

Způsoby snižování mechanického chvění

Martin Chudý

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Martin CHUDÝ

Osobní číslo: T09425

Studijní program: B 3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Téma práce: Způsoby snižování mechanického chvění

Zásady pro vypracování:

- 1. Vypracování řešení týkající se problematiky mechanického chvění**
- 2. Popis možností snižování mechanického chvění**
- 3. U vybraných materiálů proměřit jejich tlumící vlastnosti a vyhodnotit je**
- 4. Citování použité literatury**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

13. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

25. května 2012

Ve Zlíně dne 8. února 2012



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: CHUDÝ MARTIN

Obor: TECH. 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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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 10.5.2012

M. Chudý

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 nevydělečně 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.

(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 vzdělávacího 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 dílo:

(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 přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

V této práci se zabývám mechanickými vibracemi a hlavně boje proti nim. V první části teorie se věnuji základním veličinám ve vibroakustice, tedy hlavně veličinám decibelovým. V druhé části je nastíněna problematika boje proti vibracím. Praktická část je věnována měření přenosového útlumu a různým kombinacím vrstvených konstrukcí.

Klíčová slova: Vibrace, přenosový útlum, decibelové veličiny, pórovitost, pružiny, vrstvenaté konstrukce

ABSTRACT

This work deals with mechanical vibration, and especially to combat them. The first part deals with basic theory in vibroacoustic variables, variables mainly decibels. The second part outlines the problems of anti-vibration. The practical part is devoted to the transmission attenuation measurements and various combinations of layered structures.

Keywords: Vibration transmission attenuation, decibel values, porosity, springs, layered structure

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Vašinovi, Ph. D. za odborné vedení, rady a pomoc při zpracování bakalářské práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 VIBROAKUSTIKA	12
1.1 Vliv chvění na člověka	12
1.1.1 Povolené hodnoty vibrací	12
1.2 Dopad vibrací a hluku na životní prostředí	13
1.3 Dopad vibrací na stroje a pracovní procesy	14
1.4 Využití mechanických kmitů	14
2 ZÁKLADNÍ VELIČINY MECHANICKÉHO KMITÁNÍ.....	15
2.1 Rychlost a zrychlení kmitání	15
2.2 Lineární oscilátor	16
2.3 Kmitočet	17
2.4 Energie kmitajícího bodu lineárního oscilátoru	17
2.5 Další veličiny mechanického kmitání.....	18
2.5.1 Přenosový útlum.....	19
3 ZÁKLADNÍ VELIČINY AKUSTIKY	20
3.1 Zvuk.....	20
3.2 Akustická rychlost.....	20
3.3 Akustický tlak.....	21
3.3.1 Hladina akustického tlaku	21
3.4 Akustický výkon.....	22
3.4.1 Hladina akustického výkonu	22
3.5 Akustická intenzita	22
3.5.1 Hladina intenzity zvuku	23
3.6 Akustické vlnění.....	23
3.7 Vložný útlum	23
3.8 Vlnová délka	23
3.9 Ostatní decibellové veličiny akustiky	24
4 DRUHY VIBRACÍ.....	25
5 ŠÍŘENÍ CHVĚNÍ V TĚLESECH.....	28
5.1 Tyče	28
5.2 Membrány	29
5.3 Desky	29
6 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ MECHANICKÉHO CHVĚNÍ.....	30
6.1 Materiály pohlcující chvění.....	30
6.1.1 Slitiny pohlcující vibrace	31
6.1.2 Silikonové gely.....	31
6.1.3 Polymerní pěny.....	32
6.1.4 Papírová drť.....	32
6.1.5 Pryž, pryžová a gumová drť.....	32

6.1.6	Lehké pórovité kamenivo	32
6.1.7	Pěnový hliník.....	32
6.2	KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY	33
6.2.1	Hradící hmoty.....	33
6.2.2	Pružné vložky	34
6.2.3	Pružiny	35
6.2.4	Pružné elementy	36
6.2.5	Antivibrační tlumiče	37
6.2.6	Vzdušné vaky	37
6.2.7	Kompozitní vrstvené konstrukce.....	38
6.2.8	Skeletové konstrukční systémy	38
6.3	NÁTĚRY SNIŽUJÍCÍ CHVĚNÍ.....	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	39
7	STANOVENÍ PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU	40
7.1	VYHODNOCOVANÉ VZORKY.....	41
7.2	VÝPOČET ZÁKLADNÍCH VELIČIN.....	42
7.3	POROVNÁNÍ TLUMENÍ MECHANICKÉHO KMITÁNÍ U VYBRANÝCH MATERIÁLŮ.....	45
7.4	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PŘENOSOVÝ ÚTLUM	48
7.4.1	Vliv tloušťky materiálu na přenosový útlum	48
7.4.2	Vliv frekvence na přenosový útlum.....	49
7.4.3	Vliv velikosti pórů materiálu na přenosový útlum.....	50
7.4.4	Vliv setrvačné zátěže na přenosový útlum.....	51
7.5	VYUŽITÍ RECYKLOVANÉ PUR PĚNY	52
8	VRSTVENÉ KONSTRUKCE	53
8.1	DVOUVRSTVÉ KONSTRUKCE	53
8.1.1	Sendvičový systém - S + PUR50	54
8.1.2	Sendvičový systém - S + REC	55
8.1.3	Sendvičový systém - S + PRYŽ.....	56
8.1.4	Sendvičový systém - DT + 2PUR50.....	57
8.1.5	Sendvičový systém - DT + REC	58
8.1.6	Sendvičový systém - DT + PUR30	59
8.1.7	Sendvičový systém - DT + PRYŽ.....	60
8.1.8	Sendvičový systém - NEC + REC.....	61
8.1.9	Sendvičový systém - NEC + PUR30.....	62
8.2	TŘÍVRSTVÉ KONSTRUKCE	63
8.2.1	Sendvičový systém - DT + REC + DT	64
8.2.2	Sendvičový systém - S + PUR30 + DT	65
	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
	SEZNAM TABULEK	73

ÚVOD

Předmětem moji práce je shrnout základní metody snižování vibrací. Proměřit a porovnat tlumení mechanických kmitů u vybraných materiálů a vrstevnatých konstrukcí, vyhodnotit faktory ovlivňující přenosový útlum.

Chvění a vibrace jsou jevem běžným u strojů a dopravních prostředků. Mají nepříznivý vliv na pohlcování části energie potřebné na chod stroje. A taky jsou spojené s nežádoucími tepelnými a hlukovými efekty. Na vysoké dynamické síly často nejsou zařízení navrhována a při vystavování konstrukcí vibracím, může dojít k jejich trvalému poškození či kompletnímu zničení zařízení. Mnohem častěji u zařízení vznikající nežádoucí vibrace nevedou k výraznému poškození, ale poškozují geometrickou přesnost výrobku či jakost výroby. Vibrace jsou velmi často také zdrojem vysoké hladiny hluku, což škodí lidem a životnímu prostředí.

Není to tak dávno, kdy lidé tohle řešit nemuseli. Ale s postupnou modernizací a nahrazováním lidské práce stroji, je tato problematika pořád aktuálnější. V mnoha vyspělých státech jsou zavedena hluková kritéria, která se musí dodržovat. Pro eliminaci hluku z dopravy se využívají protihlukové stěny. Aplikace pro metody snižování vibrací jsou docela široké. Záleží hlavně na funkčnosti a využití stroje. Pro snižování chvění se využívají konstrukce pohlcující vibrace či změna materiálu za vhodnější. Důležitá je přesná strojní výroba, aby nevznikaly vůle v uložení strojních součástí, čímž významně snížíme chvění.

Minimalizace nežádoucích mechanických vibrací je bezesporu jedním z významných úkolů při návrhu a realizaci mnoha technických zařízení. A tuto oblast nesmíme zanedbávat. V této době existují metody virtuálního modelování pomocí počítačových simulací. Ale ne vždy se můžeme spolehnout na počítačový software, až praxe ukáže či to tak funguje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VIBROAKUSTIKA

1.1 Vliv chvění na člověka

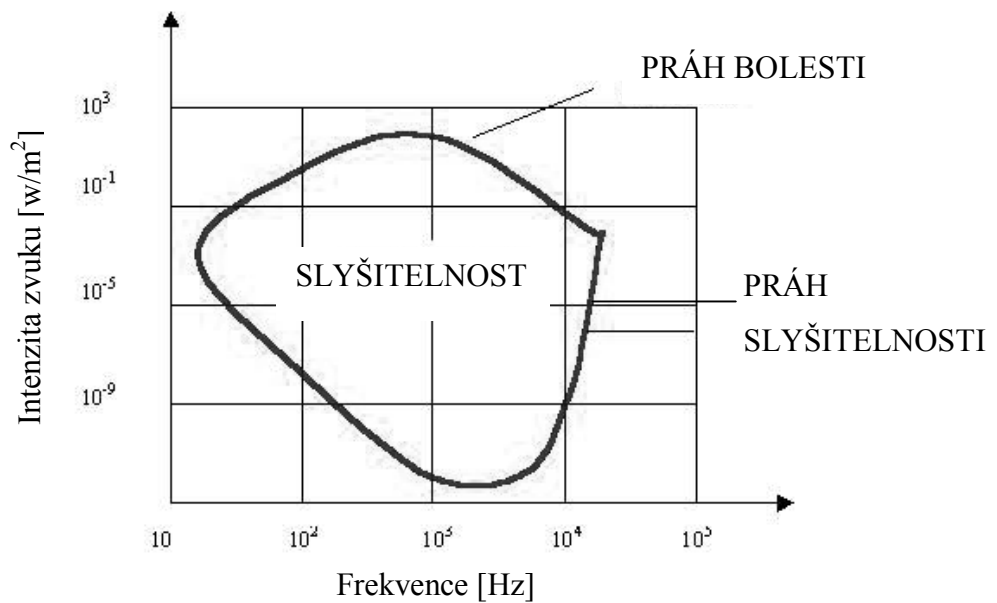
Lidské tělo nemá pro zachycení mechanického kmitání smyslový orgán. Vnímáme ho jako hluk a vibrace. Mechanické kmity na nás působí všude, aniž bychom si to uvědomovali. Mezi takové kmity patří hlavně dopravní a společenský ruch. Nebo na nás může působit místně pomocí pracovního nářadí a strojů.

V závislosti na frekvenci a amplitudě kmitání a na místě působení na tělo člověka mohou vznikat poruchy činnosti některých orgánů a funkčních systémů člověka. Celkové kmity s frekvencí (0,15 - 0,30) Hz ovlivňují vestibulární funkci, což znamená utlumení provázené točením hlavy, žaludečními potížemi, narušováním koordinace pohybů, dezorientací a psychofyzickými iluzemi. Do 1 Hz registrujeme kmity zrakem. Kmity do 10 Hz s vyššími amplitudami vnímáme změnou polohy. Kmity nad 20 Hz zachycujeme sluchem. Působením vibrací na nás dojde k vynucenému kmitání částí lidských těl, což je nežádoucí a snažíme se tomu zamezit.

Doprovodným jevem mechanického kmitání je zvuk. Základním parametrem hluku je jeho intenzita, která se udává v decibelech. Zvuk může působit negativně i na lidské vnímání, což zhoršuje pracovní i morální nasazení pracovníků. Ale vysoká hladina zvuku neznamená vždy vysoký hluk. Každý vnímá okolní zvuky subjektivně a na každého působí jinak. Co je pro někoho na obtíž, pro druhého může být přínosné. Mezi negativní účinky patří hlavně podráždění, poruchy spánku a psychické poruchy. Člověk špatně vnímá jak nízkou hladinu zvuku tak i tu vysokou. Hodnoty nižší než 20 dB, vnímáme jak nepříjemné ticho. Hladina zvuku, která je bezpečná je 80 dB. Pokud je tato mez překročena, musí pracovník nosit chrániče sluchu, jinak by mohlo dojít poškození hlukem. Při překročení hodnoty 120 dB se účinku zvuku stávají bolestivé. Při hladině 160 dB dojde k poškození bubínku sluchového orgánu. [1]

1.1.1 Povolené hodnoty vibrací

Vibrace přenášené na ruce jsou povolené o hodnotách 123 dB (hladina zrychlení) za 8 hodin nebo $1,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ za 8 hodin. Ale další podmínkou je, že při je jich dodržení každodenní činnosti nesmí dojít k poškození a to za dobu 42 roků. Hodnoty 137 dB za 8 hodin nebo $7,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ nelze překročit ani krátkodobě, jelikož i při vystavení menší než 20 minut se může poškodit zdraví. [3]



Obr. 1 Prahové křivky slyšitelnosti

1.2 Dopad vibrací a hluku na životní prostředí

Vysoká hladina hluku a vibrací dopadá také na životní prostředí a život v něm. Patří spolu se znečišťováním k podstatným problematikám, kterým se musíme zabývat. Proto jsou ve vyspělých státech zavedené normy, které nesmíme překročit.

Postupným vývojem civilizace se hluk zvětšuje. Hlavním faktorem je doprava, která pořád narůstá a vyvíjí se, ale také automatizace výroby. I když se jedná o přirozený vývoj lidstva, který nám pomáhá a usnadňuje život, mnohdy si neuvědomuje, že hluk s tímto spojený nám škodí.

ZVUK	HLADINA INTENZITY HLUKU [dB]
Spodní hranice citlivosti lidského ucha	0
Šepot	10
Tichá zahrada	20
Housle	30
Kroky	40
Hluk v kavárně	50
Rozhovor, hluk v obchodě	60
Kvákání žáby	64
Hlasitá řeč	70
Kancelář s mechanickými psacími stroji, křik	80
Rušná ulice, automobilový klakson, motorová vozidla, jedoucí vlak	90
Orchestr, siréna	100
Sbíječka, diskotéka, hlasité obráběcí přístroje	110
Tryskový motor, hrom	120
Práh bolesti	130
Petardy	170

Tab. 1 Hladiny intenzity různých zvuků

Z tabulky vyplývá, že přírodní zvuky jsou pro nás neškodné. Krátkodobé vytavení zvuku o (100 – 110) dB nám moc nevádí, horší to je z dlouhodobého hlediska.

1.3 Dopad vibrací na stroje a pracovní procesy

Hluk sám o sobě strojům nevádí. Negativní vliv na jejich části mají vibrace. Jelikož jsou více namáhané a dříve se opotřebují - celková životnost se snižuje. Účinnost se také nesmí zanedbat. Stroj, který je namáhán kmity, nemůžeme využívat naplno, a tím se nám snižuje produktivita. Dále nám zhoršují pracovní a technologické podmínky, což má za následek zhoršenou jakost povrchu výrobku.

1.4 Využití mechanických kmitů

Chvění nemá jenom negativní účinky. Dá se jich využít pro náš prospěch, ale i zábavu. Ve strojírenském průmyslu jej aplikujeme na vibrační obrábění, na vibrační dopravníky pro dopravu sypkých hmot nebo na vibrační síta pro dělbu materiálu dle velikosti. Ve stavebnictví používáme vibrační válce při tvorbě silnic či vibrační žehličky na chodníky. Zábavný průmysl využívá kmity dlouho ve formě hudebních nástrojů.

2 ZÁKLADNÍ VELIČINY MECHANICKÉHO KMITÁNÍ

2.1 Rychlost a zrychlení kmitání

U kmitavého pohybu hmotného bodu prostředí můžeme v určitém čase určit jeho výchylku z rovnovážné polohy, rychlost či zrychlení.

Rychlost kmitání získáme první derivací okamžité výchylky podle času:

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (1)$$

kde: y [m] - výchylka

v [m/s] - rychlost kmitání

Zrychlení získáme pomocí první derivace rychlosti podle času:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Dle norem je doporučeno používat efektivních hodnot veličin charakterizujících kmitání.

Potom tyto hodnoty určíme dle vztahu:

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} = \frac{y_0}{\sqrt{2}} \cdot \omega \quad (3)$$

$$a_{ef} = \frac{a_0}{\sqrt{2}} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} \cdot \omega \quad (4)$$

Průběh veličin určující mechanické kmitání v čase bývá velmi všeobecný a je obtížné jej fyzikálně charakterizovat. Proto se příslušné veličiny převádí na průběh frekvenční pomocí Fourierových vzorců. Vztahy pro veličiny kmitání se hlavně odvozují pro jednoduché harmonické kmitání. Okamžitou výchylku lze vyjádřit vztahem:

$$y = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

kde: y_0 [m] - amplituda výchylky

ω [s^{-1}] - úhlový kmitočet

τ [s] - čas

φ [°] - fázový úhel

Provedeme-li první derivaci výchylky podle času, dostane pak vyjádření ve tvaru:

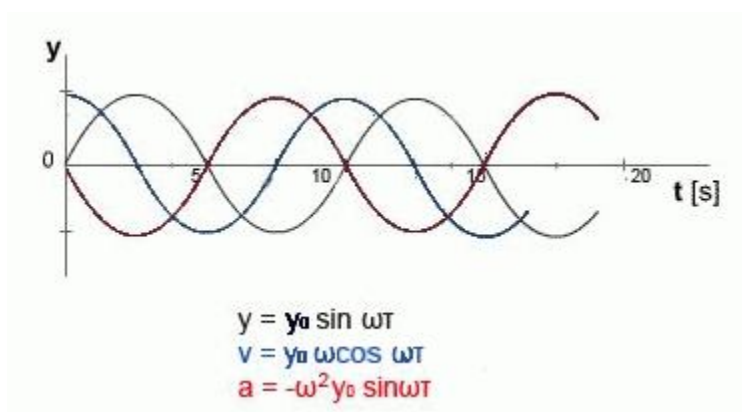
$$v = \omega \cdot y_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

$$a = -\omega^2 \cdot y_0 \cdot \sin \omega t = -\omega^2 \cdot y \quad (7)$$

Pro amplitudu rychlosti v_0 a zrychlení a_0 můžeme psát:

$$v_0 = \omega \cdot y_0 \quad (8)$$

$$a_0 = \omega^2 \cdot y_0 = v_0 \cdot \omega \quad (9)$$

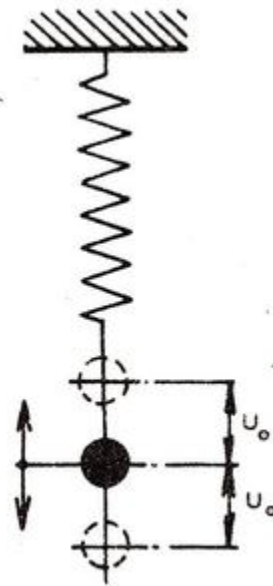


Obr. 2 Vzájemná závislost veličin kmitání, kde $\varphi=0$

Z toho vyplývá, že nepotřebujeme zjišťovat všechny veličiny, jelikož jsou na sobě závislé. Stačí, když určíme jednu, pro nás nejvýhodnější. [2]

2.2 Lineární oscilátor

Jedná se o nejjednodušší oscilátor, pohyb hmotného bodu je periodický a jeho časový průběh lze znázornit sinusovou křivkou dle rovnice 5. Tento vztah je pro netlumený kmitavý systém. Vlivem odporu prostředí a vlastního vnitřního tření dochází ke ztrátám, čímž se amplituda zmenšuje, dokud se oscilátor nezastaví.



Obr. 3 Lineární oscilátor [2]

Jelikož lineární kmitající pohyb hmotného bodu lze vyjádřit jako průmět průvodiče u_0 otáčejícího se konstantní úhlovou rychlostí, tak pro zápis můžeme využít komplexní čísla.

$$\cos\varphi + j\sin\varphi = e^{j\varphi} \quad (10)$$

Dosazením za úhel $\varphi = \omega\tau + \varphi_0$, můžeme okamžitou hodnotu výchylky kmitání vyjádřit jako reálnou či imaginární část. [2]

$$y = y_0 \cdot e^{j(\omega\tau + \varphi_0)} = y_0 \cdot e^{j\varphi_0} e^{j\omega\tau} = y_0 \cdot e^{j\omega\tau} \quad (11)$$

2.3 Kmitočet

Kmitočet neboli frekvence určuje počet kmitů za sekundu, který učiní kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu a frekvencí platí:

$$f = \frac{1}{T} \quad (12)$$

Mezi úhlovým kmitočtem a frekvencí platí:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (13)$$

2.4 Energie kmitajícího bodu lineárního oscilátoru

Celková energie se skládá z energie potenciální E_P a energie pohybové E_k . Jejich součet musí být konstantní dle zákona o zachování energie.

Kinetická energie:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (14)$$

Pro rychlost kmitajícího bodu platí vztah:

$$v = \frac{dy}{dt} = y_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) \quad (15)$$

Součin $u_0 \omega$ lze zaměnit za amplitudu rychlostí kmitání. Po dosazení do vztahu získáme vztah:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot y_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot \tau + \varphi) \quad (16)$$

Potenciální energie:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot y^2 \quad (17)$$

Dosazením za výchylku získáme vztah:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot y \cdot \sin^2(\omega \cdot \tau + \varphi) \quad (18)$$

Součtem obou energií získáme energii celkovou kmitajícího bodu, kde $\omega^2 u_0^2$ je amplituda výchylky. [2]

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \omega^2 \cdot y_0^2 \quad (19)$$

2.5 Další veličiny mechanického kmitání

Šíření chvění pevnými materiály je doprovázeno střídavými změnami napětí σ , které má stejný význam jako akustický tlak při šíření zvuku ve vzduchu. Pomocí něho můžeme vyjádřit intenzitu chvění.

$$I = v \cdot \sigma = v^2 \cdot \rho \cdot c_L \quad (21)$$

Mezi dále využívané decibelové veličiny patří veličiny uvedeny v tab. 2.

VELIČINA	DEFINACE HLADINY	REFERENČNÍ HODNOTA
Zrychlení vibrací	$L_a = 20 \log (a/a_0)$	$a_0 = 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Výchylka vibrací	$L_d = 20 \log (d/d_0)$	$d_0 = 10^{-9} \text{ m}$
Síla	$L_F = 20 \log (F/F_0)$	$F_0 = 10^{-6} \text{ N}$

Tab. 2 Hladinové veličiny mechanického chvění

Kromě hladinových veličin uvedených v tab. 2 se používají ještě další decibelové veličiny, např. ekvivalentní hladina a hladina hlukové expozice. [9]

Při výpočtech šíření akustického signálu v konstrukcích počítáme s důležitou veličinou a to s mechanickou impedancí Z_m , což udává poměr mezi budící silou a rychlostí chvění.

$$Z_m = \frac{F}{v} = \frac{\sigma}{v} \cdot s \quad (22)$$

Mechanická impedance se mění díky průřezu tělesa nebo materiálu. Na změně mechanické impedance jsou závislé útlumy.

Poměr mezi napětím a rychlostí chvění označujeme měrnou mechanickou impedancí.

$$Z_s = \frac{\sigma}{v} \quad (23)$$

Měrná mechanická impedance podélně kmitající nekonečně dlouhé tyče, se počítá dle vztahu:

$$Z_s = \rho \cdot c_L \quad (24)$$

Pro ohybové vlnění v nekonečně dlouhé tyči platí vztah: [2]

$$Z_s = \rho \cdot c_B \quad (25)$$

2.5.1 Přenosový útlum

Je schopnost látky tlumit mechanické vibrace, které se šíří soustavou ze vstupu A do výstupu B. Přenosový útlum jde vypočítat ze vztahu:

$$D_p = 20 \cdot \log \frac{v_1}{v_2} = 20 \cdot \log \frac{F_1}{F_2} [dB] \quad (26)$$

kde: v_1, v_2 - amplituda rychlosti na vstupu do / výstupu z kmitavé soustavy

F_1, F_2 - amplituda síly na vstupu do / výstupu z kmitavé soustavy

Při jakékoliv frekvenci kmitání může vzniknout jeden ze tří případů kmitání a to když:

- $D_p < 0$ - amplituda výstupní veličiny je větší než amplituda vstupní veličiny → rezonance
- $D_p = 0$ - amplituda výstupní veličiny je stejná jak amplituda vstupní veličiny → nulový přenos tlumení
- $D_p > 0$ - amplituda výstupní veličiny je menší než amplituda vstupní veličiny → tlumení mechanických vibrací [9]

3 ZÁKLADNÍ VELIČINY AKUSTIKY

Jelikož nedílnou součástí mechanického kmitání je zvuk, tak zde uvedu, co to zvuk je a jeho základní veličiny.

3.1 Zvuk

Zvuk je mechanické vlnění pružného prostředí o frekvenčním rozsahu (20 - 20000) Hz pro dospělého člověka, u dítěte (16 - 20000) Hz. Obecně se zabývá akustika mechanickými kmity v rozsáhlejším pásmu frekvence. Tedy jedná se o tři pásma a to o infrazvuk (pod 20 Hz), slyšitelnou oblast a ultrazvuk (nad 20 kHz). Mechanické vlnění se šíří určitou rychlostí daným prostředím. Rychlost zvuku ve vzduchu je 344 m/s, ve vodě je 4,4x větší a v oceli je zhruba 15x větší. Tudíž druh materiálu hraje podstatnou roli. Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i v pevných látkách. Pouze ve vakuu se nešíří. [1]

PROSTŘEDÍ	RYCHLOST [m/s]
pryž měkká	70
polystyren	315
vzduch	344
korek	500
silon	1250
pryž tvrdá	1400
olovo	1410
voda	1440
plexisklo	1580
pórobeton	1800
cihly	2800
dřevo bukové	3900
hliník	4800
ocel	5750

Tab. 3 Přehled rychlostí zvuku ve vybraných materiálech

3.2 Akustická rychlost

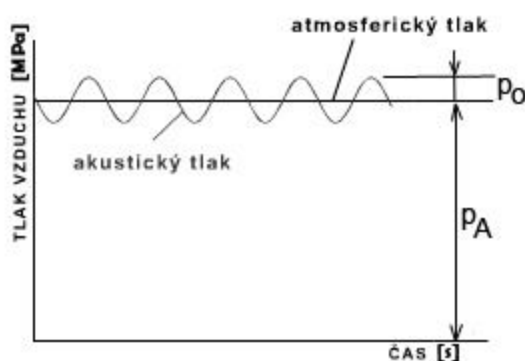
Akustická rychlost určuje, jak kmitají jednotlivé částičky prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Rovnici získáme první derivací výchylky podle času.

$$v = \frac{du}{d\tau} = \omega \cdot u_0 \cdot \cos\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) = v_0 \cdot e^{j\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right)} \quad (27)$$

Amplituda akustické rychlosti je dána součinem kruhové frekvence a amplitudy výchylky. Akustická rychlost je jednou z nejdůležitějších veličin. Nejedná se o rychlost šíření zvuku, tudíž tyto dvě veličiny nesmíme zaměňovat. [2]

3.3 Akustický tlak

Jedná se o zhušťování či zředování kmitajících částic. Následkem toho nám vzniká přetlak nebo podtlak v těchto místech.



Obr. 4 Průběh akustického tlaku

Akustický tlak má tvar harmonické funkce o frekvenci f a fázovém posuvu φ . Akustický tlak je pokládán jako odchylka celkového tlaku vzduchu od tlaku statického při vlnění v daném prostředí. Lidské ucho je citlivé na tlak, tudíž i na ten akustický. Člověk registruje akustické tlaky od $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Hodnoty zaznamenáváme jako odchylku od atmosférického tlaku.

Z hlediska kmitočtu je průběh akustického tlaku totožný s průběhem výchylky nebo akustické rychlosti. Můžeme pro harmonický signál psát: [2]

$$p_c = p_A + p(t)$$

$$p = p_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = p_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (28)$$

kde: φ [°] - fázový posun

p_0 [Pa] - amplituda akustického tlaku

3.3.1 Hladina akustického tlaku

Je měřítkem zvukové energie vysílané zdrojem hluku. Vyjadřuje se v decibelech, popřípadě v dBA a je definována vztahem:

$$L_P = 20 \cdot \log \frac{p}{p_0} = 10 \cdot \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (29)$$

kde: p [Pa] - efektivní hodnota akustického tlaku

p_0 [Pa] - referenční hodnota akustického tlaku, pro vzduch $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa

3.4 Akustický výkon

Pružným prostředím přenášíme mechanickou energii mechanickými kmity od zdroje pomocí akustických vln.

Množství akustické energie, procházející za jednotku času myšlenou prostorovou plochou, nazýváme akustickým výkonem P [W] [1]

Akustický výkon vypočítáme pomocí vztahu:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S \quad [W] \quad (30)$$

kde: v [m/s] - rychlost kmitání částic

S [m²] - plocha

3.4.1 Hladina akustického výkonu

Hladina akustického výkonu je nezávislá na poloze zdroje, okolních podmínkách a vzdálenosti od zdroje. Je definována vztahem:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \quad [dB] \quad (31)$$

kde: P [W] - sledovaný akustický výkon

P_0 [W] - referenční hodnota akustického výkonu, pro vzduch $P_0 = 10^{-12}$ W

3.5 Akustická intenzita

Je to fyzikální veličina, vyjadřující množství akustické energie, která projde jednotkovou plochou za jednotku času. Podstatnou vlastností akustické intenzity je směrovost - určuje směr šíření akustického vlnění. Akustická intenzita má nulovou hodnotu kolmo na směr. Vypočítáme ji jako vektorový součin akustického tlaku a akustické rychlosti. [1]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad [W/m^2] \quad (32)$$

3.5.1 Hladina intenzity zvuku

Hladina akustického výkonu je definována vztahem:

$$L_w = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} [dB] \quad (33)$$

kde: $I [W \cdot m^2]$ - intenzita sledovaného akustického signálu

$I_0 [W \cdot m^2]$ - referenční hodnota intenzity, pro vzduch $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^2$

3.6 Akustické vlnění

Dělíme je na podélné a příčné podle toho, zda částice kmitají ve směru vlnění nebo kolmo k němu. U plynů či kapalin je jenom podélné vlnění. U pevných materiálů je podélné i příčné vlnění.

3.7 Vložný útlum

Je schopnost tlumícího prvku po jeho vložení do konstrukce ztlumit hluk.

$$D_V = L_{w1} - L_{w2} = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_2} \quad (34)$$

kde: $L_{w1} [dB]$ - hladina akustického výkonu bez použití tlumiče

$L_{w2} [dB]$ - hladina akustického výkonu s použitím tlumiče

3.8 Vlnová délka

Při vlnění v akustickém prostředí dochází ke zhušťování a zředování kmitajících částic pružného prostředí.

Vlnová délka $\lambda [m]$ je vzdálenost dvou po sobě časově následujících např. maxim kmitů vln u sledovaného vlnění. Obecně je to vzdálenost mezi nejbližšími vlnoplochami se stejnými akustickými stavy kmitajících částic. Lze ji také definovat jako vzdálenost, kterou urazí zvuková vlna za dobu jednoho kmitu, tedy periodu T .

Když se akustická vlna zdroje šíří rychlostí c o frekvenci f , pak pro vlnovou délku platí:

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (20)$$

kde: $f [Hz]$ - frekvence vlnění

$c [m/s]$ - rychlost šíření vlnění

T [s] - perioda vlnění

3.9 Ostatní decibelové veličiny akustiky

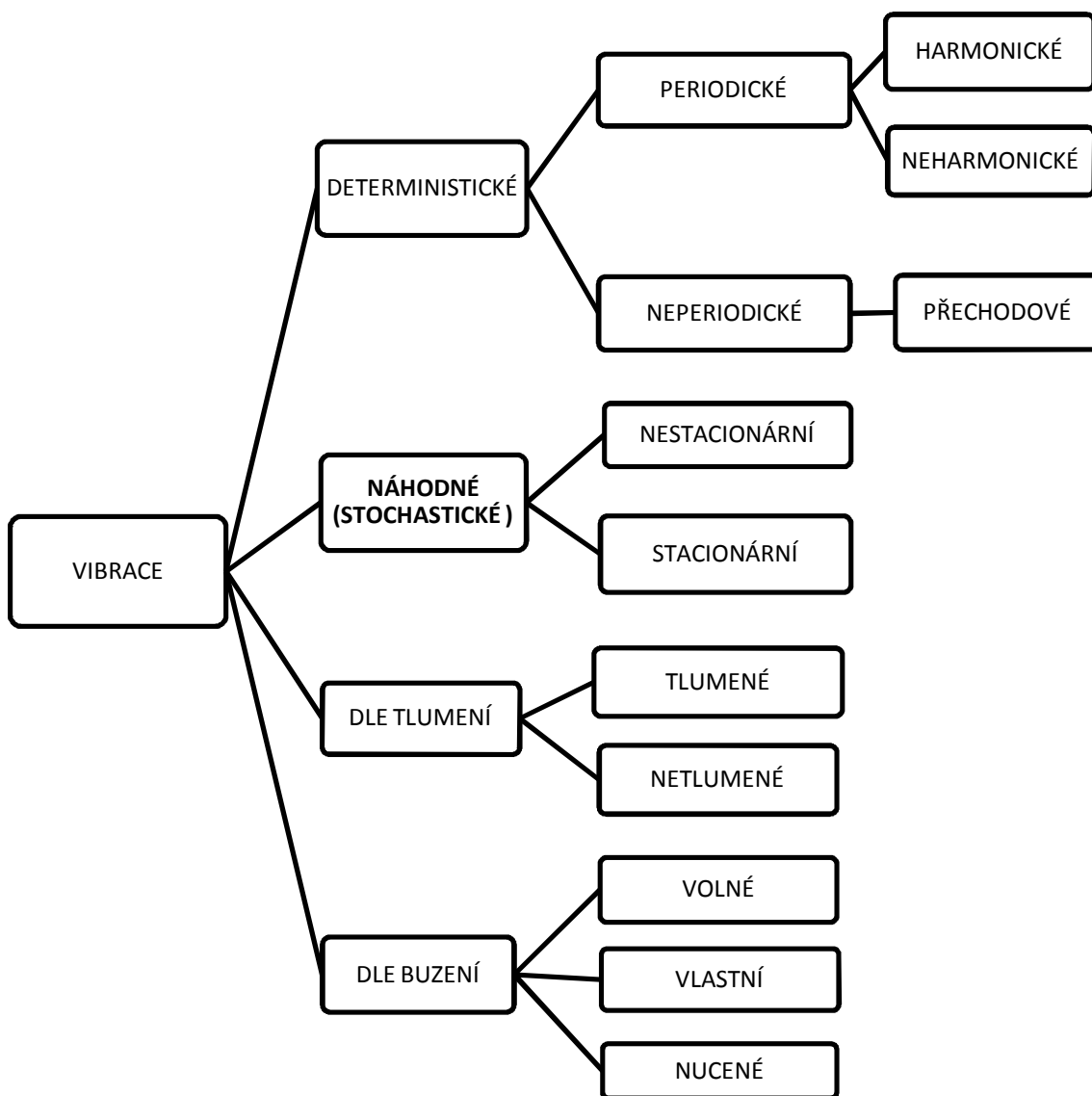
Hladina akustického tlaku, hladina akustického výkonu a hladina intenzity zvuku patří mezi základní hladinové veličiny. Ale používají se i další decibelové veličiny ve vibroakustice, které jsou uvedeny v tab. 4.

VELIČINA	DEFINACE HLADINY	REFERENČNÍ HODNOTA
Akustický výkon	$L_W = 10 \log (W/W_0)$	$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$
Akustická intenzita	$L_I = 10 \log (I/I_0)$	$I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$
Akustická energie	$L_E = 10 \log (E/E_0)$	$E_0 = 10^{-12} \text{ J}$
Hustota akustické energie	$L_w = 10 \log (w/w_0)$	$w_0 = 10^{-12} \text{ Jm}^{-3}$
Akustický tlak vzduch	$L_p = 20 \log (p/p_0)$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$
Akustický tlak jiná prostředí	$L_p = 20 \log (p/p_0)$	$p_0 = 10^{-6} \text{ Pa}$
Akustická rychlost	$L_v = 20 \log (v/v_0)$	$v_0 = 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$

Tab. 4 Hladinové veličiny využívané ve vibroakustice

4 DRUHY VIBRACÍ

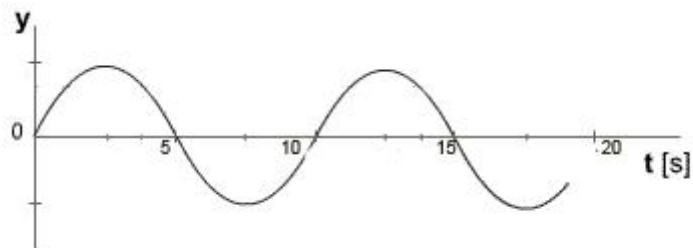
Vibrace je kmitání dané mechanické soustavy. Velikost vibrací se vyjadřuje výchylkou nebo jejími časovými derivacemi - rychlostí, zrychlením či vektorem, který udává časovou derivaci zrychlení kmitavého pohybu.



Obr. 5 Rozdělení vibrací

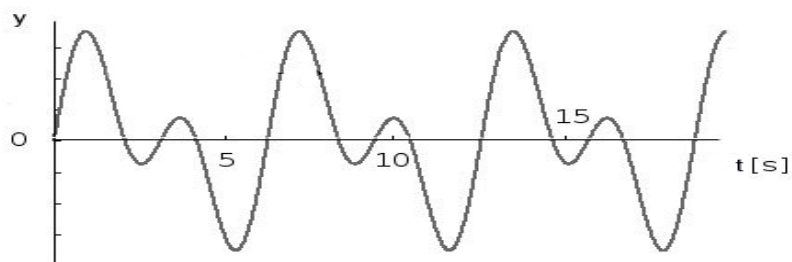
- **Deterministické vibrace** - jsou takové vibrace, u kterých je okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena přesně jejich časovým průběhem, zaznamenaným dříve, než je daný časový okamžik.

- **Náhodné vibrace** - jsou takové vibrace, pro které nemůže být okamžitá hodnota vibrací v daném čase určena z jejich časového průběhu. [4]
- **Periodické kmity** - opakují se v určitém časovém intervalu. Při periodickém pohybu se systém po určitém čase navrátí zpět do původního stavu.
 - **harmonické** - mají pravidelně opakující se sinusový průběh



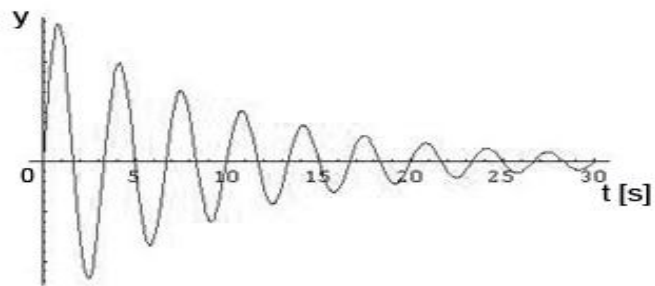
Obr. 6 Harmonické kmity

- **neharmonické** - nemají sinusový průběh, ale opakují se.



Obr. 7 Neharmonické kmity

- **netlumené** - při kmitání nedochází ke ztrátě energie.
- **tlumené** - při kmitání se část energie kmitů ztrácí v důsledku tření, až se dostane na nulovou hodnotu.



Obr. 8 Tlumené kmitý

- **nucené kmitý** - vznikají, když energii tlumených kmitů v pravidelných intervalech nahrazujeme.
- **vlastní** - vlastní kmitý jsou takové, na které nepůsobí buzení. Získáme je řešením diferenciální rovnice popisující dané kmitání. Frekvence vlastních kmitů se označuje jako vlastní frekvence - kmitočet. [6]

5 ŠÍŘENÍ CHVĚNÍ V TĚLESECH

Chvění v konstrukcích vzniká působení dynamické síly na pružná tělesa. Za pružná tělesa pokládáme desky a tyče, které mohou kmitat podélně nebo ohybově a to za předpokladu splnění podmínky:

$$L \geq \frac{\lambda_L}{2} = \frac{c_L}{2 \cdot f} \quad (35)$$

kde: L [m] - rozměr daného tělesa

Všechny konstrukce mají vlastní frekvenci. Pokud budící síla působí na těleso o frekvenci, která je stejná s vlastní frekvencí, pak se chvění výrazně zvětší a mluvíme o rezonanci.

Obecně lze vlastní frekvenci vypočítat ze vztahu:

$$f = \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (36)$$

kde: c [N/m] - tuhost soustavy

m [kg] - hmotnost soustavy

Pokud chceme snižovat chvění v konstrukcích, tak musíme tento celek rozložit na jednotlivé díly a každému se věnovat individuálně.

5.1 Tyče

Šíření chvění lze stanovit pro dvě podmínky

1) těleso nám kmitá jako celek - tělesa tuhá

2) v tělese dochází k pružným deformacím, šířící se v podobě vlnění pružným tělesem

Podélné vlny se na konci tyče odrazí, tím se v tyči vytváří stojaté vlnění. Takovou frekvenci vypočítáme ze vztahu:

$$f_n = \frac{c}{2 \cdot L} \cdot n \quad (37)$$

kde: n [-] - celé kladné číslo (nekonečné množství)

U příčného kmitání tenkých tyčí můžeme zanedbat tuhost, potom frekvenci lze určit dle vztahu:

$$f = \frac{n}{2 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{F}{m}} \quad (38)$$

Vlastní frekvenci lze určit z rovnice (36), ale musíme si stanovit konstanty K , které jsou závislé na upevnění tyče.

$$f_i = K_i \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{L^4 \cdot m}} \quad (39)$$

kde: E [N/m²] - modul pružnosti v tahu

I [m⁴] - moment setrvačnosti

5.2 Membrány

Membrány jsou tělesa, která mají malou tloušťku, oproti své ploše. Při deformaci nebere v úvahu ohybovou tuhost. Vlastní frekvenci pravoúhlé membrány lze určit ze vztahu:

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (40)$$

kde: m, n [-] - konstanty nabývající kladných celých hodnot

T [kg/m] - síla napínající jednotkovou délku membrány

M [kg/m²] - plošná hmotnost

a, b [m] - rozměry membrány

5.3 Desky

Oproti membránám mají desky větší tloušťku, tudíž i ohybovou tuhost. Okrajové podmínky jsou jiné než u membrán, mohou nastat tři případy:

- 1) všechny okraje desky jsou volné
- 2) deska je volně podložena na okraji
- 3) na obvodu je deska netknuta [2]

Pro volně podloženou desku na okraji lze určit frekvence dle Malecki [5]:

$$f_{min} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{M}} \cdot \left[\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 \right] \quad (41)$$

kde: $B = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)}$ - ohybová tuhost

6 ZPŮSOBY SNIŽOVÁNÍ MECHANICKÉHO CHVĚNÍ

Základní vlastnost látek pro pohlcování vibrací je činitel vnitřního tlumení. Z hlediska uspořádání a typické závislosti činitele pohltivosti na kmitočtu můžeme pohltivé látky rozdělit na látky porézní a látky a konstrukce, spočívající na rezonančním principu. Kromě toho se používají i úpravy smíšené nebo úpravy vzniklé kombinací absorpčních prvků s tzv. konstantami koncentrovanými (akustická hmota, poddajnost) a konstantami rozdělenými (vlnovody). Pohlcování znamená přeměna akustické energie na jinou (tepelnou). [2]

6.1 Materiály pohlcující chvění

Jeden z možných způsobů snížení chvění je správná volba materiálu. Ale ne vždy nám daný technologický plán dovolí použít materiály pohlcující mechanické chvění. Musíme brát v úvahu pevnostní podmínky, provozní podmínky, únavu materiálu, cenu a mnoho dalších faktorů. Velkou výhodou je jejich schopnost eliminovat chvění vlivem tření. Porézní materiály se využívají jako pružné vložky nebo také jako plošné desky, které se umísťují pod stroj. Často bývají geometricky upraveny, a to s otvory či rýhováním.

Materiály, které pohlcují mechanické chvění, jsou materiály porézní a vláknité - pryž, korek, guma, polystyren atd. Póry takového materiálu jsou vyplněny vzduchem a mohou zaujímat až 95% z celkového objemu. Pórovitost vypočteme následujícím vztahem:

$$h = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_M} = \frac{V_P}{V_C} \quad (42)$$

kde: ρ_A [kg/m³] - hustota porézního materiálu

ρ_M [kg/m³] - hustota vláknitého materiálu

V_P [m³] - objem pórů

V_C [m³] - celkový objem

Aby materiál dobře absorboval chvění, musí být póry navzájem spojeny, zvláště pak u nepružných materiálů. [1]

Mezi přírodní pórovité materiály patří kosti, korek, houby, bambus atd. Uměle vytvořená je sádra či polystyren.



Obr. 9 Porézní materiály [7]

6.1.1 Slitiny pohlcující vibrace

Tlumit vibrace, a tím i prodloužit životnost namáhaných součástí strojů a zařízení, je možné použitím metalických konstrukčních materiálů, u nichž dochází k martenzitickým fázovým přeměnám. Slitiny mědi, hliníku a manganu mají vysoké podíly velice pohyblivých hraničních ploch, které působením na ně střídavého zatížení, způsobují vysokou disipaci energie.

Mechanické chvění vyvolává ve slitinách Cu-Mn za určitých teplot reverzibilní martenzitickou fázovou přeměnu. Za izotermických podmínek tato přeměna způsobuje mezi austenitem a martenzitem velmi vysoký tlumivý účinek, při teplotě pohybující se kolem (300 - 340) °C. V oblasti počáteční teploty martenzitu se začíná tvořit martenzit z austenitu. Chemickým složením lze teplotní interval, při kterém vzniká značná tlumivost, posunout do teplot od -100 °C do +150 °C. Takto se silné tlumení přizpůsobí vsádkové teplotě odlitků.

Slitiny mědi, hliníku či manganu mají už při nízkých amplitudách rozpínání vysoký tlumivý efekt. Se zvyšující se amplitudou rozpínání, se zvětšuje i tlumivost, což je důsledek tvorby martenzitu. [7]

6.1.2 Silikonové gely

Silikonové gely mají mnoho užitečných vlastností. Bývá vytvořen ve formě velmi měkkého vytvrzeného elastomeru - gelu, jenž poskytne vynikající ochranu proti vlivům prostředí a zároveň je schopen pohltit potenciálně škodlivé vibrace. Tento měkký výborně pohlcuje energii.

6.1.3 Polymerní pěny

Jsou vytvářeny vakuovou expanzí, vytlačováním taveniny polymeru do vakuové komory či míšením plynu s taveninou polymeru. Má výrazně menší hmotnost, díky přítomnosti pórům vyplněnými tekutinou (plynem či kapalinou). Má výbornou schopnost pohlcovat dynamické rázy.

6.1.4 Papírová drť

Mezi hlavní výhody patří recyklovatelnost, dostupnost a cena. Používá se jako zvukový, tepelný izolant a tlumí vibrace. Ale mezi podstatnou nevýhodu patří hořlavost. Používají frakce velikosti (9,0 - 51,5) mm o tloušťce (0,5 - 1,3) mm, hustota je 0,2 g/cm³. Není vhodná pro vyšší zatížení.

6.1.5 Pryž, pryžová a gumová drť

Pryž je materiál, který se získává ze surového přírodního nebo syntetického kaučuku s přidávkem vhodného síťovadla za působením tepla. Tento proces nazýváme vulkanizace. Drť se využívá z odpadní výroby. Používají frakce velikosti (0,09 - 0,52) mm o tloušťce (1,25 - 34,00) mm, hustota je (0,20 - 0,39) g/cm³. Zvuková pohltivost není nijak výrazná. Nevýhoda je hořlavost.

6.1.6 Lehké pórovité kamenivo

Vyrábí se třeba expandováním přírodního jílu. Jelikož se jedná o dokonalejší stupeň zpracování, tak k základním vlastnostem (pevnost, malá nasákavost, zdravotní nezávadnost) můžeme přidat ještě výborné zvukové a tepelně izolační vlastnosti, malé objemovou hmotnost. Vibrace tlumí hůře než guma.

6.1.7 Pěnový hliník

Mezi kovovými pěny nachází největší uplatnění hliník a jeho slitiny, jelikož má poměrně nízkou hustotu (2700 kg.m⁻³), nízkou teplotu tání (660 °C), poměrně vysokou tuhost, je houževnatý a má vynikající korozní odolnost. Ale hlavně vykazuje skvělou pohltivost nárazové energie a tlumicí schopnosti.

Pěnový hliník je vysoce porézní materiál, kde póry tvoří 60 % jeho objemu. Pro výrobu hliníkové pěny lze použít dvou typů slévárenských slitin – slitin určených pro odlévání a tváření. Hliník pro tváření má póry s kruhovým tvarem s tlustými stěnami, pěny vyrobené

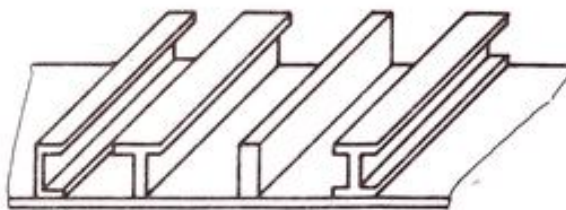
ze slévárenských slitin hliníku mají póry s nepravidelným menším tvarem, stěny pórů jsou velmi tenké. Jeho nevýhodou je několikanásobně vyšší cena proti klasickému hliníku. Používá se u vlaků, kde chrání a akumuluje nárazovou energii. [8]

6.2 Konstrukční úpravy

Jedná se o využití většinou materiálu, který sám o sobě netlumí moc vibrace. Mezi takové materiály patří hlavně ocel. Tím, že ho upravíme do požadovaného tvaru, tak zvětšíme tlumící účinky několikanásobně.

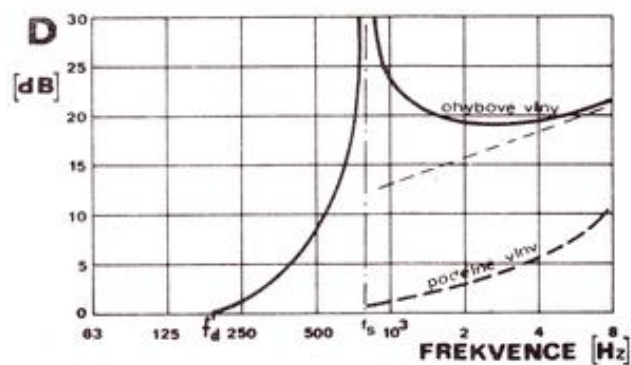
6.2.1 Hradící hmoty

V místě připojené hradící hmoty ke konstrukci se využívá dvakrát útlum reflexí a zvýšení momentu setrvačnosti, který vede k šíření frekvenčního pásma tlumení. Je důležité jejich dokonalé spojené, aby hradící hmota následovala kmitání desek.



Obr. 10 Hradící hmota [2]

Výrazně tlumí ohybové napětí, její průběh je znázorněn na obr. 11. Útlum ohybového napětí nastává od frekvence f_d , tato hodnota je mnohem nižší než mnohem nižší než frekvence f_s , kdy je útlum nekonečně velký. [2]

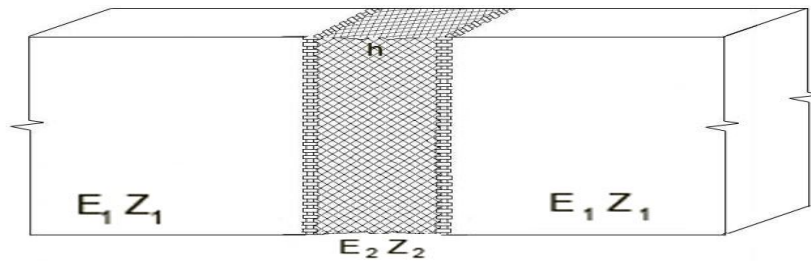


Obr. 11 Útlum ohybového vlnění [2]

Útlum podélného vlnění je výrazně nižší útlum ohybových vln.

6.2.2 Pružné vložky

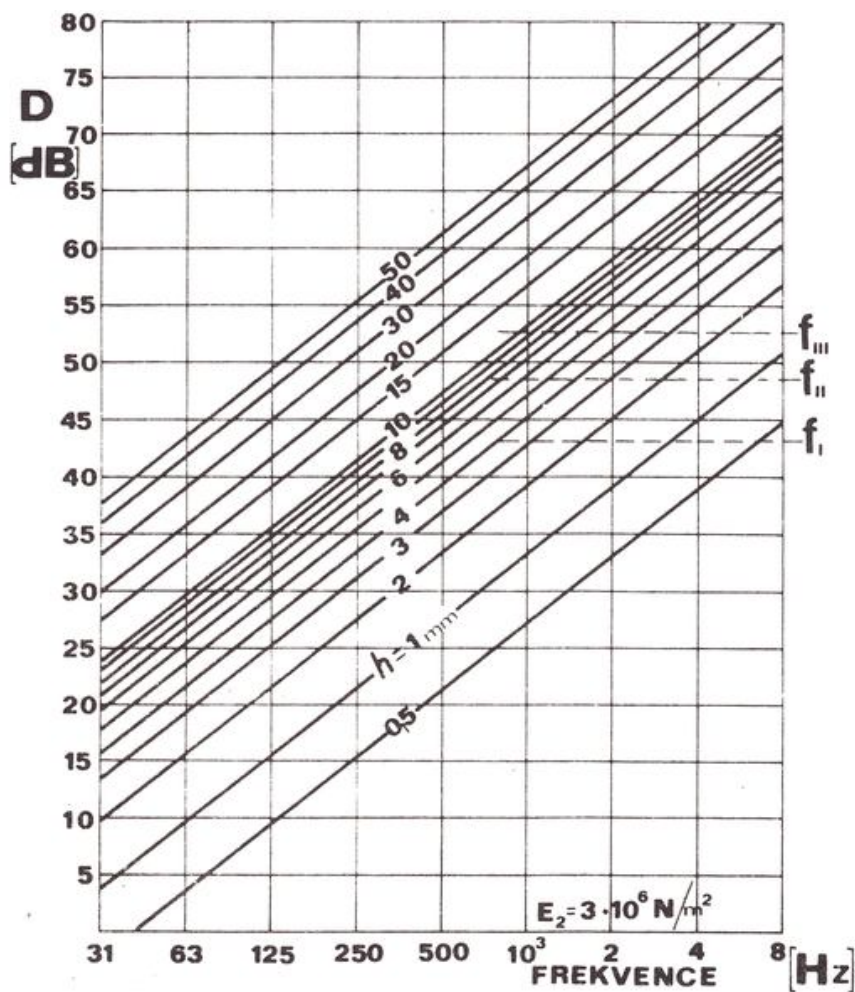
Ke snížení přenosu chvění se využívají porézní materiály jako pružné vložky. Mohou být různého tvaru a provedení. Pracují na principu odrazu vlnění na rozhraní stykových ploch materiálů s rozdílnou mechanickou impedancí. Odraz je o to větší, čím větší je rozdíl mechanických impedancí.



Obr. 12 Pružná vložka

Pro výpočet útlumu lze využít vztah:

$$D = 20 \cdot \log \frac{\pi \cdot h \cdot E_1}{c_{L1} \cdot E_2} \cdot f \quad (43)$$



Obr. 13 Útlum podélných vln u ocelových tyčí při použití středně tvrdé pružné vložky [2]

Graf znázorňuje nejvíce používanou pryžovou vložku, tedy její závislost útlumu na tloušťce a frekvenci.

6.2.3 Pružiny

Jsou kovové nejčastěji šroubovitě součásti, ale mohou být i jinak tvarované - např. listové pružnice. Akumulují i vysokou energii, jsou odolné vůči teplotám a chemikáliím. Nevýhodou je jejich nestabilita, musí být vhodně uloženy.

Zásadní vlastností pružiny je její tuhost. Což je fyzikální veličina, která je charakteristická pro každé stlačitelné těleso. Na rozdíl od modulu pružnosti se týká celého tělesa. Jelikož modul pružnosti se zabývá pouze materiálem, jímž je tvořena.

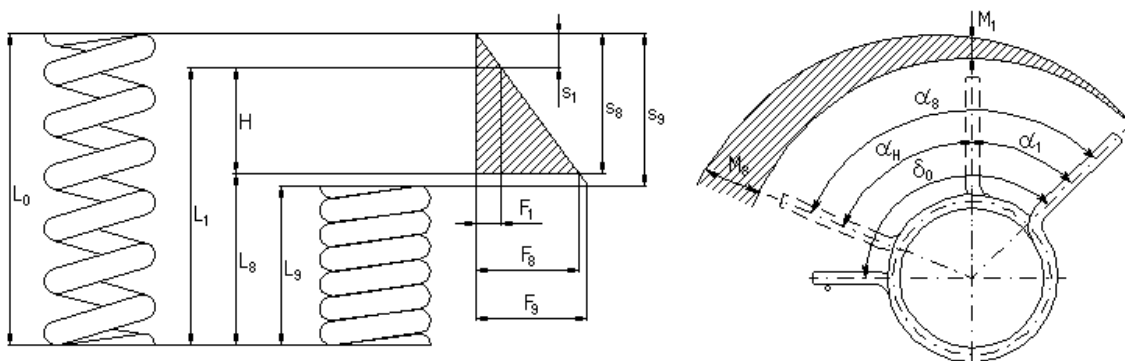
$$k = \frac{dF}{ds} \text{ nebo } k = \frac{dM}{d\alpha} \quad (44)$$

kde: F [N] - velikost působící síly

M [Nm] - velikost působícího momentu

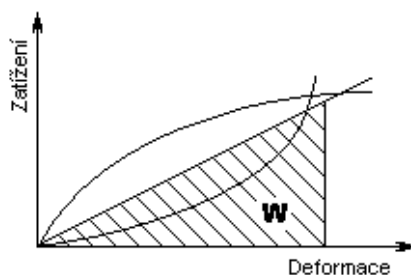
Δl [m] - rozdíl délky před a po stlačení pružiny

α [°] - úhel natočení



Obr. 14 Rozdíl deformací v plně zatíženém a před pruženým stavem [6]

U pružin s lineární charakteristikou je tuhost pružiny konstantní, u ostatních pružin je tuhost proměnlivá. Oblast pod křivkou je prací vykonané pružiny.

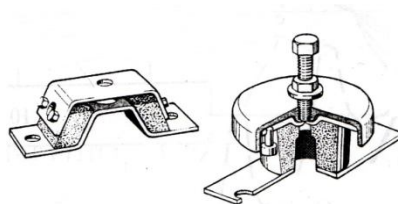


Obr. 15 Závislost deformace na zatížení

6.2.4 Pružné elementy

Využívají spojení vlastností kovových a porézních materiálů. Univerzální pružný element se vyznačuje svou jednoduchostí a kompaktní konstrukcí. Zabudované pryžové elementy z přírodního kaučuku umožňují velký pracovní úhel nastavení. Kmitací frekvence je závislá na pracovním úhlu nastavení. Použitý pryžový materiál umožňuje v rozsahu $0^\circ - 32^\circ$ progresivní chování pružiny. Univerzální pružný element může současně vykonávat více

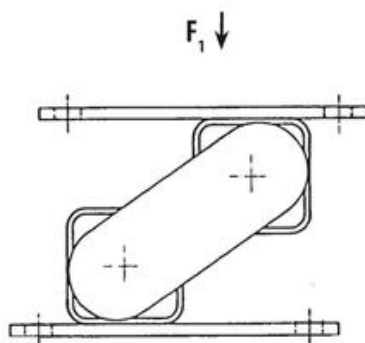
funkcí - pružení, uložení, napínání a tlumení. Podle způsobu využití se může použít také s předpětím.



Obr. 16 Pružné elementy [1]

6.2.5 Antivibrační tlumiče

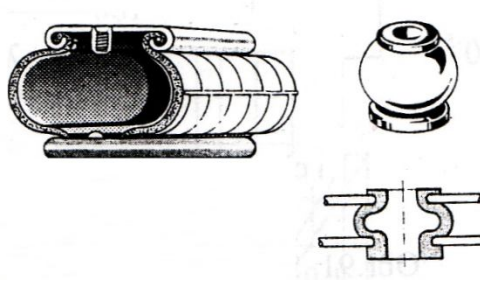
Antivibrační tlumiče jsou vhodné pro aktivní a pasivní tlumení vibrací ve všech průmyslových oborech. Jsou namáhány na tah a tlak. Mohou být použity jako boční doraz či nárazník. Jsou nenáročné na údržbu, a také bezpečné v provozu.



Obr. 17 Antivibrační tlumič

6.2.6 Vzdušné vaky

Vzdušné vaky jsou namáhané na tlak. Pružnost vaku je závislá na tlaku uvnitř elementu. Mají menší výšku oproti pružinám o stejné tuhosti. Mezi podstatné výhody patří jejich délková přizpůsobivost během provozu. Jsou bočně velmi nestabilní, proto musí být bočně vedeny. [1]



Obr. 18 Vzdušné vaky [1]

6.2.7 Kompozitní vrstvené konstrukce

Kompozitní materiály jsou složeny s různých materiálů, které vzájemným spojením získají lepší vlastnosti, než kdyby byly samotné. Výrazně snižují mechanické chvění i zvuk, ale také mají dobré tepelné vlastnosti a vyšší tuhost.

6.2.8 Skeletové konstrukční systémy

Jsou tvořeny soustavou desek, podpěrných nosníků tlumící výplně. Vibračně pohltivá vrstva je deformována v kolmém směru na vnitřní plochu podpěrných nosníků a spodní desku. Výrobou je nutné dosáhnout maximální adheze materiálu pohlcující vibrace s povrchem. Pokud toho docílíme, tak získáme plošné segmenty, které účinně tlumí vibrace. Mechanická energie se přeměňuje na tepelnou. Využívá se u dopravních prostředků, hlavně u rychlovlaků.

6.3 Nátěry snižující chvění

Používají se hlavně na konstrukce složené z tenkých plechů, které mohou být dřevěné, kovové či plastové. Nanesená vrstva nejen snižuje vibrace, ale chrání materiál před povětrnostními vlivy. Nanášejí se ve formě nátěru či gelu. Jsou vyrobeny z umělých hmot s vysokým činitelem vnitřního tlumení, tím pádem výrazně tlumí chvění i vyzařovanou akustickou energii. Činitel vnitřního tlumení desky s antivibračním nátěrem lze určit dle vztahu: [1]

$$\eta = \eta_2 \cdot \frac{E_2}{E_1} \cdot g \left(\frac{h_2}{h_1} \right) \quad (45)$$

kde: η_2 [-] - činitel vnitřního tlumení nátěru

E_2 [MPa] - modul pružnosti nátěru

E_1 [MPa] - modul pružnosti desky

$g \left(\frac{h_2}{h_1} \right)$ - funkce závislá na poměru tloušťky nátěru a desky

II. PRAKTICKÁ ČÁST

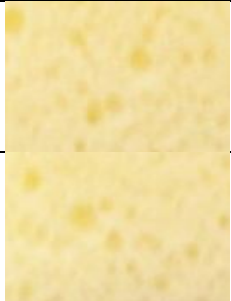

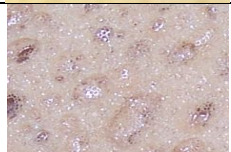


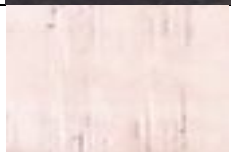
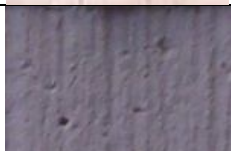

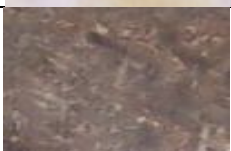
7 STANOVENÍ PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU

Přenosový útlum jsem měřil metodou nucených kmitů na měřicím přístroji skládajícího se z budícího vibrátoru typu Brüel & Kjær 4810, zesilovače typu Brüel & Kjær 2706, analyzátoru typu Brüel & Kjær 2034 a počítače pro ukládání a vyhodnocení získaných dat. Měřený vzorek o půdorysu (60x60) mm a tloušťce, která byla pro každý materiál rozdílná, se umístil mezi dvě ocelové desky. Na desky jsem umístil snímače zrychlení, kdy snímač A - budící část se upevnil na spodní desku a snímač B - volná část na horní desku. Frekvenci jsem se zabýval v pásmu $f = \langle 50 - 800 \rangle$ Hz a frekvenčním krokem $\Delta f = 25$ Hz. Vzorky jsem měřil jak v nezatíženém tak i zatížením stavu, kde závaží mělo hmotnost 500 g.



Obr. 19 Měřicí aparatura

7.1 Vyhodnocované vzorky

ZNAČENÍ	VZOREK	TLOUŠŤKA [dm]	HMOTN. [g]	HUSTOTA [g/dm ³]	STRUKTURA
PUR30	PUR pěna	0,3	3,044	28,185	
PUR50	PUR pěna	0,5	4,939	27,439	
2PUR50	PUR pěna s většími póry	0,5	5,126	28,478	
DT	Dřevotřísková deska	0,18	49,267	760,293	
PRYŽ	Přez	0,26	90,565	967,575	
NEC	Polymer NECURO N	0,33	91,616	771,178	
S	Sádrokarton	0,10	24,988	694,111	
REC	Recyklovaná PUR pěna	0,50	10,028	55,711	
OCEL	Ocel	0,3	85,783	794,287	

Tab. 5 Základní informace vyhodnocovaných vzorků

7.1.1 Příklady zápisu

PUR30 - nezatížená 30 mm PUR pěna

PUR30 Z - zatížená 30 mm PUR pěna

Sendvičový systém S + PUR30 + DT = na vstupu výchyly zrychlení je sádkartonová deska, na výstupu je dřevotřísková deska a mezi ně je vloženo tlumící jádro z PUR pěny

7.2 Výpočet základních veličin

Při určování výchyly, rychlosti a zrychlení vycházíme z rovnice 5 - 7. Zde je uveden výpočet pro pryž.

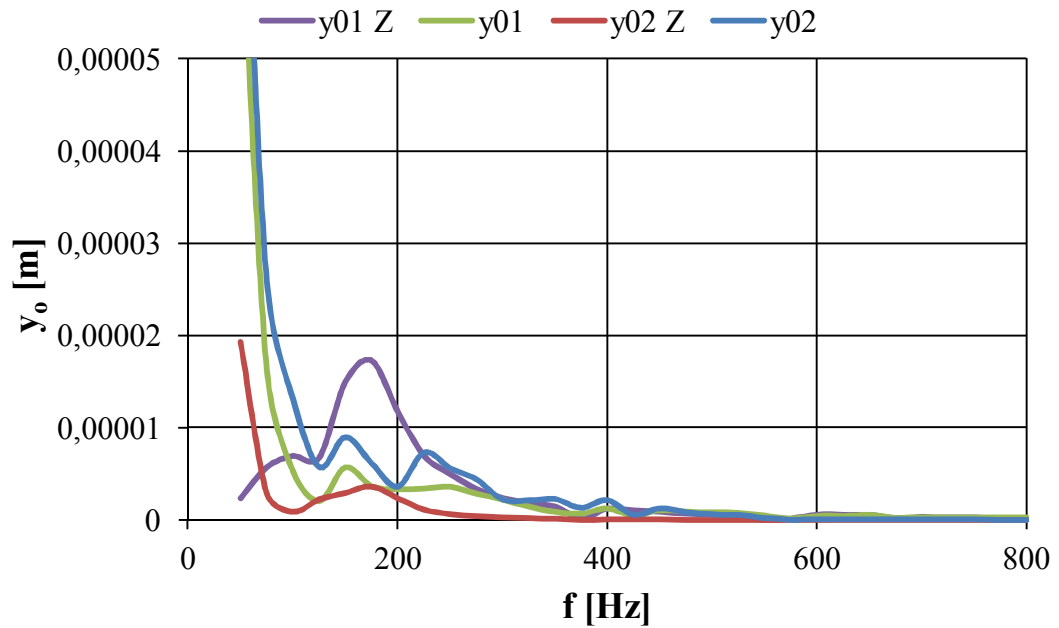
f [Hz]	VSTUP			VÝSTUP			PŘENOS. ÚTLUM [dB]
	a_{01} [m/s ²]	v_{01} [m/s]	y_{01} [m]	a_{02} [m/s ²]	v_{02} [m/s]	y_{02} [m]	
50	6,65	0,0212	0,000067488	8,03	0,0256	0,00008146	-1,64
75	3,61	0,0077	0,000016268	5,75	0,0122	0,00002592	-4,05
100	2,07	0,0033	0,000005249	5,19	0,0083	0,00001316	-7,99
125	1,25	0,0016	0,000002033	3,56	0,0045	0,00000578	-9,07
150	5,05	0,0054	0,000005685	7,99	0,0085	0,00000900	-3,99
175	4,40	0,0040	0,000003646	7,47	0,0068	0,00000618	-4,59
200	5,24	0,0042	0,000003322	5,76	0,0046	0,00000365	-0,83
225	6,74	0,0048	0,000003374	14,67	0,0104	0,00000734	-6,76
250	8,80	0,0056	0,000003572	13,92	0,0089	0,00000564	-3,98
275	8,47	0,0049	0,000002839	13,23	0,0077	0,00000443	-3,88
300	7,77	0,0041	0,000002189	8,09	0,0043	0,00000227	-0,35
325	5,98	0,0029	0,000001435	9,02	0,0044	0,00000216	-3,58
350	4,20	0,0019	0,000000869	11,09	0,0050	0,00000229	-8,44
375	3,70	0,0016	0,000000667	7,51	0,0032	0,00000135	-6,15
400	7,76	0,0031	0,000001230	13,8	0,0055	0,00000218	-5,00
425	3,22	0,0012	0,000000451	4,17	0,0016	0,00000058	-2,26
450	8,32	0,0029	0,000001042	10,32	0,0037	0,00000129	-1,87
475	7,81	0,0026	0,000000877	7,82	0,0026	0,00000087	-0,01
500	8,07	0,0026	0,000000818	6,22	0,0020	0,00000063	2,27
525	7,99	0,0024	0,000000735	6,24	0,0019	0,00000057	2,15
550	5,44	0,0016	0,000000456	3,27	0,0009	0,00000027	4,42
575	1,73	0,0005	0,000000132	0,83	0,0002	0,00000006	6,34
600	6,10	0,0016	0,000000429	1,74	0,0005	0,00000012	10,92
625	6,77	0,0017	0,000000439	1,26	0,0003	0,00000008	14,57
650	8,72	0,0021	0,000000523	2,13	0,0005	0,00000012	12,24
675	4,12	0,0010	0,000000229	1,33	0,0003	0,00000007	9,80
700	5,73	0,0013	0,000000296	2,16	0,0005	0,00000011	8,48
725	5,78	0,0013	0,000000279	1,87	0,0004	0,00000009	9,78
750	6,11	0,0013	0,000000275	1,75	0,0004	0,00000007	10,86
775	6,31	0,0013	0,000000266	1,58	0,0003	0,00000006	12,02
800	6,20	0,0012	0,000000246	1,37	0,0003	0,00000005	13,09

Tab. 6 Výpočet základních veličin pro PRYŽ

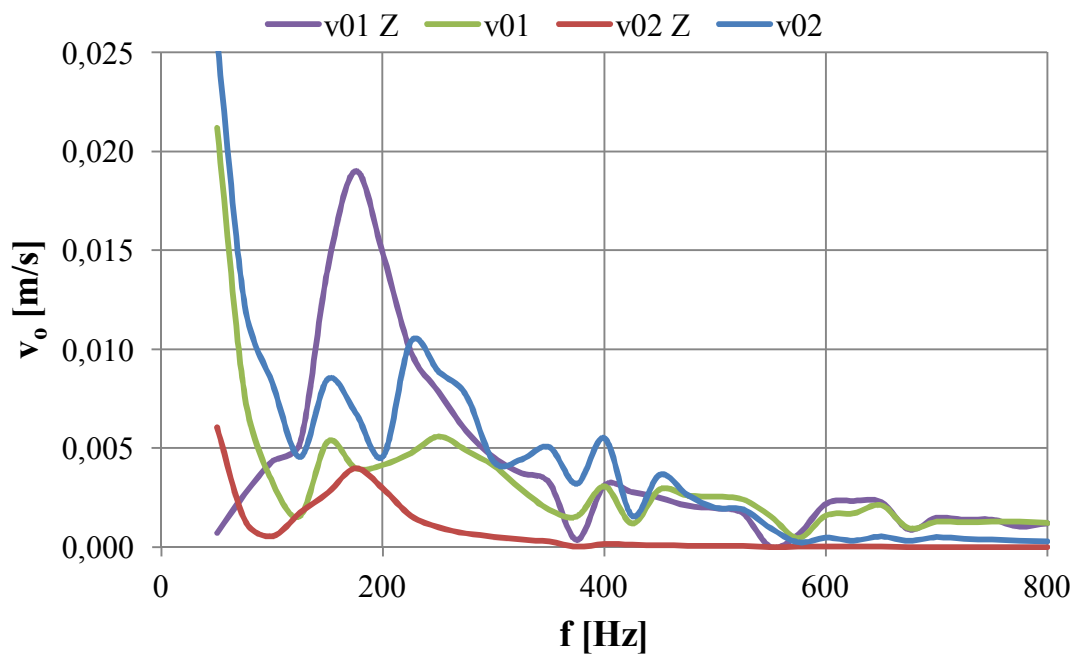
$$v_0 = \frac{a_0}{\omega} = \frac{a_0}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{6,65}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0212 \text{ m/s} \quad (46)$$

$$y_0 = \frac{v_0}{\omega} = \frac{v_0}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,0212}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 6,748 \cdot 10^{-5} \text{ m} \quad (47)$$

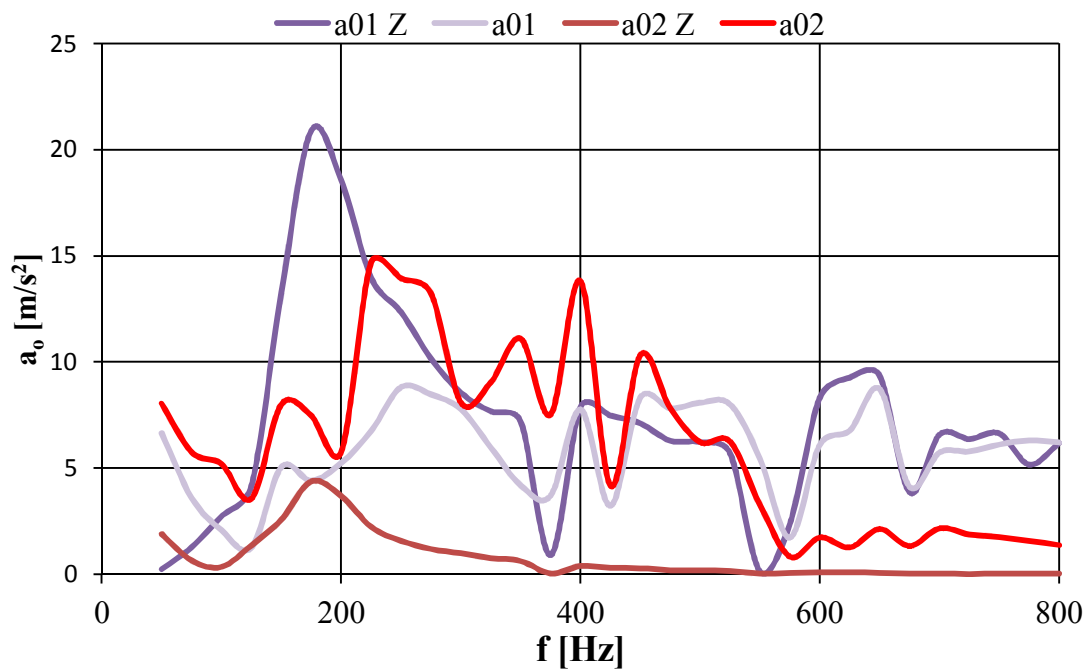
$$D_p = 20 \cdot \log \frac{a_{01}}{a_{02}} = 20 \cdot \log \frac{6,65}{8,03} = -1,64 \text{ dB} \quad (48)$$



Obr. 20 Závislost amplitudy výchylky na frekvenci

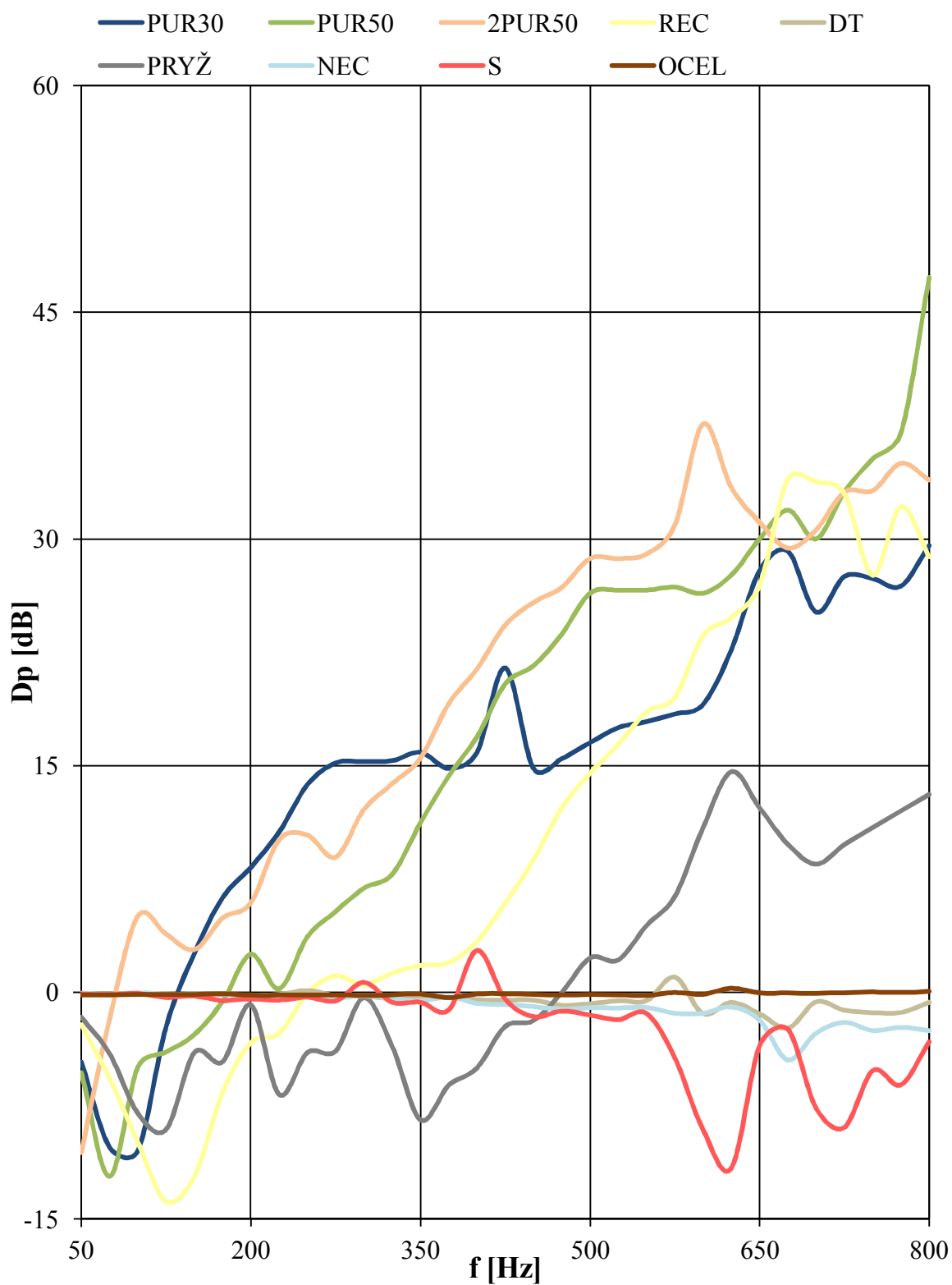


Obr. 21 Závislost amplitudy rychlosti na frekvenci

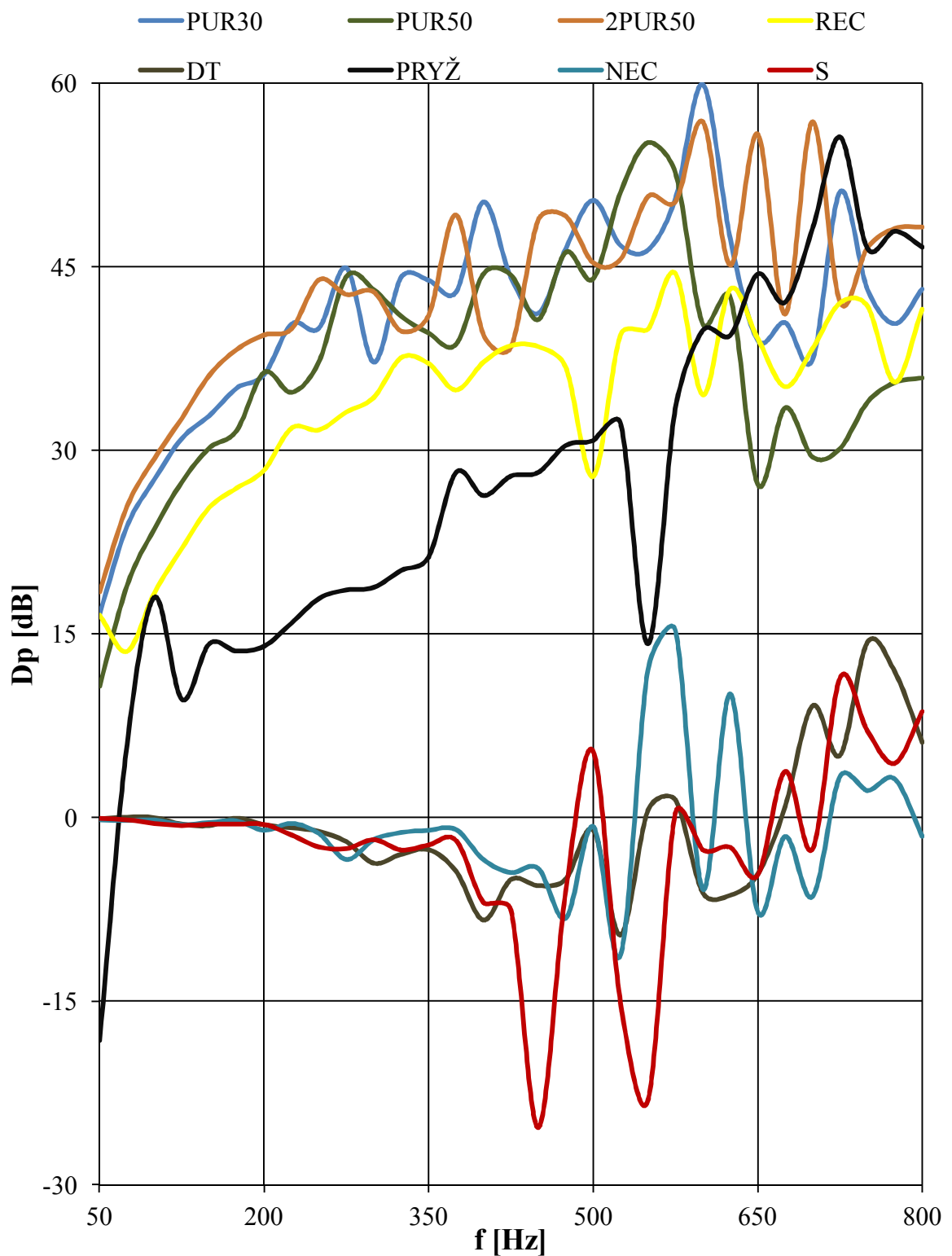


Obr. 22 Závislost amplitudy zrychlení na frekvenci

7.3 Porovnání tlumení mechanického kmitání u vybraných materiálů



Obr. 23 Frekvenční závislosti přenosového útlumu nezátížených vzorků



Obr. 24 Frekvenční závislosti přenosového útlumu zatížených vzorků

Nejlepší tlumení mechanického kmitání z naměřených vzorků má PUR pěna, která vykázala v širokém rozsahu frekvence, dobré tlumící schopnosti až 60 dB. Ocelová deska má zá-

porné hodnoty blíží se k nule, tudíž netlumí ani nějak výrazně nezesiluje vibrace. Nej-
hůře dopadla nezatížená pryž při nízkých frekvencích (50 - 450) Hz zatížená a sádrokarto-
nová deska při 450 Hz a 550 Hz, jelikož oba materiály začaly výrazně rezonovat, kdy pře-
nosový útlum byl záporný 10 dB až 25 dB.

VZOREK	$D_{P_{MIN}}$ [dB]	$f_{D_{MIN}}$ [Hz]	$D_{P_{MAX}}$ [dB]	$f_{D_{MAX}}$ [Hz]
PUR30	-10,26	75	29,55	800
PUR50	-12,16	75	47,26	800
2PUR50	-10,64	50	37,58	600
DT	-2,36	675	1,01	575
PRYŽ	-9,07	125	14,57	625
NEC	-4,47	675	-0,03	100
S	-11,62	625	2,77	400
REC	13,56	75	43,15	625
OCEL	-0,020	775	0,254	625

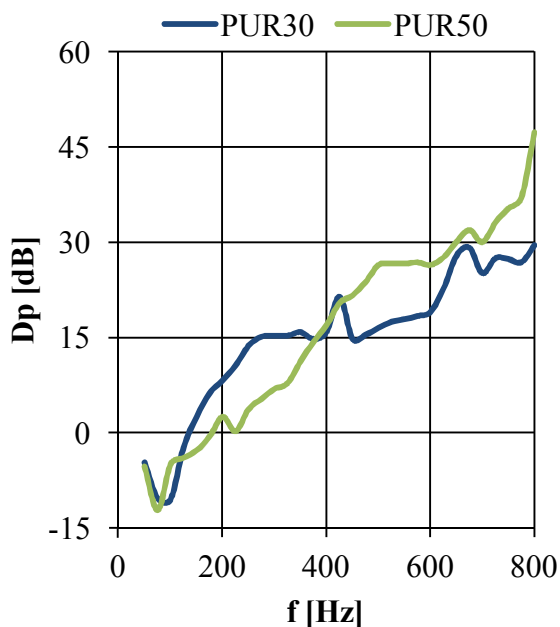
*Tab. 7 Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími
frekvencemi nezatížených vzorků*

VZOREK	$D_{P_{MIN}}$ [dB]	$f_{D_{MIN}}$ [Hz]	$D_{P_{MAX}}$ [dB]	$f_{D_{MAX}}$ [Hz]
PUR30	16,63	50	59,88	600
PUR50	10,7	50	55,12	550
2PUR50	18,44	50	56,79	600
DT	-9,58	525	14,33	750
PRYŽ	-18,23	50	55,60	725
NEC	-11,16	525	15,28	575
S	-25,34	450	11,39	725
REC	-13,83	125	33,96	675

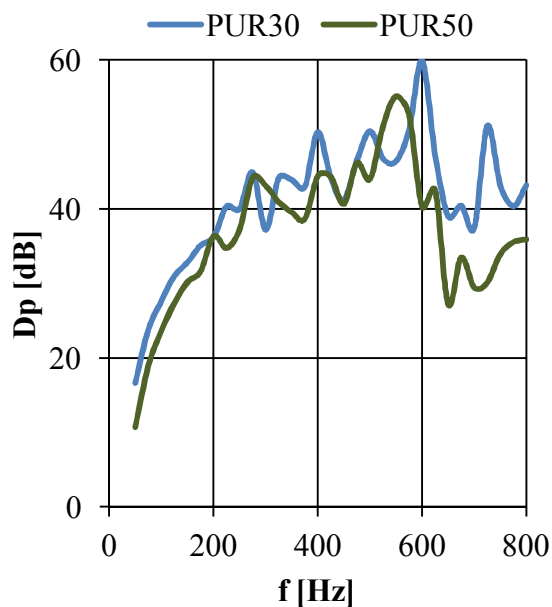
*Tab. 8 Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími
frekvencemi zatížených vzorků*

7.4 Faktory ovlivňující přenosový útlum

7.4.1 Vliv tloušťky materiálu na přenosový útlum



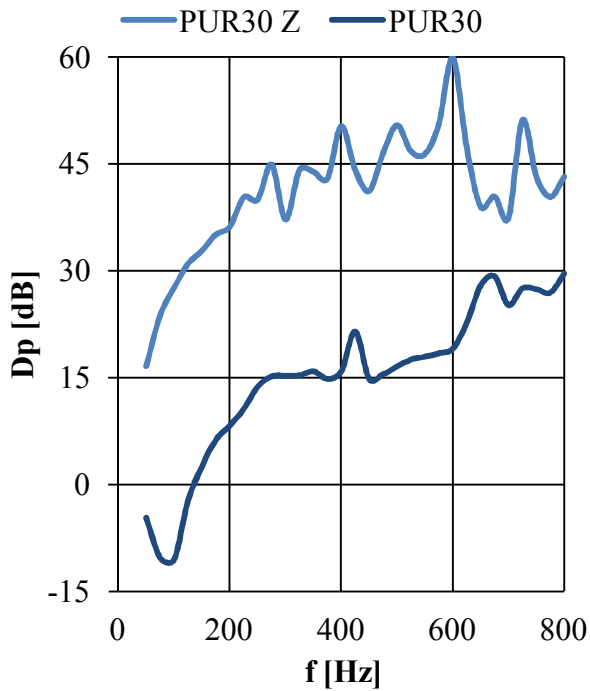
Obr. 26 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv tloušťky bez zátěže



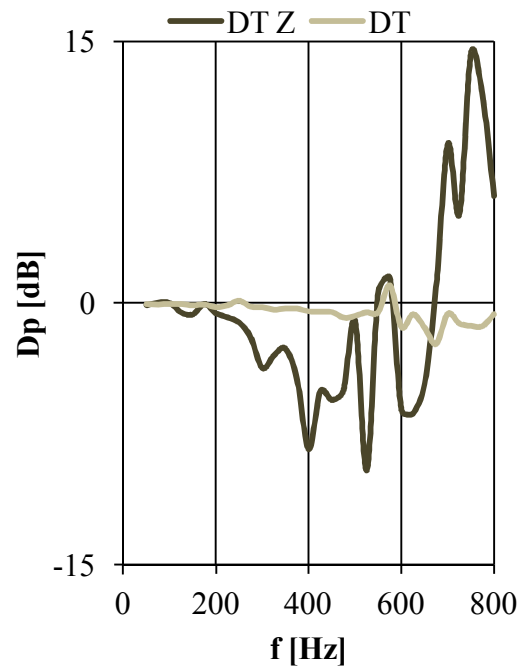
Obr. 25 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv tloušťky se zátěží

Modře označená je 30 mm PUR pěna a zeleně je 50 mm PUR pěna. I když je rozdíl mezi deskami 20 mm, tak se výsledky výrazně neliší. U nezátížených vzorků je přenosový útlum při nižších frekvencích dokonce větší u 30 mm PUR pěny. Při frekvencích nad 425 Hz už lépe tlumí PUR pěna o větší tloušťce. Zatížené vzorky mají téměř totožné výsledky. Jelikož obě dvě desky jsou dostatečně tlusté, tudíž tlumící schopnosti jsou téměř totožné. Je zbytečné, někdy i nežádoucí navyšovat tloušťku, jelikož by se zvýšila cena materiálu.

7.4.2 Vliv frekvence na přenosový útlum



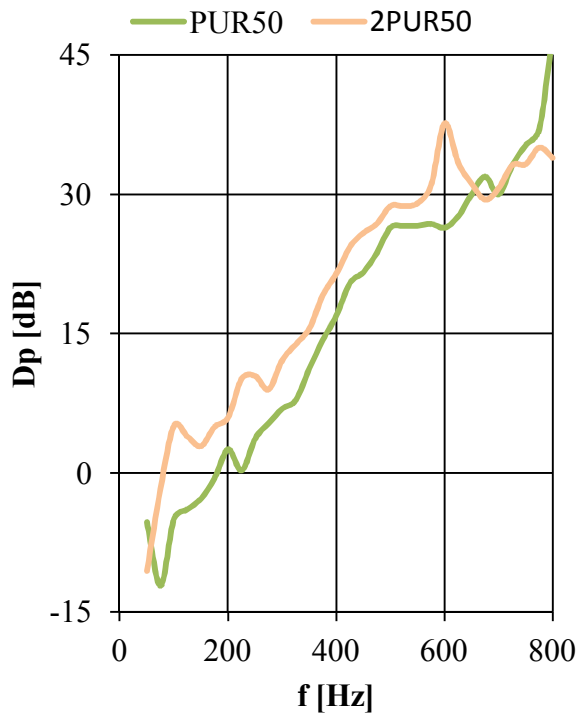
Obr. 28 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv frekvence u měkkých materiálů



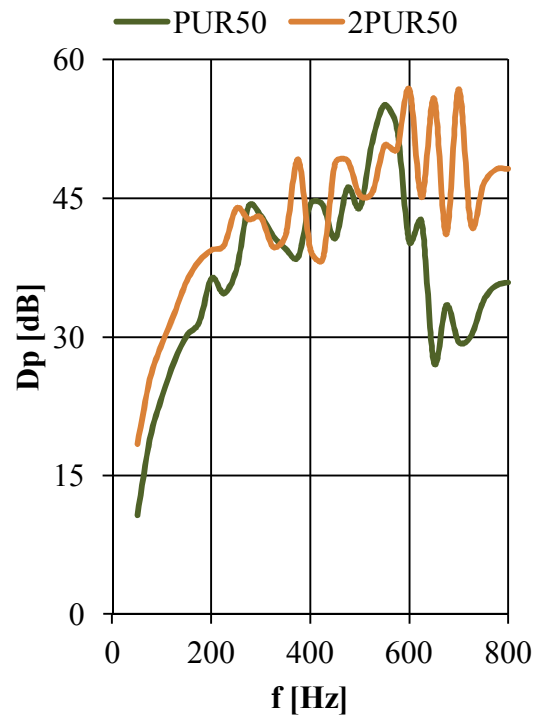
Obr. 27 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv frekvence u tvrdých materiálů

U porovitých materiálů se se zvyšující se frekvencí zvyšuje i přenosový útlum, tudíž lépe tlumí vibrace. Tvrdé materiály bez zátěže rezonují v celém rozsahu daného frekvenčního pásma, zatížené tlumí vibrace při vyšších frekvencích (nad 600 Hz).

7.4.3 Vliv velikosti pórů materiálu na přenosový útlum



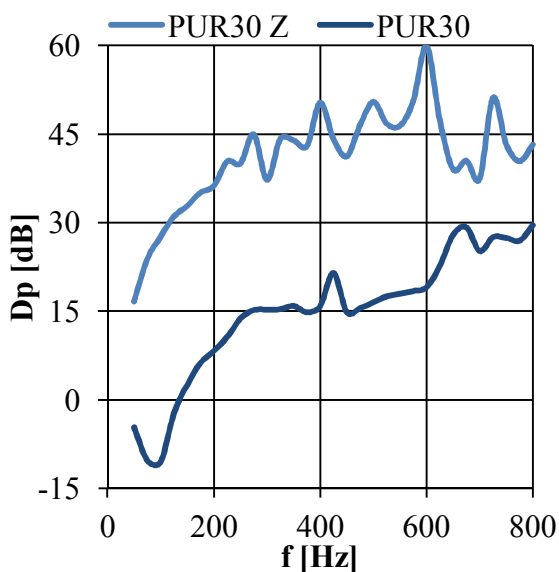
Obr. 30 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv velikosti pórů bez setrvačné zátěže



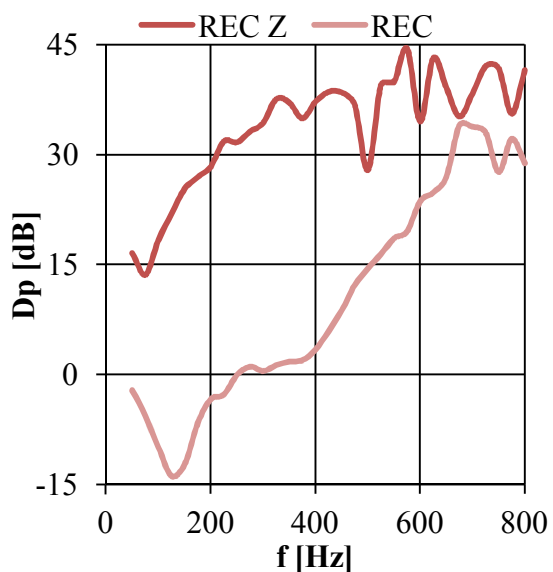
Obr. 29 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv velikosti pórů se setrvačnou zátěží

Pórovitost má u materiálu značný účinek. I když je materiál stejného chemického složení, tak velikost pórů určuje absorpci vibrací. Čím větší má materiál póry, tím lepší má tlumicí schopnost. Zde na příkladu je PUR pěna, kde se vložený útlum zvýšil o 5 dB.

7.4.4 Vliv setrvačné zátěže na přenosový útlum

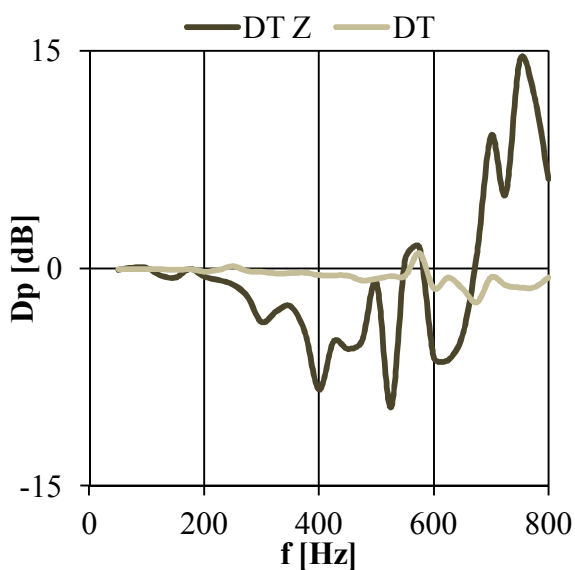


Obr. 31 Frekvenční závislosti přenosového útlumu PUR30 - vliv setrvačné zátěže

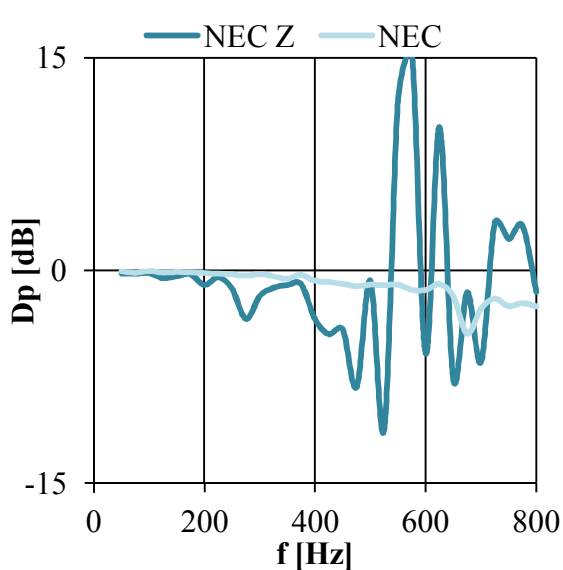


Obr. 32 Frekvenční závislosti přenosového útlumu REC - vliv setrvačné zátěže

Pórovité materiály s nízkou hmotností vykazují v zátěži lepší tlumení. Přenosový útlum se zvýšil až o 30dB.



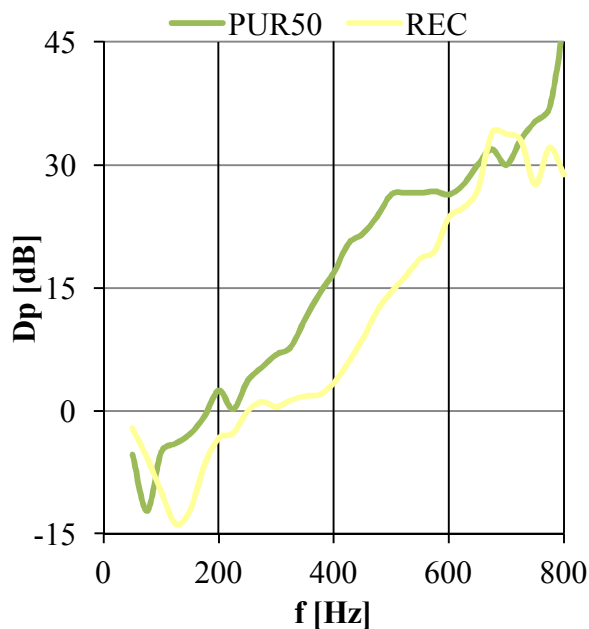
Obr. 34 Frekvenční závislosti přenosového útlumu DT - vliv setrvačné zátěže



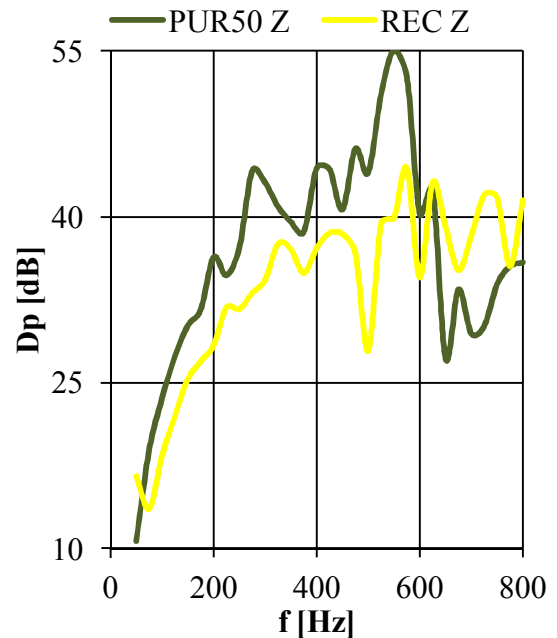
Obr. 33 Frekvenční závislosti přenosového útlumu NEC - vliv setrvačné zátěže

Tvrdé materiály vlivem zátěže při nižších frekvencích začnou rezonovat. Ale při vyšších frekvencích mají také vyšší schopnost pohlcovat vibrace.

7.5 Využití recyklované PUR pěny



Obr. 36 Frekvenční závislosti
přenosového útlumu REC



Obr. 35 Frekvenční závislosti přenosového
útlumu REC Z

Útlum se oproti nové pěně sice snížil, při (350 - 450) Hz došlo k poklesu až o 15 dB. Ale pořád má recyklát výrazné tlumící schopnosti. S ohledem na využitelnost starého odpadu, a tím pádem zlepšení životního prostředí, má cenu jít touto cestou.

8 VRSTVENÉ KONSTRUKCE

Využívají spojení vrstev pružného a tuhého prostředí, s malou a velkou hmotností a také nízkou a vysokou rychlostí šířené vlnění jednotlivými deskami. Pro snížení přenosu mechanických kmitů se využívá dynamický filtr, který vzniká na rozhraní prostředí dvou či více materiálů. Jeho principem je vytvoření takové vrstevnaté konstrukce, která snižuje intenzitu vibrací při průchodu vlnění tímto prostředím. Příkladem využití je obložení dopravního prostředku.

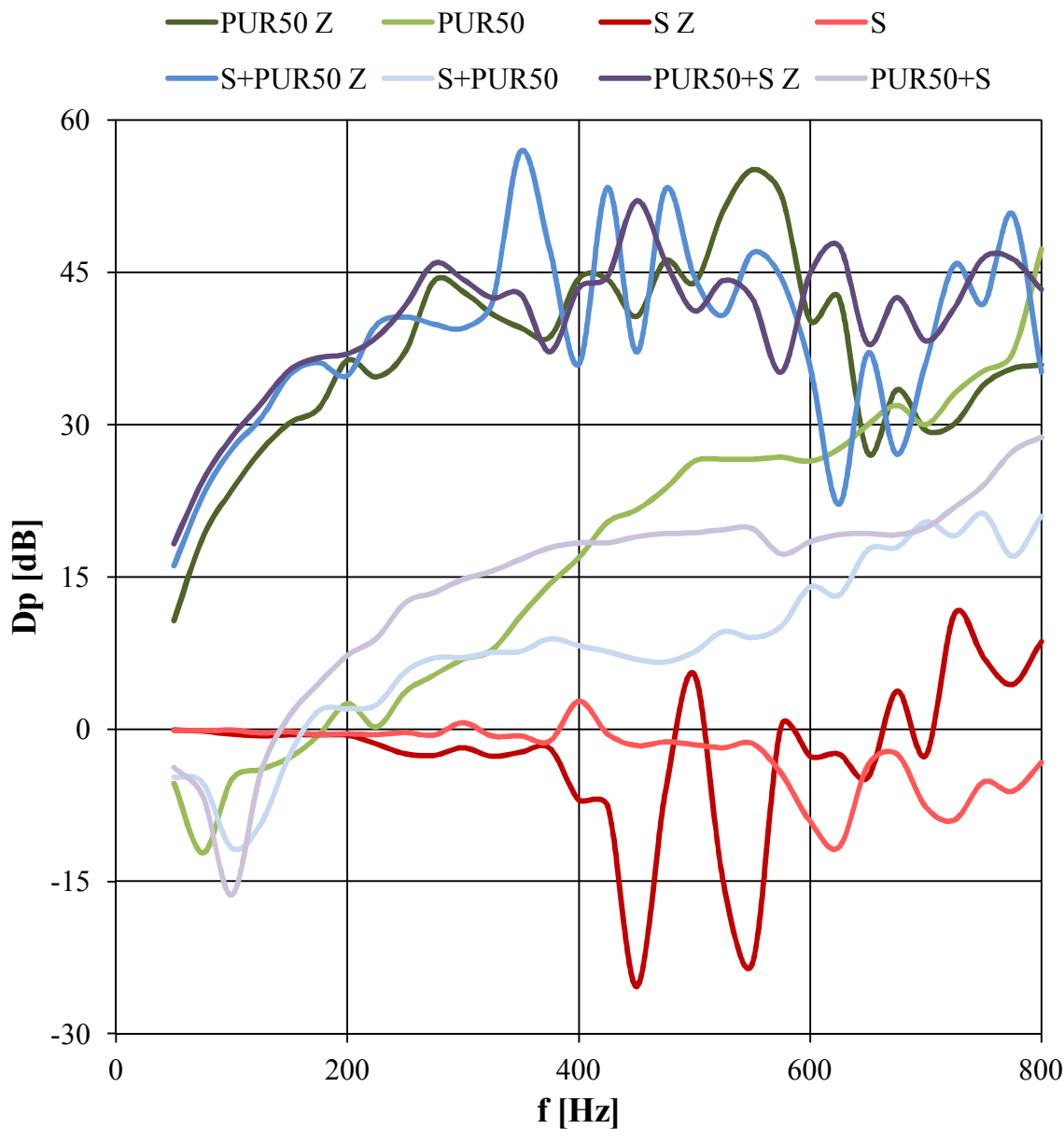
8.1 Dvouvrstvá konstrukce

Dvouvrstvá konstrukce je složena z tvrdé desky a desky tlumící vibrace. Takovýmto spojením získáme jednostranně mechanicky odolný celek, který tlumí vibrace.



Obr. 37 REC + S během měření buzené vibrátorem

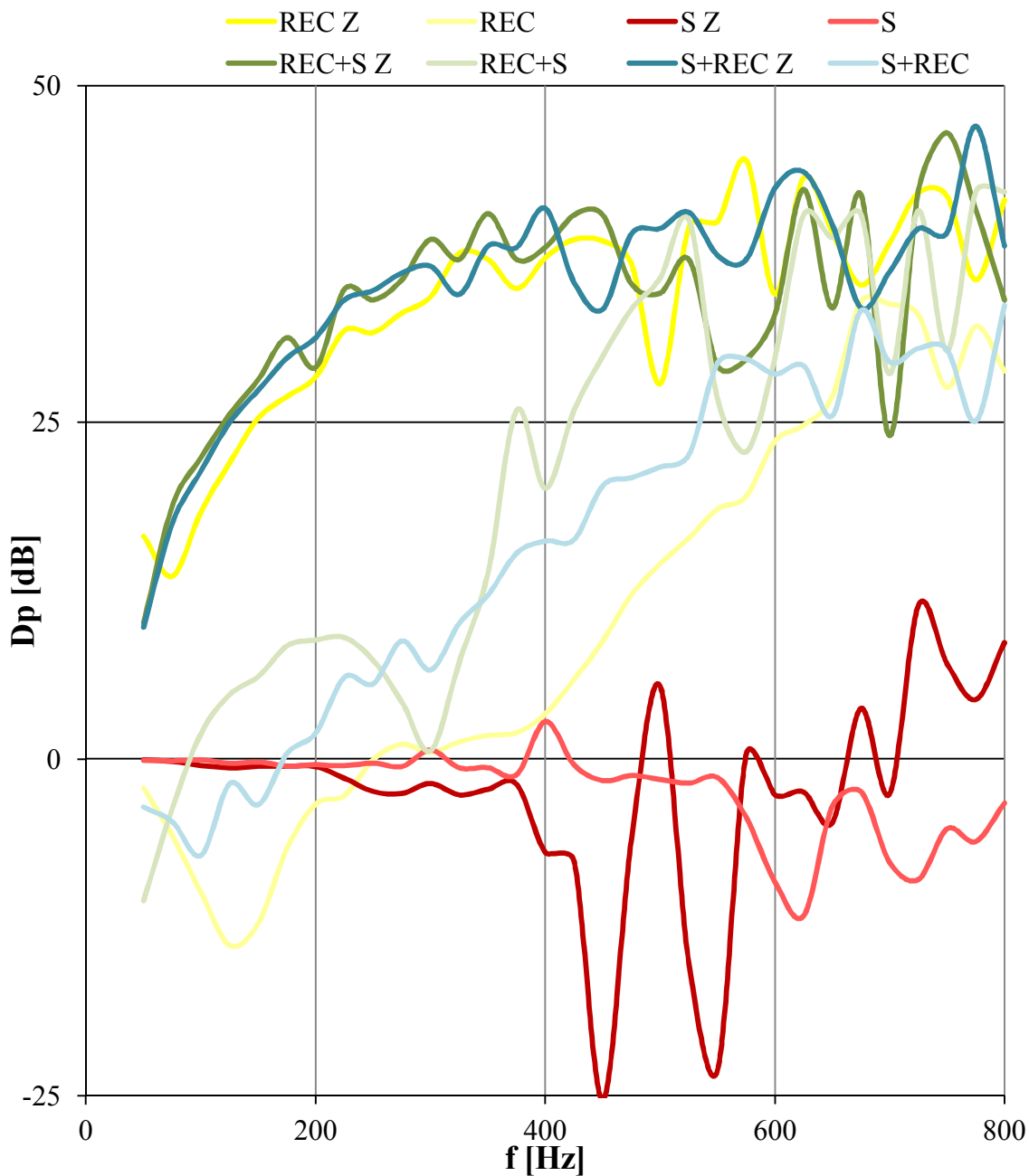
8.1.1 Sendvičový systém - S + PUR50



Obr. 38 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a PUR50

Spojením těchto dvou materiálů získá sádrokartonová deska výrazně lepší tlumící schopnosti. Sádrokarton samotný netlumí vibrace, jelikož rezonuje. V zatíženém stavu má sendvičová konstrukce při frekvencích (50 - 550) Hz podobné tlumení, jak samostatná 50 mm PUR pěna. Při frekvencích nad 550 Hz se přenosový útlum u konstrukce sádrokarton + 50 mm PUR pěna snížil až o 20 dB, než v obráceném pořadí.

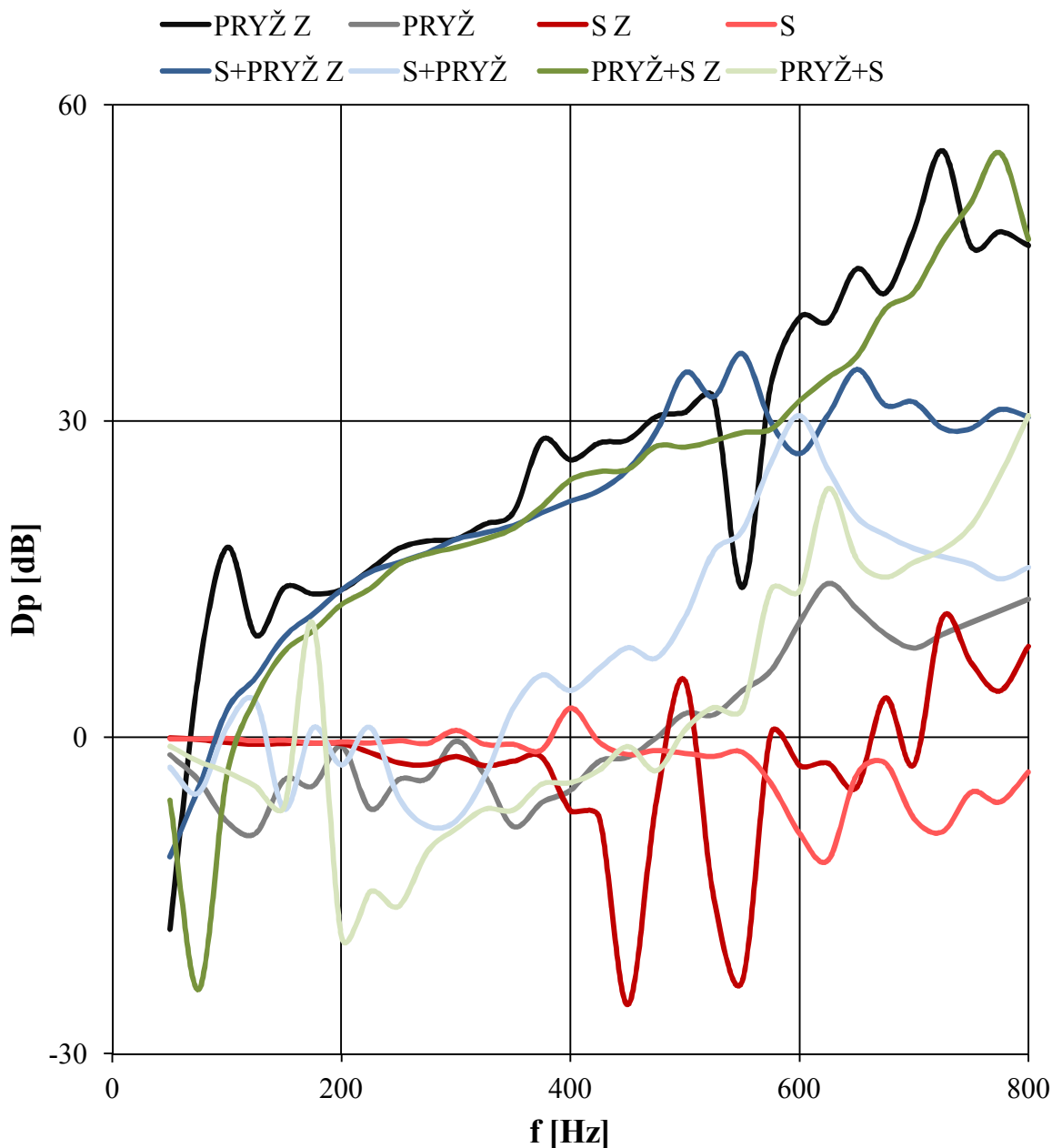
8.1.2 Sendvičový systém - S + REC



Obr. 39 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a REC

Při použití recyklované PUR pěny je průběh přenosového útlumu stejný, jak u nového materiálu.

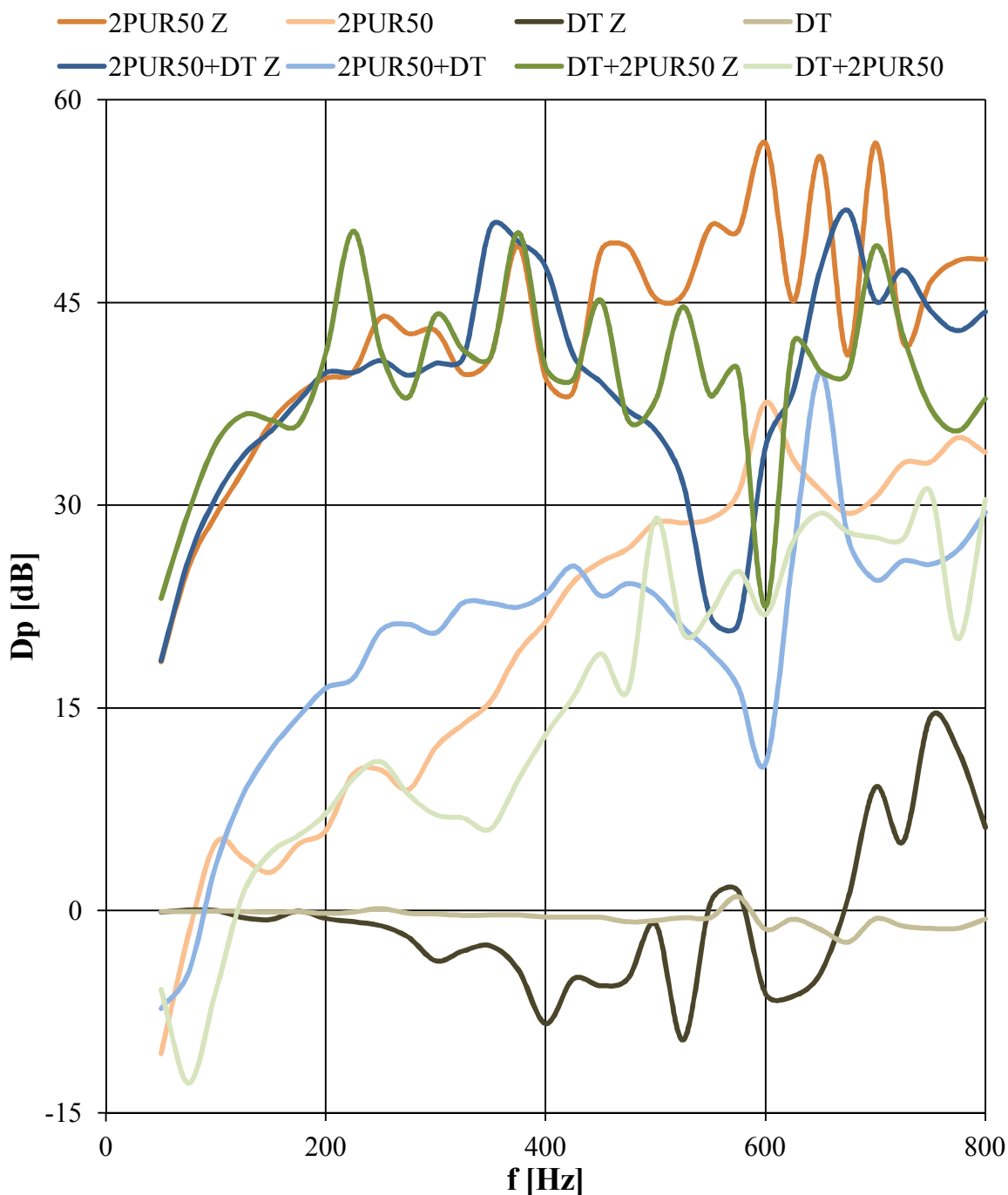
8.1.3 Sendvičový systém - S + PRYŽ



Obr. 40 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a PRYŽ

V nezátženém stavu při frekvencích do 400 Hz je přenosový útlum záporný, jakmile se překročí tato hodnota, tak konstrukce začne tlumit vibrace, kdy útlum dosahuje maximální hodnoty 30 dB. Při zatížení se tlumení zvýší, kde nad frekvencí 100 Hz je kladné s maximální hodnotou 55 dB. Při vyšších frekvencích nad 450 Hz, v zatíženém stavu, záleží na pořadí desek. Je-li první pryžová deska od zdroje vibrací, tak je přenosový útlum vyšší až o 25 dB. V porovnání s PUR pěnou je tlumení konstrukce s pryží horší.

8.1.4 Sendvičový systém - DT + 2PUR50

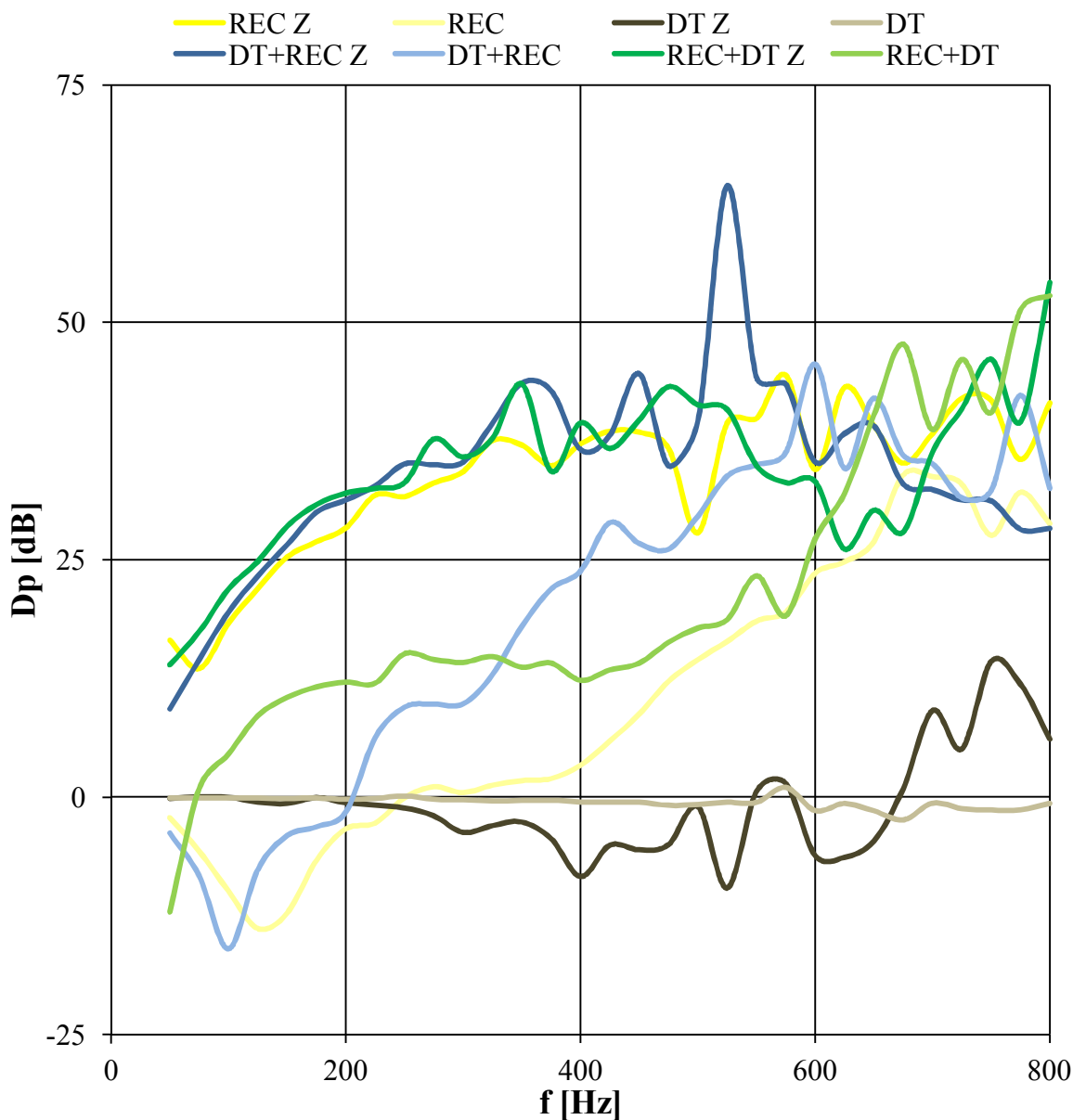


Obr. 41 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a 2PUR50

Díky PUR pěně získá vrstevnatá konstrukce větší schopnost tlumit kmity. I zde záleží na pořadí vrstev, tedy hlavně v nezátíženém stavu, pokud je PUR pěna první od zdroje vibrací, je přenosový útlum o desítku decibelů vyšší, při nízkých frekvencích rezonuje. V zatíženém stavu pořadí desek nehraje velkou roli, přenosový útlum je téměř shodný s maxi-

mem 52 dB. V nízkých frekvencích (50 - 450) Hz a nad 650 Hz se vyrovná samostatné PUR pěně. Při frekvenci (450 - 650) Hz se tlumení snížilo až o 35 dB.

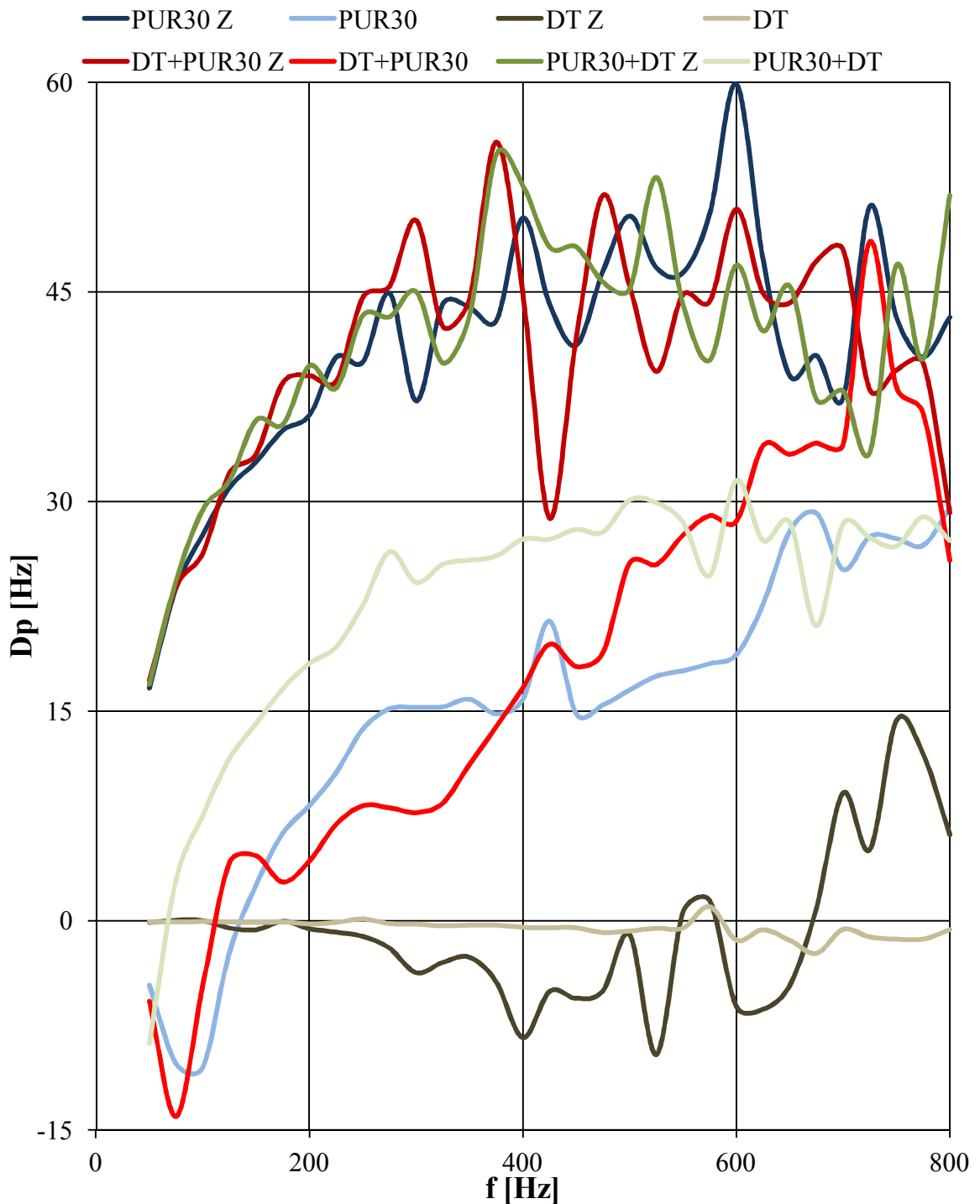
8.1.5 Sendvičový systém - DT + REC



Obr. 42 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a REC

Recyklovaná 50 mm PUR pěna se chová shodně s PUR pěnou nerecyklovanou. Maximální hodnota útlumu v zátěži je 54 dB. V nezátěženém stavu opět dochází k rezonanci při nízké frekvenci 100 Hz, kdy útlum je -15 dB.

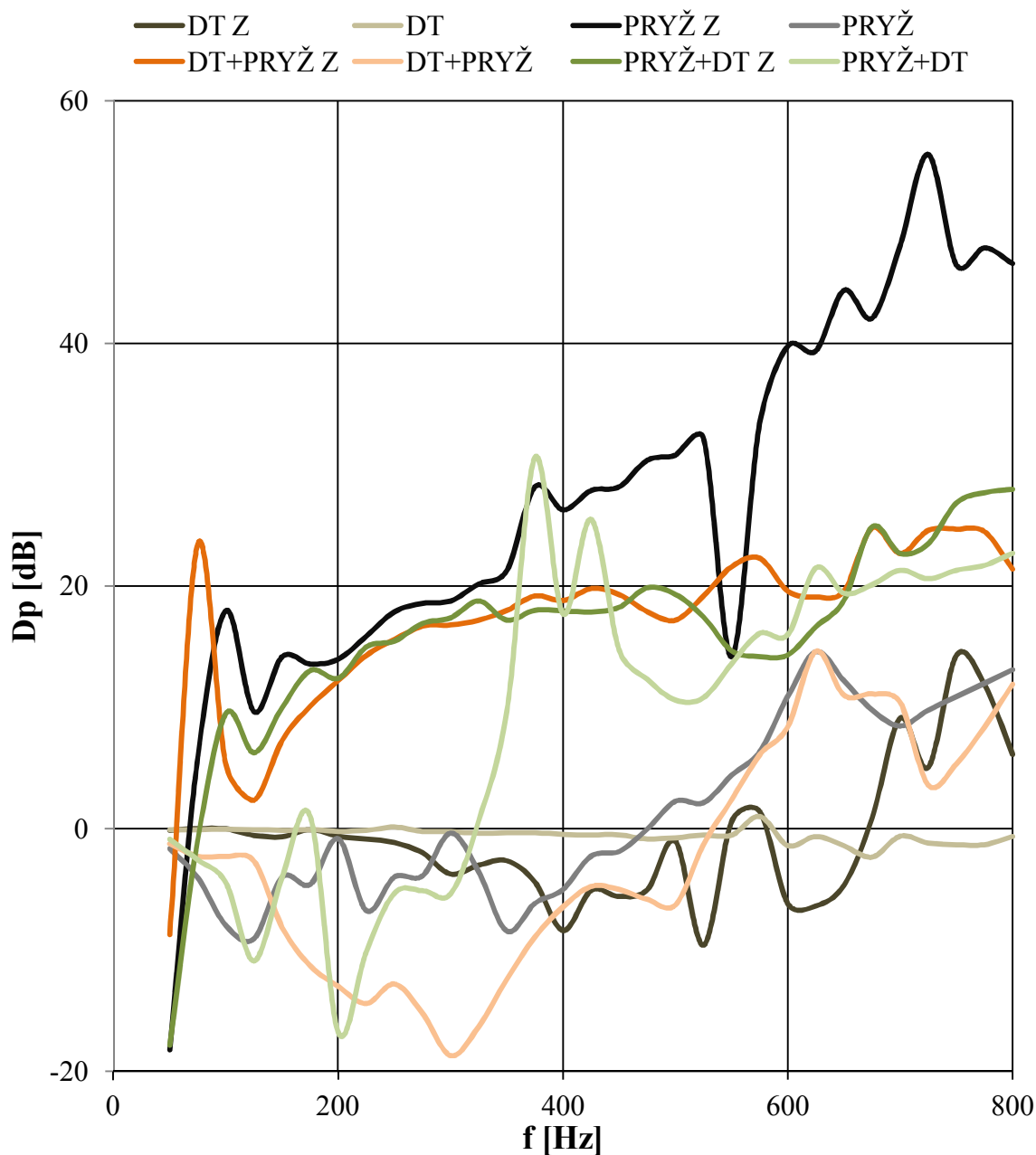
8.1.6 Sendvičový systém - DT + PUR30



Obr. 43 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a PUR30

Při zatížení je tlumení vibrací stejné velké, jak s 50 mm PUR pěnou, tedy 55 dB. V nezatíženém stavu do frekvence 550 Hz je vyšší útlum i o několik desítek, když je první PUR pěna. Nad touto frekvencí stoupá přenosový útlum u opačného pořadí desek.

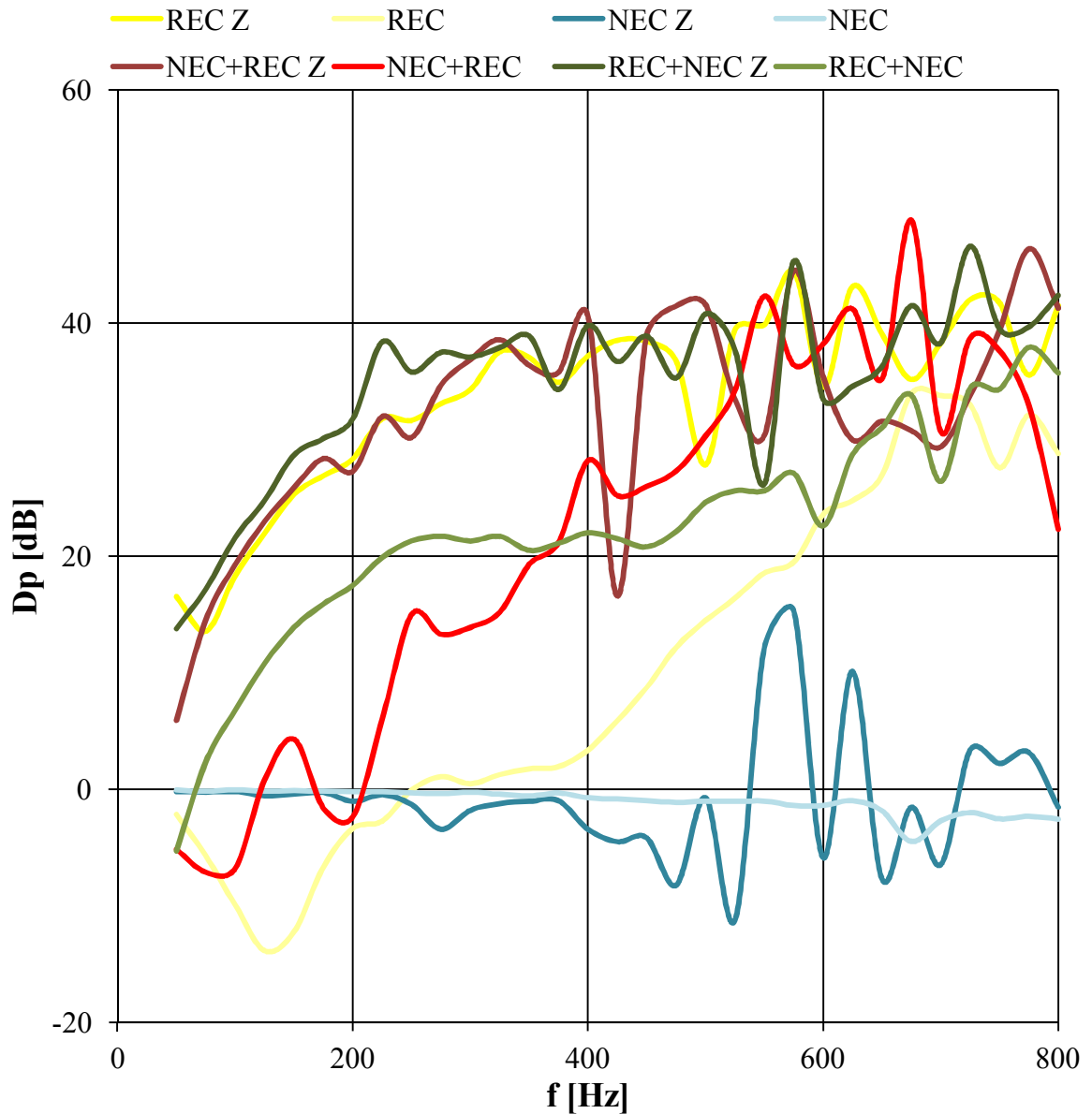
8.1.7 Sendvičový systém - DT + PRYŽ



Obr. 44 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a PRYŽ

Nezatížená konstrukce při nízkých frekvencích rezonuje. Tedy u sestavy pryžová deska + dřevotřísková to je do frekvence 325 Hz a u obráceného pořadí to je do 525 Hz. Nad tyto frekvence vykazují utlumení vibrací. V zatíženém stavu je přenosový útlum kladný s maximální hodnotou 30 dB.

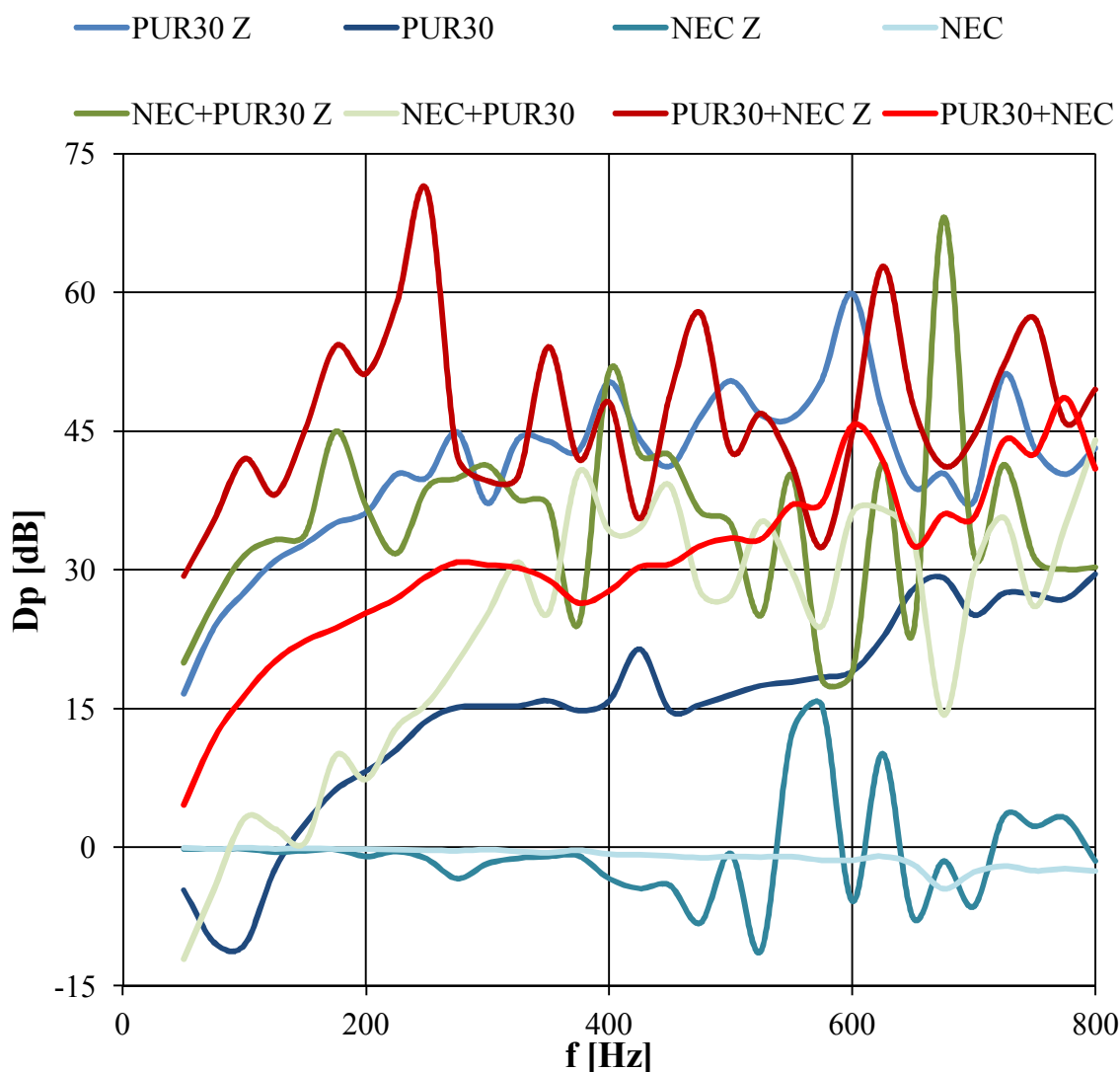
8.1.8 Sendvičový systém - NEC + REC



Obr. 45 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály NEC a PUR50

Polymer NECURON má špatné tlumící vlastnosti. Ve spojení s PUR pěnou se tlumící schopnost zvyšuje. Kombinace PUR pěny, a pak polymeru je lepší pro nižší frekvence do 400 Hz, jelikož dosahuje většího útlumu. Nad touto frekvencí je lepší opačná kombinace. Rozdíl je až 15 dB. V zatíženém stavu se útlum zvyšuje s frekvencí až do 48 dB.

8.1.9 Sendvičový systém - NEC + PUR30



Obr. 46 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály NEC a PUR30

Opět kombinace PUR pěny, a pak polymeru je lepší pro nižší frekvence do 325 Hz. Nad touto frekvencí je lepší opačná kombinace. S menší tloušťkou klesá hranice frekvence, pro kterou je výhodná určitá kombinace. V zatíženém stavu se útlum zvyšuje s frekvencí až do 72 dB, což je více než u 50 mm PUR pěny.

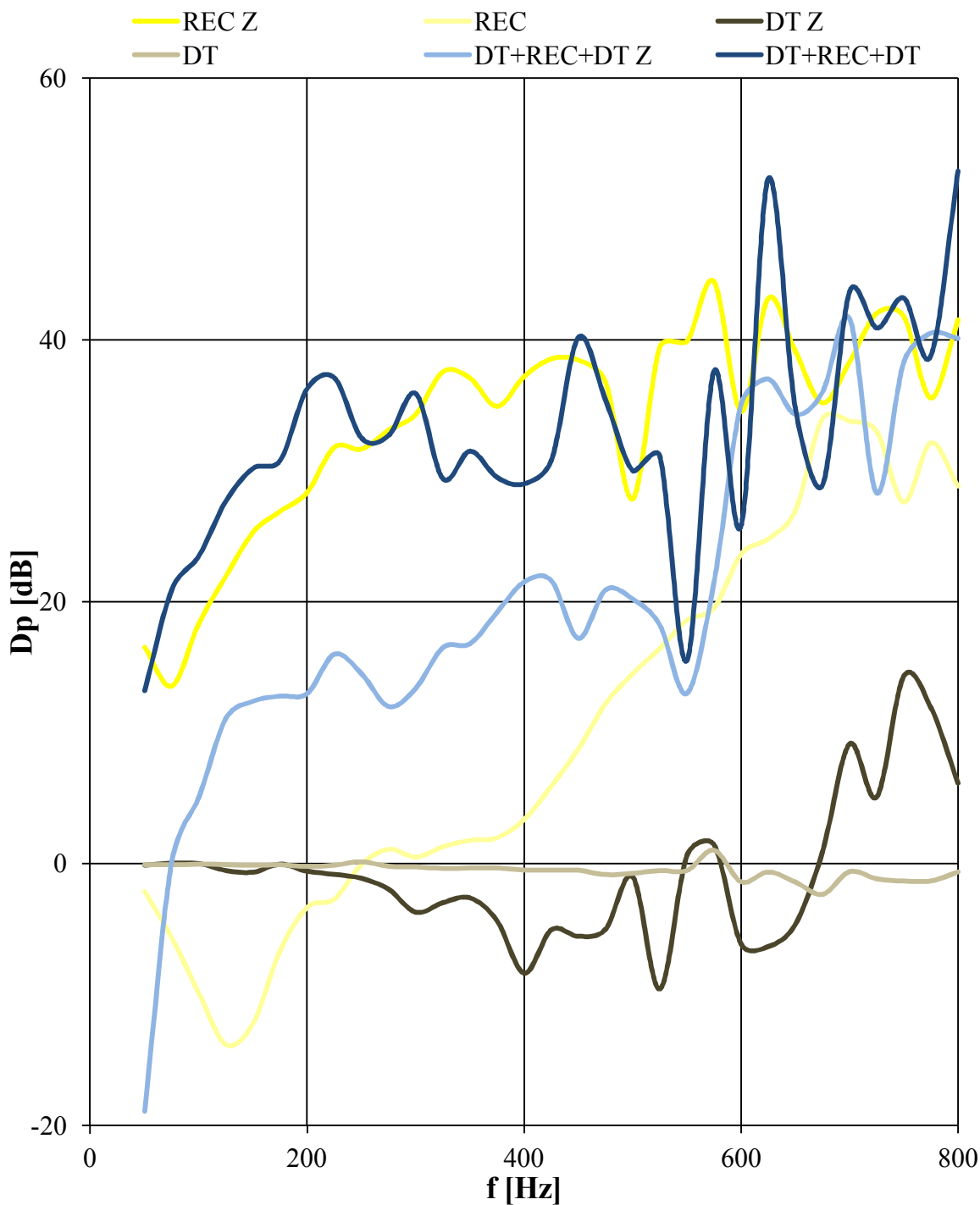
8.2 Třívrstvé konstrukce

Sestavením tří vrstev získáme mechanicky odolný povrch z obou stran a tlumící jádro.



Obr. 47 DT + REC + DT Z během měření buzené vibrátorem

8.2.1 Sendvičový systém - DT + REC + DT

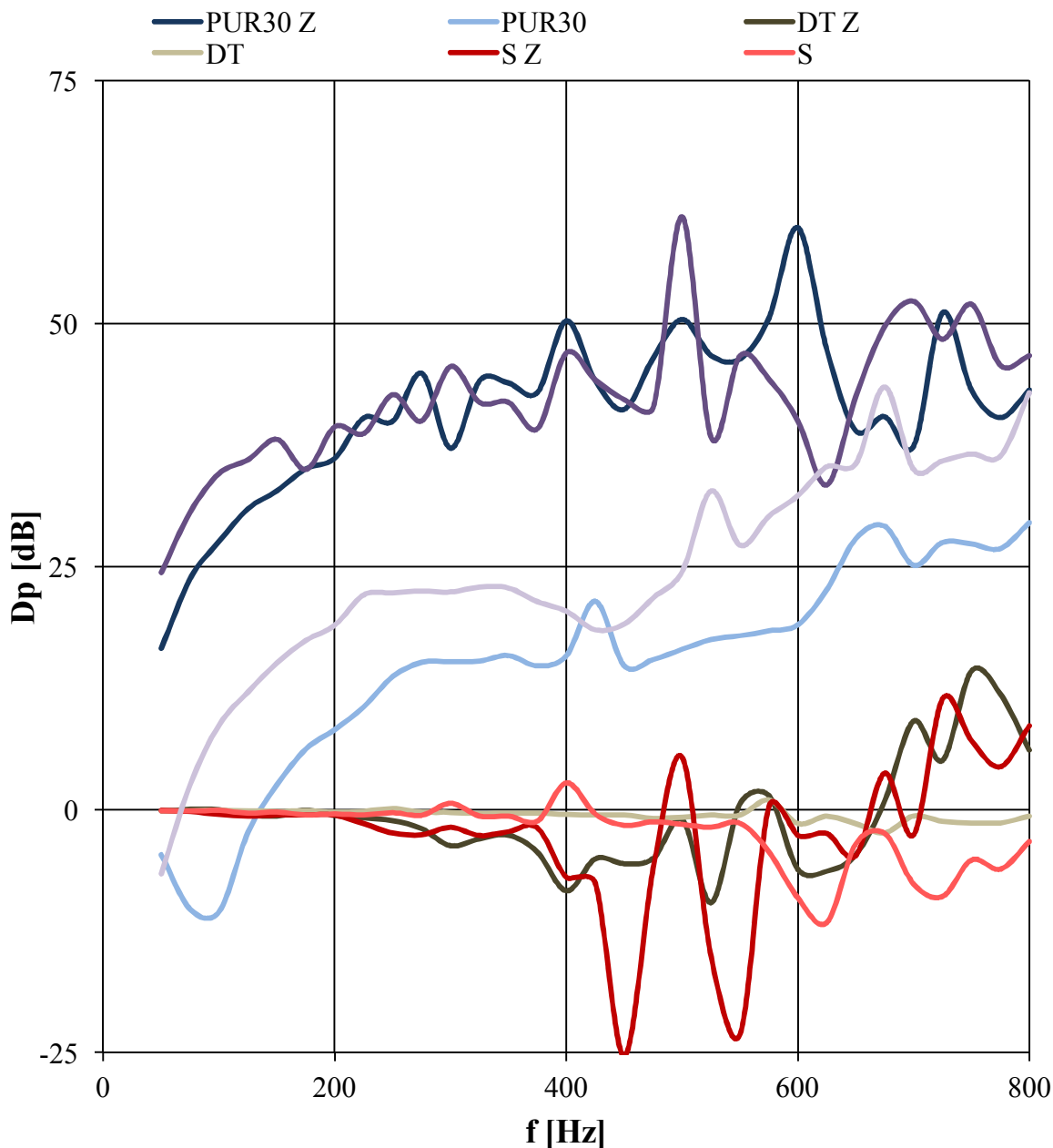


Obr. 48 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT, REC a DT

Nezatížená konstrukce při frekvencích (50 - 75) Hz rezonuje, poté začne útlum stoupat na maximální hodnotu 42 dB při 700 Hz. Při zatížení je přenosový útlum v celém rozsahu

kladný s maximem 52 dB při 625 Hz. Největší pokles je při 550 Hz o 25 dB (i v nezátíženém stavu je zde úbytek).

8.2.2 Sendvičový systém - S + PUR30 + DT



Obr. 49 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S, PUR30 a DT

Sádrokarton i dřevotříska má špatné tlumící vlastnosti, přidáním PUR pěny se přenosový útlum výrazně zvýší. V nezátíženém stavu se útlum zvýší o (5 - 10) dB než u samostatné PUR pěny. V zatíženém stavu je tlumení větší o 5 dB při frekvenci (50 - 150) Hz, poté kolísá kolem hranice tlumení PUR pěny.

ZÁVĚR

V této práci se zabývám snižování mechanických vibrací. V teoretické části jsem shrnul základní veličiny mechanických kmitů, dále pak chování šíření chvění v tělesech, druhy vibrací a hlavně metody boje proti vibracím. Snižování vibrací a hluku má příznivý dopad i na životní prostředí, proto je na místě se tímto zabývat.

V praktické části jsem se zaměřil na měření přenosového útlum u vybraných materiálů. Nejlepší pro útlum vibrací jsou materiály pórovité s malou hmotností a nízkou rychlostí šířené vlnění. Tyto materiály mají také dobrou zvukovou či tepelnou izolaci. Příkladem jsou PUR pěny, což se měřením potvrdilo, dále mezi takové materiály patří pěnový polystyren, pěnový hliník atd. Útlum blížící se k nule z měřených vzorků má ocel. Rezonovat začaly tvrdé materiály jako je dřevotřískka, sádrokarton či polymer NECURON a to hlavně při vyšších frekvencích.

Se zvyšující se frekvencí se zvyšuje i přenosový útlum. Tloušťka materiálu zvyšuje tlumení, útlum s tloušťkou pozvolna narůstá. Pórovité materiály s nízkou hmotností vykazují v setrvačné zátěži lepší tlumení. Tvrdé materiály v setrvačné zátěži při nižších frekvencích začnou rezonovat, ale při vyšších frekvencích mají také vyšší schopnost pohlcovat vibrace. Rozdílná pórovitost stejného materiálu má značný vliv. Čím větší má materiál póry, tím lepší má tlumící schopnost. Dále se dají využívat recykláty, které dosahují podobných výsledků jako nové materiály. Hlavní výhodou je zpracování starého odpadu.

Pokud je třeba mechanické odolné konstrukce, tak s výhodou se dají využít sendvičové materiály. Kdy spojením tuhého obalu a pórovitého jádra dostaneme pevný celek, který dostatečně tlumí mechanické kmity. Dle požadavků v provozu se určuje počet a pořadí vrstev u takového sestavení. Pokud je třeba celkově mechanicky odolný celek, tak se dá s výhodou využít třívrstvou konstrukci, kde je mechanický odolný obal s tlumícím jádrem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] MIŠUN, Vojtěch a Zdeněk HLAVÁČ. *Vibrace a hluk: Určeno pro stud. fak. strojní*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998, 177 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1262-3.
- [2] NOVÝ, Richard a Zdeněk HLAVÁČ. *Hluk a otřesy: Určeno pro stud. fak. strojní*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 1989, 190 s. ISBN 80-010-0101-6.
- [3] MATOUŠEK, Richard. *Vibrace*. 1. vydání. Praha 10: GEOPRINT, 1998.
- [4] SMETANA C., Hluk a vibrace. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5
- [5] MALECKI, I.: *Physical Foundations of technical Acoustics*, Pergamon I Press, 1969
- [6] Kmitání. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-01-12]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kmitán%C3%AD>
- [7] KAHUDA, St. Slitiny, které dokáží tlumit vibrace. In: *Technik.ihned.cz* [online]. 12.4.2011 [cit. 2012-02-12]. Dostupné z: <http://TECHNIK.IHNED.CZ/c1-51542760-slitiny-ktere-dokazi-tlumit-vibrace>
- [8] Výrobky z hliníkové pěny. In: NOVÁ, Iva. [online]. [cit. 2012-01-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyrobky-z-hlinikove-peny.html>
- [9] Ústav fyziky a materiálového inženýrství: Environmentální fyzika. [online]. [cit. 2012-01-12]. Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/>
- [10] ZEMAN, Vladimír a Zdeněk HLAVÁČ. *Kmitání mechanických soustav*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 218 s. ISBN 80-704-3337-X.
- [11] JIŘÍČEK, Ondřej a Zdeněk HLAVÁČ. *Úvod do akustiky: Určeno pro stud. fak. strojní*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 146 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-010-2460-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a, b [m]	Rozměry membrány
c [m/s]	Rychlost šířené vlnění
c [N/m]	Tuhost soustavy
c_L [m/s]	Podélné vlnění
D_p [dB]	Přenosový útlum
D_V [dB]	Vložený útlum
f [Hz]	Frekvence
E [N/m ²]	Modul pružnosti v tahu
E_1 [MPa]	Modul pružnosti desky
E_2 [MPa]	Modul pružnosti nátěru
E_k [J]	Pohybová energie
E_p [J]	Potenciální energie
F [N]	Síla
F_1 [N]	Amplituda síly na vstupu do kmitavé soustavy
F_2 [N]	Amplituda síly na výstupu z kmitavé soustavy
h [%]	Pórovitost
h_1 [m]	Tloušťka desky
h_2 [m]	Tloušťka nátěru
I [m ⁴]	Moment setrvačnosti
I [W·m ²]	Referenční hodnota intenzity
I_0 [W·m ²]	Intenzita akustického tlaku
Δl [m]	Rozdíl délky před a po stlačení pružiny
L [m]	Rozměr daného tělesa
L_P [dB]	Hladina akustického tlaku

L_W [dB]	Hladina akustického tlaku
L_{w1} [dB]	Hladina akustického výkonu bez použití tlumiče
L_{w2} [dB]	Hladina akustického výkonu s použitím tlumiče
m [kg]	Hmotnost
m, n [-]	Konstanty nabývající kladných celých hodnot
M [Nm]	Moment
M [kg/m ²]	Plošná hmotnost
n [-]	Celé kladné číslo
p [Pa]	Efektivní hodnota akustického tlaku
p_A [Pa]	Akustický tlak
p_0 [Pa]	Atmosférický tlak
P [W]	Akustický výkon
P_0 [W]	Referenční akustický výkon
S [m ²]	Průřez
T [s]	Perioda vlnění
T [kg/m]	Síla napínající jednotkovou délku membrány
u [m]	Akustická výchylka
u_0 [m]	Amplituda akustické výchylky
v [m/s]	Rychlost kmitání
v_1 [m/s]	Amplituda rychlosti na vstupu do kmitavé soustavy
v_2 [m/s]	Amplituda rychlosti na výstupu z kmitavé soustavy
V_P [m ³]	Celkový objem
V_P [m ³]	Objem pórů
y [m]	Výchylka
y_0 [m]	Amplituda výchylky

Z_m [N.s.m ⁻³]	Mechanická impedance
α [-]	Koeficient zvukové pohltivosti
α [°]	Úhel natočení
η_2 [-]	Činitel vnitřního tlumení nátěru
λ [m]	Vlnová délka
ρ_A [kg/m ³]	Hustota porézního materiálu
ρ_M [kg/m ³]	Hustota vláknitého materiálu
σ [Mpa]	Napětí
τ [s]	Čas
φ [°]	Fázový úhel
ω [s ⁻¹]	Úhlový kmitočet
2PUR50	50 mm deska z PUR pěny - s většími póry
DT	Dřevotřísková deska
NEC	Deska z polymeru NECURON
OCEL	Ocelová deska
PRYŽ	Pryžová deska
PUR30	30 mm deska z PUR pěny
PUR50	50 mm deska z PUR pěny
REC	50 mm deska z recyklované PUR pěny
S	Sádrokartonová deska
Z	Zátěž

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Prahové křivky slyšitelnosti.....	13
Obr. 2 Vzájemná závislost veličin kmitání, kde $\varphi=0$	16
Obr. 3 Lineární oscilátor [2].....	17
Obr. 4 Průběh akustického tlaku.....	21
Obr. 5 Rozdělení vibrací.....	25
Obr. 6 Harmonické kmity.....	26
Obr. 7 Neharmonické kmity.....	26
Obr. 8 Tlumené kmity.....	27
Obr. 9 Porézní materiály [7].....	31
Obr. 10 Hradící hmota [2].....	33
Obr. 11 Útlum ohybového vlnění [2].....	33
Obr. 12 Pružná vložka.....	34
Obr. 13 Útlum podélných vln u ocelových tyčí při použití středně tvrdé pružné vložky [2].....	35
Obr. 14 Rozdíl deformací v plně zatíženém a před pruženým stavem [6].....	36
Obr. 15 Závislost deformace na zatížení.....	36
Obr. 16 Pružné elementy [1].....	37
Obr. 17 Antivibrační tlumič.....	37
Obr. 18 Vzdušné vaky [1].....	38
Obr. 19 Měřicí aparatura.....	40
Obr. 20 Závislost amplitudy výchylky na frekvenci.....	43
Obr. 21 Závislost amplitudy rychlosti na frekvenci.....	44
Obr. 22 Závislost amplitudy zrychlení na frekvenci.....	44
Obr. 23 Frekvenční závislosti přenosového útlumu nezatížených vzorků.....	45
Obr. 24 Frekvenční závislosti přenosového útlumu zatížených vzorků.....	46
Obr. 26 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv tloušťky se zátěží.....	48
Obr. 25 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv tloušťky bez zátěže.....	48
Obr. 28 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv frekvence u tvrdých materiálů.....	49
Obr. 27 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv frekvence u měkkých materiálů.....	49

Obr. 30 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv velikosti pórů se setrvačnou zátěží.....	50
Obr. 29 Frekvenční závislosti přenosového útlumu - vliv velikosti pórů bez setrvačné zátěže	50
Obr. 31 Frekvenční závislosti přenosového útlumu PUR30 - vliv setrvačné zátěže	51
Obr. 32 Frekvenční závislosti přenosového útlumu REC - vliv setrvačné zátěže	51
Obr. 34 Frekvenční závislosti přenosového útlumu NEC.....	51
Obr. 33 Frekvenční závislosti přenosového útlumu DT - vliv setrvačné zátěže	51
Obr. 36 Frekvenční závislosti přenosového útlumu REC Z.....	52
Obr. 35 Frekvenční závislosti přenosového útlumu REC	52
Obr. 37 REC + S během měření buzené vibrátorem.....	53
Obr. 38 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a PUR50.....	54
Obr. 39 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a REC.....	55
Obr. 40 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S a PRYŽ.....	56
Obr. 41 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a 2PUR50	57
Obr. 42 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a REC.....	58
Obr. 43 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a PUR30	59
Obr. 44 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT a PRYŽ.....	60
Obr. 45 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály NEC a PUR50.....	61
Obr. 46 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály NEC a PUR30.....	62
Obr. 47 DT + REC + DT Z během měření buzené vibrátorem	63
Obr. 48 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály DT, REC a DT.....	64
Obr. 49 Frekvenční závislosti přenosového útlumu pro materiály S, PUR30 a DT	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hladiny intenzity různých zvuků	14
Tab. 2 Hladinové veličiny mechanického chvění	18
Tab. 3 Přehled rychlostí zvuku ve vybraných materiálech.....	20
Tab. 4 Hladinové veličiny využívané ve vibroakustice.....	24
Tab. 5 Základní informace vyhodnocovaných vzorků.....	41
Tab. 6 Výpočet základních veličin pro PRYŽ.....	42
Tab. 7 Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími frekvencemi nezatížených vzorků.....	47
Tab. 8 Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími frekvencemi zatížených vzorků	47