

Viskoelastické vlastnosti materiálů

Tomáš Gargulák

Bakalářská práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš GARGULÁK**
Studijní program: **B 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Chemie a technologie materiálů**

Téma práce: **Viskolelastické chování materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši týkající se viskoelastického chování materiálů podle doporučené literatury.
2. V experimentální části pro dané materiály proměřte frekvenční charakteristiky veličin charakterizujících tlumící vlastnosti materiálů.
3. Zhodnoťte naměřené frekvenční závislosti a proveďte příslušná doporučení.
4. Citujte použitou literaturu.



Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Nový R.: Hluk a chvění, Praha, 2000.
2. Mišun V.: Vibrace a hluk, Brno, 2008.
3. Vaňková M. a kol.: Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí, část I. Brno, 1995.
4. Macháček L.: Struktura a vlastnosti materiálů. Brno, 1987.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Vašina, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

15. února 2010

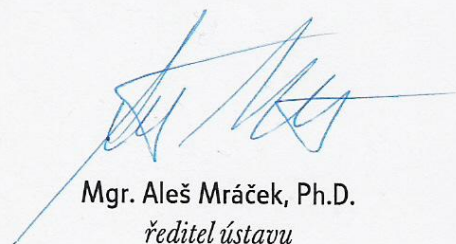
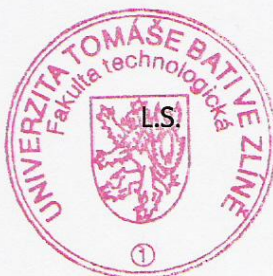
Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2010

Ve Zlíně dne 15. února 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem této práce je stanovit frekvenční charakteristiky veličin charakterizující tlumící vlastnosti materiálů. Teoretická část práce vysvětluje základní typy materiálů a typy viskoelastických modelů. V experimentální části práce se zkoumá přenosový útlum vybraných materiálů a toto zkoumání se vyhodnocuje.

Klíčová slova: Přenosový útlum, Viskoelasticita, Viskoelastické modely

ABSTRACT

The aim of this work is to set frequency response parameters characterizing the damping properties of materials. The theoretical section explains the basic types of materials and types of viscoelastic models. The experimental part of this work examines the transmission attenuation of selected materials, and this examination is evaluated.

Keywords: Transmission attenuation, Viscoelasticity, Viscoelastic models

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za jeho pomoc a trpělivost při konzultacích, bez kterých by se tato práce neobešla. Dále bych chtěl poděkovat rodině za to, že kolem mě chodili po špičkách když jsem tuto práci dělal a spolužákům za jejich rady.

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

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	10
1.1 VSKOELASTICITA MATERIÁLŮ	10
1.2 ELASTICKÉ MATERIÁLY	10
1.3 VISKÓZNÍ MATERIÁLY	12
1.4 VSKOELASTICKÉ MATERIÁLY	13
2 PRUŽNOST A TLUMENÍ	15
2.1 KOMPLEXNÍ MODUL PRUŽNOSTI	15
2.2 ČINITEL VNITŘNÍHO TLUMENÍ.....	15
2.3 PŘENOSOVÝ ÚTLUM	16
2.4 SOUVISLOST PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU A ČINITELE VNITŘNÍHO TLUMENÍ	17
2.5 POROVNÁNÍ MATERIÁLŮ PODLE JEJICH ČINITELE VNITŘNÍHO TLUMENÍ	18
2.6 VLIV TEPLoty NA VSKOELASTICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ	19
3 VSKOELASTICKÉ MODELY	20
3.1 ZÁKLADNÍ PRVKY	20
3.1.1 Pružný prvek	20
3.1.2 Viskozitní prvek.....	21
3.2 DVOUPRVKOVÉ MODELY	23
3.2.1 Maxwellův model	23
3.2.1.1 Chování Maxwellova modelu při konstantní deformaci.....	25
3.2.1.2 Chování Maxwellova modelu při konstantní rychlosti deformace	26
3.2.1.3 Chování Maxwellova modelu při konstantním napětí.....	27
3.2.1.4 Chování Maxwellova modelu při periodické deformaci	28
3.2.2 Kelvinův model.....	29
3.2.2.1 Chování Kelvinova modelu při konstantním napětí	30
3.2.2.2 Chování Kelvinova modelu při konstantní rychlosti deformace	31
3.3 TŘÍPRVKOVÉ MODELY	32
3.3.1 Modely třídy C	32
3.3.2 Modely třídy D	33
3.4 ČTYŘPRVKOVÉ MODELY.....	34
3.4.1 Modely složené ze dvou pružin a dvou tlumičů.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 CÍLE PRÁCE	37
5 VLASTNÍ MĚŘENÍ	38
5.1 POPIS PRÁCE.....	38
5.2 POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ.....	39
5.3 POUŽITÉ MATERIÁLY	40
5.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	41
5.4.1 Vliv zátěže na přenosový útlum.....	43
5.4.2 Vzájemné srovnání materiálů z hlediska přenosového útlumu při vlivu setrvačné zátěže.....	46

5.4.3	Sendvičové soustavy	48
5.4.3.1	Sendvičová soustava složená z molitanu a korku	48
5.4.3.2	Sendvičová soustava složená z recyklátu a polyuretanu	50
5.4.4	Porovnání sendvičových struktur se samostatnými materiály	51
ZÁVĚR	.....	55
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	.....	56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	.....	57
SEZNAM OBRÁZKŮ	.....	59
SEZNAM TABULEK	.....	61

ÚVOD

Technika a její prudký rozvoj v poslední době klade stále více důraz na zlepšování životního prostředí a na eliminaci vlivů, které negativně působí na člověka. V moderní době je snaha snížit tyto vlivy v pracovních procesech na minimum. Důvodem je zvýšení pracovní výkonnosti, zvýšení bezpečnosti práce a tím i produktivity práce. Jedná se zejména o vibraci a hluk, které jsou nedílnou součástí všech pracovních procesů strojních zařízení a patří k environmentálním faktorům.

Vibrace vznikají v důsledku časově proměnných silových účinků, působících v určitých místech sledovaného zařízení. Jsou v některých případech chtěné a potřebné na správný chod určitých strojů jakou jsou např. vibrační válce a vibrační pěchy.

Ve velké většině případů jsou ale nežádoucí a proto je snaha o jejich eliminaci. Vibracím se dá předcházet vhodnou konstrukcí zařízení nebo vhodným výběrem materiálu.

Tato práce se věnuje zkoumání tlumících vlastností u vybraných druhů materiálů z hlediska jejich schopnosti tlumit vibrace v závislosti na budící frekvenci, setrvačné zátěži, tloušťce a jejich vzájemné kombinaci.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ

1.1 Viskoelasticita materiálů

Viskoelasticita materiálů souvisí se schopností materiálů tlumit mechanické vibrace. Když budeme materiál střídavě namáhat v tahu i tlaku v oblasti elastických deformací, bude se u něj v čase měnit poměrná deformace a napětí. Poměrná deformace má vzhledem k napětí určité fázové zpoždění způsobené strukturálním tlumením materiálu, při kterém dochází k částečné přeměně vložené energie na teplo. Jedná se o vnitřní tlumení materiálu jehož měřítkem je množství takto přeměněné energie. Z hlediska přeměny energie při dynamickém dělení materiálů na elastické, viskózní a viskoelastické. [1]

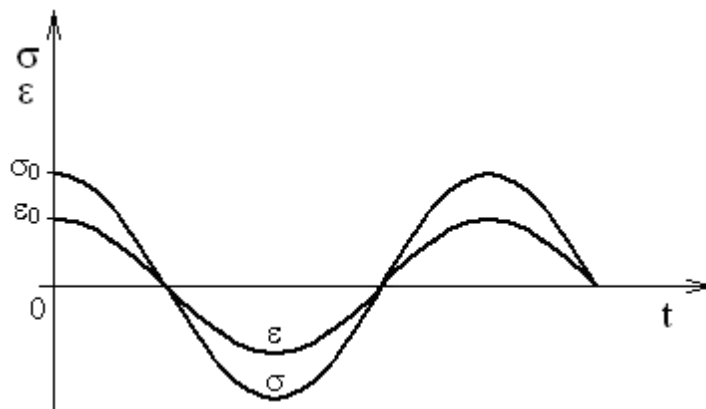
1.2 Elastické materiály

Ideálně elastické těleso je takové, které se při poklesu působícího napětí na nulu vrátí do původního stavu – veškerá energie naakumulovaná při jeho zatížení se zpětně využije na jeho odlehčení. Nedochozí k žádné přeměně vložené energie na teplo a tím pádem jsou napětí a poměrná deformace ve fázi, takže fázový posun δ je nulový ($\delta = 0$). Napětí a poměrná deformace se mění harmonicky se stejnou kruhovou frekvencí. Chování ideálně elastického materiálu popisují následující rovnice: [1], [3]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \sigma_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \varepsilon_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

kde σ_0 je amplituda napětí, ε_0 je poměrná deformace, ω je kruhová frekvence, t je čas a f je frekvence kmitání. [1]

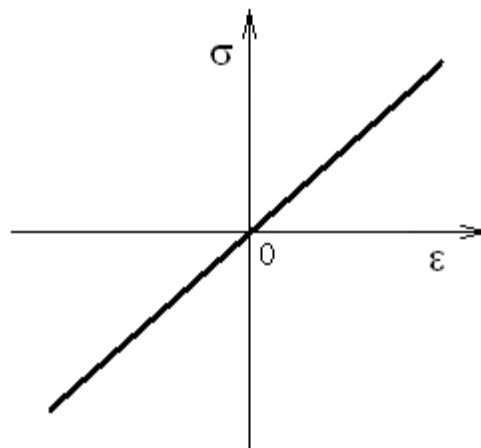


Obr. 1: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů. [1]

Existuje případ tzv. lineární elasticity, která je vyjádřena Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

kde konstantu E nazýváme modulem pružnosti v tahu nebo Youngovým modelem.



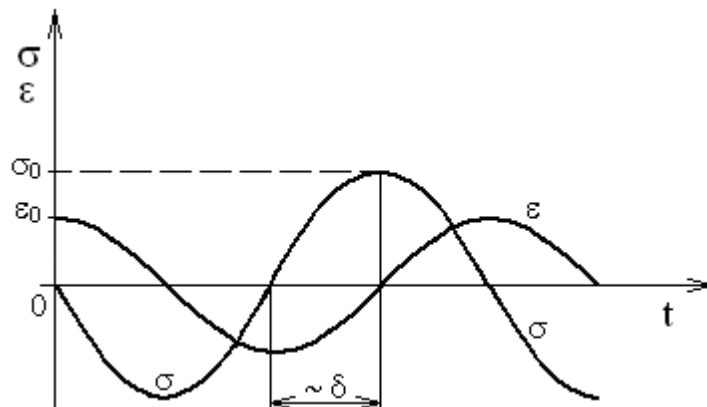
Obr. 2: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání ideálně elastických materiálů. [1]

1.3 Viskózní materiály

Ideálně viskózní materiály se ve srovnání s elastickými chovají přesně naopak. Veškerá energie naakumulovaná při jeho zatížení se přemění na teplo. Nedochází k žádnému zpětnému využití vložené mechanické energie při odlehčení vzorku. Napětí zde předbíhá poměrnou deformaci o fázový posun $\delta = \pi/2$. Chování viskózních materiálu popisují tyto rovnice: [1]

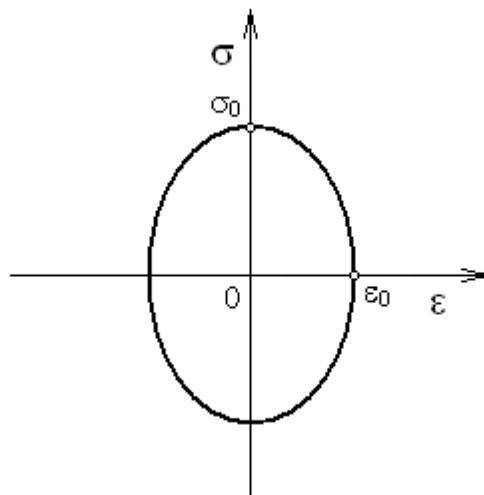
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) = \delta_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) = -\sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (5)$$



Obr. 3: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskózních materiálů. [1]

Jak je zřejmé, zde neplatí Hookův zákon a proto je zde závislost mezi napětím a poměrnou deformací dána uzavřenou křivkou ve tvaru elipsy:



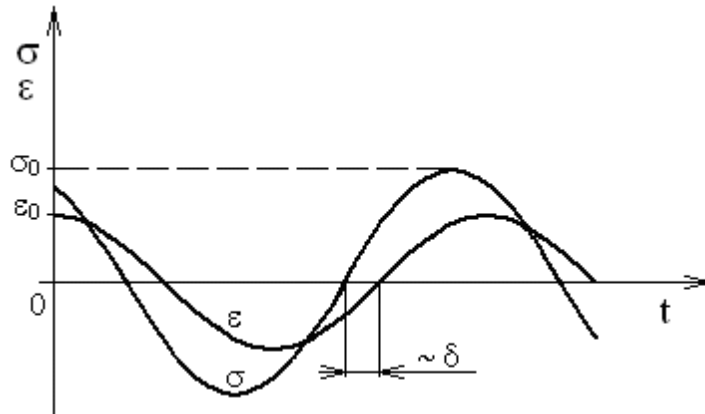
Obr. 4: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání viskózních materiálů [1]

1.4 Viskoelastické materiály

Viskoelastické materiály vykazují při napěťovém namáhání jak elasticitu (termodynamicky vratnou deformaci) tak plasticitu (termodynamicky nevratnou deformaci). Patří mezi ně většina biologických materiálů, polymery v pevném stavu nebo ve stavu taveniny, vysoce viskózní látky, suspenze atd. [3] Napětí předbíhá poměrnou deformaci o fázový posun $\delta \in (0, \pi/2)$ tedy podobně jako u látek viskózních (obr. 3). Chování viskoelastických materiálů popisují tyto rovnice: [1]

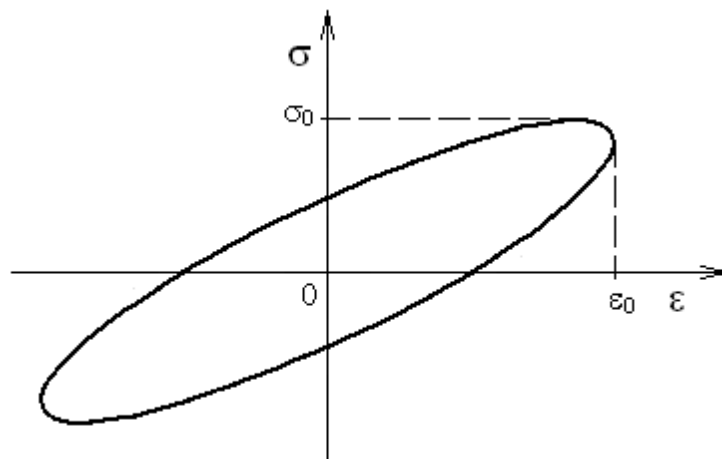
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (7)$$



Obr. 5: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů. [1]

Ani zde neplatí Hookův zákon, protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární. Část použité energie při namáhání těchto materiálů se zpětně použije při jeho odlehčení a část se přemění na teplo. Plocha, která je vymezena hysterezí křivkou odpovídá energii kmitání, která se přemění na teplo během jednoho kmitu: [7]



Obr. 6: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. [1]

2 PRUŽNOST A TLUMENÍ

2.1 Komplexní modul pružnosti

Rovnici (6) lze po úpravách převést do tvaru:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) = E' \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + E'' \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

kde E' je reálná složka komplexního modulu pružnosti v tahu charakterizující pevnostní vlastnosti materiálu, E'' je imaginární složka komplexního modulu pružnosti v tahu (ztrátový modul) charakterizující tlumící vlastnosti materiálu. Obě složky jsou funkcí frekvence kmitání při harmonickém namáhání a jsou vyjádřeny rovnicemi : [1]

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos \delta \quad (9)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin \delta \quad (10)$$

Komplexní modul pružnosti se skládá ze součtu reálné a imaginární složky :

$$E^* = E' + i \cdot E'' \quad (11)$$

2.2 Činitel vnitřního tlumení

Je definován poměrem imaginární složky komplexního modulu pružnosti k jeho reálné složce:

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \operatorname{tg} \delta \quad (12)$$

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která slouží k popisu materiálů z hlediska schopnosti tlumení mechanických vibrací. Jeho velikost závisí na délce fázového posunu δ :

Při nižších hodnotách fázového posunu $\delta \rightarrow 0$ převažují elastické vlastnosti. Při vyšších hodnotách fázového posunu $\delta \rightarrow \pi/2$ převažují tlumící vlastnosti u viskoelastických materiálů.

Určuje se experimentálně a to tak, že vzorek ve tvaru zkušebního pásku nejprve rozkmitáme v rozsahu rezonančních frekvencí a potom měříme spektrum amplitud v závislosti na frekvenci. Činitel vypočítáme jako poměr šířky spektra a rezonanční frekvence. [7] Vzhledem k existenci vnitřního tlumení materiálů se Hookův zákon rozšíří do tvaru: [1]

$$\sigma = E \cdot (1 + i \cdot \eta) \cdot \varepsilon \quad (13)$$

2.3 Přenosový útlum

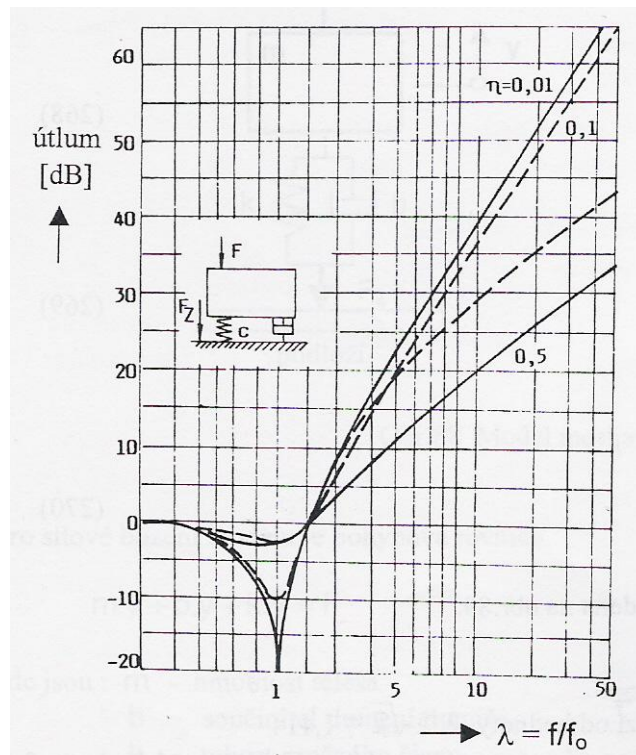
Charakterizuje schopnost materiálů tlumit mechanické vibrace, které se šíří od směrem od vstupu a_1 k výstupu a_2 daného vzorku. Jednotkou je decibel a platí pro něj vztah :

$$D = 20 \log \frac{|a_1|}{|a_2|} \quad (14)$$

Při určité frekvenci kmitání mohou nastat 3 případy:

1. $D > 0$ – amplituda výstupní veličiny je menší než amplituda vstupní – dochází k tlumení
2. $D = 0$ – amplituda na výstupu je shodná s amplitudou na vstupu – nedochází k tlumení
3. $D < 0$ – amplituda na výstupu je větší než na vstupu – dochází k rezonanci

Grafické znázornění útlumu materiálů různých viskozit vidíme v obr. 7:



Obr. 7: Útlum vibrací [5]

2.4 Souvislost přenosového útlumu a činitele vnitřního tlumení

Mezi činitelem vnitřního napětí a přenosovým útlumem existuje vzájemná souvislost, která je dána následujícím vztahem v případě tlumeného kmitání:

$$D = 10 \cdot \log \frac{\eta^2 + (1 - \lambda^2)}{1 + \eta^2} \quad (15)$$

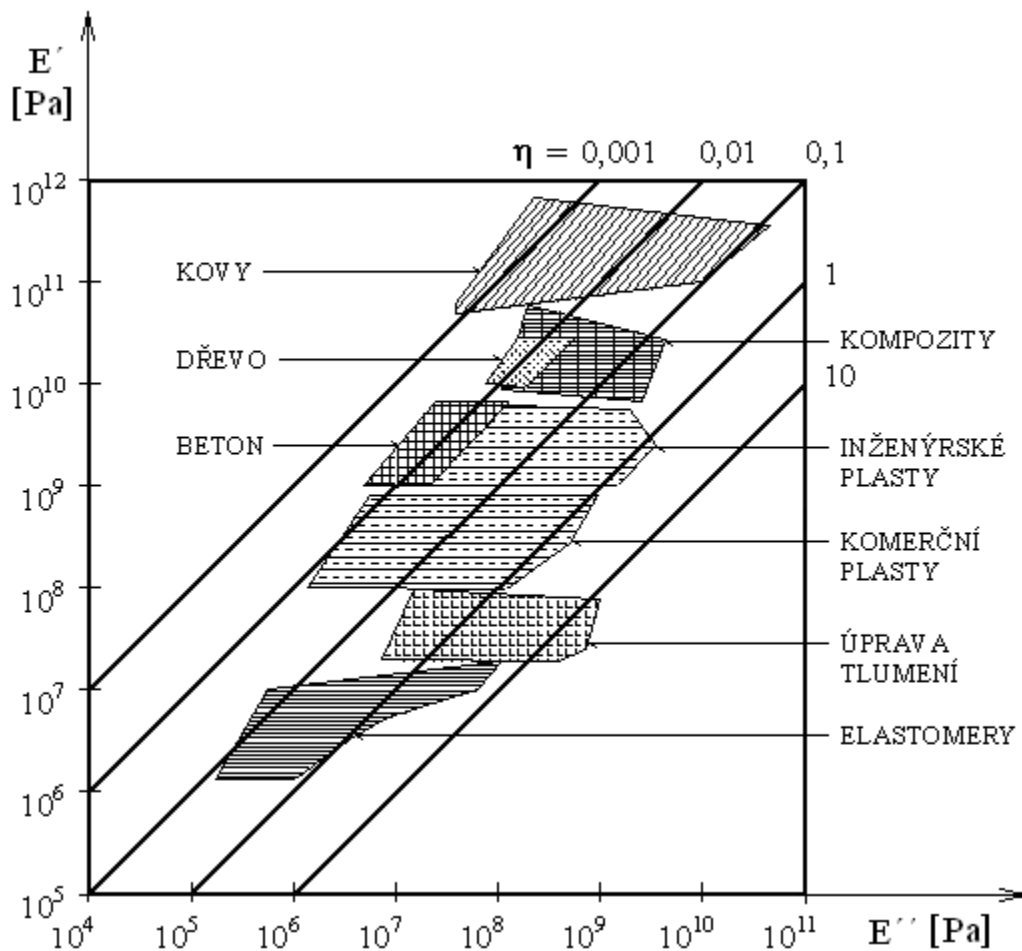
Kde lze ještě vyjádřit:

$$\lambda = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (16)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi \cdot f_0 \quad (17)$$

2.5 Porovnání materiálů podle jejich činitele vnitřního tlumení

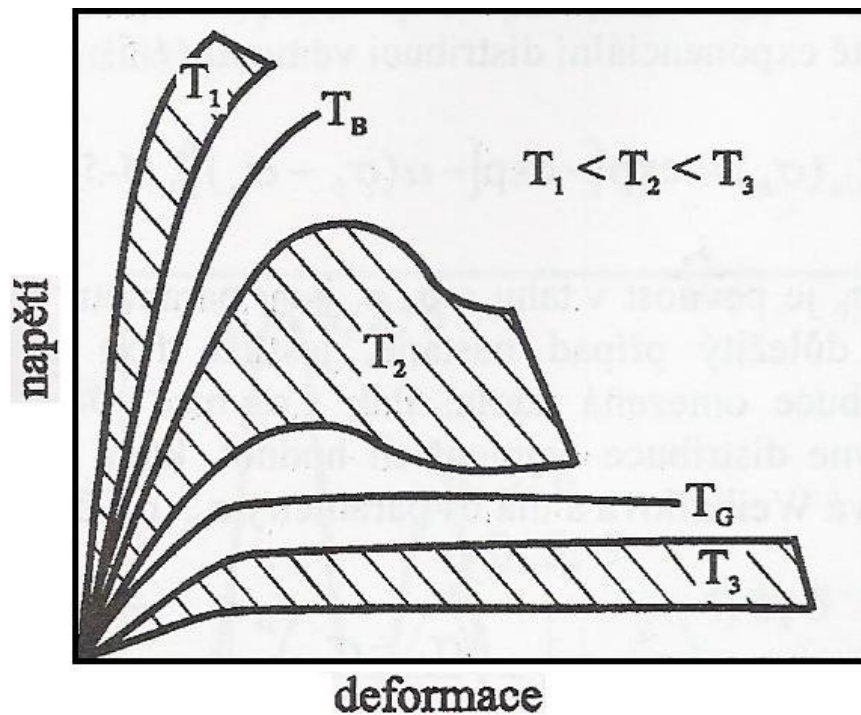
Z obr. 8 je zřejmé, že nejmenších hodnot činitele vnitřního tlumení dosahují kovy a svými vlastnostmi se tedy nejvíce blíží k ideálně elastickým materiálům. Naopak elastomery a materiály se speciální úpravou tlumení dosahují vyšších hodnot činitele vnitřního tlumení a blíží se tak k ideálně viskózním materiálům. [1]



Obr. 8: Rozsahy hodnot reálné složky E' a imaginární složky E'' komplexního modulu pružnosti a činitele vnitřního tlumení η u vybraných materiálů. [1]

2.6 Vliv teploty na viskoelastické vlastnosti polymerů

S rostoucí teplotou přechází chování určitého polymeru od jednoho typu do druhého. [4] Na obr je znázorněn vliv teploty v závislosti na napětí a deformaci tohoto polymeru. Při nejnižší teplotě T_1 se polymer chová elasticky až do teploty křehnutí T_B . Od teploty křehnutí do teploty skelného přechodu T_G se polymer chová plasticky (T_2) a nad teplotu skelného přechodu se chová viskoelasticky (T_3).



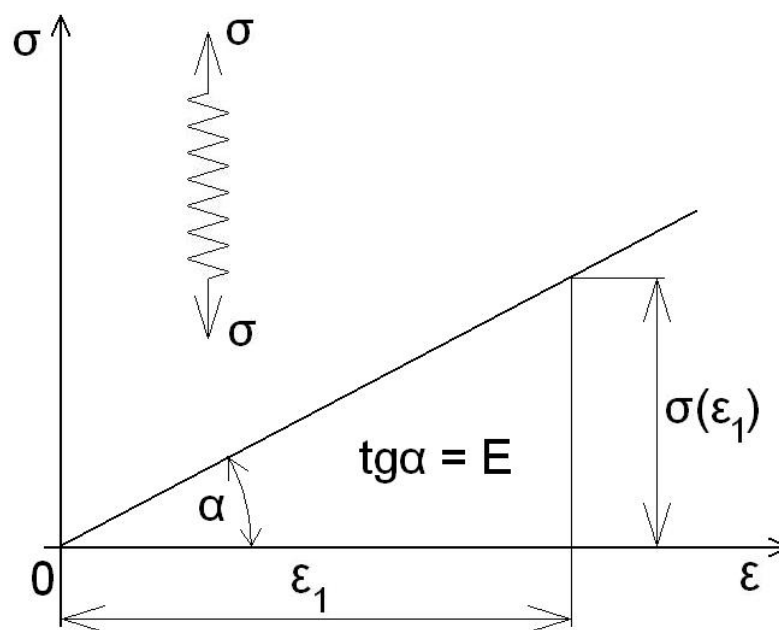
Obr. 9: Závislost napětí a deformace u určitého polymeru na teplotě.

3 VISKOELASTICKÉ MODELY

3.1 Základní prvky

3.1.1 Pružný prvek

Jedná se závislost napětí na deformaci, kterou podle tohoto – Hookovského prvku definuje Hookův zákon (viz. vzorec 3). Graf této závislosti je přímka procházející počátkem souřadnic, tangens úhlu mezi touto přímkou a osou ε je roven modulu pružnosti E (obr. 10)



Obr. 10: Grafická definice Hookova zákona.

Hookův zákon neuvažuje čas a proto předpokládáme, že vzniklá deformace odpovídá okamžitému napětí. Práce vynaložená na deformaci Hookovského prvku od 0 do ε_1 je rovna ploše vzniklého trojúhelníku dle obr. 10 a vyjádřená jako: [2]

$$W(\varepsilon_1) = \frac{\varepsilon_1 \cdot \sigma(\varepsilon_1)}{2} = \frac{E \cdot \varepsilon_1^2}{2} \quad (18)$$

Kde $W(\varepsilon_1)$ je práce, která má rozměr modulu pružnosti E – práce jednotky objemu Hookovského prvku. Při zadané hodnotě deformace je práce úměrná modulu pružnosti E , při zmenšování deformace od ε_1 do 0 se práce vynaložená na deformaci úplně vrací (práce za celý cyklus deformace je rovna 0).

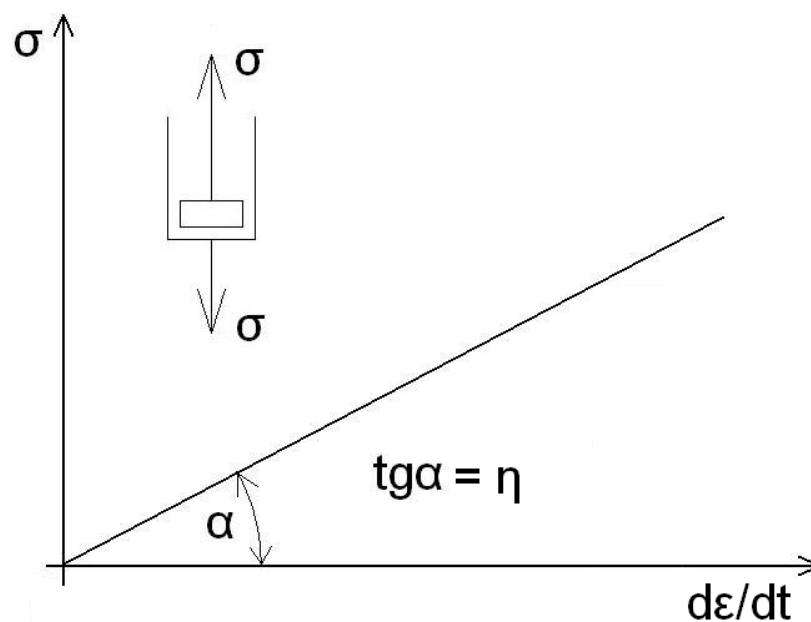
Hookovský prvek však nemůže být vyroben, protože reálná tělesa nemají okamžitou pružnou deformaci. V každém tělese se napětí a deformace šíří určitou rychlostí. [2]

3.1.2 Viskozitní prvek

Jedná se o závislost napětí na rychlosti deformace podle Newtonovského prvku, která je definována Newtonovým zákonem tečení: [2]

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (19)$$

Kde η je koeficient viskozity. Graf této závislosti je následující:

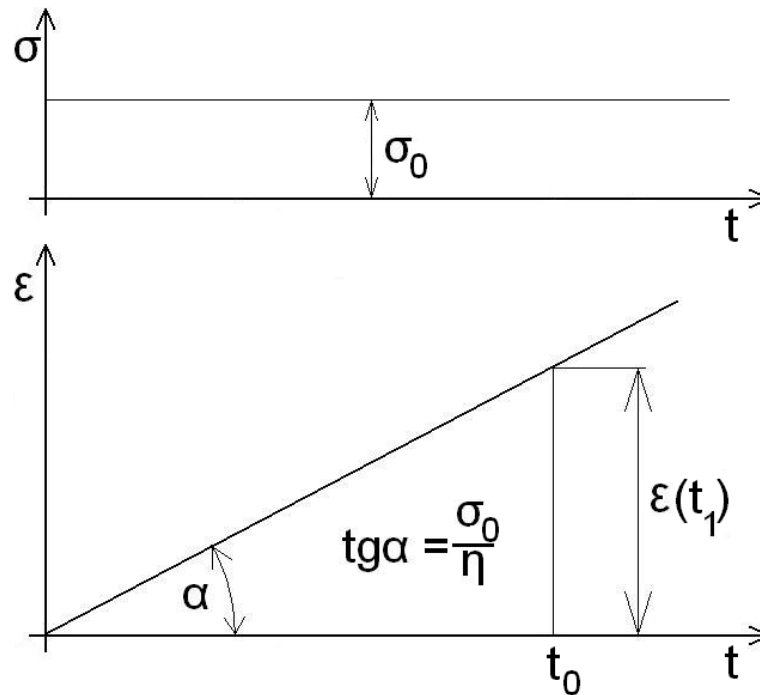


Obr. 11: Závislost napětí na rychlosti deformace u viskozitního prvku.

Rovnici (19) převedeme do tvaru :

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot t \quad (20)$$

Vyplývá z ní, že pro konečnou hodnotu σ_0 nenastane okamžitá deformace. Graf této závislosti je znázorněn na obr. 12:



Obr. 12: Závislost deformace na čase při konstantním napětí. [2]

Když v okamžiku t_1 odstraníme napětí, tok se přeruší, ale deformace zůstává. Takovou deformaci lze nazvat stálou. Je přímo úměrná t_1 a nepřímo úměrná η . Vyjadřujeme ji vztahem: [7]

$$\varepsilon(t_1) = \left(\frac{\sigma_0}{\eta} \right) \cdot t_1 \quad (21)$$

Kde t_1 je čas působení napětí σ .

Práce vynaložená na deformaci do velikosti $\varepsilon_1 = \varepsilon(t_1)$ je při konstantním napětí σ_0 rovna:

$$W(\varepsilon_1) = \sigma_0 \cdot \varepsilon_1 = \frac{\sigma_0^2 \cdot t_1}{\eta} \quad (22)$$

Práce $W(\varepsilon_1)$ se úplně rozptýlí při deformaci, takže po odstranění napětí deformace ε_1 nezmiž. Jedná se o práci vykonanou jednotkou objemu Newtonovského prvku. I tento prvek nelze vyrobit. Vyrobit s dostatečným stupněm přiblížení Newtonovský prvek je obtížnější než vyrobit prvek Hookovský. Modely Newtonovského prvku obvykle obsahují tlumič sestavený z cylindru s kapalinou a pístu. Při zdvižení pístu kapalina přechází z jedné poloviny cylindru do druhé přes štěrbinu mezi pístem a cylindrem nebo přes otvory v pístu.[2]

3.2 Dvouprvkové modely

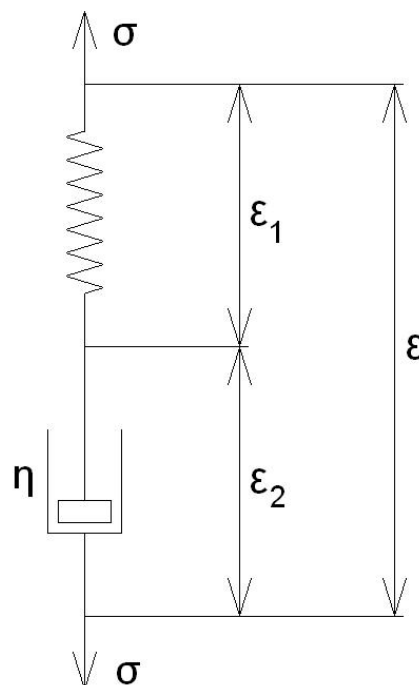
Dva výše zmiňované základní prvky (pružina, píst) mohou být zapojeny buď sériově nebo paralelně. Jsou-li zapojeny sériově, pak se jejich deformace sčítají a napětí na každém prvku je rovno celkovému napětí na modelu. Jsou-li zapojeny paralelně, pak je celková deformace rovna deformaci každého prvku a celkové napětí je rovno sumě napětí na každém prvku.

3.2.1 Maxwellův model

Je sestaven z pružiny a tlumiče sériově zapojených (viz. obr. 13). Deformaci pružiny označíme ε_1 a tlumiče ε_2 . Uvažujeme-li podmínky sériového zapojení, pak rovnici základních prvků je možné zapsat ve tvaru: [2]

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E} \quad (23)$$

$$\frac{d\varepsilon_2}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (24)$$



Obr. 13: Schéma Maxwellova modelu

Dosadíme-li do rovnic (23) a (24), dostaneme rovnici pro Maxwellův model: [2]

$$E^{-1} \cdot \frac{d\sigma}{dt} - \eta^{-1} \cdot \sigma = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (25)$$

kterou lze také zapsat ve tvaru:

$$\frac{d\sigma}{dt} + E \cdot \eta^{-1} \cdot \sigma = E \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (26)$$

Zavedeme-li následující pomocnou veličinu:

$$\tau = \eta \cdot E^{-1} \quad (27)$$

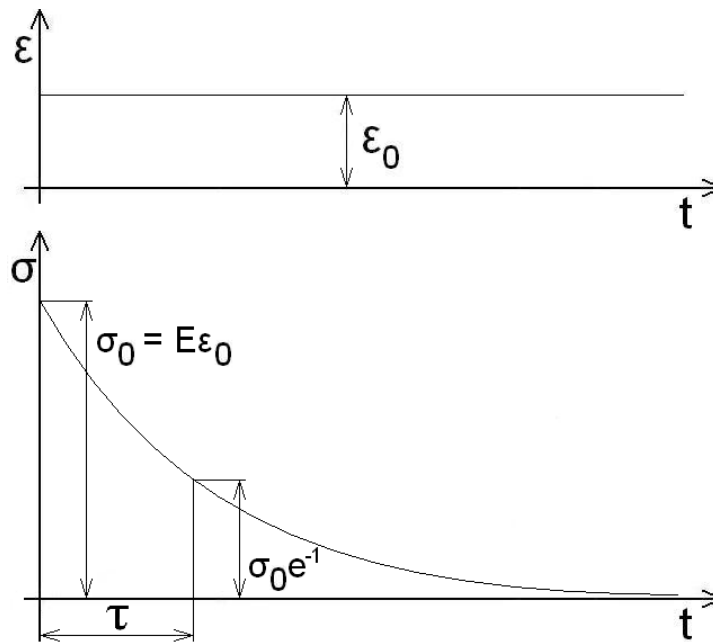
pak můžeme Maxwellovu rovnici napsat také ve tvaru:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau} = E \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad (28)$$

Všechny tyto tři tvary Maxwellových rovnic jsou rovnocenné, volba rovnice se řídí podle jednotlivých případů.

3.2.1.1 Chování Maxwellova modelu při konstantní deformaci

V počátečním okamžiku uvažujeme čas $t = 0$. Model je tedy bez napětí a deformace. Je dána okamžitá deformace ε_0 , která zůstává konstantní. Pak tento model bude v závislosti na čase vypadat: [2]



Obr. 14: obr: Závislost napětí na čase při konstantní deformaci – křivka relaxace. [2]

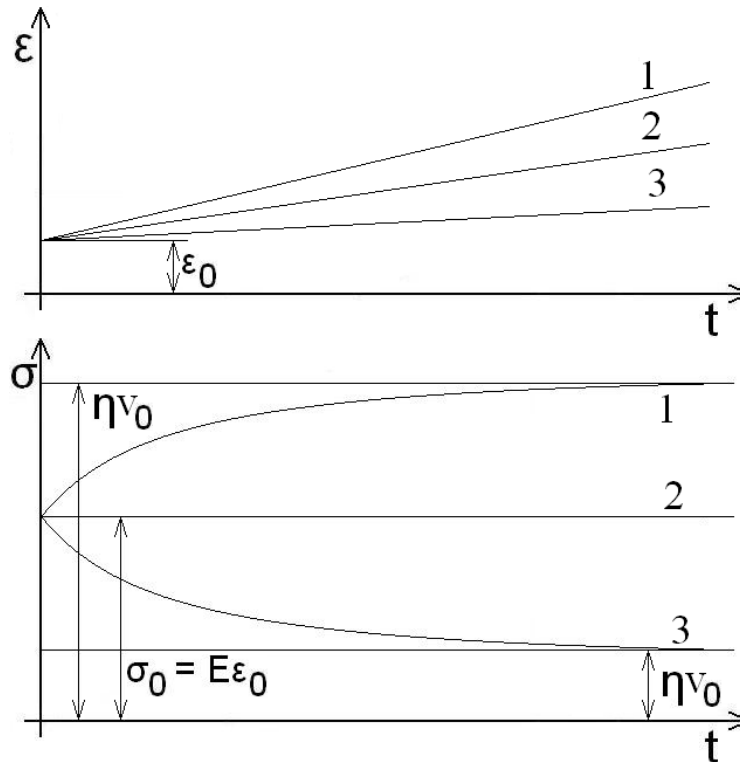
Okamžitá deformace je rovna deformaci pružiny $\varepsilon_1(0)$, tlumič nemůže dosáhnout okamžité deformace a proto podle Hookova zákona platí :[2]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} = \sigma_0 \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} \quad (29)$$

Při konstantní deformaci napětí klesá od počáteční hodnoty σ_0 do 0 pro $t \rightarrow \infty$. Čas τ , při kterém počáteční napětí klesá do „e“ se nazývá doba relaxace.[2]

3.2.1.2 Chování Maxwellova modelu při konstantní rychlosti deformace

V počátečním okamžiku $t = 0$ se vytvoří okamžitá deformace ε_0 , která postupuje s konstantní rychlostí v_0



Obr. 15: Závislost napětí na čase při konstantní rychlosti deformace

Kde křivka číslo 1 má tvar: $v_0 > \frac{\sigma_0}{\eta}$, křivka číslo dva: $v_0 = \frac{\sigma_0}{\eta}$ a křivka číslo tři: $v_0 < \frac{\sigma_0}{\eta}$ [2]

Rovnice (26) dostane tedy po dosazení tvar:

$$\sigma = (\sigma_0 - \eta \cdot v_0) \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} + \eta \cdot v_0 = (E \cdot \varepsilon_0 - \eta \cdot v_0) \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} + \eta \cdot v_0 \quad (30)$$

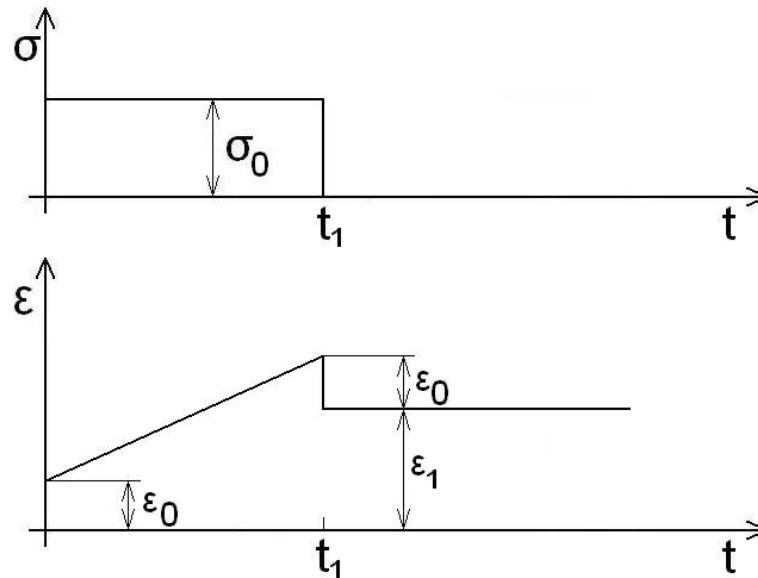
Změna napětí závisí nyní na rychlosti deformace v_0 . Je-li rychlost deformace $v_0 > \frac{\sigma_0}{\eta}$, pak

napětí roste. Je-li rychlost deformace $v_0 = \frac{\sigma_0}{\eta}$, pak napětí zůstane konstantní a pokud je

rychlost deformace $v_0 < \frac{\sigma_0}{\eta}$, pak napětí klesá a pro $t \rightarrow \infty$ platí $\sigma(t) \rightarrow \eta v_0$. [2]

3.2.1.3 Chování Maxwellova modelu při konstantním napětí

V počátečním okamžiku $t = 0$ se vytvoří napětí, které zůstává konstantní.



Obr. 16: Závislost deformace na čase

Po dosazení do vztahu (25) dostaneme:

$$\varepsilon = \sigma_0 \cdot \left(\frac{t}{\eta} + \frac{1}{E} \right) = \left(\frac{\sigma_0}{\eta} \right) \cdot t + \varepsilon_0 \quad (31)$$

Odejmeme-li v okamžiku t_1 napětí, pružina se zmenší na hodnotu okamžité deformace ε_0 znázorněnou rovnicí (31). Zůstatková deformace po odejmutí napětí bude potom: [2]

$$\varepsilon_z = \left(\frac{\sigma_0}{\eta} \right) \cdot t_1 \quad (32)$$

Maxwellův model má tedy okamžitou deformaci i viskózní tok, ale nemá pružnou deformaci.

3.2.1.4 Chování Maxwelllova modelu při periodické deformaci

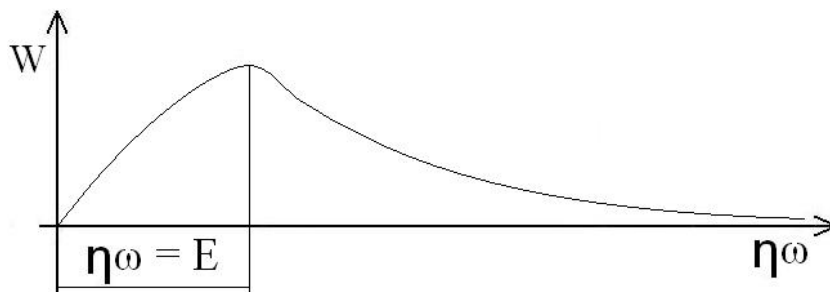
Uvažujme, že se deformace mění podle harmonického zákona :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \sin \omega t \quad (33)$$

Pokud zanedbáme vliv počátečních podmínek, systém se bude nacházet v ustáleném režimu kmitočtů, pokud budeme uvažovat vliv počátečních podmínek, systém se bude nacházet v přechodném režimu kmitočtů. Stanovit přesnou hranici mezi ustáleným a přechodným napětím není možné. V praxi se počítá pouze s ustáleným režimem, protože se vždy dostaví dostatečně rychle. Proto můžeme rovnici (26) po úpravách napsat ve tvaru pro ustálený režim: [2]

$$\sigma = \frac{E\varepsilon_0\eta\omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \theta)}{(E^2 + \eta^2\omega^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (34)$$

Práce W je vždy kladná a proto pro některou hodnotu viskozity od 0 do ∞ dosahuje svého maxima. Závislost práce na frekvenci kmitů ω je stejná jako závislost práce na koeficientu viskozity η a proto můžeme tyto závislosti znázornit:



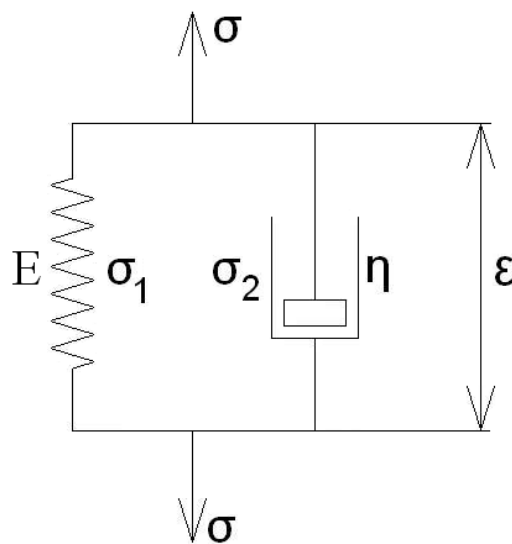
Obr. 17: Závislost práce W vykonané za cyklus na součinu $\eta \cdot \omega$. [2]

3.2.2 Kelvinův model

Je sestaven z pružiny a tlumiče zapojených paralelně (viz. obr. 18). Napětí pružiny označíme σ_1 a tlumiče σ_2 . Uvažujeme-li podmínky paralelního zapojení, pak rovnici základních prvků je možné napsat ve tvaru: [2]

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon \quad (35)$$

$$\sigma_2 = \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (36)$$



Obr. 18: Kelvinův model

Z rovnic (35) a (36) odvodíme rovnici pro Kelvinův model:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (37)$$

Lze ji také přepsat do tvaru:

$$\frac{\sigma}{\eta} = \frac{\varepsilon \cdot E}{\eta} + \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon}{\tau} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (38)$$

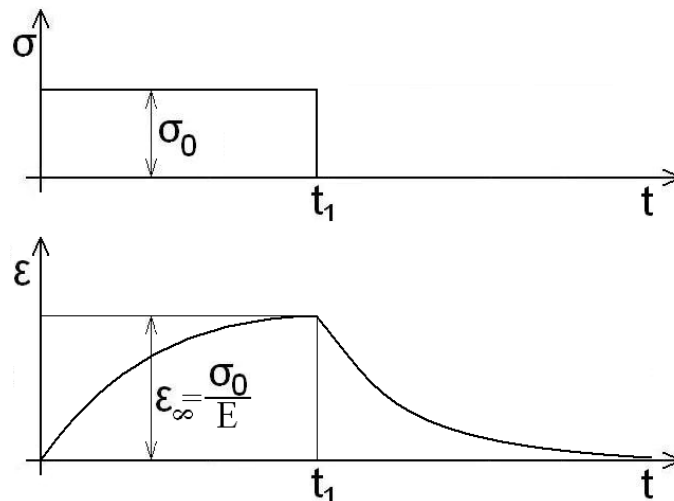
3.2.2.1 Chování Kelvinova modelu při konstantním napětí

Napětí σ_0 působící v počátečním okamžiku $t=0$ nemůže vyvolat okamžitou deformaci kvůli paralelnímu zapojení. Po odstranění napětí se deformace přerušuje a začne konstantně klesat. Jedná se o zpomalenou pružnou deformaci, kterou lze charakterizovat: [2]

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_0}{E} \right) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} \right) \quad (39)$$

Deformace roste s časem a blíží se k Hookovské deformaci podle obr. 19:

$$\varepsilon_\infty = \frac{\sigma_0}{E} \quad (40)$$



Obr. 19: Závislost deformace na čase při konstantním napětí Kelvinova modelu.

Pokud se v okamžiku t_1 odstraní napětí, pak lze rovnici (38) napsat ve tvaru:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} - 1 \right) \cdot e^{-\left(\frac{E}{\eta}\right)t} \quad (41)$$

Vzhledem k tomu, že Kelvinův model nepřipouští okamžitou deformaci, není u něj možná konstantní deformace.

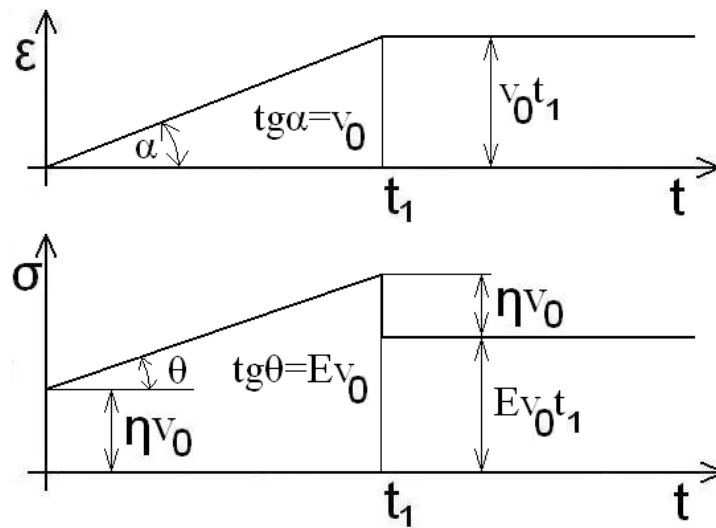
3.2.2.2 Chování Kelvinova modelu při konstantní rychlosti deformace

Dosadíme do rovnice (37) a dostaneme:

$$\sigma = \eta v_0 + E v_0 t \quad (42)$$

Kde ηv_0 je napětí na tlumiči a $E v_0$ je napětí na pružině. Předpokládejme, že se v okamžiku t_1 deformace přeručí (rychlost deformace se rovná nule). Pak zůstane dosažená deformace v tomto okamžiku již konstantní, podle vztahu :

$$\sigma = E v_0 t_1 \quad (43)$$



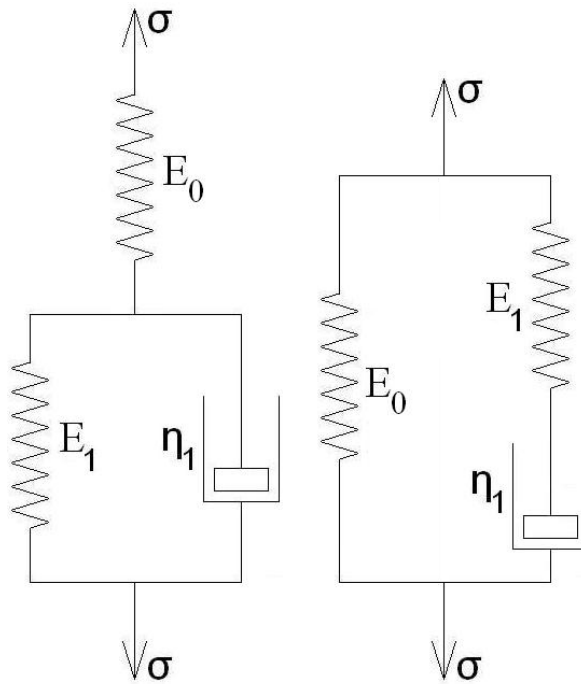
Obr. 20: Závislost napětí na čase při konstantní rychlosti deformace a jejím přeručení.

3.3 Tříprvkové modely

Tříprvkové modely jsou rozděleny do dvou tříd:

1. Třída C – dvě pružiny a jeden tlumič
2. Třída D – dva tlumiče a jedna pružina

3.3.1 Modely třídy C



Obr. 21: Tříprvkové modely třídy C, typ „a“ (vlevo) a typ „b“ (vpravo)

Rovnice pro tyto prvky se sestavují následovně: Sestavíme rovnici pro každý prvek s ohledem na podmínky zapojení (jestli paralelně nebo sériově) a potom z těchto rovnic vyjádříme částečná napětí. Rovnice lze tedy zapsat: [2]

$$\sigma_0 = E_0 \varepsilon \quad (44)$$

$$\frac{d\sigma_1}{dt} + \frac{E_1 \sigma_1}{\eta_1} = E_1 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (45)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (46)$$

Pokud do těchto rovnic dosadíme, dostaneme rovnice pro typ „a“:

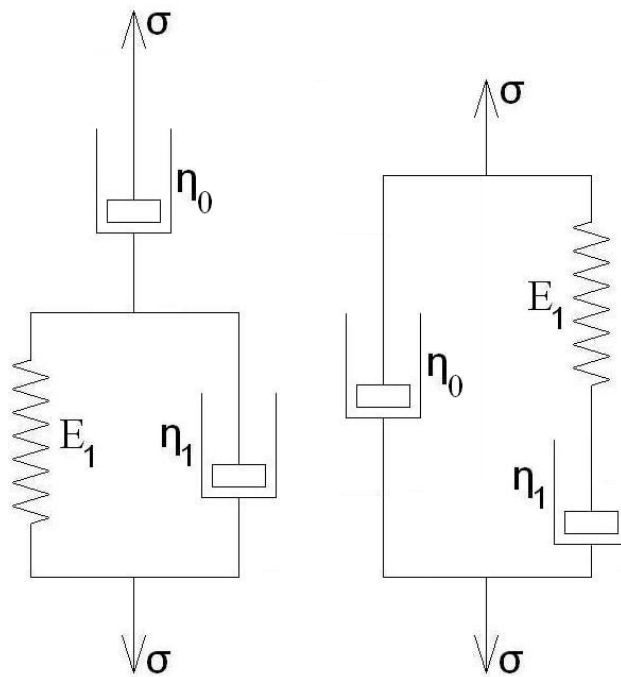
$$\frac{d\sigma}{dt} + (E_0 + E_1) \cdot \frac{\sigma}{\eta_1} = E_0 \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 E_1 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta_1} \quad (47)$$

nebo pro typ „b“:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1 \sigma}{\eta_1} = (E_0 + E_1) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} + E_0 E_1 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta_1} \quad (48)$$

Tím, že jsme do modelu typu „a“ zavedli pružinu, má model okamžitou deformaci a díky Kelvinově modelu (viz výše) má model i opožděnou deformaci. Protože Kelvinův model ani pružina nevytváří zůstatkovou deformaci, nemá ji ani model typu „a“. Zůstatkovou deformaci lze určit na modelech třídy „b“. [2]

3.3.2 Modely třídy D



Obr. 22: Tříprvkové modely třídy D, typ „a“ (vlevo) a typ „b“ (vpravo).

Rovnice pro tyto typy získáme podobně jako v předešlých případech. Pro typ „a“ bude :

$$\frac{d\sigma}{dt} + \sigma \cdot \frac{E_1}{(\eta_0 + \eta_1)} = \left[\frac{\eta_0 \cdot \eta_1}{(\eta_0 + \eta_1)} \right] \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \left[\frac{\eta_0 E_1}{(\eta_0 + \eta_1)} \right] \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (49)$$

a pro typ „b“:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \sigma \cdot \frac{E_1}{\eta_1} = \eta_0 \cdot \frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + E_1 \left(1 + \frac{\eta_0}{\eta_1} \right) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (50)$$

Tím, že jsme do modelu typu „a“ zavedli tlumič vzniká zůstatková deformace (bez přítomnosti okamžité) a díky Kelvinově modelu má model i opožděnou deformaci. [2]

3.4 Čtyřprvkové modely

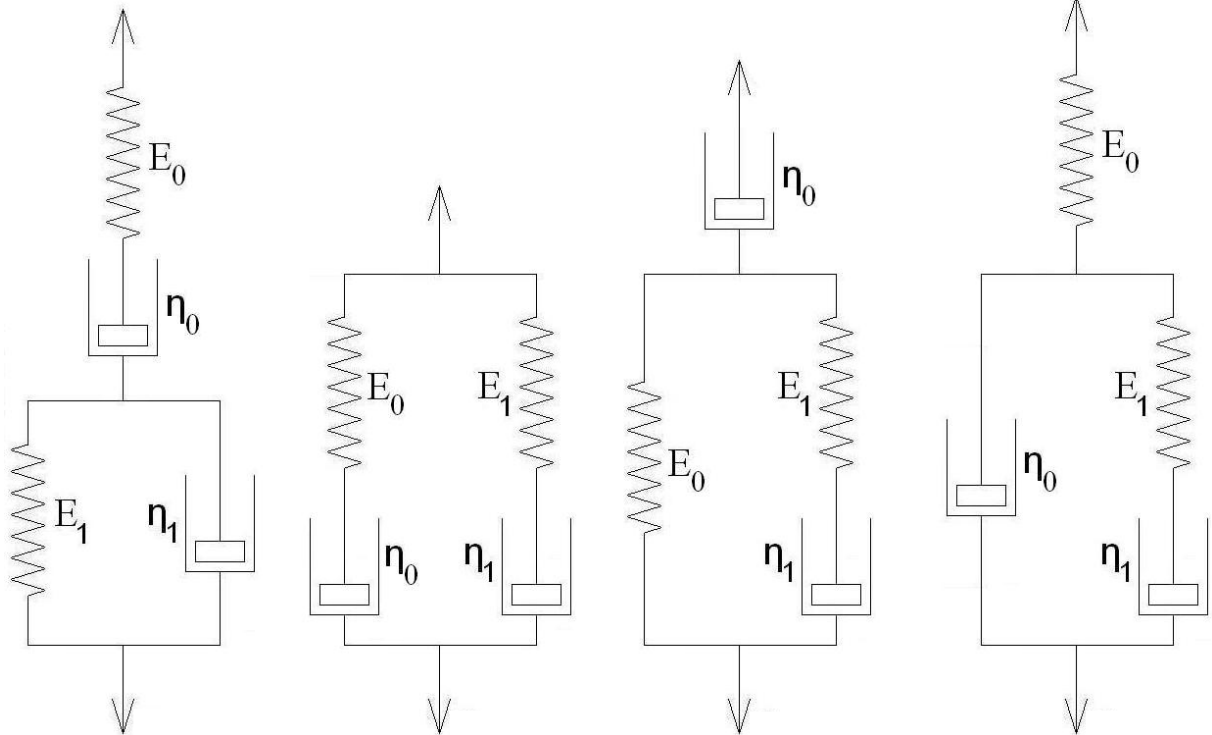
Existují tři typy čtyřprvkových modelů:

1. Ze dvou pružin a dvou tlumičů
2. Ze třech pružin a jednoho tlumiče
3. Z jedné pružiny a tří tlumičů

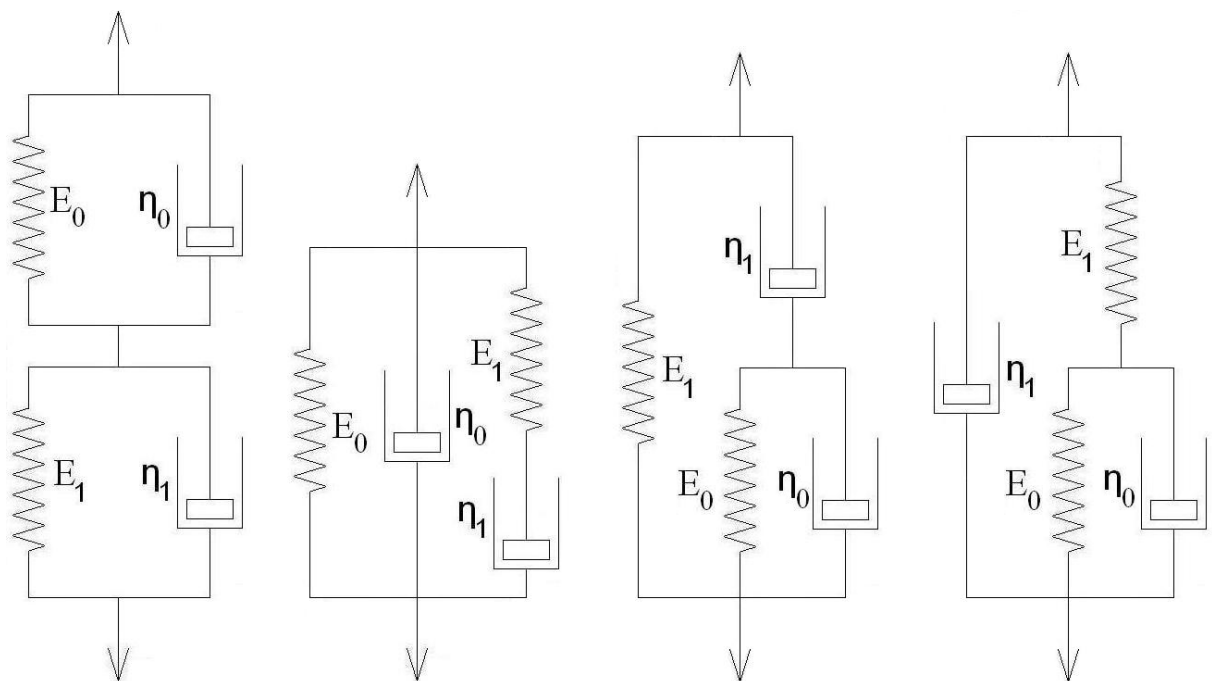
Libovolné spojení prvků modelu druhého a třetího prvku je ekvivalentní již dříve prostudovaným typům. Z toho důvodu se budeme zabývat pouze modely prvního typu. [2]

3.4.1 Modely složené ze dvou pružin a dvou tlumičů

Tyto modely se dělí na třídy s okamžitou deformací (třída A) a bez okamžité deformace (třída B). Rovnice k jednotlivým třídám lze zpracovat podobně jako u předchozích případů.



Obr. 23: Čtyřprvkové modely třídy A



Obr. 24: Čtyřprvkové modely třídy B

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Cílem práce bylo stanovit závislost přenosového útlumu na frekvenci u vybraných materiálů, porovnat tyto závislosti mezi sebou a zhodnotit vliv tloušťky a velikost setrvačné zátěže na kvalitu tlumení u jednotlivých materiálů.

5 VLASTNÍ MĚŘENÍ

5.1 Popis práce

Bylo použito celkem 5 typů materiálů. Materiály byly nařezány na čtvercový rozměr 60 x 60mm, přilepeny lepidlem na spodní kovovou desku ve které byl uprostřed šroub, díky kterému mohl být vzorek našroubován do budícího vibrátoru. Měření bylo prováděno ve frekvenčním rozsahu $f = 50 - 1200 \text{ Hz}$ s frekvenčním krokem $\Delta f = 25 \text{ Hz}$.

Každý materiál byl měřen celkem 3x: poprvé samostatně, podruhé zatížený deskou o hmotnosti $m = 85 \text{ g}$ (značeno písmenem D) a potřetí zatíženo závažím o celkové hmotnosti $m = 500 \text{ g}$ (značeno písmenem Z).

Příklad značení jednotlivých zatížení materiálu:

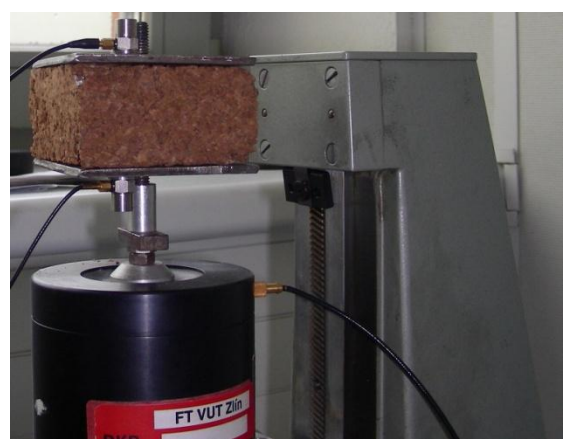
Korek – materiál není zatížen (obr. 25)

KorekD – materiál je zatížen deskou (obr. 26)

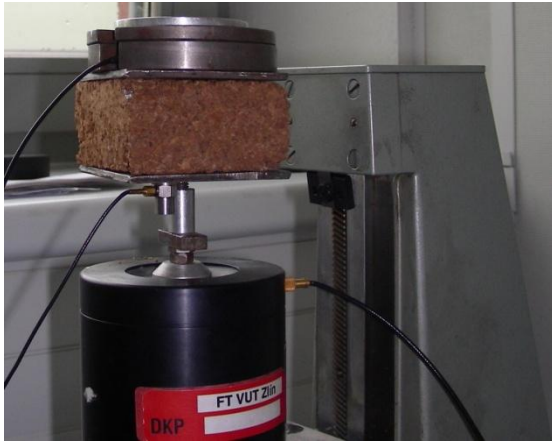
KorekZ – materiál je zatížen závažím (obr. 27)



Obr. 25: Příklad nezatíženého korku



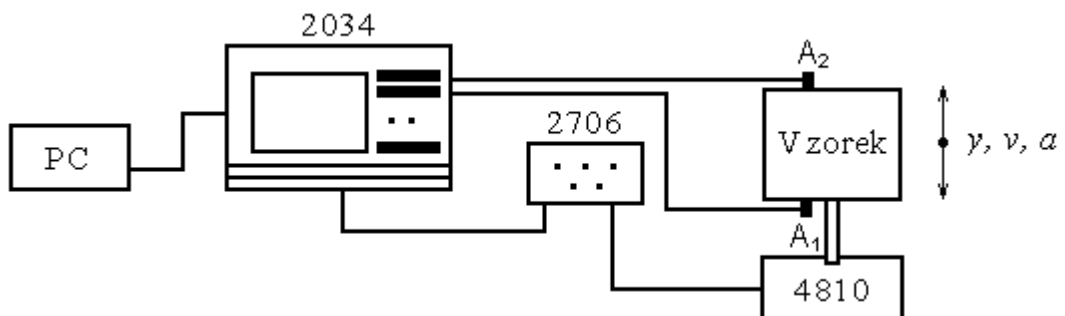
Obr. 26: Korek zatížený deskou (KorekD)



Obr. 27: Korek zatížený závažím (KorekZ)

5.2 Použité zařízení

Práce byla provedena na budícím vibrátoru typu Brüel & Kjær 4810, zesilovače typu Brüel & Kjær 2706, analyzátoru typu Brüel & Kjær 2034 a osobního počítače pro ukládání a vyhodnocení naměřených dat. [1]



Obr. 28: Schéma zapojení měřící aparatury. [1]

Kde A_1 je snímač zrychlení na vstupu a A_2 je snímač zrychlení na výstupu. Snímače měří příslušné amplitudy zrychlení a_1 a a_2 . Tyto hodnoty se dosadí do vztahu (14) a vypočte se přenosový útlum.



Obr. 29: Fotografie měřící aparatury.

5.3 Použité materiály

Tabulka 1: Přehled materiálů

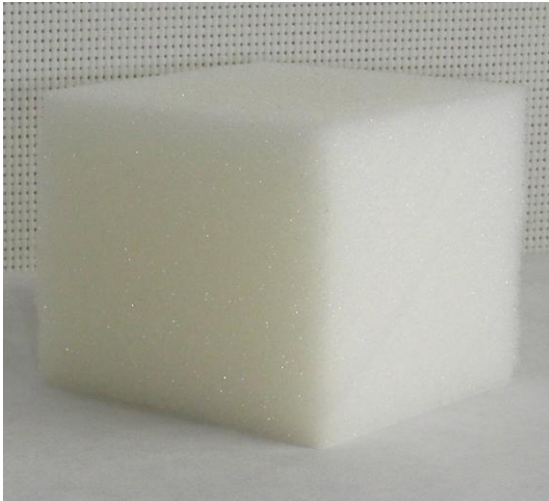
	Název Materiálu	Zkratka	Tloušťka [mm]	Hustota [kg/m ³]
1.	Polyuretan	Pur	30	23
2.	Molitan tenký	Mol	30	19,4
3.	Molitan tlustý	Mol2	50	
4.	Recyklát polyuretano- vé odpadní směsi	Rec	30	97,4
5.	Korek	Korek	32	322



Obr. 30: Vzorek polyuretanu



Obr. 31: Vzorek tenkého molitanu



Obr. 32: Vzorek tlustého molitanu



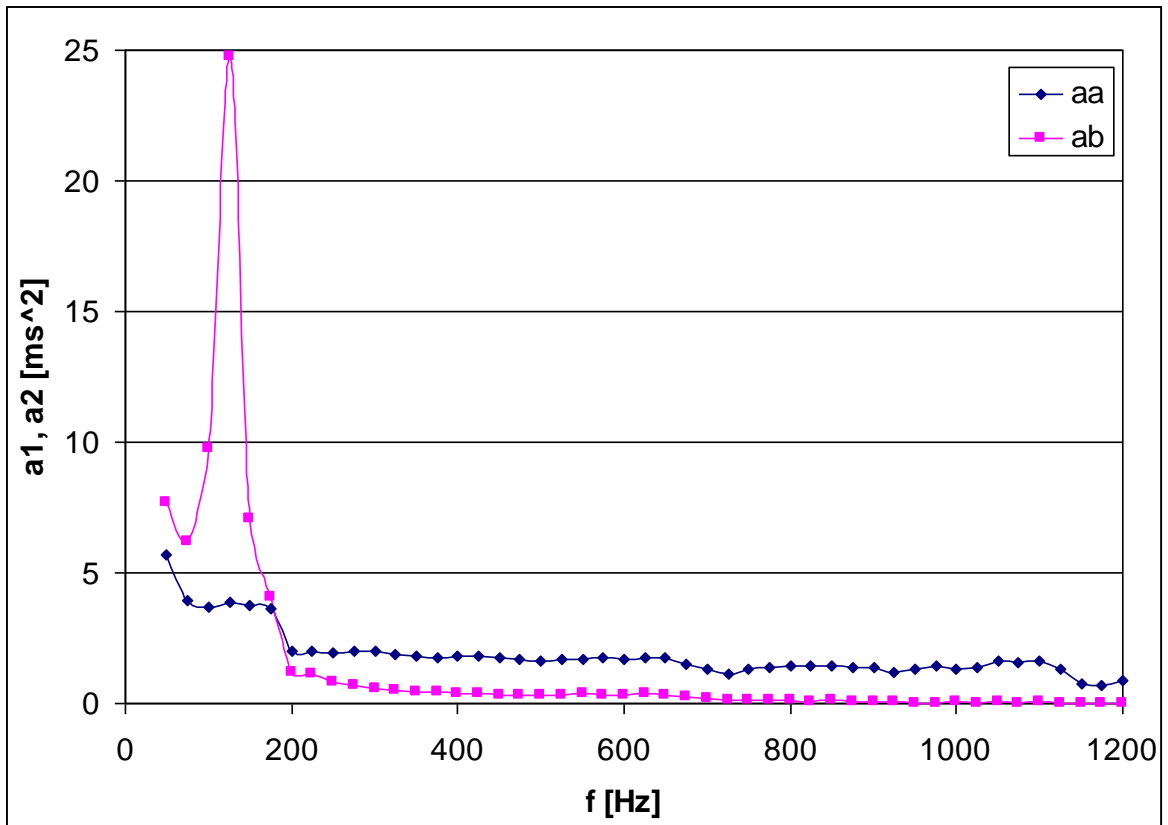
Obr. 33: Vzorek recyklátu



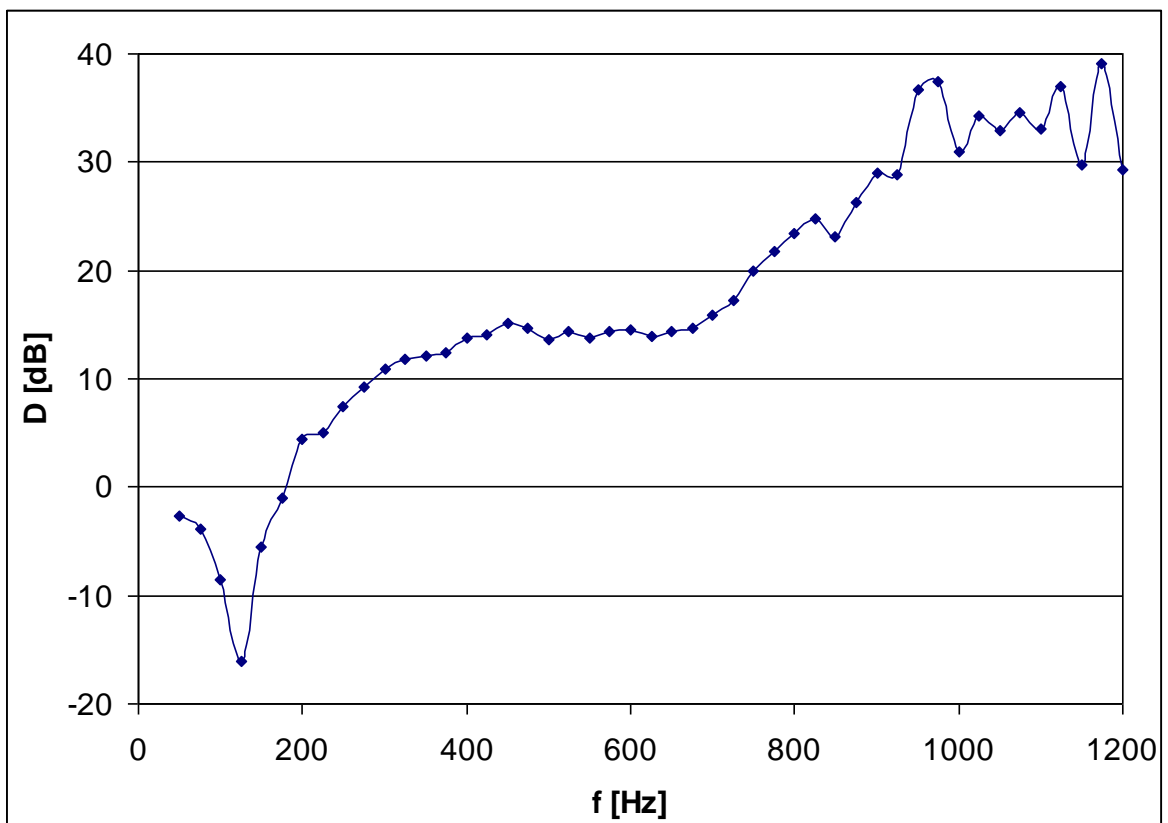
Obr. 34: Vzorek korku

5.4 Analýza výsledků měření

Byly změřeny amplitudy na vstupu a na výstupu v závislosti na frekvenci (viz. obr. 35), které byly poté dosazeny do vzorce (14) a byl vypočten přenosový útlum, který se také vyhodnotil v závislosti na frekvenci (viz. obr. 36). Vzorový materiál zde představuje polyuretan.

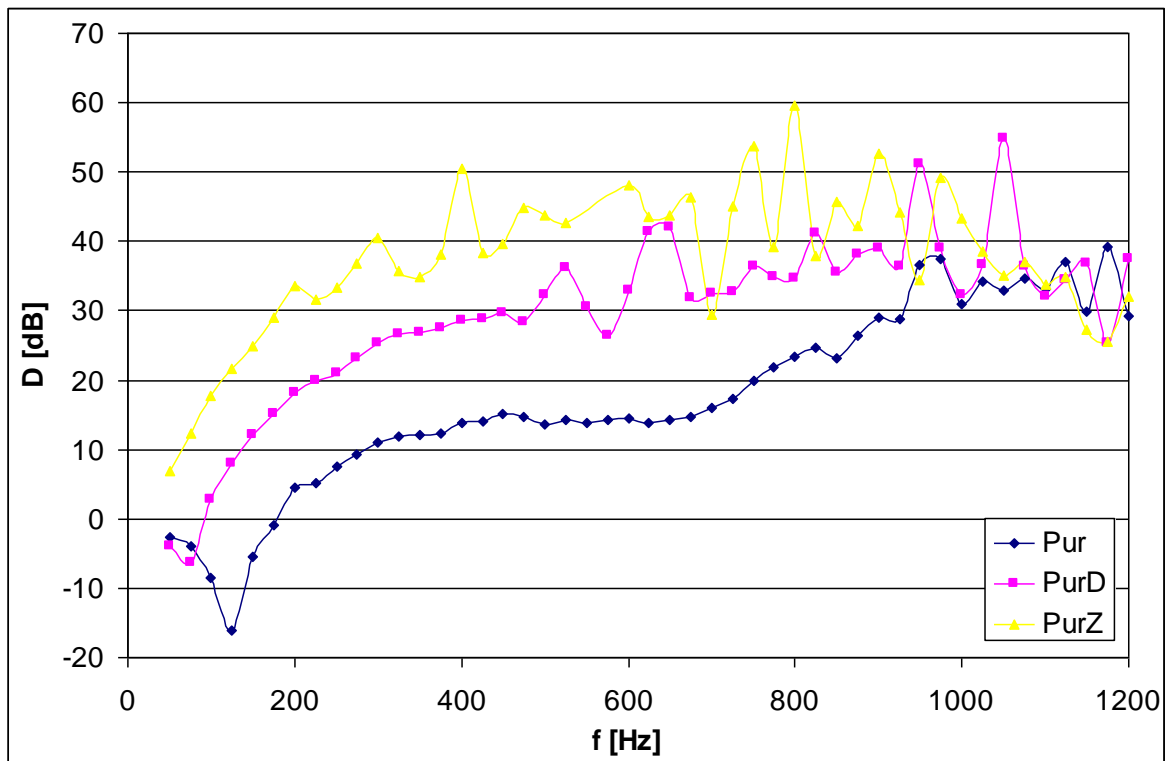


Obr. 35: Amplitudy zrychlení na vstupu a výstupu v závislosti na frekvenci

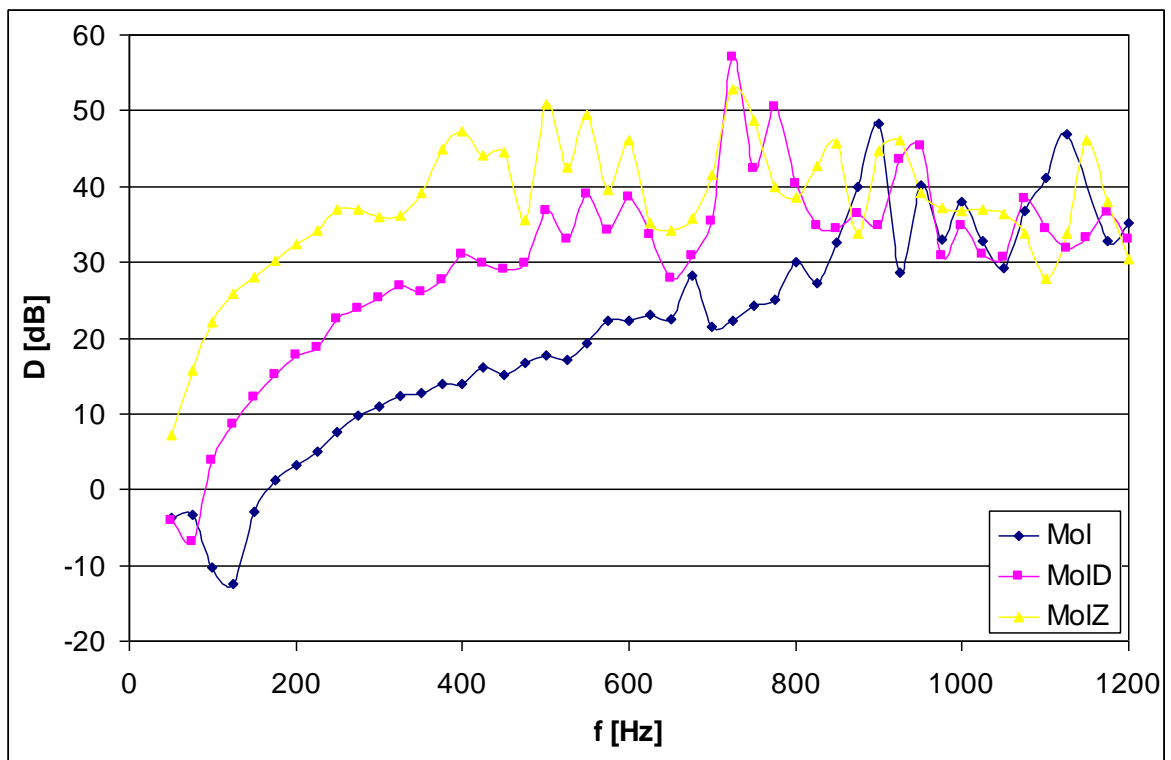


Obr. 36: Přenosový útlum v závislosti na frekvenci

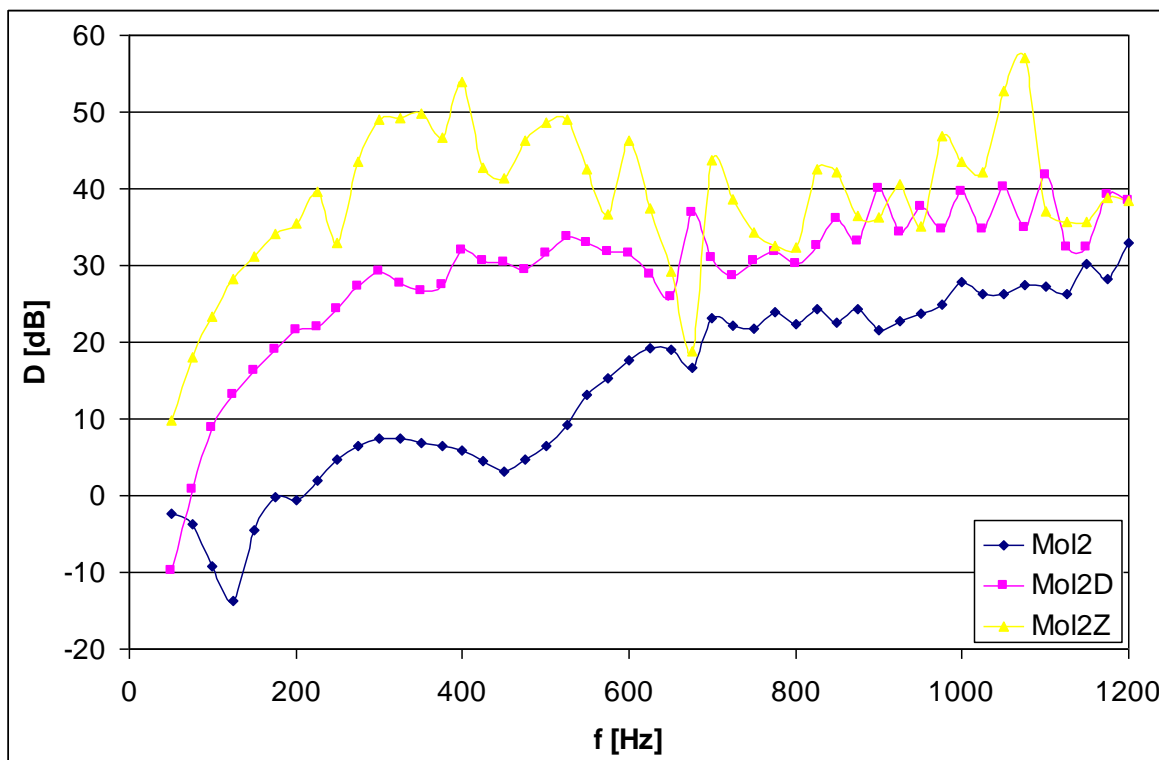
5.4.1 Vliv zátěže na přenosový útlum



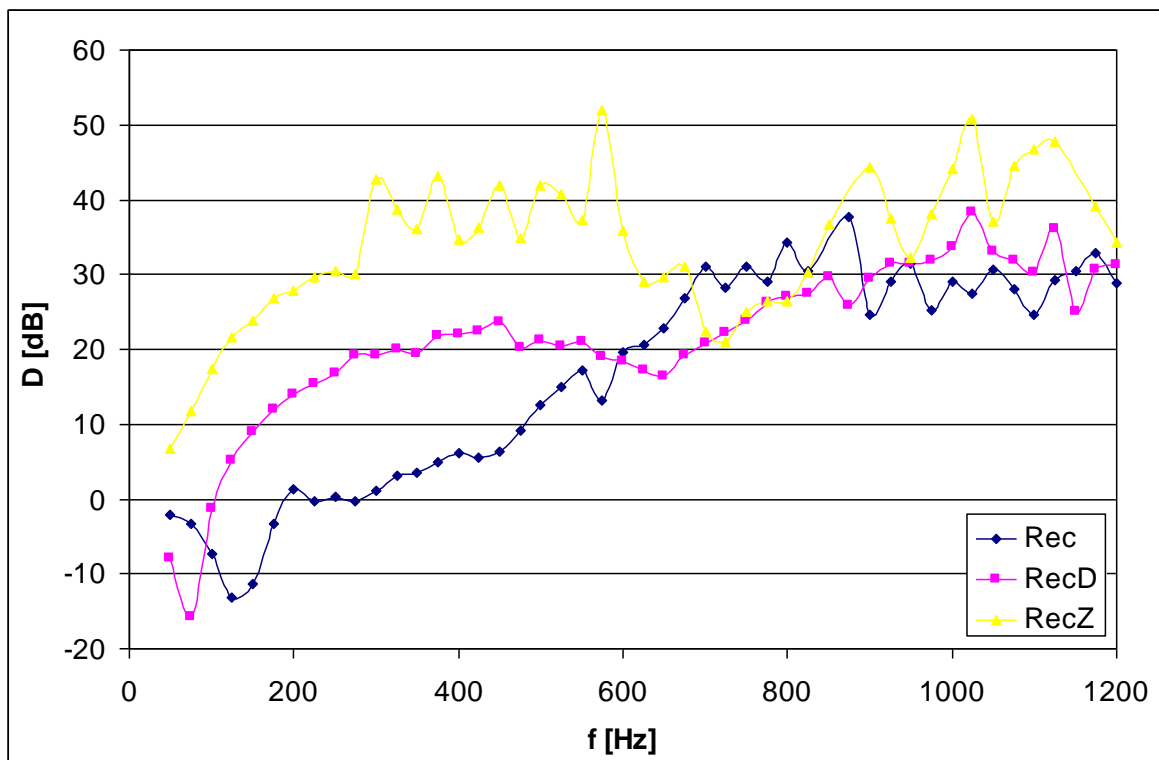
Obr. 37: Frekvenční závislost přenosového útlumu polyuretanu



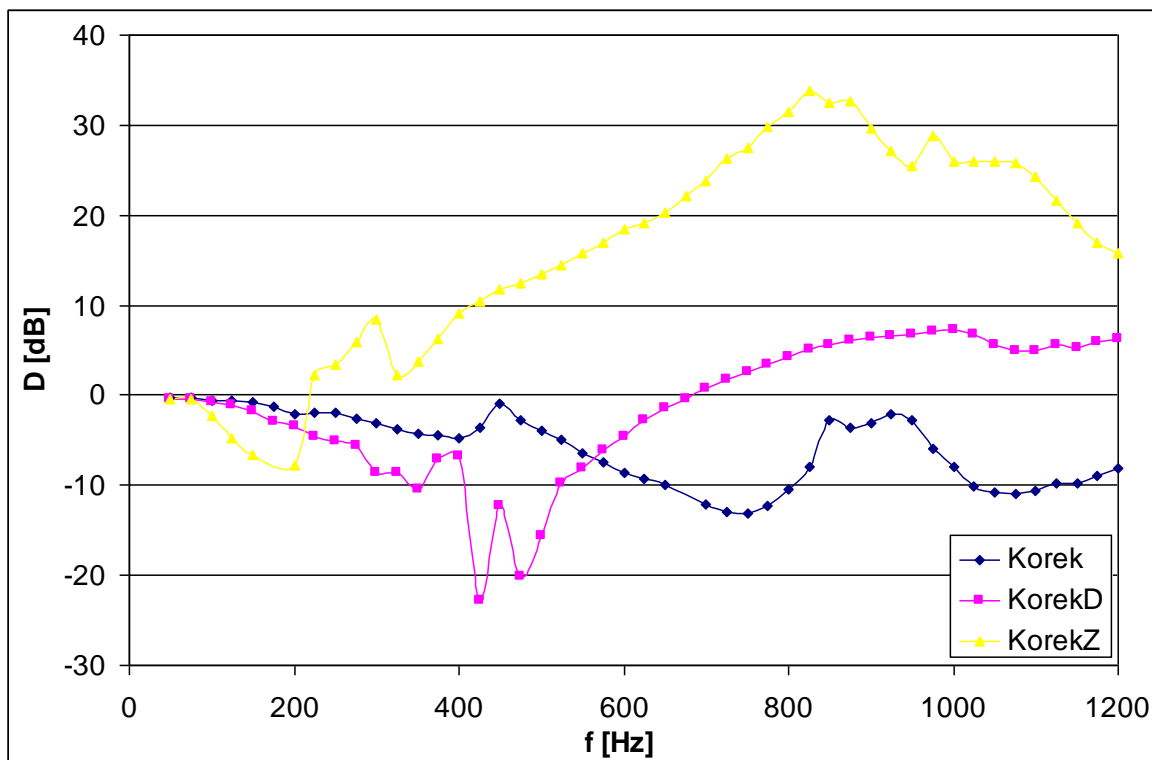
Obr. 38: Frekvenční závislost přenosového útlumu tenkého molitanu



Obr. 39: Frekvenční závislost přenosového útlumu tlustého molitanu



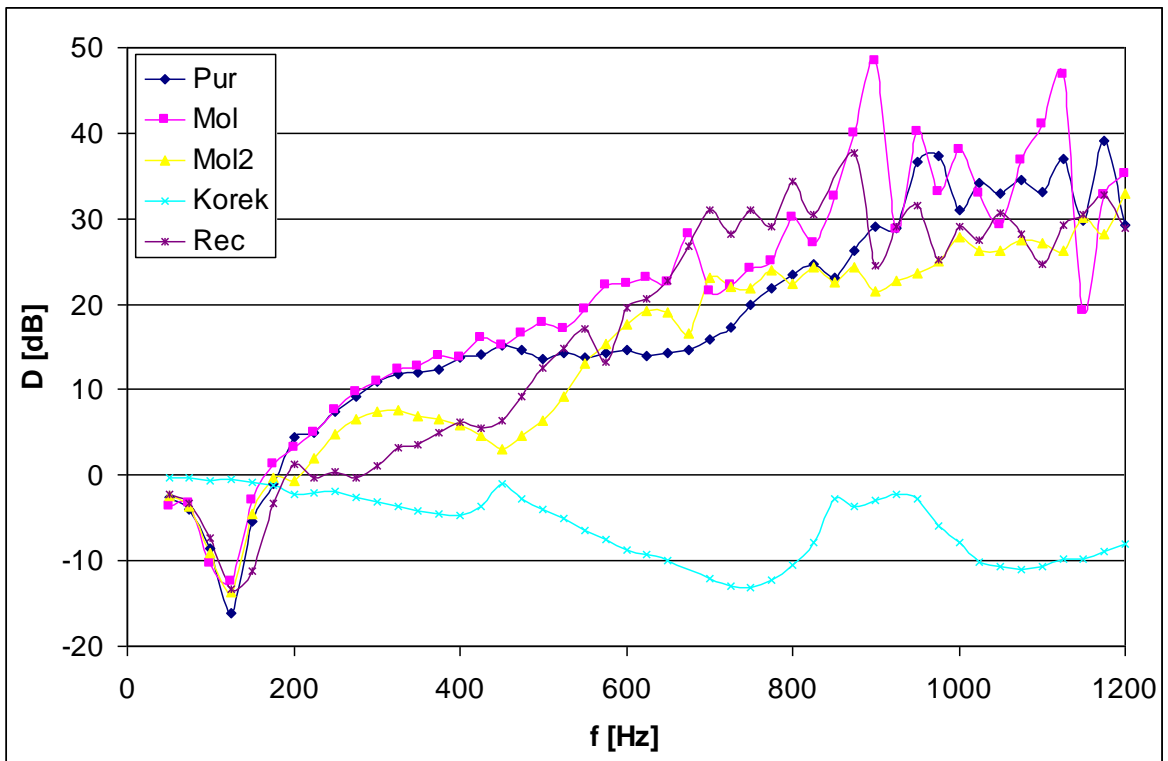
Obr. 40: Frekvenční závislost přenosového útlumu recyklátu



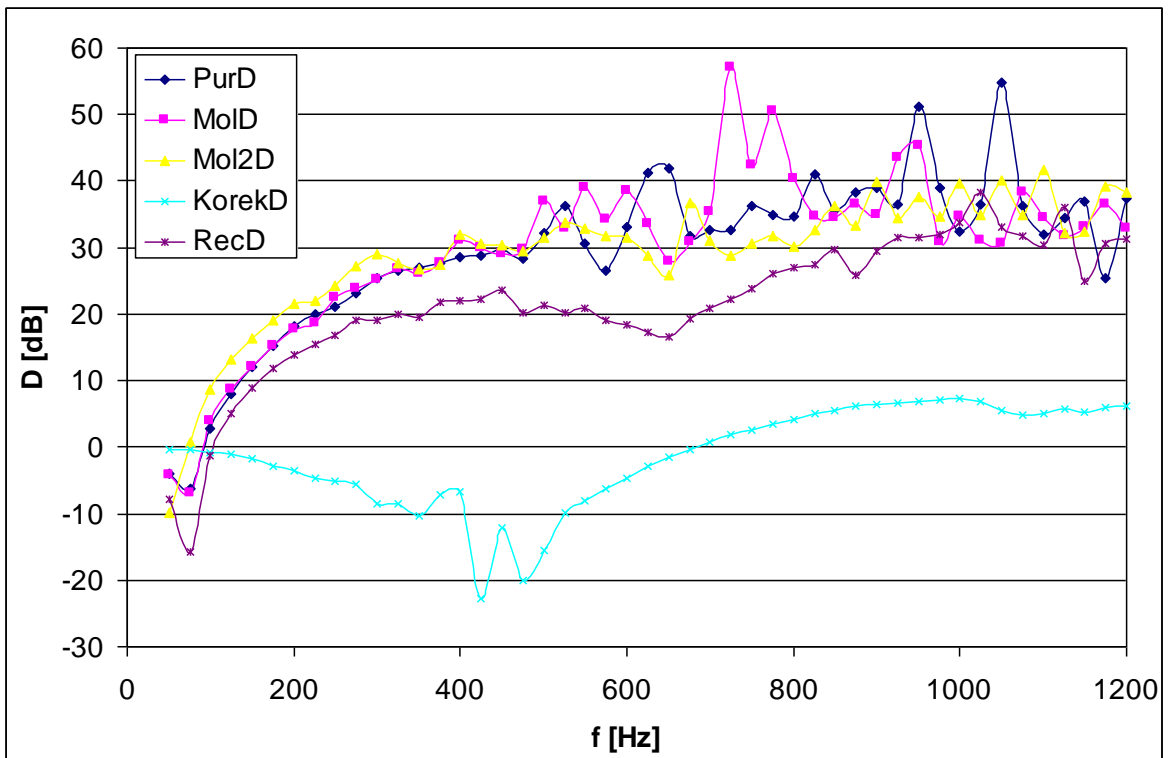
Obr. 41: Frekvenční závislost přenosového útlumu korku

Jak můžeme vidět, všeobecně platí, že pokud je materiál zatěžován závažím, jeho tlumicí vlastnosti se zlepšují. Ničím nezatížený materiál naopak při menších frekvencích do 200 Hz netlumí, ale rezonuje. Materiály zatížené deskou tlumí vibrace tím lépe, čím větší je frekvence a materiálům zatížený závažím stoupá útlum do 600 Hz a potom se ustálí a pohybuje se kolem této hodnoty až do 1200 Hz. Všimněme si, že všechny materiály nezávisle na zatížení začnou tlumit vibrace stejně od $f = 900$ Hz (obr. 37 - 40). Korek bez zatížení netlumí vůbec, pouze rezonuje a čím víc ho zatěžíme, tím se jeho tlumicí vlastnosti výrazně lepší (obr. 41).

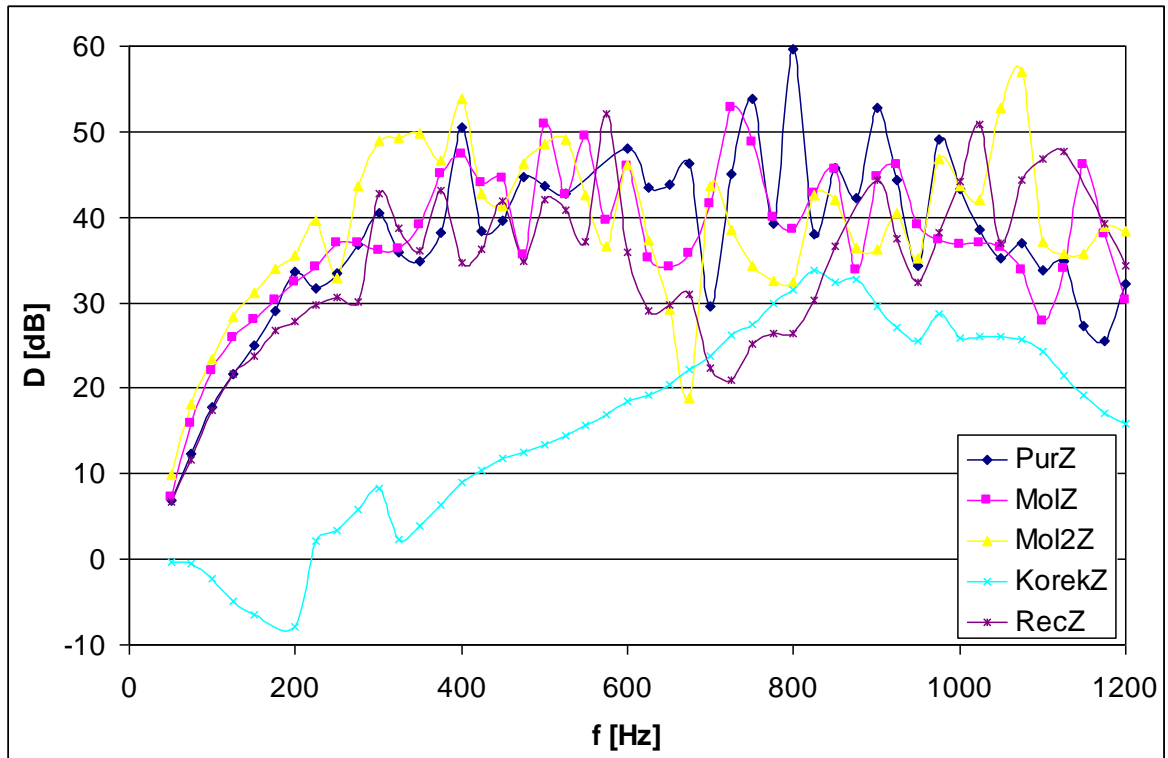
5.4.2 Vzájemné srovnání materiálů z hlediska přenosového útlumu při vlivu setrvačné zátěže



Obr. 42: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály bez zátěže



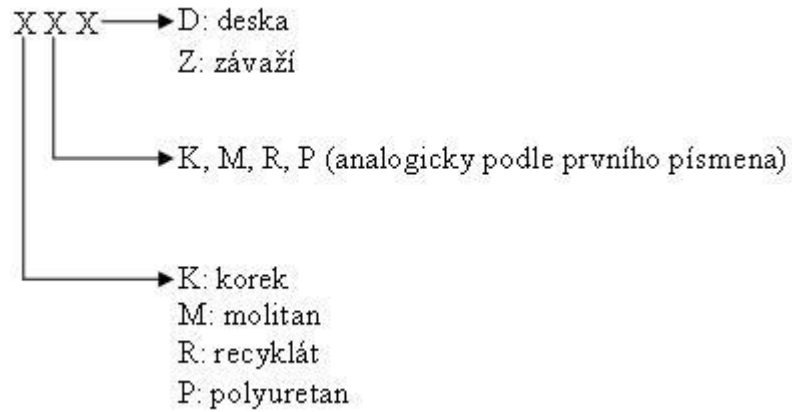
Obr. 43: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály zatížené deskou



Obr. 44 Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály zatížené závažím

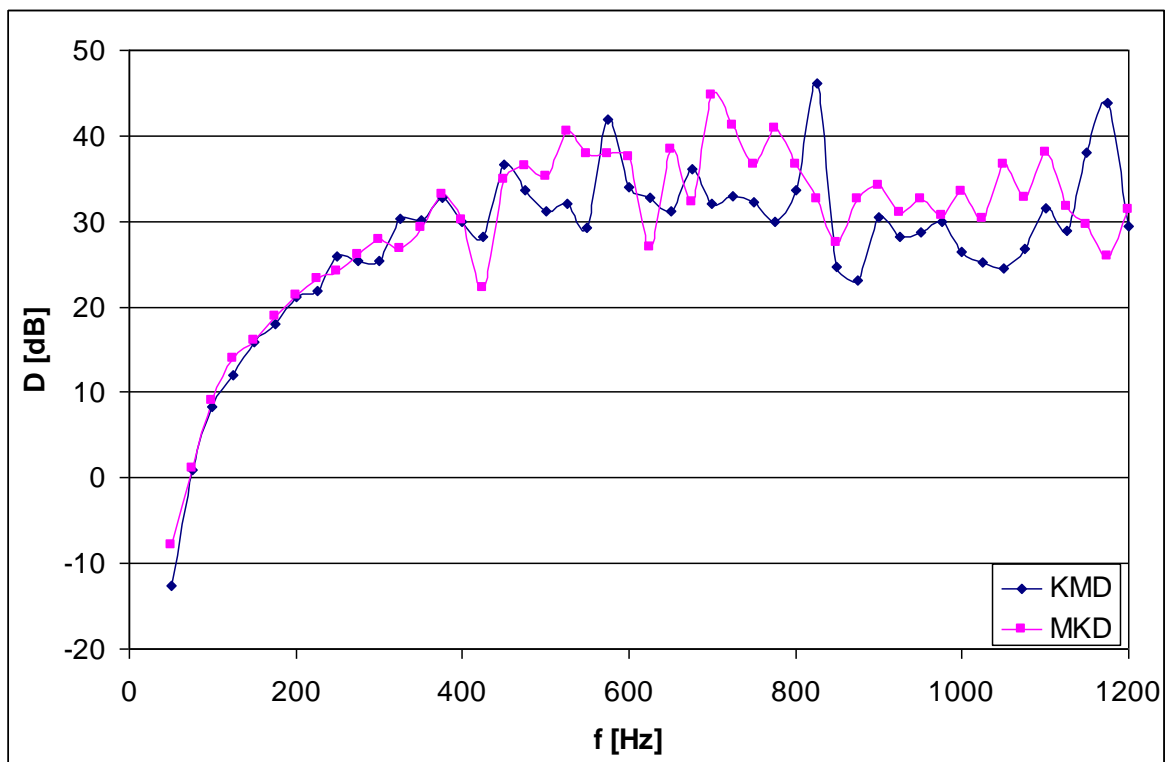
Nejlepší tlumící vlastnosti bez zatížení jsou patrné u tenkého molitanu. S přibývajícím zatížením začne lépe tlumit tlustý molitan. Při zatížení závažím tlumí všechny materiály (kromě korku) stejně do $f = 500$ Hz, potom se jejich tlumící vlastnosti začnou lišit. Tloušťka tedy u materiálů ovlivňuje tlumící vlastnosti tehdy, když začneme materiál nějakým způsobem zatěžovat. Můžeme říct, že čím větší hustota materiálu, tím hůř tlumí vibrace jak je patrné na korku a recyklátu.

5.4.3 Sendvičové soustavy

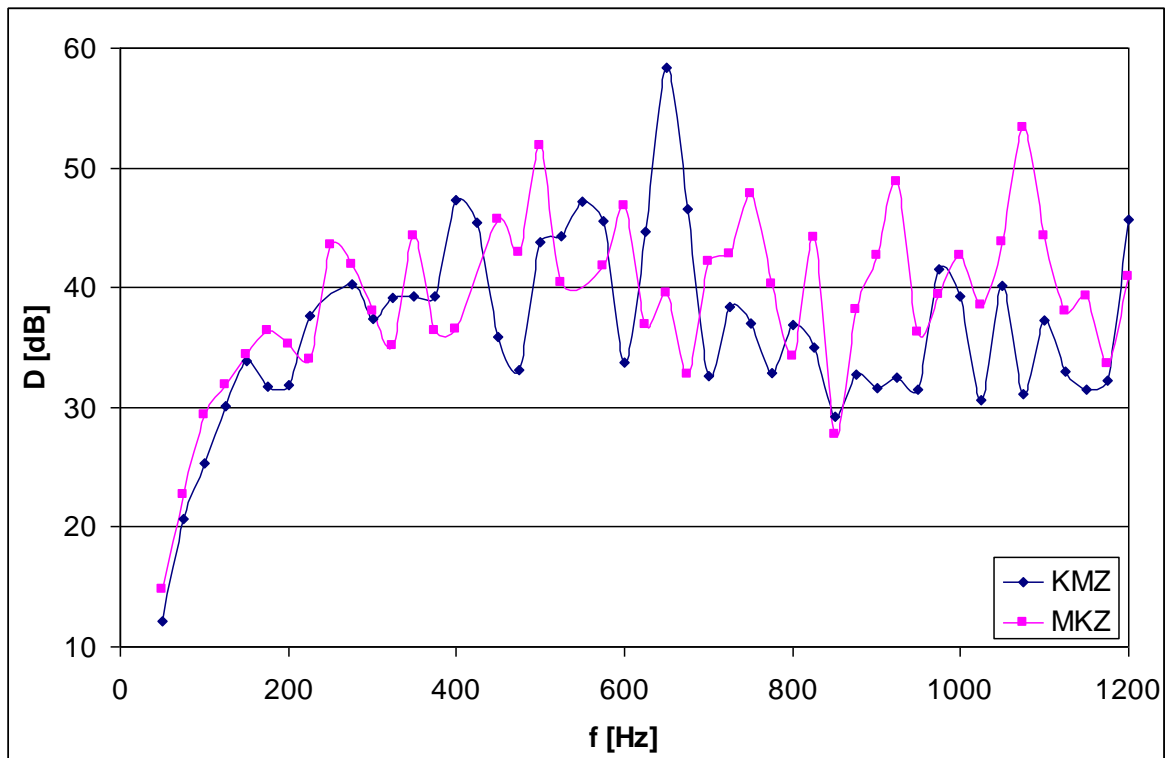


Obr. 45: Princip označování sendvičových soustav

5.4.3.1 Sendvičová soustava složená z molitanu a korku



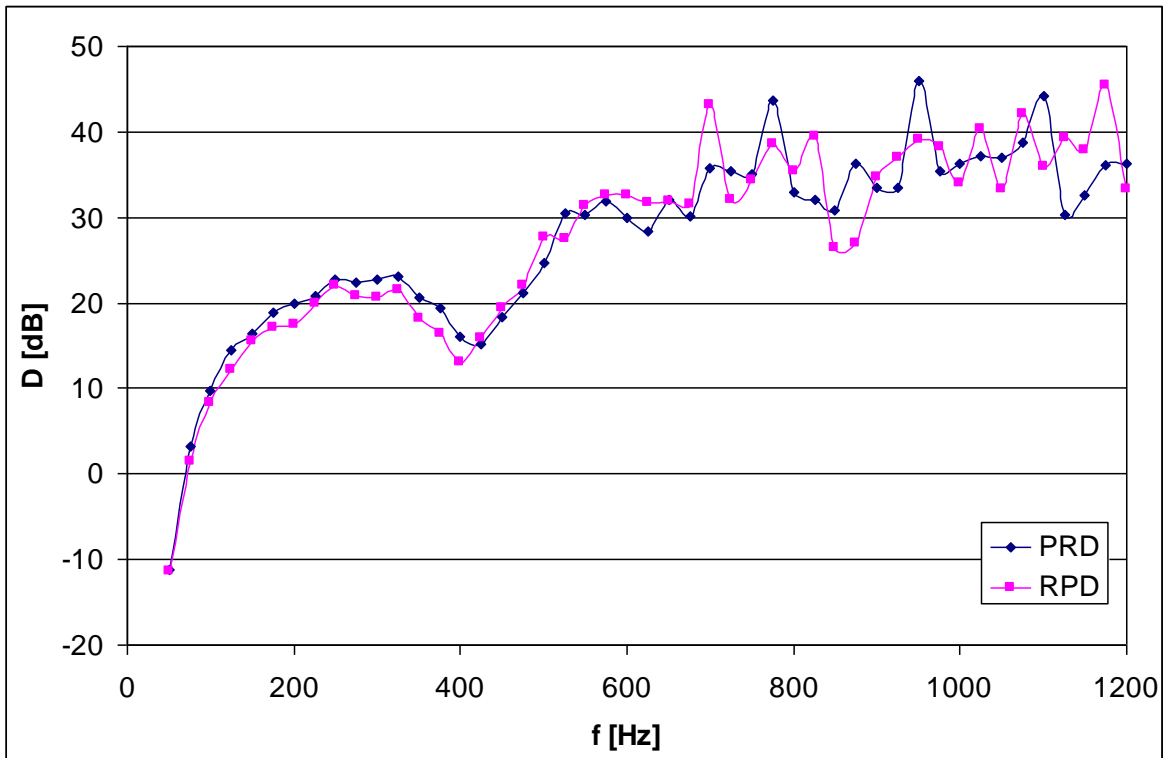
Obr. 46: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič K/M zatížený deskou



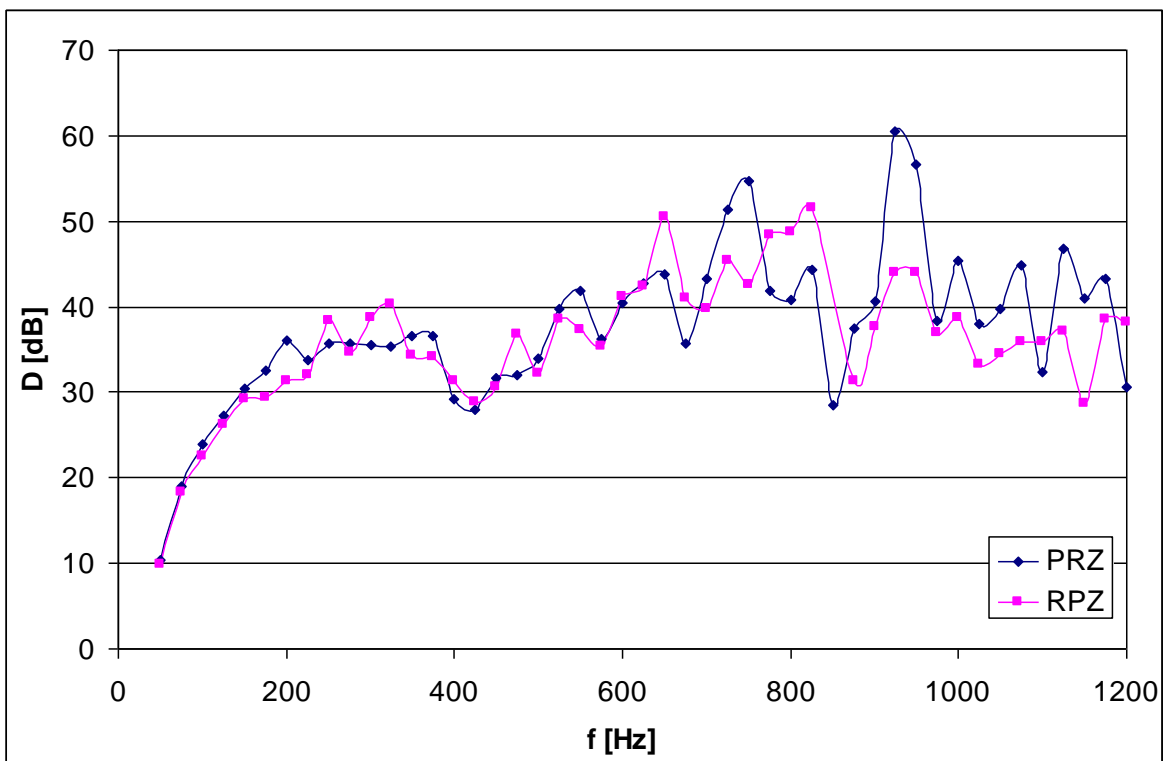
Obr. 47: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič K/M zatížený závažím

Lepší tlumící vlastnosti při obou formách zatížení vykazuje sendvič, kde je molitan na vstupní straně. Opět platí, že čím více jsme sendviče zatížili, tím lépe tlumily.

5.4.3.2 Sendvičová soustava složená z recyklátu a polyuretanu



Obr. 48: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič P/R zatížený deskou

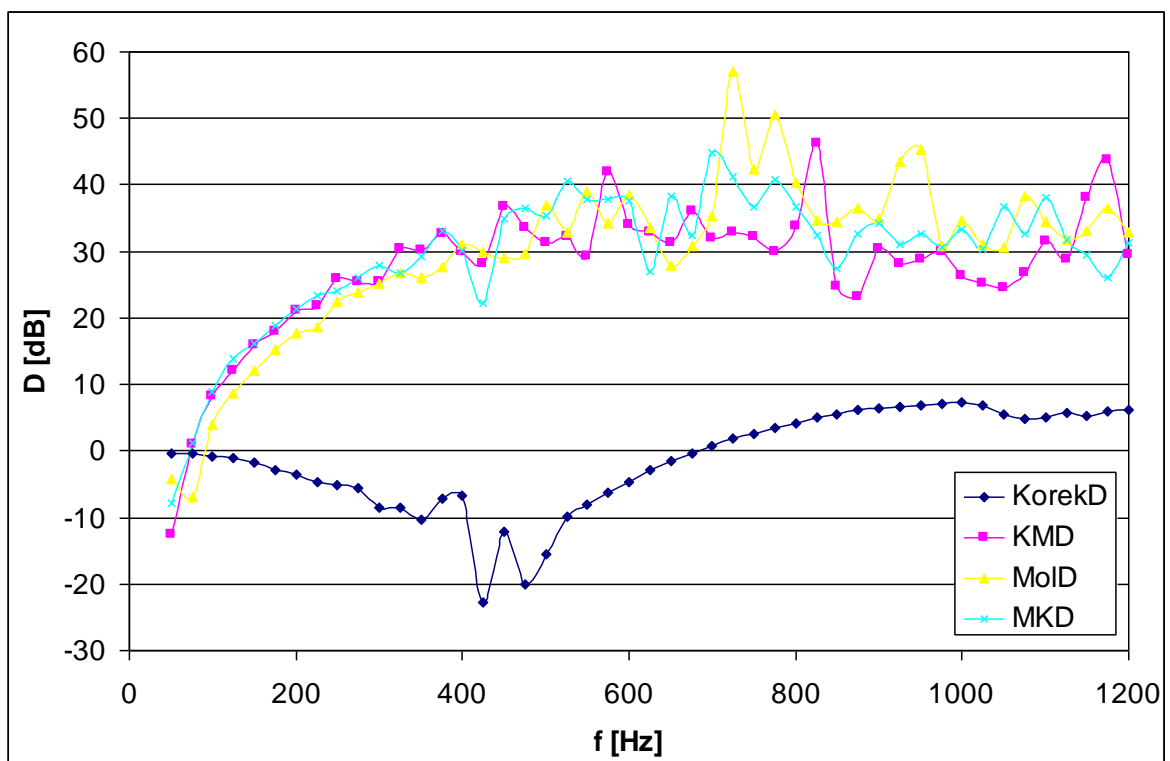


Obr. 49: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič P/R zatížený závažím

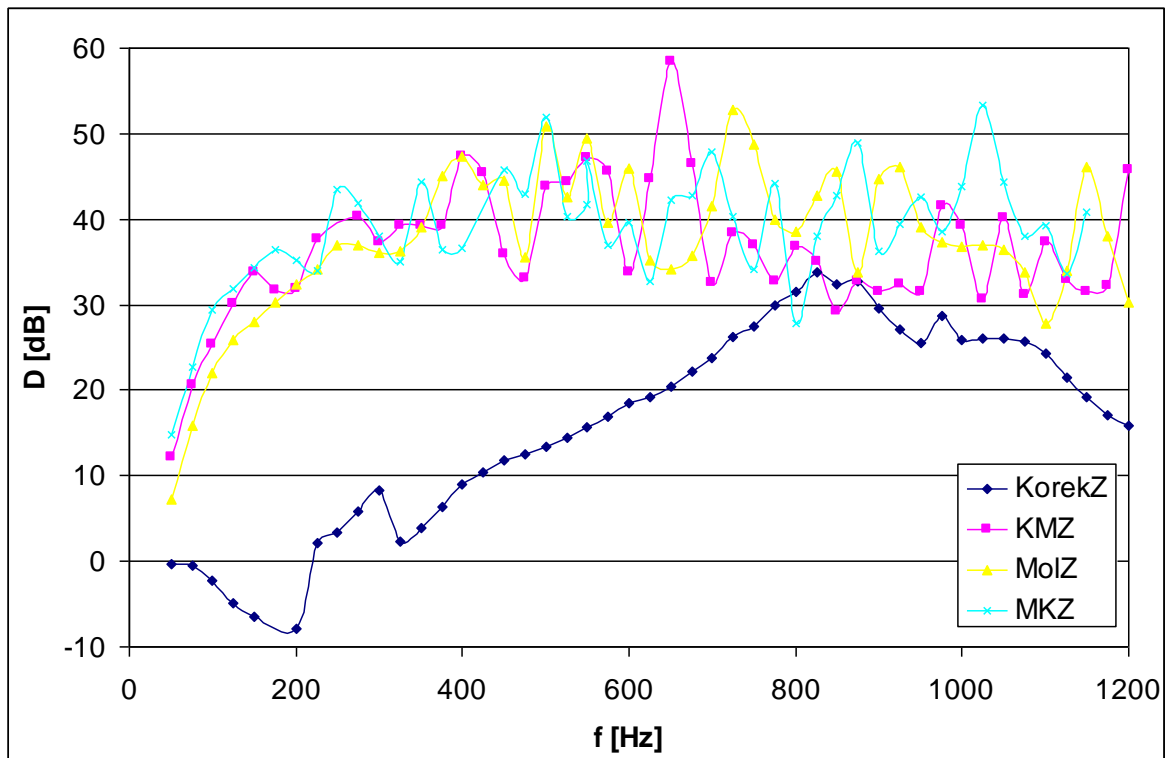
Sendvič, který vykazuje lepší tlumící vlastnosti je složen z polyuretanu na vstupu a recyklátu na výstupu. U sendvičů zatížených deskou stoupá tlumící tendence až do frekvence 600 Hz a poté se ustálí kolem hodnoty 35 dB. Rozdíl zde není tak velký jako když materiály zatížíme závažím.

Všeobecně se dá říct, že pokud materiály s menší hustotou umístíme na vstup budícího členu, vykazují sendvičové struktury lepší tlumící vlastnosti.

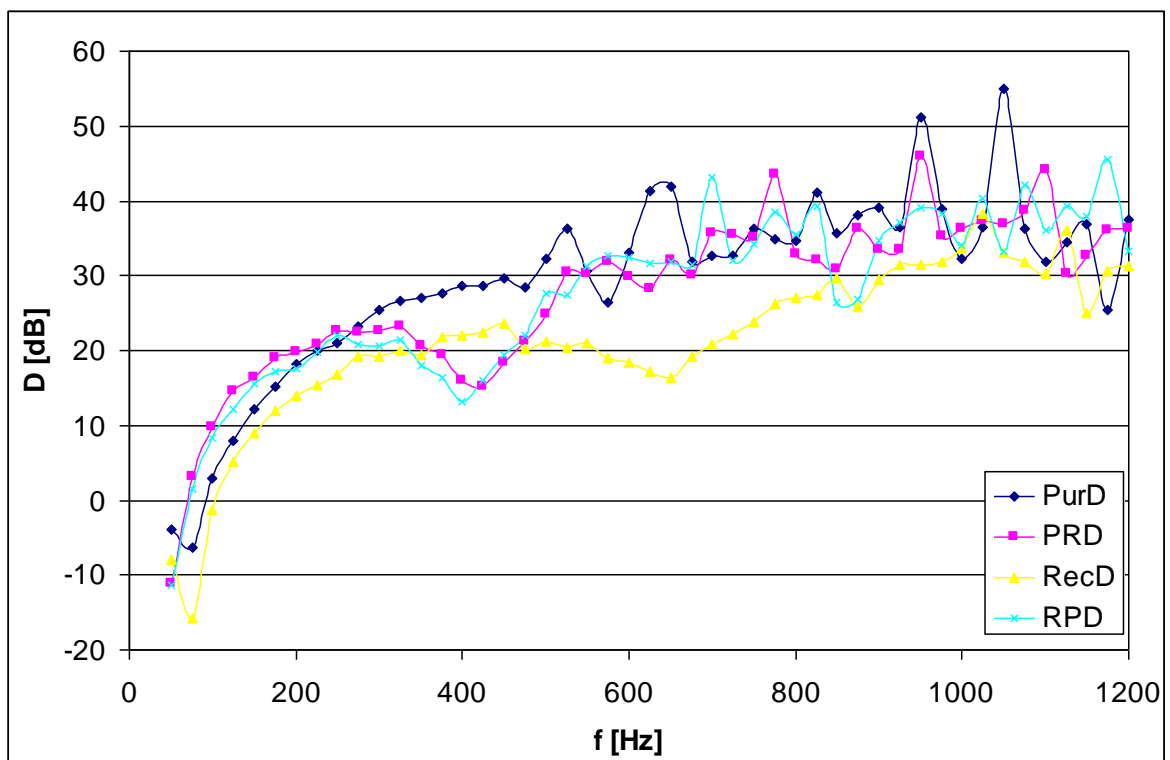
5.4.4 Porovnání sendvičových struktur se samostatnými materiály



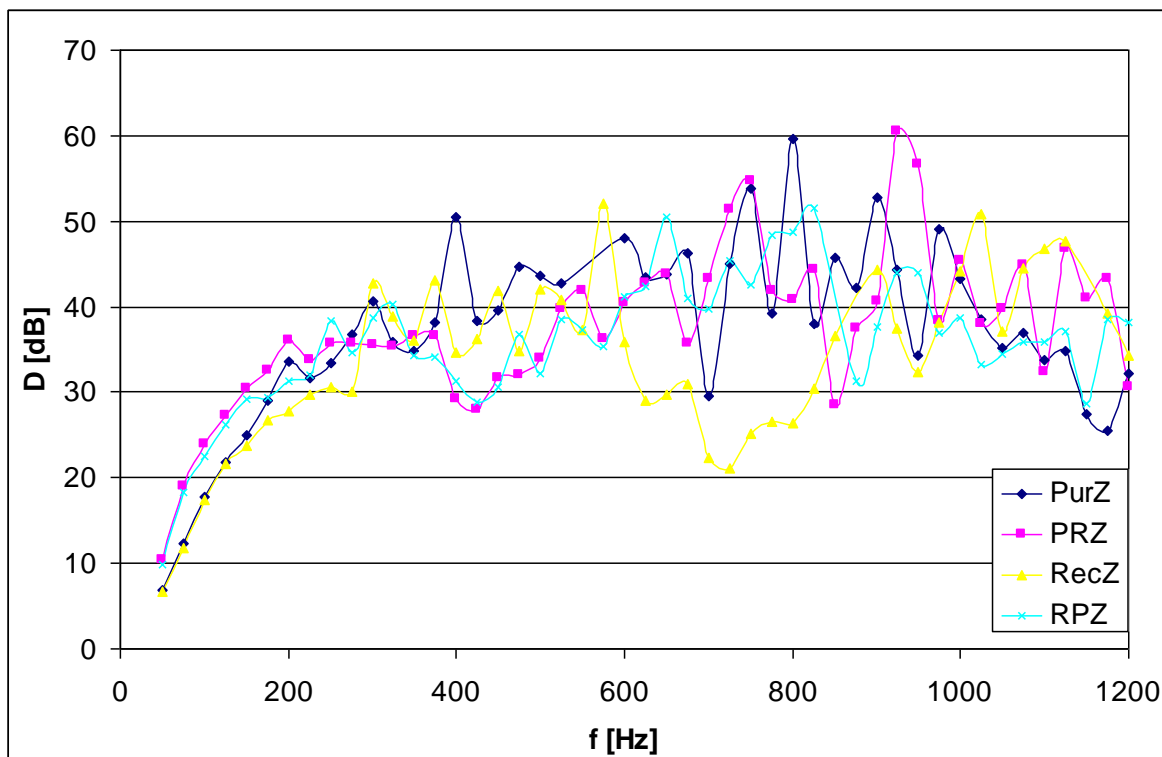
Obr. 50: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav K/M se samostatnými materiály zatížených deskou



Obr. 51: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav K/M se samostatnými materiály zatížených závažím



Obr. 52: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav P/R se samostatnými materiály zatížených deskou



Obr. 53: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav P/R se samostatnými materiály zatížených závaží

Porovnáme-li tvrdší materiály s jejich sendviči (korek, recyklát), vidíme, že po přidavku druhé složky se jejich tlumící vlastnosti výrazně zlepšily. Na druhou stranu můžeme také říct, že porovnáme-li měkčí prvky s jejich sendviči, tak přidavek druhé složky jejich vlastnosti zhoršil. Všeobecně ale materiály po jejich zkombinování s druhou složkou do sendviče dostaly větší tlumící stálost při vysokých frekvencích.

V Tabulce 2 jsou uvedeny minima a maxima přenosového útlumu s příslušnými frekvencemi. Je z ní zřejmé, že všeobecně menších hodnot mají materiály v nižších frekvencích (rezonují) a aplikace se tedy při těchto frekvencích nedoporučuje. Vyšších hodnot nabývají materiály při vyšších frekvencích (tlumí) a použití se tedy doporučuje.

Tabulka 2: Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími frekvencemi [1]

Vzorek	D_{\min} [dB]	f_{\min} [Hz]	D_{\max} [dB]	f_{\max} [Hz]
Pur	-16,12	125	39,16	1175
PurD	-6,241	75	54,9	1050
PurZ	6,807	50	59,59	800
Mol	-12,36	125	48,33	900
MolD	-6,953	75	57,07	725
MolZ	7,27	50	52,82	725
Mol2	-13,66	125	32,99	1200
Mol2D	-9,782	50	41,74	1100
Mol2Z	9,896	50	56,99	1075
Rec	-13,25	125	37,62	875
RecD	-15,78	75	38,37	1025
RecZ	6,686	50	52,04	575
Korek	-13,1	750	-0,214	50
KorekD	-22,82	425	7,311	1000
KorekZ	-7,86	200	33,79	825
KMD	-12,61	50	46,12	825
KMZ	12,16	50	58,35	650
MKD	-7,796	50	44,79	700
MKZ	14,82	50	53,29	1075
PRD	-11,16	50	45,97	950
PRZ	10,43	50	60,42	925
RPD	-11,4	50	45,45	1175
RPZ	9,894	50	51,52	825

ZÁVĚR

Předmětem práce bylo stanovit frekvenční závislosti přenosového útlumu u vybraných materiálů.

Zjistili jsme, že jak tloušťka tak hustota mají významný vliv na přenosový útlum materiálů. Molitan tenký vykazuje lepší tlumící vlastnosti pouze pokud jej nezatížíme v porovnání s molitanem tlustým. Čím více jej zatěžujeme, tím se jeho tlumící vlastnosti zhoršují zejména v oblastech vyšší frekvence. Když zatěžujeme molitan tlustý, tak se jeho tlumící vlastnosti stále zlepšují a to i v oblastech s vyšší frekvencí.

Materiály s větší hustotou tlumí vibrace hůř. Největší rozdíl je jasně vidět u korku a u recyklátu zatíženého deskou. U korku je zajímavé to, že čím více jej zatěžujeme, tím se jeho tlumící vlastnosti výrazně zlepšuje (až 47 dB rozdíl).

Na sendvičové soustavy se můžeme dívat ze dvou hledisek. Každá soustava obsahuje jeden materiál který tlumí dobře (polyuretan, molitan) a jeden materiál který tlumí špatně (korek) nebo hůř (recyklát). Z pohledu dobře tlumícího materiálu se jeho tlumící vlastnosti po přidání druhé složky zhoršily a z pohledu špatně tlumícího materiálu se jeho tlumící vlastnosti po přidání druhé složky zlepšily.

Jediný sendvič, který vykazuje zlepšení tlumících vlastností je typ PRZ, který od 600 do 1200 Hz tlumí lépe než samostatný polyuretan.

Materiály většinou rezonují pokud se pohybujeme v menších frekvencích do 200 Hz, potom začínají tlumit. Přenosový útlum stoupá až do hodnoty 600-800 Hz, kde podle Tabulky 2 vidíme, že bývají maximální hodnoty přenosového útlumu a potom se ustálí kolem určité hodnoty, u každého materiálu jiné.

Na závěr můžeme dodat, že nejlepší tlumící vlastnosti má polyuretan, který je v popředí jak nezatížený, tak zatížený oběma druhy setrvačné zátěže, tak v kombinaci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] <http://ufmi.ft.utb.cz/>

[2] Гольбер, И. И.: Механическое поведение полимерных материалов.

Издательство „ХИМИЯ“, Moskva 1970

[3] Macháček L.: Struktura a vlastnosti materiálů. Brno, 1987

[4] Lapčík, L. – Raab, M.: Nauka o materiálech II. Skriptum UTB ve Zlíně, 2004

[5] Mišun V.: Vibrace a hluk, Brno, 2008.

[6] Vaňková M. a kol.: Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí,
část I. Brno, 1995.

[7] Nový R.: Hluk a chvění, Praha, 2000.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_1	[ms ²]	Amplituda zrychlení na vstupu
a_2	[ms ²]	Amplituda zrychlení na výstupu
D	[dB]	Přenosový útlum
E	[Pa]	Modul pružnosti
E*	[Pa]	Komplexní modul pružnosti
E'	[Pa]	Reálná složka komplexního modulu pružnosti
E''	[Pa]	Imaginární složka komplexního modulu pružnosti
f	[Hz]	Frekvence
Δf	[Hz]	Frekvenční krok
k	[N/m]	Tuhost materiálu
m	[g]	Hmotnost
t	[s]	Čas
T	[K]	Teplota
T _B	[K]	Teplota křehnutí
T _G	[K]	Teplota skelného přechodu
v ₀	[m/s]	Rychlost deformace
W	[J]	Práce
δ	[-]	Fázový posun
ε	[Pa]	Deformace
ε_0	[Pa]	Poměrná deformace
ε_∞	[Pa]	Hookovská deformace
η	[-]	Činitel vnitřního tlumení
λ	[-]	Frekvenční ladění
σ	[Pa]	Napětí

σ_0 [Pa] Amplituda napětí

ω [s⁻¹] Úhlová rychlost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů. [1].....	11
Obr. 2: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání ideálně elastických materiálů. [1]	11
Obr. 3: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskózních materiálů. [1].....	12
Obr. 4: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání viskózních materiálů [1]	13
Obr. 5: Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů. [1].....	14
Obr. 6: Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. [1]	14
Obr. 7: Útlum vibrací [5]	17
Obr. 8: Rozsahy hodnot reálné složky E' a imaginární složky E'' komplexního modulu pružnosti a činitele vnitřního tlumení η u vybraných materiálů. [1].....	18
Obr. 9: Závislost napětí a deformace u určitého polymeru na teplotě.....	19
Obr. 10: Grafická definice Hookova zákona.	20
Obr. 11: Závislost napětí na rychlosti deformace u viskozitního prvku.	21
Obr. 12: Závislost deformace na čase při konstantním napětí. [2]	22
Obr. 13: Schéma Maxvellova modelu	23
Obr. 14: obr: Závislost napětí na čase při konstantní deformaci – křivka relaxace. [2]	25
Obr. 15: Závislost napětí na čase při konstantní rychlosti deformace	26
Obr. 16: Závislost deformace na čase	27
Obr. 17: Závislost práce W vykonané za cyklus na součinu $\eta \cdot \omega$. [2]	28
Obr. 18: Kelvinův model	29
Obr. 19: Závislost deformace na čase při konstantním napětí Kelvinova modelu.	30
Obr. 20: Závislost napětí na čase při konstantní rychlosti deformace a jejím přerušení.	31
Obr. 21: Tříprvkové modely třídy C, typ „a“ (vlevo) a typ „b“ (vpravo).....	32
Obr. 22: Tříprvkové modely třídy D, typ „a“ (vlevo) a typ „b“ (vpravo).	33
Obr. 23: Čtyřprvkové modely třídy A	35
Obr. 24: Čtyřprvkové modely třídy B.....	35
Obr. 25: Příklad nezatíženého korku	38

Obr. 26: Korek zatížený deskou (KorekD).....	38
Obr. 27: Korek zatížený závažím (KorekZ)	39
Obr. 28: Schéma zapojení měřící aparatury. [1].....	39
Obr. 29: Fotografie měřící aparatury.	40
Obr. 30: Vzorek polyuretanu	40
Obr. 31: Vzorek tenkého molitanu	40
Obr. 32: Vzorek tlustého molitanu	41
Obr. 33: Vzorek recyklátu	41
Obr. 34: Vzorek korku	41
Obr. 35: Amplitudy zrychlení na vstupu a výstupu v závislosti na frekvenci	42
Obr. 36: Přenosový útlum v závislosti na frekvenci	42
Obr. 37: Frekvenční závislost přenosového útlumu polyuretanu	43
Obr. 38: Frekvenční závislost přenosového útlumu tenkého molitanu	43
Obr. 39: Frekvenční závislost přenosového útlumu tlustého molitanu	44
Obr. 40: Frekvenční závislost přenosového útlumu recyklátu	44
Obr. 41: Frekvenční závislost přenosového útlumu korku	45
Obr. 42: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály bez zátěže	46
Obr. 43: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály zatížené deskou	46
Obr. 44: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro materiály zatížené závažím.....	47
Obr. 45: Princip označování sendvičových soustav	48
Obr. 46: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič K/M zatížený deskou.....	48
Obr. 47: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič K/M zatížený závažím.....	49
Obr. 48: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič P/R zatížený deskou	50
Obr. 49: Frekvenční závislost přenosového útlumu pro sendvič P/R zatížený závažím	50
Obr. 50: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav K/M se samostatnými materiály zatížených deskou	51
Obr. 51: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav K/M se samostatnými materiály zatížených závažím	52
Obr. 52: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav P/R se samostatnými materiály zatížených deskou	52
Obr. 53: Porovnání frekvenčních závislostí přenosového útlumu sendvičových soustav P/R se samostatnými materiály zatížených závažím	53

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled materiálů.....	42
Tabulka 2: Minimální a maximální hodnoty přenosového útlumu s příslušnými budícími frekvencemi [1].....	56