vytvrzovací schopností, které mají kromě svých izolačních vlastností vůči vlivům prostředí taktéž i odpovídající tlumící účinek. Využívají se často u elektronických zařízení a v automobilovém průmyslu.

4.2.2.5 Slitiny s tvarovou pamětí

Kromě materiálů plastických lze využít i vlastností šedé litiny, která vykazuje odolnost proti chvění, a proto jsou z ní často odlévány právě základy strojů. Ještě významnější tlumící vliv mají některé slitiny především s obsahem Cu a Mn. Tuto tlumící vlastnost vyvolává přechod při určité teplotě z jedné krystalické struktury do jiné.

PRAKTICKÁ ČÁST

5 HODNOCENÍ TLUMÍCÍCH VLASTNOSTÍ

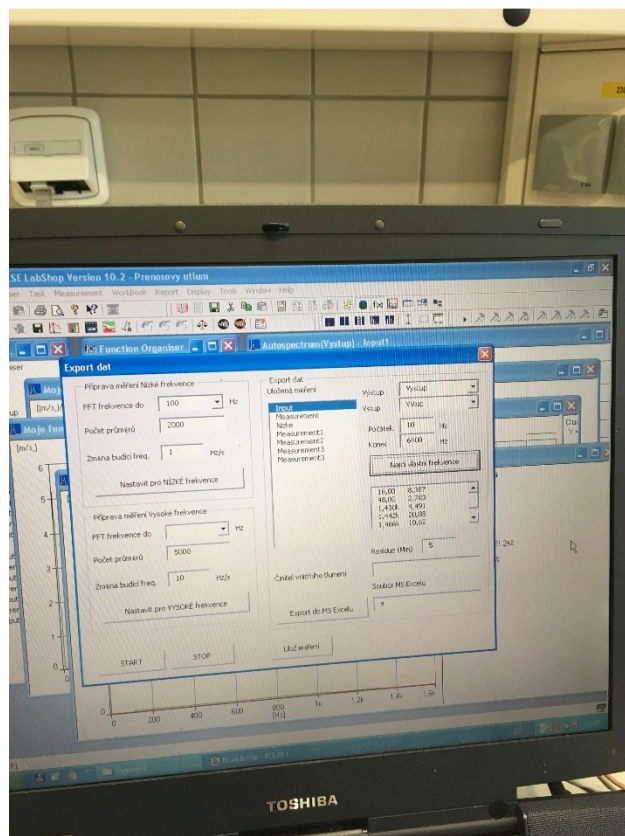
Hodnocení tlumících vlastností bylo provedeno na základě měření veličiny přenosového útlumu u vybraných materiálů a jejich kombinací. Pro měření přenosového útlumu byla využita metoda nucených kmitů, která bude podrobněji vysvětlena dle obrázku 25. Tento způsob měření byl prováděn pomocí měřicího zařízení společnosti Brüel & Kjær a Tato měřicí sestava se skládá z vibračního zařízení BK 4810, analyzátoru typu BK 3560-B-030 (obr. 22) a nezbytného zesilovače BK 2706 (obr. 23).



Obr. 22. Analyzátor BK 3560-B-030

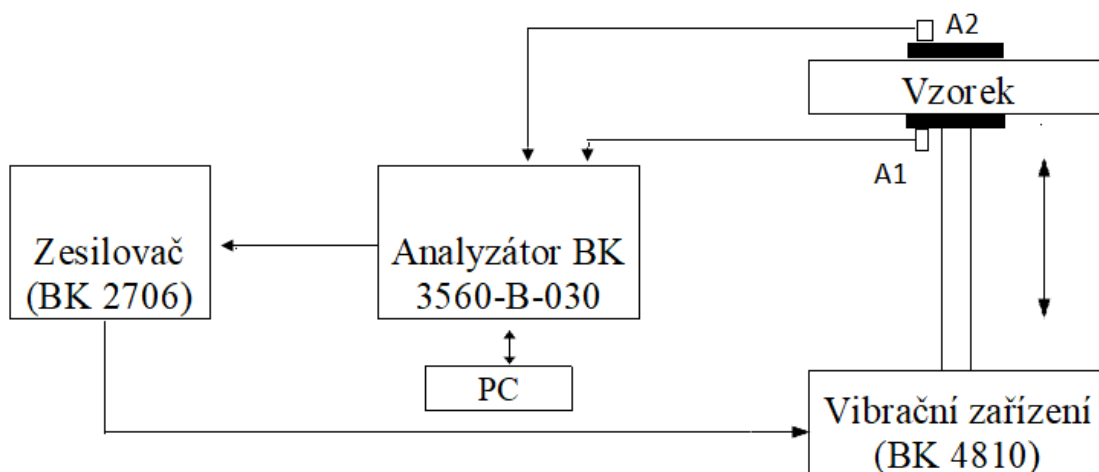


Obr. 23. Zesilovač BK2706



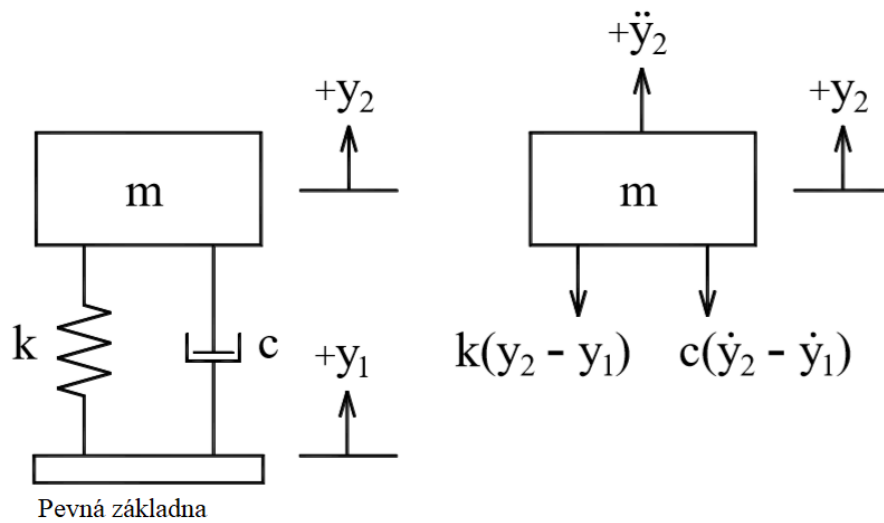
Obr. 24. Program měření přenosového útlumu

Zařízení je propojeno s počítačem pro zápis jednotlivých dat a jejich následné vyhodnocení propojeno s počítačem. Schematický náčrt měřicí sestavy je na obr. 24. Počítačové výstupy k jednotlivým měřeným vzorkům se ukládají do souborů, z kterých se následně exportují do formátu souborů excel.



Obr. 25. Schéma měřicí sestavy

Praktický postup měření započal nastavením požadované frekvence v rozsahu 0-1600 Hz, který se zadával pro každý jednotlivý vzorek. Vzorky různorodých materiálů, ve shodném rozměru 60x60 mm, ale s rozdílnou tloušťkou, se bezpečně uchytily mezi dva ocelové přípravky čtvercového průřezu se středovým šroubem. Tento šroub sloužil k ukotvení vzorku do bezpečné polohy vibračního zařízení. Pro lepší zajištění měřeného materiálu byla použita oboustranná adhesivní páska. Dva snímače, A1 a A2 kruhového průřezu o poloměru 15 mm, se přiložily magnetem k horní a dolní straně desky. Při každém měření se muselo dbát zvýšené pozornosti, aby se tyto dva snímače nezaměňovaly, aby se tak zabránilo nepřesnosti v měření. Pro optimální průběh měření se snímače umísťovaly tak, aby byla dodržena souosost. První měření probíhalo bez navýšené setrvačné zátěže. Při druhém měření se již použila přídatná setrvačná zátěž v podobě kruhových ocelových desek s výřezem pro ustavující šroub i senzory A1 a A2 dle obr. 25. Tato setrvačná zátěž se zajistila našroubováním kruhové desky o poloměru 35 mm. Celková váha setrvačné zátěže tak činila 500 g,. Váha bez této zátěže odpovídá měrnému zatížení 23,6 g/cm³.



Obr. 26 Model tělesa s jedním stupněm volnosti (4)

Metoda výpočtu měření pro model soustavy s jedním stupněm volnosti při harmonickém kmitání je patrná z obrázku 25. Výchylka y_1 pevné části soustavy je vyjádřena z:

$$y_1 = y_0 \sin(\omega t) = y_{01} \sin(2\pi f t), \quad (26)$$

Kde:

y_{01} [m] - výchylka kmitající soustavy

ω [rads⁻¹] – úhlová rychlost kmitání

t [s] - čas

f [Hz] – frekvence soustavy

Zcela shodně pak je vyjádřena výchylka hmoty, tedy vzorku, rovnicí:

$$y_2 = y_{02} \sin(\omega t - \varphi), \quad (27)$$

Kde:

y_{02} [m] – výchylka hmoty vzorku

$\varphi [^\circ]$ - fázový úhel, který jako poměrná veličina vychází z rovnice:

$$\tan\varphi = \frac{m c \omega^3}{k^2 - k m \omega^2 + c^2 \omega^2} \quad (28)$$

Kde:

$m [kg]$ - hmotnost vzorku

$c [N s m^{-1}]$ – součinitel tlumení

$k [N m^{-1}]$ – tuhost pružiny

Pohybovou rovnicí kmitání této soustavy tak vyjádříme následovně (30-32):

$$m \ddot{y}_2 + c(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k(y_2 - y_1) = 0 \quad (29)$$

V uspořádání soustavy s hmotou m v klidu je tedy řešení rovnice (30) dáno poměrem výchylek:

$$\frac{y_{01}}{y_{02}} = \sqrt{\frac{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}{k^2 + (c\omega)^2}}, \quad (30)$$

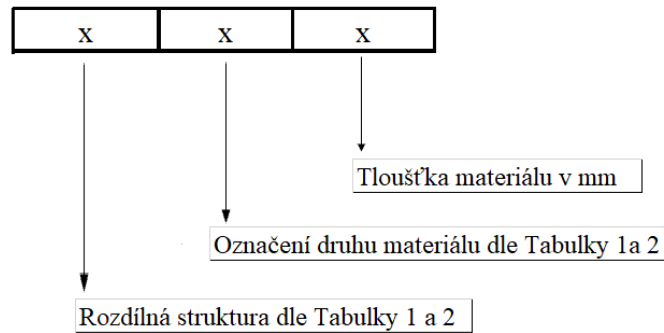
kdy vzorec pro výpočet přenosového útlumu je pak:

$$D_p = 20 \log \frac{y_{01}}{y_{02}} \quad (31)$$



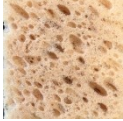


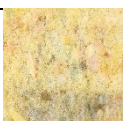
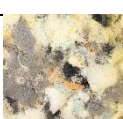
Obr. 27. Vibrační zařízení se setrvačnou zátěží

Pro měření bylo tedy použito 20 druhů základních materiálů rozdílných struktur a složení dle tab.1 a tab. 2. Tloušťka, která není výslovně uváděna u vzorku, tak odpovídá 20 mm. Z důvodu přehlednější orientace v grafech bylo označení vzorku upraveno dle obr. 26. Všechny vyhodnocované vzorky jsou uvažovány se setrvačnou zátěží 85 g.



Obr. 28. Popis náhradního označení



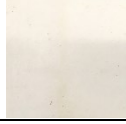

Tab. 1 . Vzorky materiálů

OZNAČENÍ	POPIS VZORKU	HUSTOTA [g/cm ³]	VZOREK
1PUR	PUR pěna velké póry	0,029	
2PUR	PUR pěna střední póry	0,035	
3PUR	PUR pěna malé póry	0,092	
2PURR	PUR recyklovaný střední póry	0,033	
3PURR	PUR recyklovaný malé póry	0,070	

OZNAČENÍ	POPIS VZORKU	HUSTOTA [g/cm ³]	VZOREK
70DSK	Pryž 70DSK	1,229	
30DSK	Pryž 30DSK	1,061	
0DSK	Pryž 0DSK	0,949	
PRYŽ	Pryžová drásanina	0,616	
1PPE	Pěnový PE velké póry	0,032	
2PPE	Pěnový PE střední póry	0,029	
3PPE	Pěnový PE malé póry	0,032	
PET	PET	1,357	
PP	PP	0,904	
PMMA	PMMA	1,178	

Tyto vzorky budou použity u vrstvených materiálů jako jednotlivé vrstvy, základní vrstvu bude vždy tvořit granit.

Tab. 2. Vzorky materiálů

OZNAČENÍ	POPIS VZORKU	HUSTOTA [g/cm^3]	VZOREK
GRA	Granit	2,055	
KOK	Kokosová vlákna vrstvená	0,096	
KOR	Korek	0,290	
ESIL	Expandovaný silikon	0,052	
EPDM	Expandovaný EPDM	0,426	

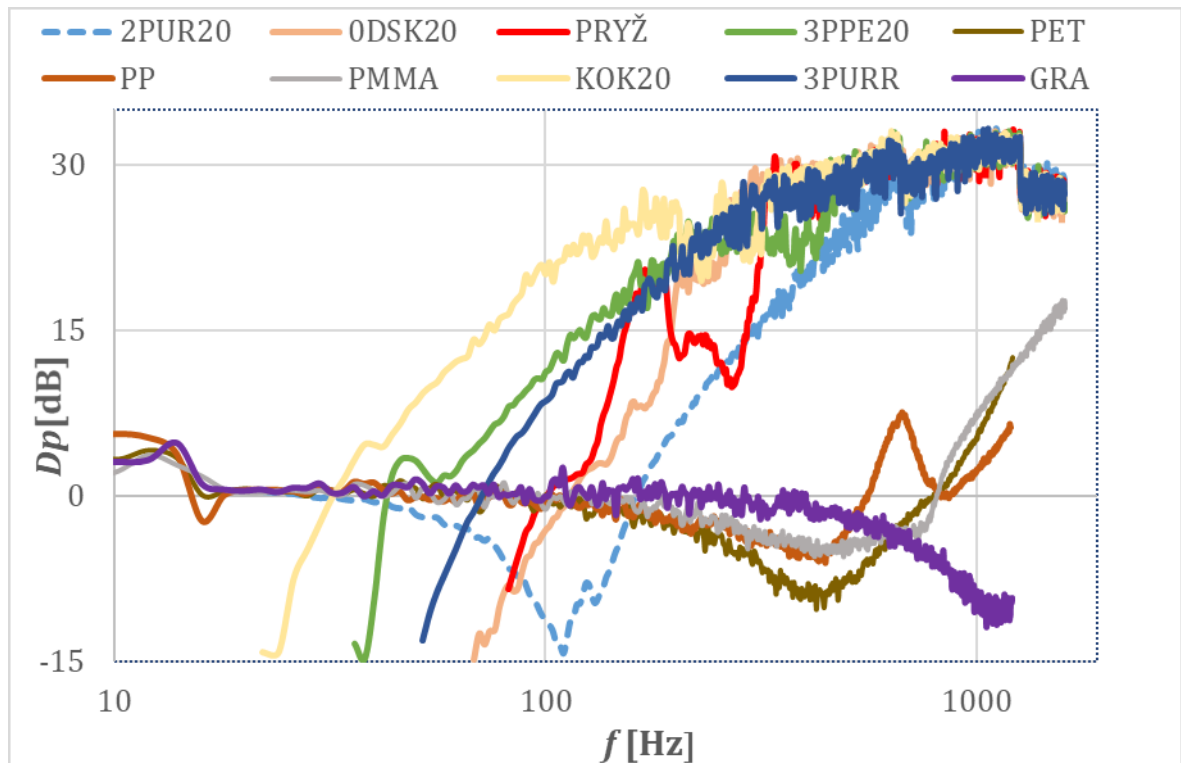
Měření základních vzorků z tabulky a měření vybraných kombinací těchto vzorků, neboť záměrem bylo hodnotit tlumící účinky vrstvených konstrukcí, které mohou v praxi přinést při volbě vhodných kombinací materiálů a počtu vrstev značné výhody nejen v oblasti snížení nákladů u dražších materiálů s kvalitními tlumícími vlastnostmi, ale také v rozšířených možnostech aplikovatelných konstrukčních řešení. . V grafech je, opět pro snadnější orientaci a přehlednost, použito náhradní označení těchto vrstvených vzorků dle tabulky 3.

Tab. 3. Značení vrstvených vzorků

12xxxx +	1xxxx +	12345 +	1xxxx
		3PURR	GRA20
		3PURR30	GRA20
		1PUR30	GRA20
	ESIL10	3PURR	GRA20
	ESIL10	3PURR30	GRA20
	KOR10	KOK20	GRA20
EPDM10	ESIL10	3PURR	GRA20
EPDM10	ESIL10	3PUR30	GRA20
EPDM10	ESIL10	1PUR30	GRA20

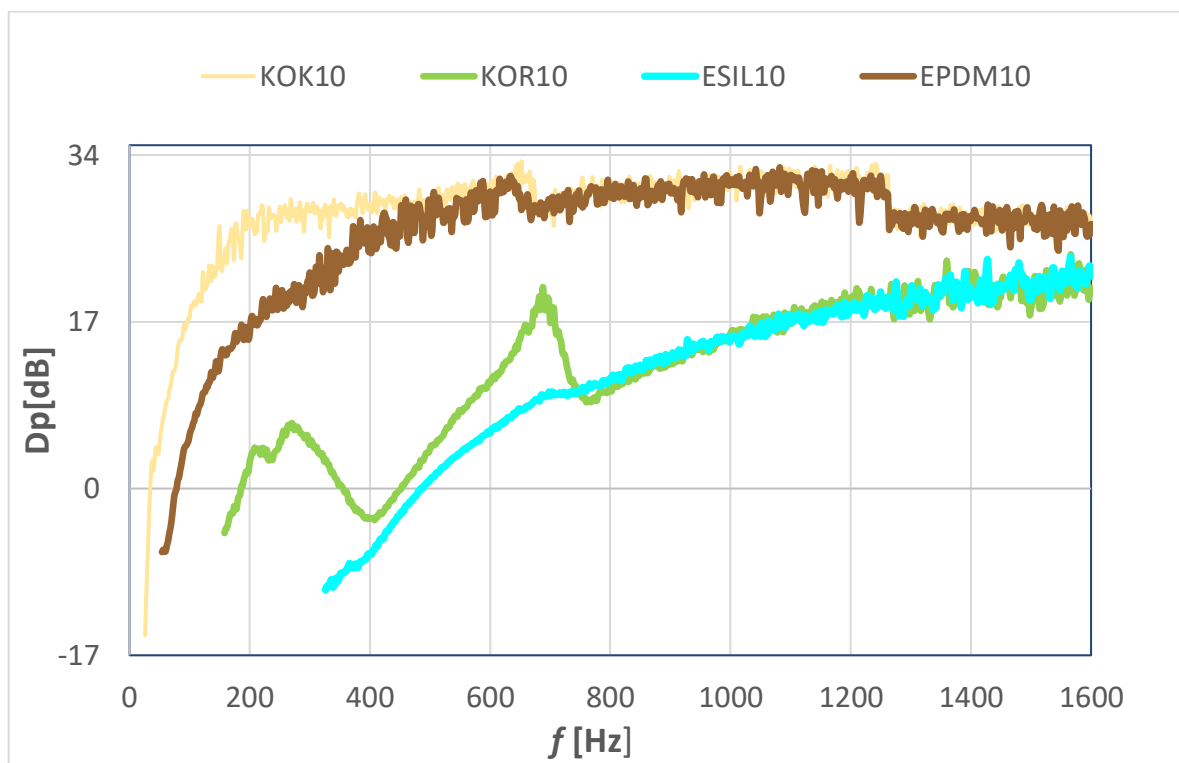
5.1.1 Vliv materiálového složení na tlumící účinky

Z měřených vzorků bylo hodnoceno 8 vzorků se zcela rozdílným složením materiálu, ale shodnou tloušťkou 20 mm a 4 vzorky se shodnou tloušťkou 10 mm. Struktura materiálu v tomto případě nebyla uvažována.



Obr. 29. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle materiálu

Vliv materiálového složení na tlumící účinky je patrný z obr. 27, kde je viditelný značný rozdíl mezi vzorky granitu, který pouze rezonuje, a pryžemi 30DSK a 0DSK či polyuretany, které vykazují dobré tlumící vlastnosti již při nízkých frekvencích. Zajímavé hodnoty se projevily u vzorku vrstvených kokosových vláken, kde dochází již od frekvence 20 Hz k tlumení. U tohoto přírodního materiálu jsou vlákna lisována do vrstev a jako pojídlo slouží silikon, kdy je zachována velká pórovitost. Tento materiál má však nevýhodu v velmi nízké pevnosti. Jeho tlumící vlastnost by však plně vyhovovala pro použití u akvaristických filtrů, kdy se často používá jako filtrační médium. Nejlepší tlumící vlastnosti má vzorek pěnového polyetyleny s hrubou strukturou. Frekvenční rozsah přenosového útlumu u těchto vzorků se tedy pohyboval od 20 Hz do 1114 Hz. Podrobné hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.



Obr. 30. Vliv materiálu – předpoklad tlumících vlastností

U následujících vzorků šlo především o srovnání přírodních materiálů s materiály průmyslovými. Opět kokosové vlákno i při menší vrstvě tlumí již od frekvence nad 26 Hz

5.1.2 Vliv frekvence na přenosový útlum

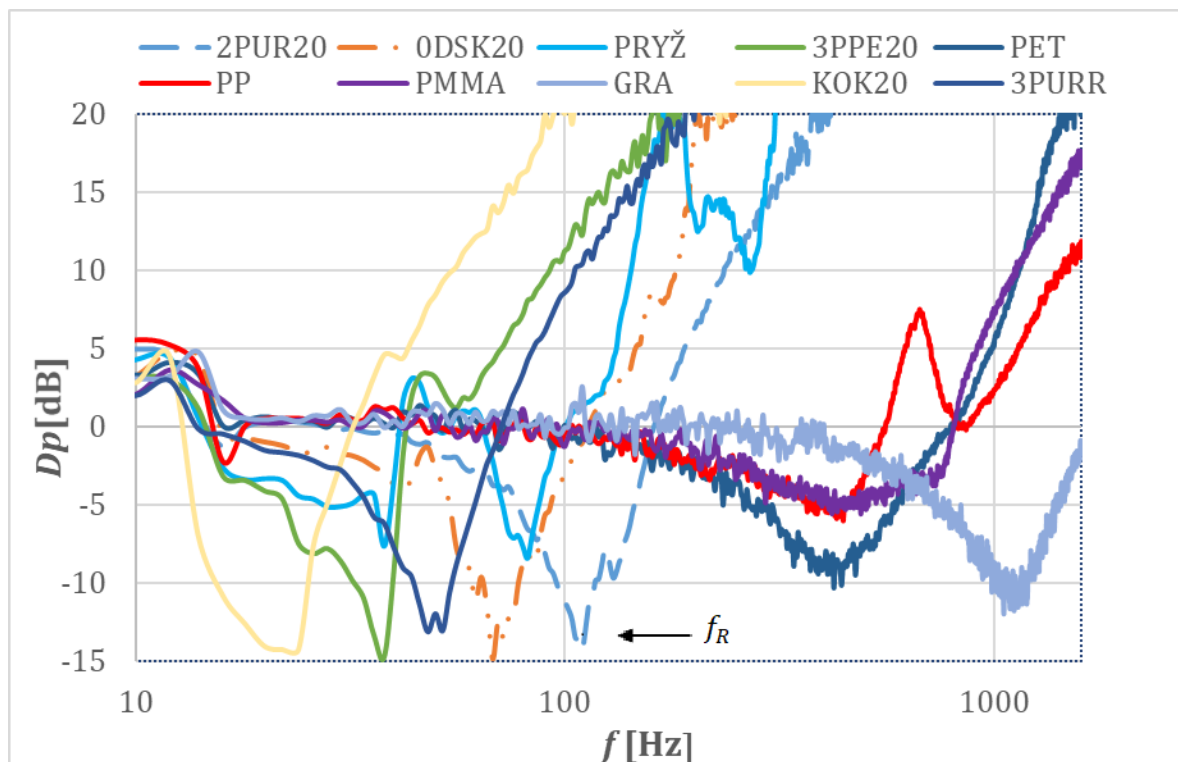
U pružinového systému při harmonickém kmitání výpočet vlastní netlumené úhlové frekvence soustavy vyplývá z obecného vzorce

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (33)$$

Zde tedy bude doplněno na:

$$\omega_d = 2\pi f_R = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} = \sqrt{\frac{k(1 - \xi^2)}{m}} \quad (34)$$

Kde ξ je tlumicí poměr a f_R frekvence rezonance.



Obr. 31. Rezonanční frekvence f_R a její vztah k D_{min}

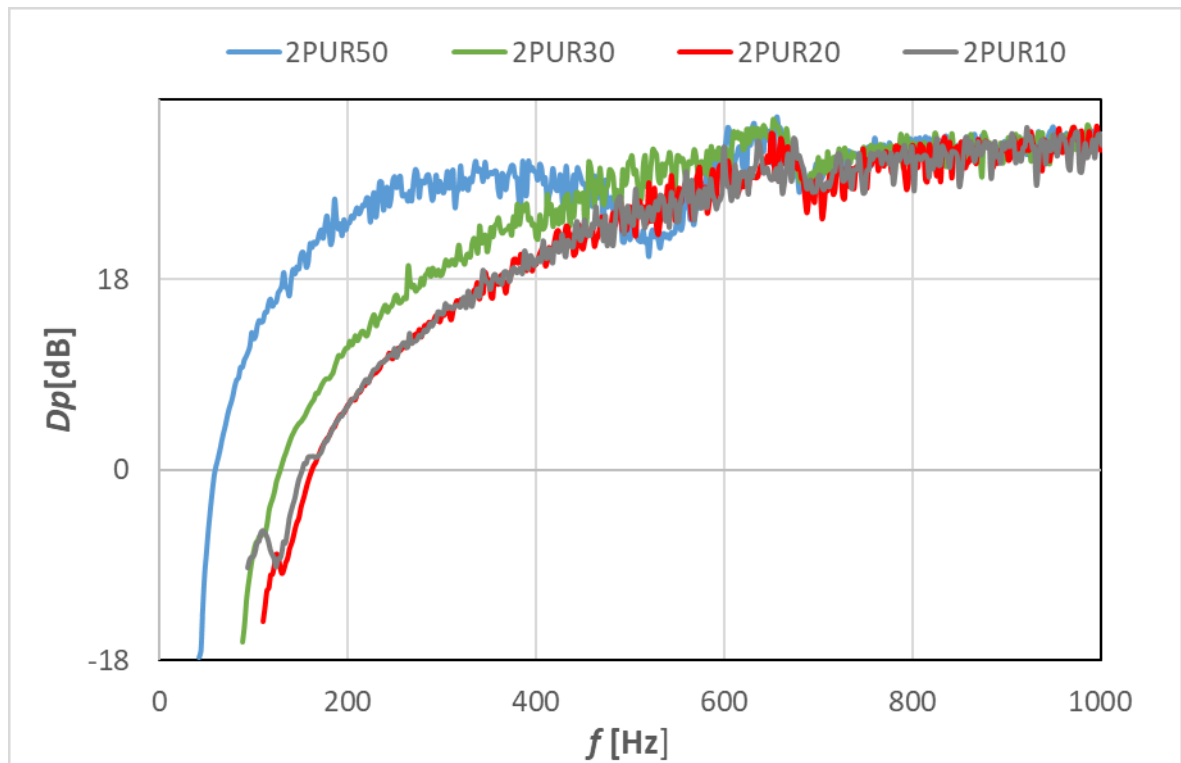
Velmi odolné a tvrdé materiály rezonují, což je nebezpečné zejména u nosných konstrukcí, kdy se chvění přenáší do dalších částí a může dojít k porušení celistvosti. Je patrné, že všechny pružné a pórovité materiály rezonují při nižších frekvencích a přenosový útlum nabývá vyšších hodnot, tak jak vyplývá z tab. 4. a obr.30.

Tab. 4. Naměřené hodnoty přenosového útlumu ve vztahu k frekvenci

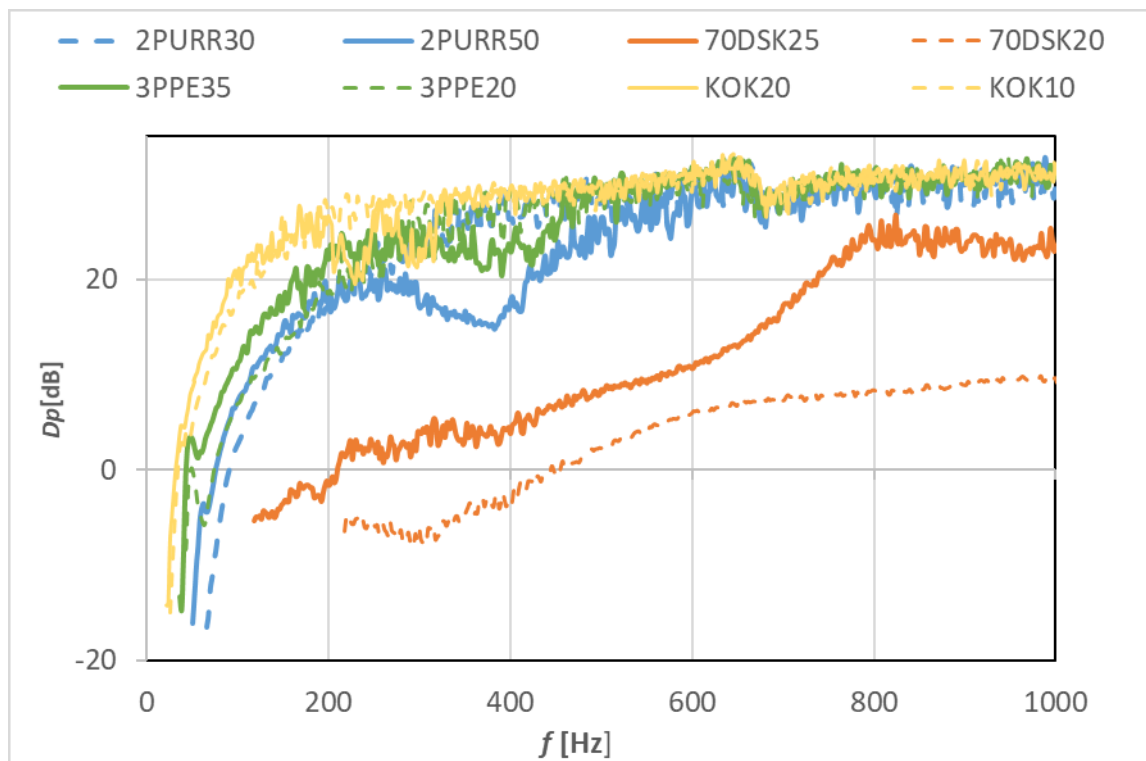
Vzorek	D_{min}	f_{min}	D_{max}	f_{max}
KOK20	-14,2302	22	33,01498	634
3PPE20	-13,3708	36	32,98204	1188
3PURR	-13,0799	52	33,22726	1064
ODSK20	-14,8885	68	33,00533	1104
PRYŽ	-8,43887	82	33,14835	1216
2PUR20	-14,2549	110	33,45044	1114
30DSK20	-10,4743	162	33,53027	1194
70DSK20	-6,46631	218	33,00533	1104
ESIL10	-10,3383	326	23,5529	1566
PET	-10,2717	424	22,68745	1580
PP	-6,05408	446	11,89255	1600
PMMA	-5,57251	490	17,69327	1576
GRA	-11,7326	1114	4,802484	14
KOR	-4,54029	158	23,84427	1560
EPDM10	-6,41215	60	32,74421	1082

5.1.3 Vliv tloušťky materiálu na tlumící účinky

Vliv tloušťky materiálu, který se měřil u 4 vzorků PUR je výraznější pouze mezi vzorky 50 mm a 10 mm. Rozdíly jsou sice viditelné, ale pro praktické použití, můžeme říct, že tento vliv nabývá významu pouze mezi většími rozdíly v tloušťce, tak jak je patrné z obrázku 31.



Obr. 32. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle tloušťky materiálu u PUR střední pórovitosti

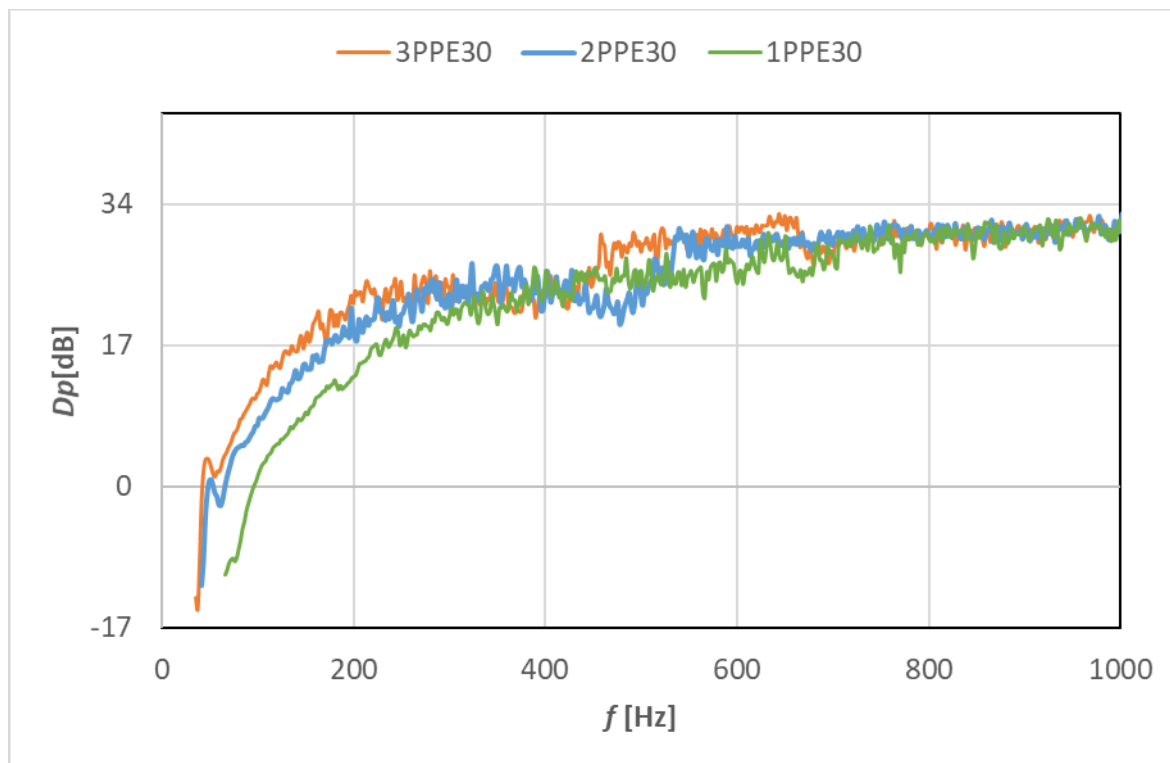


Obr. 33. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle tloušťky u tvrdého materiálu

U ostatních materiálů byl rozdíl zejména u pryže 70DSK, kde pouhý rozdíl 5 centimetrů měl vykazoval lepší tlumící hodnoty již od frekvence 200 Hz. Nízký účinek však koresponduje s materiálem, oproti pórovitým materiálům jako je polyuretan nebo polyetyleny. Z hlediska tlumících vlastností je u pevných materiálů, jako je pryž, nevýhodou jejich váha a především cena. Takže s ohledem na jejich použití v praxi není příliš zajímavé navyšovat tloušťku materiálu z důvodu lepších tlumících vlastností.

U materiálu pěnového polyetyleny největší struktury pórovitosti a největší tloušťky 35mm se hodnoty přenosového útlumu blížily hodnotám polyuretanu střední pórovitosti s menší tloušťkou 30 mm.

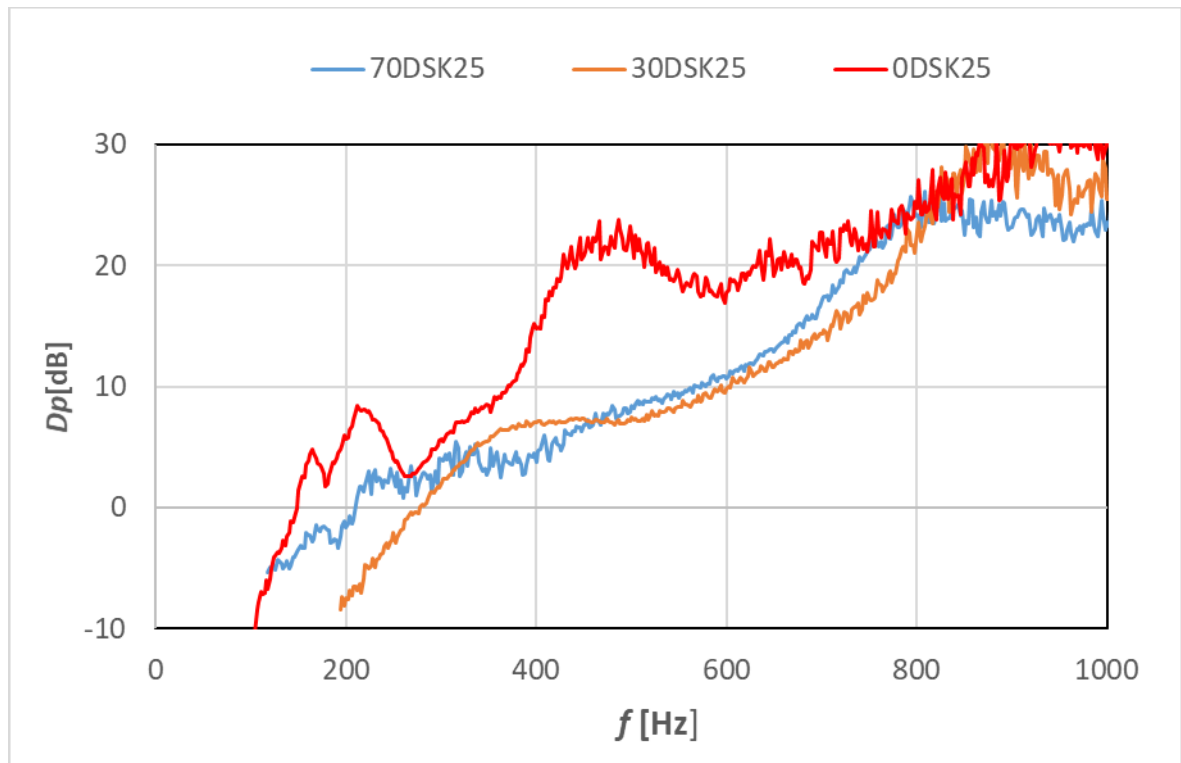
5.1.4 Vliv struktury materiálu na tlumící účinky



Obr. 34. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle rozdílné struktury

U několika materiálů byla i rozdílná struktura. Pórovitost byla rozdělena na tři skupiny, malé póry, velké póry a střední. Dle obr. 33 vyplývá, že pórovitost má jednoznačný vliv na tlumící účinky, jak se prokazuje u materiálu pěnového polyetyleny, kde je patrný i zvětšující se rozdíl mezi nejmenšími póry a vzorky se větší pórovitostí. Při stejné tloušťce 30 mm je u větších pórů rozdíl ve frekvenci 20 Hz. Praktické využití polyetyleny s velkou pórovitostí však značně omezuje jeho křehkost, kdy při takovéto velikosti pórů není už zdaleka natolik odolný poškození jako PUR. Jeho výhodou však může být jeho nízká váha, kdy opět nezatíží konstrukce. Z tohoto tedy vyplývá, že struktura materiálu se významně podílí na jeho tlumících vlastnostech.

5.1.5 Vliv hustoty materiálu na tlumící účinky



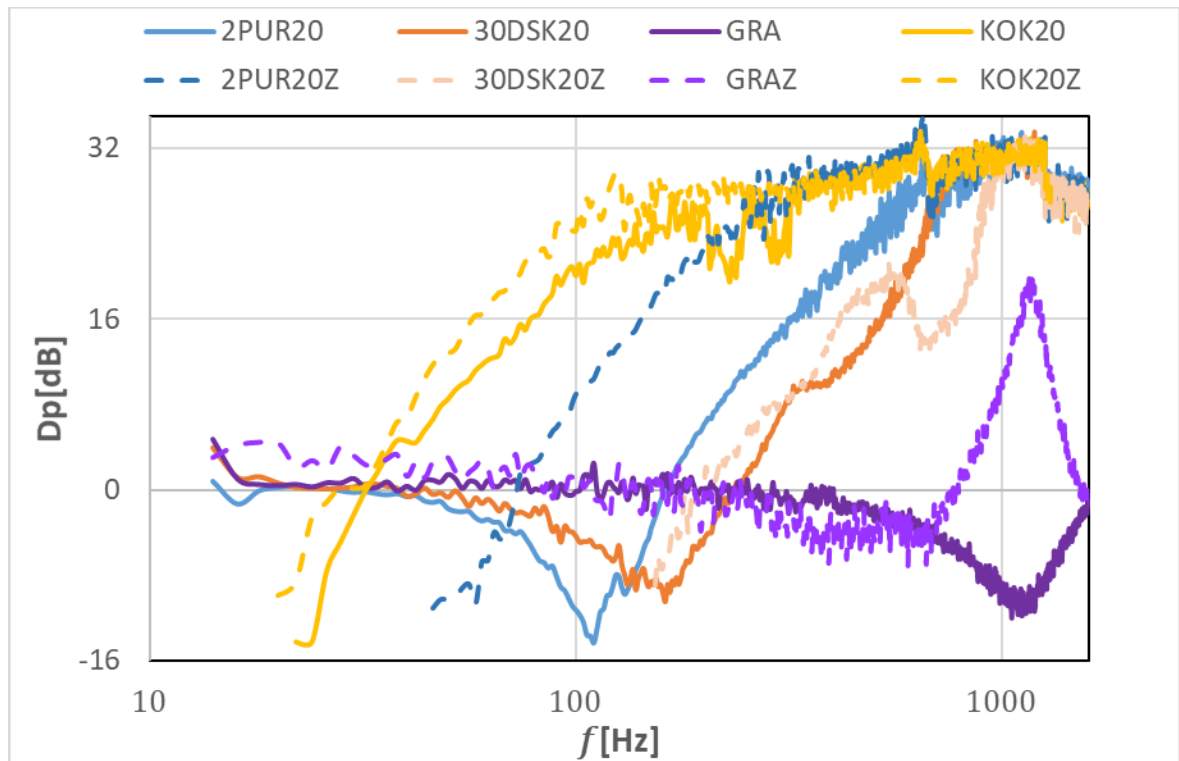
Obr. 35. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle hustoty.

Měřeny byly tři pryže, které vykazovaly rozdíly již na první pohled odlišným odstínem zabarvení. U těchto tří vzorků se lišily koncentrace nekaučukových příměsí, které jsou přesně specifikovány dle tab.5. Vliv rozdílné hustoty byl u vzorků velmi výrazný. Pryž s nejnižším podílem příměsí jednoznačně převýšila svojí tlumící kvalitou, a to již kolem frekvencí do 200 Hz, kde hodnota útlumu dosahovala nad 5 dB. Pryže ovšem celkově patří k využívaným materiálům pro účely tlumení. Jejich nevýhodou však je jejich hmotnost a pochopitelně cena, proto se používají pouze pro určité aplikace například v automobilovém či leteckém průmyslu.

Tab. 5. Materiálové složení vzorků pryží

Směs	70DSK	30DSK	0DSK
SBR-1500	100	100	100
Saze N 320	70	30	0
ZnO	3	3	3
Stearin	1	1	1
TBBS	1	1	1
Sira	1,75	1,75	1,75
Celkem	176,75	136,75	106,75
Hustota	136,75	1,061	0,9535

5.1.6 Vliv zátěže na tlumící účinky



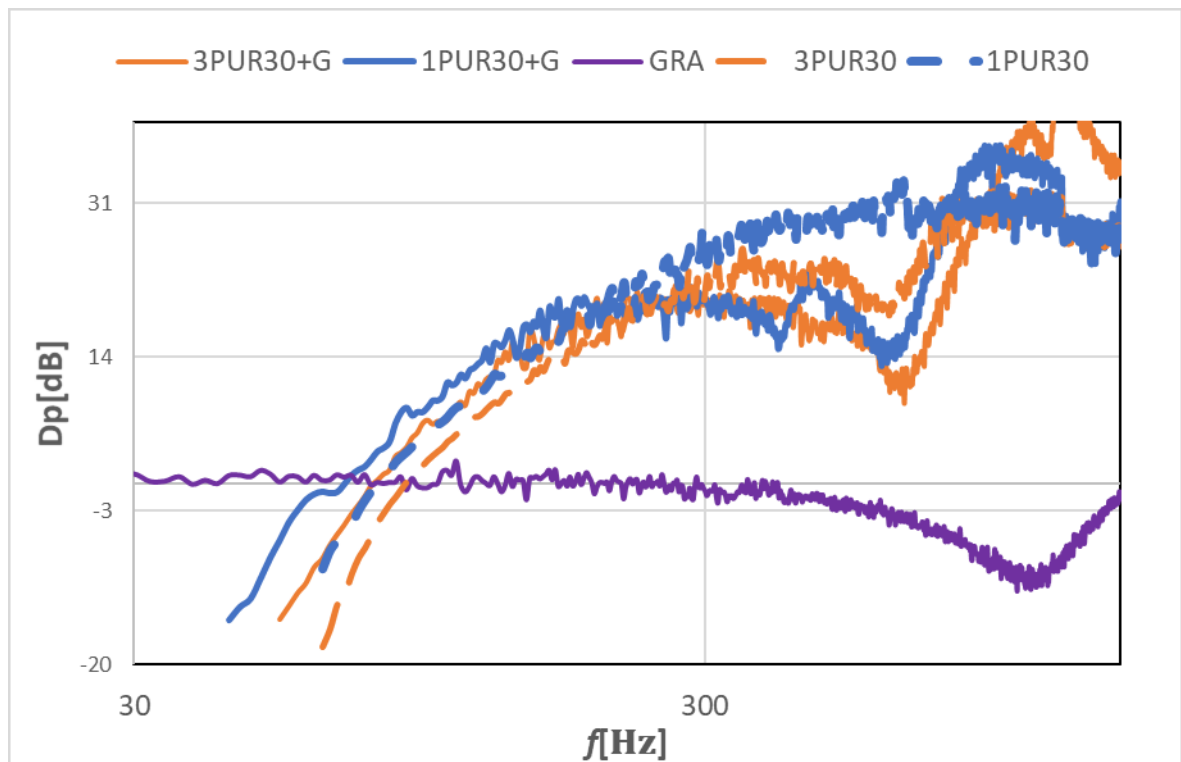
Obr. 36. Rozdíl frekvenční závislost přenosového útlumu dle zatížení

Vybrané vzorky různých vlastností byly zatíženy přídatnou setrvačnou zátěží, jak bylo vysvětleno v postupu měření. Váha celkového zatížení tedy byla 500 g. Tento vliv byl patrný především u materiálů pohlcujících chvění, kde byl rozdíl. Granit naproti tomu v nezátíženém stavu pouze rezonoval. Při zatížení tlumil jen od při vysokých frekvencích.

5.1.7 Vliv vrstvení materiálu na tlumicí účinky

Pro vrstvení materiálu byly použity především materiály, u kterých je předpoklad tlumících vlastností v kombinaci s granitem, jako základnou, která vykazuje .

5.1.7.1 Dvouvrstvé konstrukce

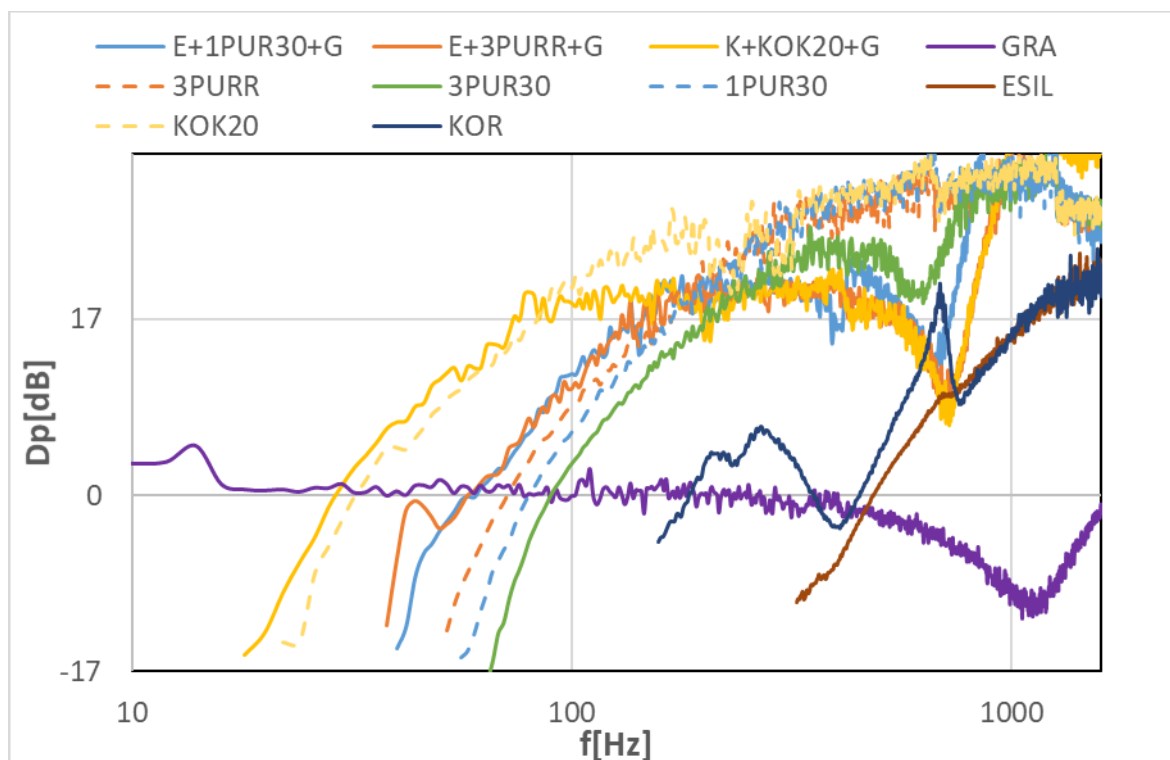


Obr. 37. Frekvenční závislost přenosového útlumu u dvouvrstvých konstrukcí

U dvouvrstvé kombinace strukturně rozdílných vzorků PUR ve spojení s granitem je viditelný vliv pórovitosti, kdy oba materiály tlumí. Hodnota narůstala od 80 Hz. Při frekvenci 300 Hz to již bylo o 20 dB. Hodnoty u samostatných materiálů vykazovaly dobré tlumicí vlastnosti, kdy v kombinaci s granitem se blížily výsledky k hodnotám samostatného PUR. Dle označení se má jednat o PUR malé pórovitosti, který ovšem, jak bylo prokázáno dle obr. 33, nemůže nabývat vyšších hodnot než materiál s většími póry. Může se tedy jednat o chybu v měření, případně o záměnu označení vzorku. Rozdílnost materiálu u nerecyklovaného PUR je nepravděpodobná.

5.1.7.2 Třívrstvé konstrukce

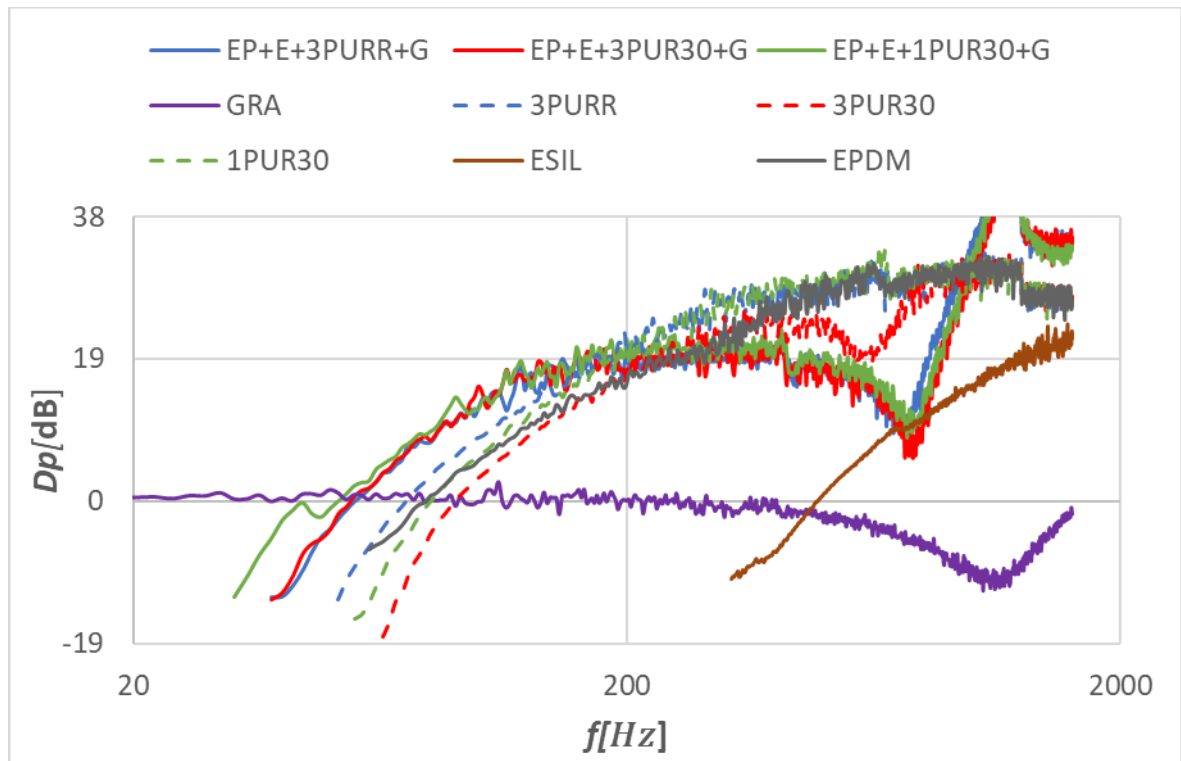
Pro tuto skupinu vzorků byly použity předchozí kombinace PUR a granit s přidáním vrstvy expandovaného silikonu, který ovšem běžně neslouží jako tlumící materiál. Jeho vlastnost tlumení vyniká až při vyšších frekvencích. Třetí vzorek kokosových vláken v kombinaci s korkem, který vykazoval tlumící účinky také až od vyšších frekvencí. Všechny svrchní vrstvy byly pouze v tloušťce 10 mm.



Obr. 38. Frekvenční závislost přenosového útlumu u třívrstvých konstrukcí

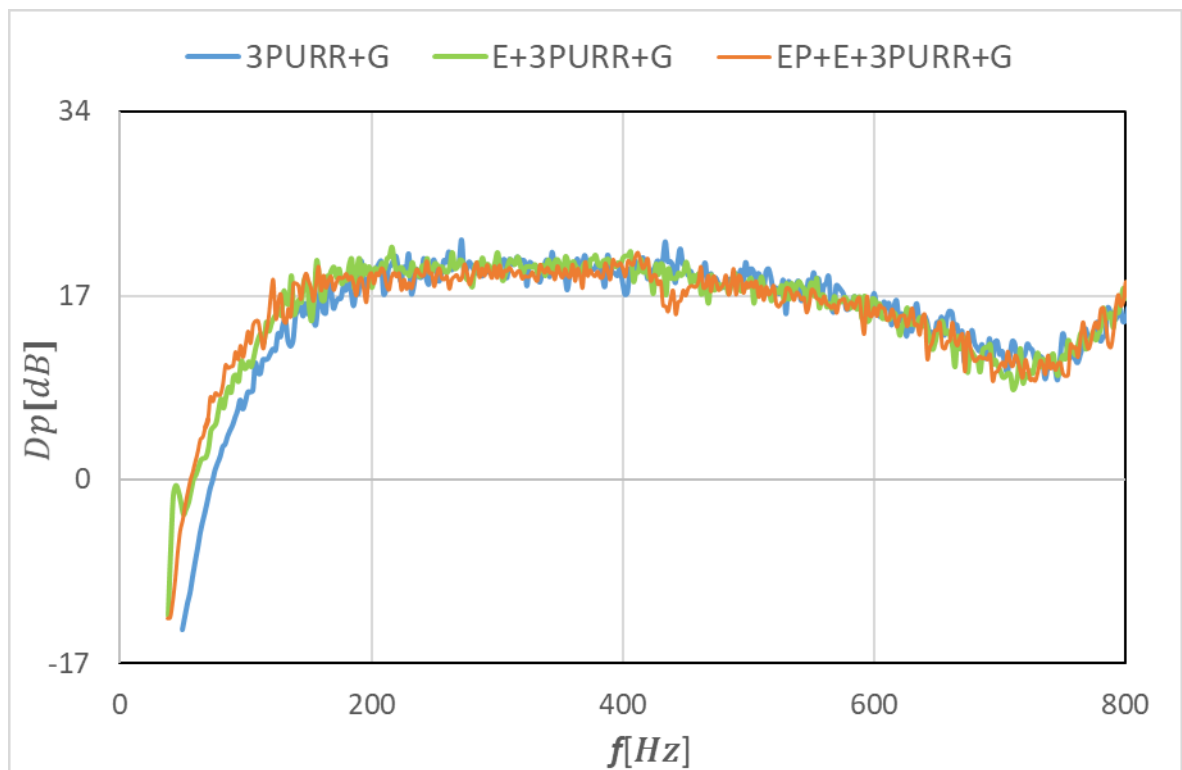
Od frekvence 32 Hz začala kokosová vlákna tlumit, opět se prokázalo, že v kombinaci se hodnoty zvyšují. U vzorku PUR byly hodnoty v kombinaci materiálu velmi shodné. Při frekvenci nad 80 se kombinace kokosu začala lišit od samostatných vláken, kdy ty tlumily až do hodnoty nad 30 dB. Tlumící účinky PUR se opět potvrdily, PUR je vrchní pevnou vrstvou chráněn před zanesením pórů případně před nasákavostí z prostředí, což může být vhodné pro aplikaci do prašného prostředí.

5.1.7.3 Čtyřvrstvé konstrukce



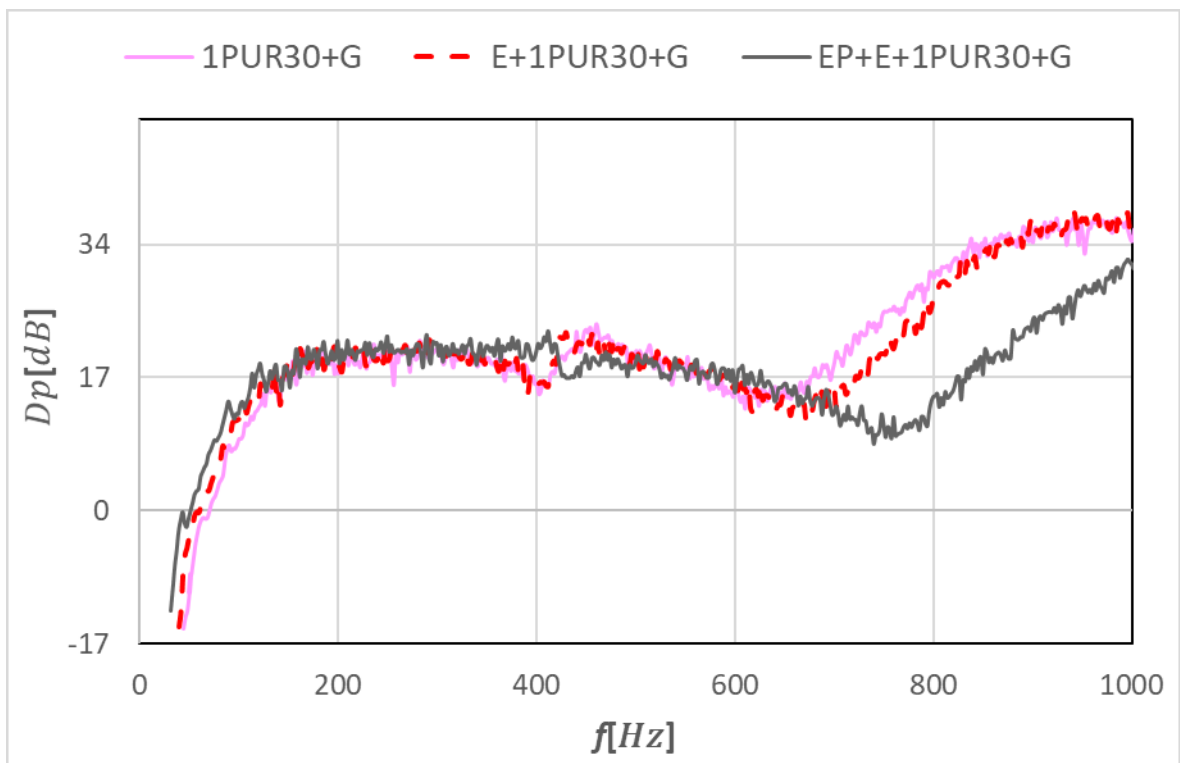
Obr. 39. Frekvenční závislost přenosového útlumu u čtyřvrstvých konstrukcí

U této kombinace materiálu byla přidána vrstva 10 mm materiálu EPDM, který vykazuje obecně dobré tlumicí vlastnosti. Recyklovaný PUR tlumil ze všech použitých PUR nejlépe. Rozdíl mezi PUR a vícevrstvou kombinací začínal již u frekvence 52 Hz. Opět se potvrdilo, že i granit, který by rezonoval, vykazuje v kombinaci s PUR a dalším materiálem také tlumicí vlastnosti.



Obr. 40. Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiál recyklovaný PUR ve vrstvené kombinaci

Při srovnání těchto materiálových kombinací bylo patrné, že při nižších frekvencích je hodnota útlumu u čtyřvrstvého vzorku nejvyšší. V rozsahu 18 až 54 Hz nabývají kladných hodnot, které narostou až o 17 dB do výše frekvence 200 Hz.



Obr. 41. Frekvenční závislost přenosového útlumu u materiálu 1PUR30 ve vrstvené kombinaci

Pro jednovrstvou konstrukci s materiálem PUR30 jemné pórovitosti, hodnota frekvence tlumícího účinku se pohybovala od 42 Hz. Je jednoznačné, že kombinace materiálu má dobré tlumící vlastnosti i v případě, že obsahuje netlumící prvek.

ZÁVĚR

V úvodu práce bylo zmíněno, že dnešním trendem je neustálé snižování nákladů, zvyšování výkonosti a hledání takových konstrukčních řešení, která by umožnila smysluplnou úsporu v rámci bezpečnosti. Tuto snahu tedy podpoří i vhodně zvolené tlumící materiály, protože mechanické chvění, jak bylo popsáno v teoretické části této práce, představuje významný problém zasahující do mnoha oblastí. Pomineme-li, zdraví škodlivé či přímo nebezpečné vlivy působení na člověka a jeho zdraví, je nutné mít jasnou představu o konstrukčních dopadech. Zvláště pak u materiálů vykazujících nízké tlumící vlastnosti či přímo tendenci k rezonanci. Tento případ byl přímo předmětem měření.

Díky tomu, že je možno přesně měřit hodnoty chvění, jak bylo aplikováno v praktické části, jsou tak známy jeho účinky a dopady. Tím tedy jsou známa i patřičná opatření k jejich regulaci. Vhodně zvolené materiály či jejich kombinace jsou jedním z nich.

Z provedeného měření vyplývá, že na schopnost materiálu tlumit chvění, má vliv také zatížení. Tlumící charakter a odolnost při zatížení jsou tedy dvě zásadní podmínky, které by měl tlumící materiál splňovat, pokud má být využitelný pro různé aplikace. Materiál kokosových vláken, který vykazoval nejlepší tlumící charakter, tuto podmínku dlouhodobě nespĺňuje, přestože své uplatnění nachází. Naopak recyklovaný PUR i přes značnou pórovitost je pružným materiálem, a tedy při vhodném zatížení se jeho tlumící účinek zvyšuje. Avšak nejlepších výsledků bylo dosaženo při kombinování více druhů materiálu, kdy ty se sklony k rezonanci nabyly tlumících vlastností právě od materiálů jako je polyuretan, polyetylen a EPDM. A materiály, které nemají takovou odolnost při zatížení, byly podpořeny a chráněny další vrstvou houževnatějšího materiálu než výplňový. Vhodně zvolené kombinace jsou pak již otázkou konkrétní aplikace, pro jaký účel mají být použity.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. **NOVÝ, Richard.** *Hluk a chvění.* Praha : ČVUT, 2000. ISBN978-80-01-06554-9.
2. **LEPIL, Oldřich.** *Mechanické kmitání a chvění.* Olomouc : MŠMT, 2012. ISBN 978-80244-3295-3.
3. **VLACHOVÁ, Magda.** *Mechanické kmitání a chvění.* Brno : MŠMT, 2012.
4. **Martin Vašina, Lumír Hružík, Adam Bureček.** Structural damping of mechanical vibration . *Manufacturing technology.* 2016, 6(6):1379-1382 .
5. **SMETANA, Ctirad a kolektiv.** *Hluk a vibrace.* Praha : Sdělovací technika,, 1998. ISBN80-901936-2-5.
6. **VAŇKOVÁ, Marie a kolektiv.** *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí.* Brno : VUT, 1995. ISBN 80-214-0695-X.
7. **SMETANA, Ctirad.** *Měření hluku a chvění.* Praha : SNTL, 1974. ISBN 04-526-74 .

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

D_p [dB]	Přenosový útlum
E_k [J]	Kinetická energie
E_p [J]	Potenciální energie
I_+ [Wm^{-2}]	Intenzita dopadajícího chvění
I_2 [Wm^{-2}]	Intenzita prošlého chvění
L_v [dB]	Hladina rychlosti chvění
Z_m [Nms^{-3}]	Mechanická impedance
Z_s [Nms^{-3}]	Měrná mechanická impedance
c_L [ms^{-1}]	Podélné vlnění
c_M [ms^{-1}]	Rychlost šíření v membráně
f_n [Hz]	Rezonanční kmitočet
u_0 [m]	Akustická amplituda výchylky
y_m [m]	Amplituda výchylky
PUR	Polyuretan
B [Nm^{-1}]	Ohybová tuhost
D [dB]	Vložný útlum
DSK	Koncentrace nekaučukových přísad
E [Nm^{-2}]	Modul pružnosti v tahu
E [J]	Energie
EPDM	Ethylenpropylendienový kaučuk
F [N]	Síla
I [Wm^{-2}]	Intenzita
K [–]	Konstanta upevnění

PE	Polyetylen
PET	Polyetylentereftalát
$PMMA$	Polymethylmethakrylát
PP	Polypropylen
$T[s]$	Perioda vlnění
$a[ms^{-2}]$	Zrychlení
$c[ms^{-1}]$	Rychlost šíření vlnění
$d[-]$	Součinitel přestupu
$f[Hz]$	Kmitočet
$l[m]$	Délka strany
$m[kg]$	Hmotnost
$n[-]$	Libovolné celé číslo
$n, m[-]$	Konstanty nabývající kladných hodnot
$t[s]$	Čas
$v[ms^{-1}]$	Rychlost
$y[m]$	Okamžitá výchylka
$\lambda[m]$	Vlnová délka
$\pi[-]$	Konstanta Ludolfovo číslo
$\rho[kgm^{-2}]$	Hustota
$\sigma[MPa]$	Napětí
$\varphi[^\circ]$	Fázový úhel
$\omega[s^{-1}]$	Úhlová frekvence

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Vliv mechanického chvění v dopravě</i>	11
<i>Obr. 2. Vzduchové bourací kladivo</i>	12
<i>Obr. 3. Pozitivní efekt hudby</i>	13
<i>Obr. 4. Časový diagram kmitavého pohybu (2)</i>	14
<i>Obr. 5. Mechanické oscilátory (2)</i>	15
<i>Obr. 6. Druhy kmitání</i>	18
<i>Obr. 7. Pojmová mapa kmitání</i>	19
<i>Obr. 8. Vlnoplocha v prostoru a rovině (3)</i>	20
<i>Obr. 9. Vlnění na vodní hladině</i>	21
<i>Obr. 10. Huygensův princip (2)</i>	21
<i>Obr. 11. Ohyb vlnění (2)</i>	22
<i>Obr. 12. Rozsah zvuku</i>	23
<i>Obr. 13. Chladního obrazce</i>	27
<i>Obr. 14. Pružná vložka v konstrukci tyče</i>	29
<i>Obr. 15. Pružné podložky</i>	30
<i>Obr. 16. Listová pružina trapézová</i>	31
<i>Obr. 17. Pružná tlumící vložka</i>	31
<i>Obr. 18. Tlumící držáky</i>	32
<i>Obr. 19. Sortiment PUR pěnových podložek</i>	33
<i>Obr. 20. Kompozitní materiál</i>	34
<i>Obr. 21. Tlumící podložka pryžová</i>	34
<i>Obr. 22. Analyzátor BK 3560-B-030</i>	37
<i>Obr. 23. Zesilovač BK2706</i>	38
<i>Obr. 24. Program měření přenosového útlumu</i>	38
<i>Obr. 25. Schéma měřicí sestavy</i>	39
<i>Obr. 26 Model tělesa s jedním stupněm volnosti (4)</i>	40
<i>Obr. 27. Vibrační zařízení se setrvačnou zátěží</i>	42
<i>Obr. 28. Popis náhradního označení</i>	43
<i>Obr. 29. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle materiálu</i>	47
<i>Obr. 30. Vliv materiálu – předpoklad tlumících vlastností</i>	48
<i>Obr. 31. Rezonanční frekvence f_R a její vztah k D_{min}</i>	49

Obr. 32. Frekvenční závislost přenosového útlumu dle tloušťky materiálu u PUR střední pórovitosti.....	51
Obr. 33. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu dle tloušťky u tvrdého materiálu</i>	52
Obr. 34. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu dle rozdílné struktury</i>	53
Obr. 35. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu dle hustoty</i>	54
Obr. 36. Rozdíl frekvenční závislost přenosového útlumu dle zatížení	56
Obr. 37. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu u dvouvrstvých konstrukcí</i>	57
Obr. 38. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu u třívrstvých konstrukcí</i>	58
Obr. 39. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu u čtyřvrstvých konstrukcí</i>	59
Obr. 40. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiál recyklovaný PUR ve vrstvené kombinaci</i>	60
Obr. 41. <i>Frekvenční závislost přenosového útlumu u materiálu IPUR30 ve vrstvené kombinaci</i>	61

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vzorke materiálu</i>	43
<i>Tab. 2. Vzorke materiálu</i>	45
<i>Tab. 3. Značení vrstvených vzorků</i>	46
<i>Tab. 4. Naměřené hodnoty přenosového útlumu ve vztahu k frekvenci</i>	50
<i>Tab. 5. Materiálové složení vzorků pryží</i>	55