

Hodnocení tlumících charakteristik strojních součástí z plastů

Bc. Ondřej Paládi

Diplomová práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej PALÁDI**
Osobní číslo: **T09574**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Téma práce: **Hodnocení tlumících charakteristik strojních součástí z plastů**

Zásady pro vypracování:

1. Hodnoťte kmitání technologických zařízení
2. Uveďte vliv kmitání a tlumení kmitů na jakost výrobků
3. Určete experimentálně tlumení různých materiálů.
4. Provedte hodnocení možností použití polymerních materiálů ve výrobě strojních součástí.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

HORÁK, Z., KRUPKA, F. Fyzika: Příručka pro vysoké školy technického směru. 1st ed. Praha: SNTL/ALFA, 1976. 424 p.

ZEMAN, V., HLAVÁČ, Z. Kmitání mechnických soustav. 2nd ed. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 218 p. ISBN 80-7043-337-X.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika: Část 2 Mechanika – Termodynamika. 5th ed. Praha: VUTIUM a PROMETHEUS, 1997.

NESLUŠAN, M., et al. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina: Žilinská univerzita, 2007.

LIEMERT, G. – DRÁBEK, F. – ONDRA, J. – VAVŘÍK, I. Obrábění. Praha, SNTL 1974. 352 s.

KOCMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., prosinec 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Imrich Lukovics, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

14. února 2011

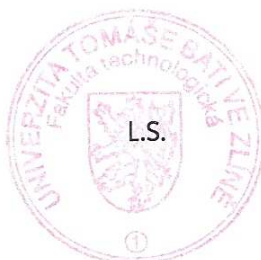
Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2011

Ve Zlíně dne 6. ledna 2011

doc. Ing. Retr Hlaváček, CSc.

děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: **Ondřej Paládi**

Obor: **Výrobní inženýrství**

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít 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 15.4.2011



.....

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá porovnáním tlumících vlastností různých polymerních materiálů. K experimentu byly použity 3 metody měření. První metoda porovnává rozdíl vstupní a výstupní amplitudy na kmitajícím vzorku. Druhá metoda měří intenzitu zvuku, která projde přes zkušební desky. Třetí metoda byla provedena na Kundtově trubici a byla měřena pohltivost zvuku materiálů. Dále byla u materiálů provedena tahová zkouška pro zjištění mechanických vlastností materiálů s ohledem na jejich potenciální použití při konstrukci strojních součástí. Na základě všech naměřených veličin byly vybrány nejvhodnější materiály pro konstrukci strojních součástí z plastů i s přihlédnutím k současné ceně materiálů.

Klíčová slova: tlumení vibrací, pohltivost zvuku, tahová zkouška, ceny polymerů

ABSTRACT

This diploma work deal with comparison absorbing characteristics of different polymer materials. To this experiment was used 3 methods of mensuration. First method comparing diference between input and output amplitude on vibrating specimens. Second method measures sound intensity which pass through test board. Third method was performed on Kundt's pipe and was measured absorbing capacity of sound on materials. Further was on materials performed tensile test for finding mechanical charakteristics of materials regarding on their potential using at construction of machine parts. On basis of all measured quantities was chosen optimal materials for construction of machine parts from plastic and took account of actual prices of materials.

Keywords: absorbing vibration, absorbing of sound, tensile test, prices of polymers

Hlavní poděkování patří panu Prof. Ing. Imrichu Lukovicsovi, CSc. za vedení mé diplomové práce, za rady a připomínky, které vedly k úspěšné obhajobě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D., Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., Ing. Jiřímu Šálkovi a Ing. Jakubu Černému za praktickou pomoc při měření a jich přípravě.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KMITÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....	12
1.1 OBECNÉ VLIVY KMITÁNÍ A HLUKU	12
1.1.1 Vliv vibrací a hluku na člověka	13
1.1.2 Vliv vibrací a hluku na stroje a pracovní procesy.....	16
1.1.3 Metody boje proti vibračním a hluku.....	16
1.2 TEORIE KMITÁNÍ.....	18
1.2.1 Vlastní kmity	19
1.2.2 Vynucené kmity	20
1.2.3 Samobuzené kmity	21
1.3 TLUMENÍ VLIVEM VNITŘNÍCH ZTRÁT MATERIÁLU	23
1.3.1 Činitel vnitřního tlumení	23
1.3.2 Rozdělení měřících metod.....	24
1.3.3 Tlumiče kmitání	25
2 VLIV KMITÁNÍ A TLUMENÍ NA JAKOST VÝROBKŮ	28
2.1 DRSNOST A VLNITOST	28
2.2 HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU	31
3 VIBRAČNÍ ZKOUŠENÍ.....	34
3.1 ÚČEL VIBRAČNÍHO ZKOUŠENÍ.....	34
3.2 PRINCIP A KONSTRUKCE ELEKTRODYNAMICKÉHO BUDIČE	34
3.3 VÝKONOVÝ ZESILOVAČ.....	35
3.4 OVLÁDACÍ ZAŘÍZENÍ	35
3.5 PIEZOELEKTRICKÝ SNÍMAČ ZRYCHLENÍ.....	36
3.5.1 Konstrukce a typy snímačů zrychlení	36
3.5.2 Určení polohy a upevnění snímače zrychlení	37
3.6 ZÁKLADNÍ SYSTÉM K BUZENÍ MECHANICKÝCH KMITŮ	39
3.6.1 Buzení sinusovým signálem.....	40
3.6.2 Buzení náhodným signálem	40
II PRAKTICKÁ ČÁST	41
4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	42
5 PŘEHLED MĚŘENÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	43

5.1	POLYPROPYLÉN (PP).....	43
5.2	POLYOXYMETYLÉN (POM).....	43
5.3	POLYTETRAFLUORETYLÉN (PTFE).....	43
5.4	POLYAMID (PA).....	44
5.5	POLYMETYLMETAKRYLÁT (PMMA).....	44
5.6	POLYVINYLCHLORID (PVC).....	45
5.7	POLYTETRAFLUORETYLÉN (PET).....	45
5.8	POLYETYLÉN (PE).....	45
5.9	POLYKARBONÁT (PC).....	46
6	MĚŘENÍ TLUMENÍ VIBRACÍ.....	47
6.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ.....	47
6.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	49
6.2.1	Porovnání tlumení jednotlivých materiálů.....	49
6.2.2	Porovnání tlumení vytlačovaných a litých materiálů.....	51
6.2.3	Porovnání vlivu tloušťky materiálu.....	53
7	MĚŘENÍ PRŮCHODU HLUKU PŘES POLYMERNÍ STĚNU.....	55
7.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ.....	55
7.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	57
8	MĚŘENÍ POHLTIVOSTI ZVUKU.....	58
8.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ.....	58
8.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	60
9	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	64
9.1	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	65
9.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	66
10	EKONOMICKÉ HODNOCENÍ MATERIÁLŮ.....	70
10.1	POROVNÁNÍ SOUČASNÝCH CEN MATERIÁLŮ A JEJICH VÝVOJ.....	70
10.2	DLOUHODOBÝ VÝVOJ CEN MATERIÁLŮ.....	71
	ZÁVĚR.....	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	76
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	78
	SEZNAM TABULEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH.....	81

ÚVOD

V současnosti je trend vývoje nových strojů podmíněn rostoucím výkonem a rozměry. Při současném uplatňování tendencí materiálově úsporného konstruování roste dynamická poddajnost konstrukcí. To se projevuje zvýšeným počtem vlastních kmitů v dynamické odezvě a tedy častějším vznikem rezonančních stavů, které mohou být obzvláště intenzivní a nebezpečné.

U klasických konstrukčních materiálů, což jsou především oceli, je velkou nevýhodou jejich malý vnitřní útlum. Proto bychom měli klást větší důraz na použití konstrukčních materiálů s vysokým vnitřním útlumem. To splňují především šedá litina nebo plastické materiály, které mají obzvláště vysoké tlumící schopnosti. Plasty mají také mnoho dalších výhod jako je nízká hmotnost, poměrně levný způsob zpracování nebo korozivzdornost. Speciální plasty mají i mnoho dalších výhod a vlastností.

V této diplomové práci budou porovnávány tlumící vlastnosti různých polymerů, které by mohly být použity jako materiálová alternativa klasických materiálů strojních součástí. U materiálů strojních součástí jsou důležité kromě tlumících vlastností hlavně mechanické vlastnosti jako jsou pevnost a tvrdost. Aby mohl být polymerní materiál adekvátní náhradou za ocel, musí mít srovnatelné mechanické vlastnosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KMITÁNÍ TECHNOLOGICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Kmitání mechanických soustav je proces změn fyzikálních veličin v čase (např. výchylek, rychlostí, zrychlení, sil, napětí), charakterizovaný střídavým zvyšováním a snižováním a jejich hodnot. Přitom celková energie soustavy nabývá střídavě formu kinetické a potenciální energie a má-li kmitání ustálený charakter, část energie musí být soustavě trvale přiváděna.

S kmitáním se setkáváme jako s průvodním jevem provozu mnoha technických zařízení. Intenzivní kmitání konstrukcí může výrazně snížit jejich životnost nebo se projeví vyzařováním nepříjemného hluku. U dopravních prostředků, kdy člověk je součástí systému, se kmitání přenáší na člověka a podmiňuje komfort cestování. Kmitání může být i příčinou havárií nebo dokonce katastrof, spojených např. se zřícením stavebních konstrukcí a s únikem radioaktivních záření při seizmických událostech jaderných elektráren. [2]

1.1 Obecné vlivy kmitání a hluku

Vibrace a hluk jsou průvodními jevy pracovních procesů všech strojních zařízení – výrobních strojů, dopravních prostředků, různých domácích elektrospotřebičů apod. Nelze proto vibrace a hluk zcela z pracovního a životního prostředí úplně odstranit, lze je pouze redukovat na přijatelnou hodnotu.

Vibrace a hluk jsou proto součástí životního prostředí nejen lidí, ale vlastně všech živých organismů na naší Zemi. Vibrace i hluk působí negativně na živé organismy. Z tohoto důvodu je v současnosti jedna z nejdůležitějších úloh celé společnosti cílevědomá a systematická starost o ochranu a tvorbu životního prostředí.

Hlukem je nazýván jakýkoliv nežádoucí, obtěžující a rušivý zvuk. Je obtížné nějak definovat hluk, protože velmi záleží na vztahu člověka k danému zvuku. Pro někoho může být daný zvuk nepříjemným hlukem, ale pro jiného příjemným a zábavným poslechem. Zvuk je proto obecnějším pojmem než je hluk.

Základní příčinou zvuku je pohyb částic příslušného pružného prostředí v jeho některé oblasti. Zdrojem zvuku je tedy vymezená část prostředí, kde vzniká akustická energie a od které se tato energie šíří do okolního akustického prostředí (vzdušného, kapalného, poddajných těles). [7]

Příčiny vzniku akustické energie (zvuku, hluku) proto jsou:

a) mechanické kmity povrchů strojů, stěn budov, technologických zařízení resp. jejich částí a podobně – **mechanický hluk**. Kmitající povrch tělesa (stroje, stěn budovy apod.) způsobí akustický rozruch kapalného, nejčastěji plynného prostředí a svoji mechanickou energii odevzdává akustickému prostředí. Akustická energie se pak prostřednictvím akustických vln dále šíří do celého akustického prostředí (subsystému). Akustická energie souvisí s rozměry kmitajícího tělesa, tvarem jeho povrchu a stavem jeho kmitání (frekvencí, amplitudou).

b) nestacionární proudění plynného nebo kapalného proudění – **aerodynamický hluk**. Hluk vzniká v oblastech neustáleného proudění tekutiny (plynu, kapaliny), nebo kde dochází k výrazným změnám tlaku (vzniká tlakový spád) a tím dochází ke vzniku vlnění příslušného média (ventilátory, kompresory, sání a výfuk spalovacích motorů, únik stlačeného plynu nebo kapaliny z potrubí nebo trysky, výbuch apod.).

V praxi u strojních zařízení dochází k emisi hluku často z obou příčin. Například u spalovacího motoru vzniká jak mechanický hluk (od setrvačných sil, dosedání ventilů, třecí síly v kinematických dvojicích a dalších silových účinků) tak i hluk aerodynamický (sání, výfuk, ventilátor apod.). Jednotlivé příčiny se liší frekvenčním složením, intenzitou a směrovým působením. V obou případech vzniku zvuku (hluku) se tento šíří vlněním příslušného akustického média dále od původního zdroje (vzruchu). [7]

1.1.1 Vliv vibrací a hluku na člověka

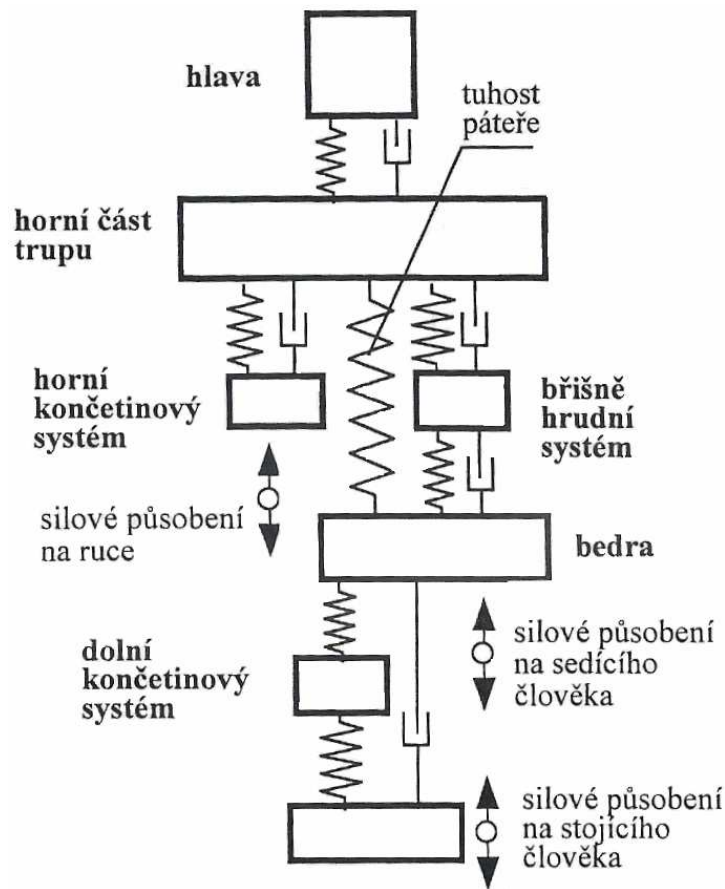
Lidský organismus nemá pro registraci mechanického kmitání speciální smyslový orgán, takže jej vnímá jinými smysly. Mechanické kmity mohou na člověka působit celkové (dopravní prostředky) nebo lokálně (sbíječky, ruční vrtačky atd.).

V závislosti na frekvenci a amplitudy kmitání a také místa působení na tělo člověka vznikají nejčastěji poruchy činnosti některých orgánů a funkčních systémů člověka.

Při působení vibrací na člověka dochází k vynucenému kmitání některých částí lidského organismu nebo celého těla, tj. dochází k jejich rezonanci. Znalost těchto jevů je důležitým předpokladem pro správnou konstrukci strojů a různých zařízení, se kterými je člověk v bezprostřední interakci.

Znalost mechanických vlastností lidského těla je nutná při jeho modelování jako mechanické soustavy. Lidský organismus se chová jako mechanická soustava o větším počtu

stupňů volnosti. Používané diskrétní modely lidského těla lze použít přibližně do frekvence 100 Hz. Model lidského těla pro analýzu svislých pohybů je uveden na obr. 1. [7]



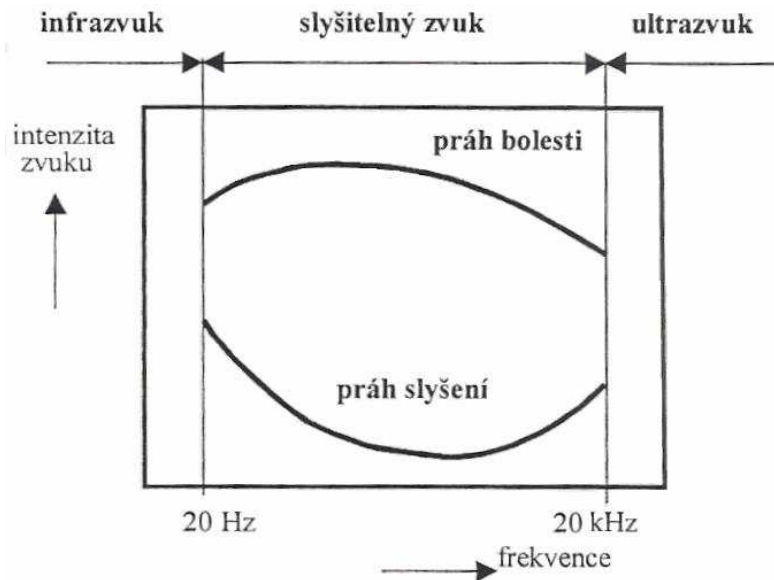
Obr. 1. Mechanický model lidského těla

V důsledku vibrací dochází k dynamickému namáhání částí lidského těla a jeho vnitřních orgánů. To má za následek zhoršení oběhového systému lidského organismu, projevující se nejdříve jako únava a později jako poruchy vegetativní nervové soustavy.

Vedle vibrací na člověka působí škodlivě i doprovodný hluk. Základním parametrem hluku, určujícím jeho účinek na člověka je intenzita hluku, případně akustický tlak.

Člověk se necítí dobře v prostředí s neobvykle nízkou hladinou hluku. Hodnoty blízké 20dB většina lidí považuje za hluboké ticho a za nepříjemný stav. Z tohoto důvodu v kosmických kabinách bylo nutno vytvářet vhodné hlukové pozadí, aby se kosmonauti cítili jakoby v přirozeném prostředí.

Při hladině hluku nad 130dB se účinky hluku zpravidla mění na bolest sluchového orgánu (práh bolesti). Při hladinách hluku nad 160dB dochází již k poruše bubínku sluchového orgánu. Prahové křivky slyšitelnosti člověka jsou zobrazeny na obr. 2. [7]



Obr. 2. Prahové křivky slyšitelnosti

Obtěžující účinky hluku závisí na více faktorech:

- na intenzitě a frekvenci
- na době trvání a šířce jeho frekvenčního pásma
- na rozdílu mezi hlukem zdroje a hlukem pozadí
- na frekvenci přerušování
- na impulznosti hluku a jeho neočekávanosti
- na osobních dispozicích člověka a jeho vztahu ke zdroji hluku

Negativní účinky na zdraví člověka se především projevují v oblasti sluchového orgánu. Nejčastějším projevem poškození sluchového orgánu je trvalý posun sluchového prahu slyšitelnosti. [7]

1.1.2 Vliv vibrací a hluku na stroje a pracovní procesy

Vibrace mají nepříznivý vliv nejen na člověka a živé organismy, ale i na pracovní či výrobní stroje a jejich části. Vibrace zhoršují pracovní podmínky pracovních procesů včetně technologických pracovních procesů. Tím se zhoršuje kvalita opracovávaných ploch a povrchů výrobků.

Vibrace ostří nástroje způsobují změnu řezné rychlosti obrábění, čímž se výrazně snižuje životnost nástrojů. Vibrace nástroje a obrobku rovněž zhoršují přesnost opracovávaných součástí. Vibrace stroje způsobují jeho výrazná dynamická namáhání včetně vzniku únavových poruch jeho uzlů. Tím dochází ke snížení spolehlivosti stroje a celkové jeho životnosti.

Vibrace nedovolují plné využití výkonu stroje, neboť při zvýšených vibracích nelze například obrábět a tím samozřejmě dochází ke snížení produkce daného stroje. Na udržování vibrací a hluku se spotřebuje část mechanické energie, takže se tím zhoršuje mechanická účinnost stroje.

Mechanických kmitů lze naopak výhodně využít, např.:

- u některých technologických pracovních procesů (vibrační síta, vibrační silniční válce, vibrační obrábění apod.)
- vibroakustických signálů generovaných stroji lze použít při diagnostice vad sledovaných strojů a jejich uzlů
- v hudební oblasti (konstrukce hudebních nástrojů) [7]

1.1.3 Metody boje proti vibracím a hluku

Při sledování hlučnosti strojů je nutno sledovat celý řetězec od zdrojů vibrací (budící síly) až po akustické prostředí s obsluhou.

Podle zásahu do jednotlivých bloků řetězce se metody snižování vibrací a hlavně hluku dělí na metody:

- primární (aktivní metody)
- sekundární (pasivní metody)

a) primární metody

Mezi tyto metody patří úpravy a snížení budících silových účinků, zlepšují se přenosové vlastnosti struktury strojů (frekvenční ladění) a upravují se zářiče hluku (povrchy strojů).

Je nutno především věnovat zvýšenou pozornost výrobě jednotlivých součástí stroje, jejich vyvažování, opracování, přesnosti, technologické montáži, vhodného výběru konstrukčního materiálu, použití vhodných tlumících vložek, vhodné tvarování potrubí k zamezení vzniku nestacionárního proudění kapaliny apod. Stejně dobře lze použít pružného uložení stroje za účelem snížení přenosu vibrací ze stroje do okolního podloží a obráceně. [7]

Dále je vhodné provádět úpravu nebo náhradu příslušného technologického pracovního procesu jiným méně hlučným (náhrada nýtování např. šroubovým spojením apod.).

b) sekundární metody

Sekundární metody se uplatňují tam, kde nelze použít některou z primárních metod.

Patří mezi tyto metody zejména:

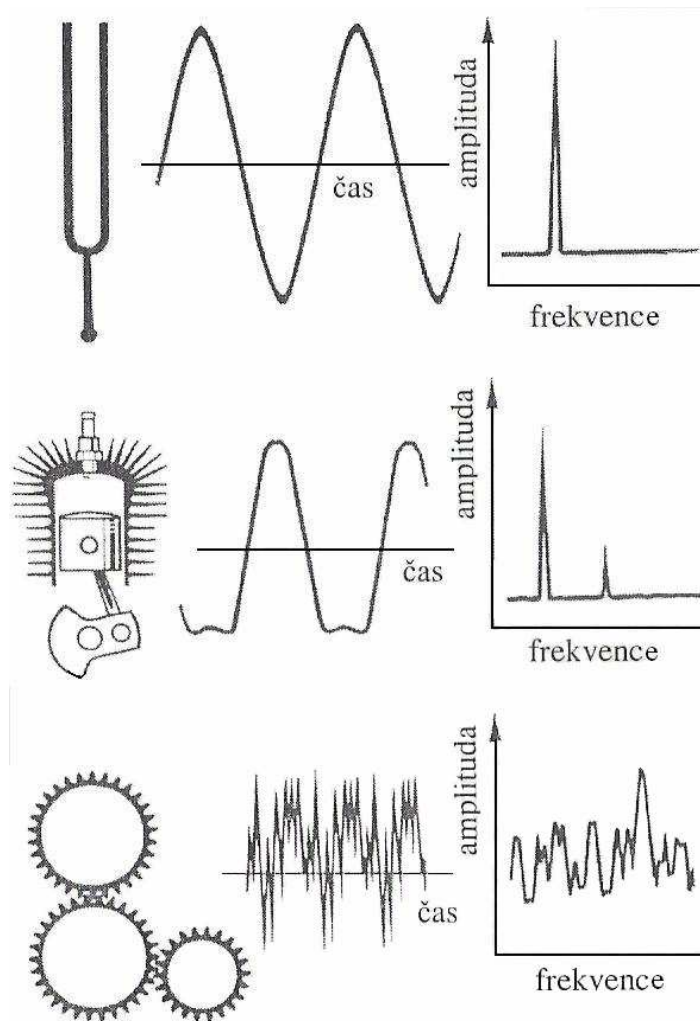
- vibrační a hlukové izolace zdrojů hluku (např. strojů) od chráněného prostoru např. vhodnou karotáží, kryty a ložením zdroje hluku. Cílem těchto metod je zamezit šíření mechanické a akustické energie do okolního prostoru nebo na sousední stroje, přístroje, konstrukce apod.
- vhodné prostorové rozmístění hlučných strojů a zařízení v daném prostoru tak, aby výsledná hlučnost dosahovala minimální hodnoty
- správné projektování výrobních hal, tj. zabezpečit dostatečnou prostornost hal se stěnami s vysoce pohltivými materiály, jednotlivé zdroje hluku oddělit zvukoizolačními stěnami apod.
- využíváním osobních ochranných prostředků (sluchové chrániče, přilby, vhodně pracovní oděvy, antivibrační rukavice, obuv atd.). Tyto pomůcky je nutno použít tam, kde nebylo možné upravit hluk výše uvedenými metodami, neboť tyto pomůcky zatěžují pracovníka a ztěžují jeho pracovní aktivitu.
- mezi sekundární metody patří i tzv. aktivní řízení (regulace) zvuku, kdy se využívá jevu interference zvukových vln primárního a sekundárního zdroje. [7]

1.2 Teorie kmitání

Kmitavým pohybem nebo krátce kmitáním (oscilací) nazýváme obecně takový pohyb hmotného bodu (nebo tělesa), při němž bod nepřekročí konečnou vzdálenost od jisté, tzv. rovnovážné polohy. V rovnovážné poloze jsou všechny síly působící na hmotný bod navzájem ve statické rovnováze. Je to tedy taková poloha, kterou by kmitající bod zaujal, kdyby byl v klidu. Je-li časový průběh kmitavého pohybu pravidelný, tj. opakuje-li se po stejném časovém intervalu T (periodě), nazýváme jej kmitavým periodickým pohybem. Převrácená hodnota periodicky se nazývá kmitočet nebo frekvence f , protože číselně udává, kolikrát se kmit nebo jiný periodicky děj opakuje za jednotku času. Jednotka frekvence $[f] = \text{s}^{-1}$ se nazývá hertz (značka Hz). [1]

Nejjednodušší periodický kmitavý pohyb je takový, při němž se hmotný bod pohybuje po přímce. Pak nazýváme kmitající bod lineárním oscilátorem. Příkladem může být pohyb tělesa zavěšeného na spirálové pružině, vychýlíme-li je z klidové (rovnovážné) polohy ve svislém směru o délku A a pak uvolníme. V tomto okamžiku se začne uplatňovat síla pružiny, která směřuje do rovnovážné polohy a zrychluje těleso až do okamžiku, kdy těleso dospěje do rovnovážné polohy. V ní sice přestane síla pružiny působit, avšak těleso má jistou rychlost, a tedy kinetickou energii, takže se pohybuje dále. Zastaví se, až se kinetická energie, kterou mělo v okamžiku průchodu rovnovážnou polohou, celá spotřebuje na práci napínání pružiny, jejíž síla působí proti smyslu pohybu, neboť směřuje opět do rovnovážné polohy. Jakmile kinetická energie vymizí, začne se celý děj opakovat. Kdyby nebylo odporu prostředí, v němž se pohyb děje (např. vzduchu), a nedokonalosti materiálu pružiny, kmitalo by takto těleso stále. Takovému kmitání říkáme netlumené. Ve skutečnosti se však amplituda kmitů postupně zmenšuje, až se těleso zastaví v rovnovážné poloze. Takové kmitání nazýváme tlumeným. Kmitání může být rovinné, jež lze považovat za výsledný kmitavý pohyb složený z dvou lineárních kmitání, nebo prostorové, složené z tří lineárních oscilací. [1]

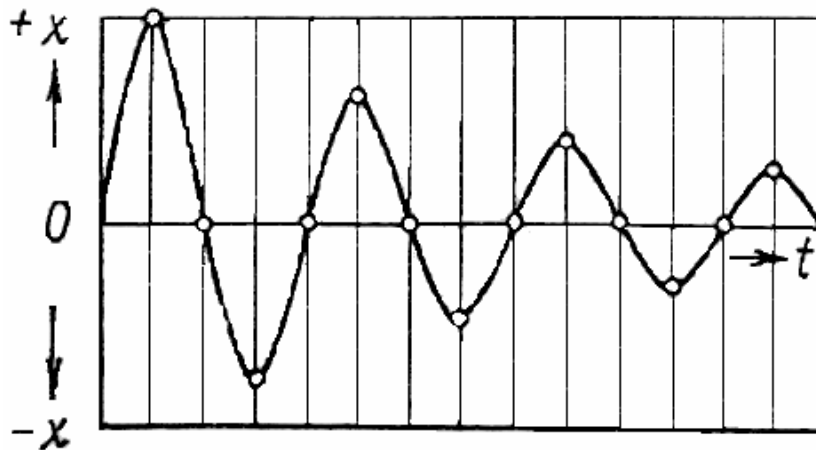
Příklad jednoduchého kmitavého pohybu s jedinou výraznou frekvencí je na obr. 3.a, s dvěma frekvencemi na obr. 3.b (jde o pohyb pístu v motoru). Ve většině případů se skládá signál z více frekvencí (obr. 3.c) a obvykle je obtížné určit na základě takovýchto signálů jejich zdroje. Proto takové signály rozkládáme na jednotlivé frekvence a jejich příslušné amplitudy. Takový rozklad se nazývá frekvenční spektrogram. Frekvenční spektrogramy umožňují identifikovat frekvence s výraznými amplitudami a následně i zdroje kmitání. [4]



Obr. 3. Příklady signálů kmitavého pohybu

1.2.1 Vlastní kmity

Vlastní kmity v technologické soustavě, případně v některých uzlech této soustavy, jsou vyvolané nárazem (např. při zapnutí spojky nebo při záběru nástroje apod.). Ve většině případů je vliv vlastních kmitů na proces obrábění minimální, protože se kmitání rychle utlumí vlivem odporu prostředí a můžeme tedy jeho vliv zanedbat. Perioda a frekvence vlastních kmitů nezávisí na počáteční výchylce ani na počáteční rychlosti kmitající částice. Zabývat se vlastními kmity při obrábění má význam jen v souvislosti s určováním charakteru kmitavých procesů. Vlastní kmity se udržují působením sil pružnosti. Časový průběh tlumených vlastních kmitů je na obr.4.



Obr. 4. Časový průběh vlastních kmitů

1.2.2 Vynucené kmity

Kmitavý pohyb může při působení pružných sil vzniknout i v důsledku působení periodické síly, jejíž perioda se ve všeobecnosti odlišuje od periody vlastních kmitů. Jsou to tzv. vynucené kmity, jejichž charakteristickým znakem je to, že se jejich frekvence shoduje s frekvencí budící síly. Vynucené kmity vždy doprovázejí vlastní kmity, protože v tělese, které se odklání od rovnovážné polohy, vznikají pružné síly, které se snaží dostat těleso do rovnovážné polohy. [8]

Vynucené kmitání můžeme rozdělit z hlediska původu budící síly na:

a) Kmitání, kdy budící síla nesouvisí s procesem řezání, sem patří tyto případy:

- kmitání vyvolané periodickou silou, u které jsou zdrojem periodické rázy vznikající v okolních strojích
- kmitání vyvolané nevyváženými rotujícími částmi stroje, obrobku nebo nástroje
- kmitání způsobené setrvačnými silami při přímočarém vratném pohybu vlastního mechanismu stroje
- kmitání vznikající v převodovém mechanismu stroje
- kmitání způsobené různou tuhostí některých částí systému stroj – nástroj

b) Kmitání, kdy budící síla souvisí s procesem řezání, sem patří tyto případy:

- kmitání způsobené nerovnoměrným přídatkem na obrábění
- kmitání vyvolané charakterem práce stroje [4]

Vynucené kmitání můžeme minimalizovat například:

- vhodnými základy obráběcích strojů, kterými zamezíme přenášení kmitání z jednoho stroje na druhý
- statickým a dynamickým vyvážením rotujících součástí
- vyvarováním se rezonanční oblasti změnou otáček v důsledku čeho se změní frekvence budící síly, a tím i poměr ω_0 / ω a pracuje se v jiné oblasti rezonanční křivky
- zmenšením průřezu třísky
- používáním tlumičů chvění

1.2.3 Samobuzené kmity

Samobuzené kmity nepotřebují na rozdíl od vynuceného kmitání ke svému vzniku a udržení žádnou vnější periodicky působící sílu. Vzniká a udržuje se působením síly vznikající v průběhu kmitání. Periodická síla se ztratí, když se ztratí kmitání. Frekvence samobuzeného kmitání není určena funkcí vnějšího zdroje, ale vlastnostmi kmitajícího systému. Je velmi blízká vlastní frekvenci některého řídicího členu systému. Samobuzené kmity při obrábění mohou být skroharmónické nebo relaxační. [8]

Z hlediska příčiny vzniku můžeme samobuzené kmitání rozdělit do dvou skupin:

a) Budící síla nesouvisící s procesem řezání:

Patří sem především relaxační kmitání, které se vyskytuje na obráběcích strojích při obrábění velmi malými posunovými rychlostmi a kmitání vznikající při použití kopírovacích systémů se zpětnou vazbou.

b) Budící síla související s řezným procesem:

Tento druh samobuzeného kmitání se vyskytuje při obrábění nejčastěji. Projevuje se výraznou vlnitostí obrobené plochy a je provázeno hlukem. Kmitání vyvolává samotná řezná síla. Takovéto kmity se nazývají skroharmnické samobuzené kmity. Frekvenci kmitů v zásadě neurčují řezné poměry, ale tuhost a hmota částí systému stroj – nástroj – obrobek. Zpravidla je blízká frekvenci vlastních kmitů soustavy a nebo některého jejího člena. Amplituda kmitů při konstantních podmínkách je stejná. Při samobuzeném kmitání existuje tzv. zpětná vazba mezi řeznou silou, která vyvolává kmitavý pohyb, a naopak. Její periodická změna je podmíněná existencí samobuzených kmitů. Kdyby nebyly samobuzené kmity, nebyly by ani periodické změny řezné síly. [8]

Samobuzené kmitání můžeme minimalizovat různými způsoby, jako například:

- změnou řezných podmínek jako je řezná rychlost, posuv nebo změnou hloubky řezu
- změnou geometrie nástroje, kam patří úhel čela, úhel hřbetu, poloměr nástroje atd.
- snížením drsnosti povrchu řezné části nástroje a použitím řezných kapalin se sníží tření mezi třískou a čelem nože, tím se zmenší řezná síla a její závislost na řezné rychlosti, a díky tomu se zmenšuje kmitání
- zvýšením tuhosti technologické soustavy, což je hlavním předpokladem pro zabránění vzniku chvění
- změnou hmotnosti kmitající soustavy, kdy se na obrobek nebo na suport zavěšují různě těžká závaží
- použitím tlumičů kmitání

1.3 Tlumení vlivem vnitřních ztrát materiálu

Každý druh materiálu vykazuje větší nebo menší vnitřní tlumení. Nevýhodou většiny klasických konstrukčních materiálů je jejich malý vnitřní útlum. Proto by mělo být snahou všech konstruktérů aplikovat ty konstrukční materiály, které vykazují velké vnitřní tlumení. Tyto požadavky splňují především plastické materiály. Z materiálů tradičních je to šedá litina. Proto jsou z ní odlévány základy přesných obráběcích strojů, které vyžadují potlačení chvění na minimum. [9]

1.3.1 Činitel vnitřního tlumení

Při dynamickém namáhání konstrukčních prvků je nutno, vzhledem k existenci vnitřního tlumení v materiálu, zavést komplexní modul pružnosti. Znamená to, že Hookův zákon popisující závislost napětí na poměrném prodloužení, se rozšíří na tvar

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

Kde je	E [N/m ²]	dynamický modul pružnosti,
	σ [N/m ²]	napětí,
	η [-]	činitel vnitřního tlumení,
	ε [-]	poměrné prodloužení.

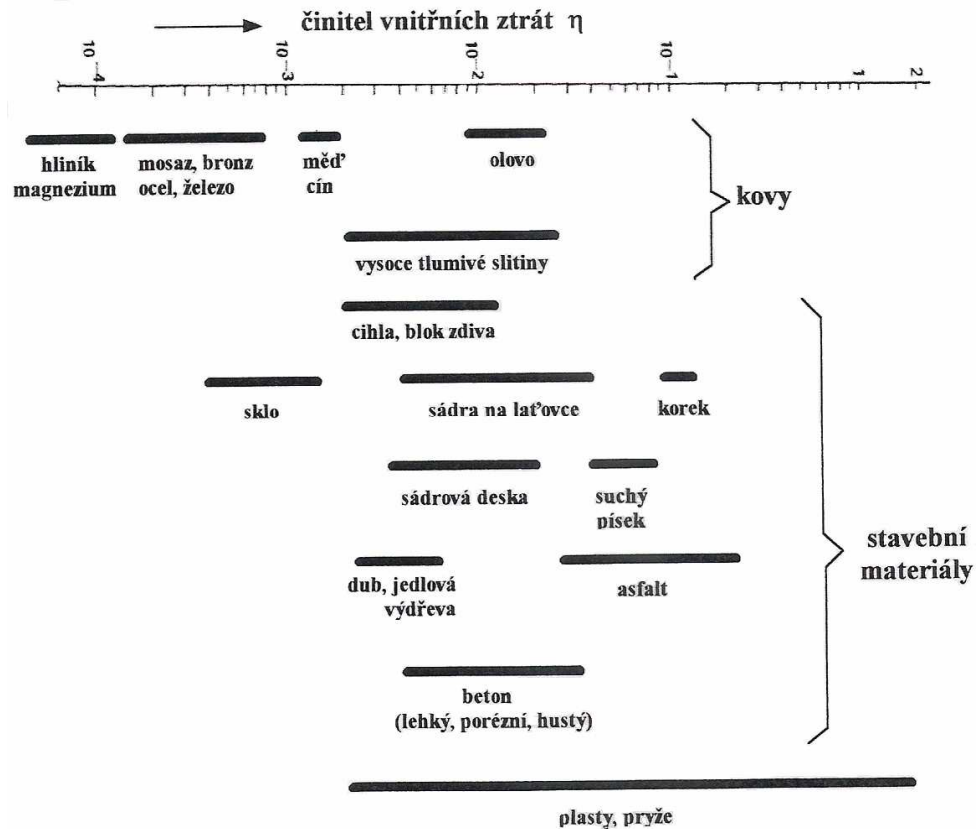
Hodnotu $E \cdot (1 + j \cdot \eta)$ můžeme nazvat komplexním modulem pružnosti. Činitel vnitřního tlumení je možno definovat vztahem

$$\eta = \frac{I_q}{I} = \frac{E_{Im}}{E_{Re}} \quad (2)$$

Kde je	I_q [W/m ²]	část intenzity chvění přeměněné na teplo
	I [W/m ²]	celková intenzita chvění
	E_{Im} [W/m ²]	imaginární část modulu pružnosti
	E_{Re} [W/m ²]	reálná část modulu pružnosti

Činitel vnitřního útlumu je rovněž možno definovat jako tangentu fázového úhlu mezi deformací a napětím. Ten se zvětšuje tak, jak rostou vnitřní ztráty. [9]

Přehled činitelů vnitřních ztrát pro různé materiály je uveden na obrázku 5.



Obr. 5. Přehled činitelů vnitřních ztrát η pro kovy a stavební materiály

1.3.2 Rozdělení měřících metod

Dělení způsobu měření modulu pružnosti a vnitřního tlumení dle frekvenčního kritéria:

Infrazvukové metody (10^{-4} až 10^2 Hz) - metody statické a dynamické hysterézní smyčky se používají při studiu charakteristik vnitřního tlumení a modulu pružnosti materiálu při napětích blízkých mezi únavy a nebo nad ní. Metoda spočívá v současném měření velikosti napětí σ a vznikající deformace ε v procesu postupného zatěžování a odlehčování vzorku.

Zvukové (10^2 až 10^4 Hz) a ultrazvukové metody (10^5 až 10^8 Hz) - princip této metody je takový, že na vzorek působí periodická síla vznikající v důsledku buzení. Toto buzení vyvolá kmitání vzorku. Způsoby buzení vzorku mohou být různé (elektrostatické, elektrodynamické, elektromagnetické)

Základní rozdělení měřících zařízení: s upevněným vzorkem v uzlových bodech dotykovým způsobem a upevnění vzorku v uzlu kmitů bezkontaktním způsobem.

Hyperzvukové metody (až 10^{11} Hz) - při této metodě se generují akustické vlny s velmi vysokou frekvencí (rozmezí kolem 109 Hz) a měří se absorpce těchto vln ve zkoumaném materiálu. Tato metoda je velmi technicky náročná.

Dělení metod měření modulu pružnosti a vnitřního tlumení dle úrovně automatizace:

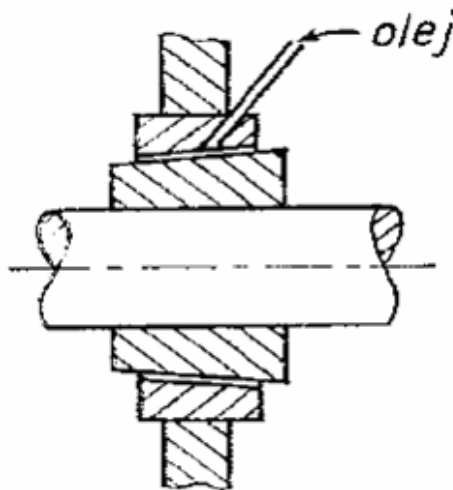
Podle úrovně automatizace lze metody měření rozdělit na neautomatizované, poloautomatizované, a automatizované. V případě automatizovaných metod jsou procesy snímání a buzení kmitů včetně registrace údajů v analogové nebo digitální podobě zcela automatizovány. Plně automatizované systémy jsou řízené počítačem včetně zpracování údajů a vyhodnocování výsledků. [10]

1.3.3 Tlumiče kmitání

Vyšší meze stability kmitání lze dosáhnout použitím tlumičů kmitání. Tlumiče rozdělujeme na pasivní a aktivní.

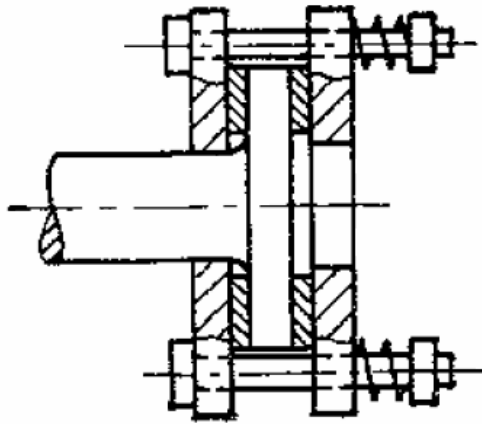
Pasivní tlumiče

Olejevý tlumič, který je zobrazen na obrázku 6, je nasazen na hřídeli jako pouzdro.



Obr. 6. Tlumící pouzdro s olejem

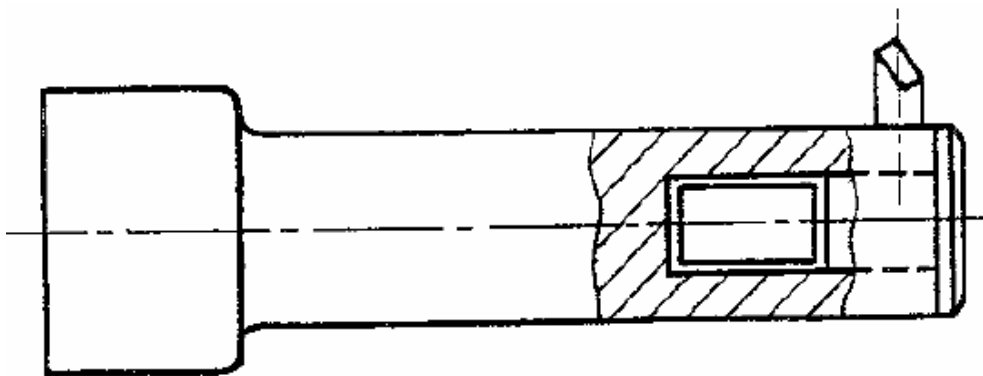
Tlumič Lanchester (obr. 7) působí svojí hmotností prostřednictvím suchého nebo viskózního tření na hřídel nebo na vyvrtávací tyč.



Obr. 7. Tlumič Lanchester

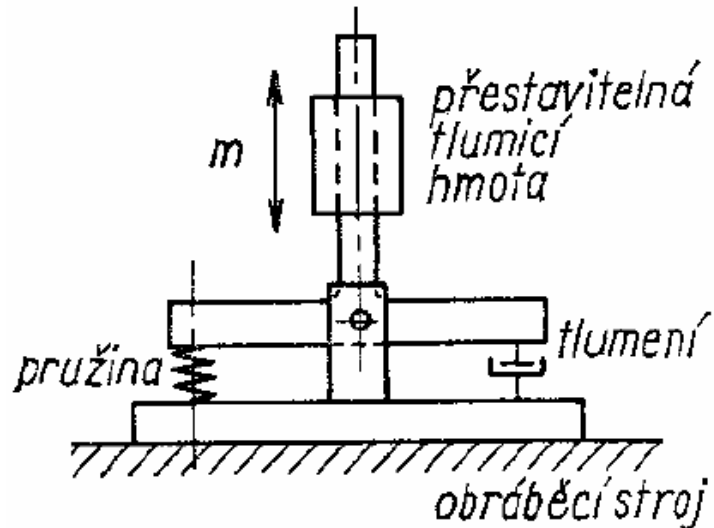
U frézek, vyvrtávaček a odvalovacích frézek se osvědčují tlumiče s pomocnou hmotou, která je tlumenou pružinou připojena k obráběcímu stroji.

Na obrázku 8 je vyvrtávací tyč s tlumením (Hahn), které je vyvolané dutým válečkem plněným olovem nebo rtutí, vsazeným do konce tyče. Váleček má v dutině vyvrtávací tyče radiální vůli 0,02 až 0,10 mm a axiální vůli 0,1 až 0,2 mm.



Obr. 8. Hahnův tlumič vyvrtávací tyče, aplikace Lanchesterova tlumiče

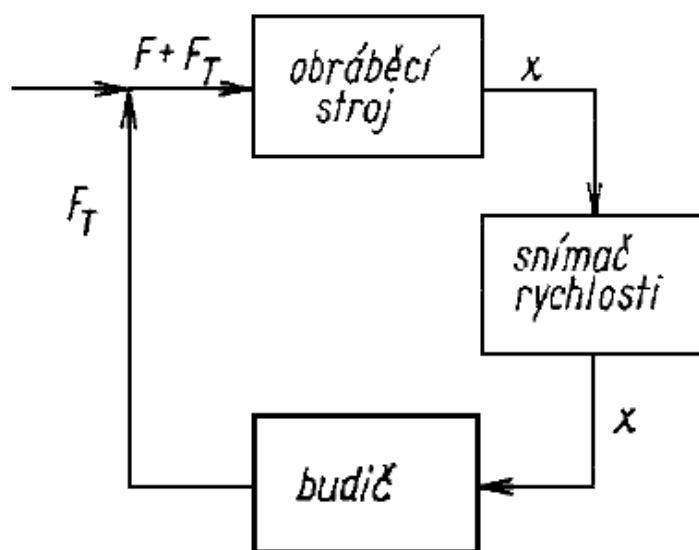
Nevýhodou dosud uvedených tlumičů kmitání je jejich omezené použití pouze pro určitou frekvenci. Tuto nevýhodu lze z části odstranit u tlumičů, které mají pomocnou hmotu stavitelně uspořádanou, kterou můžeme vidět na obrázku 9.



Obr. 9. Tlumič s přestavitelnou tlumící hmotou

Aktivní tlumiče

Další zlepšení přinášejí aktivní tlumiče, které postihují širší oblast kmitání. Na obrázku 10 je blokové schéma aktivního tlumiče, u kterého je použit snímač rychlosti kmitání pro ladění budiče tlumící síly. Tento tlumící systém se sám reguluje proměnlivé frekvence samobuzeného kmitání. [5]



Obr. 10. Aktivní tlumič s automatickou regulací

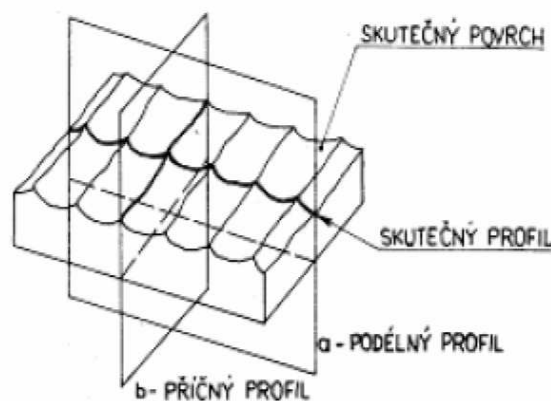
2 VLIV KMITÁNÍ A TLUMENÍ NA JAKOST VÝROBKŮ

Kmitání má neoddiskutovatelný vliv na jakost výrobku, zejména pak na drsnost a vlnitost povrchu. Kmitání soustavy se přenáší přes nástroj na obráběný povrch součásti, a ten je jím silně ovlivněn. Čím je kmitání soustavy větší, tím je drsnost i vlnitost větší, to má za následek nedodržení předepsaných geometrických vlastností povrchu. Proto se snažíme kmitání soustavy co nejvíce eliminovat, abychom co nejvíce zlepšili jakost obroběných ploch.

S rozvojem výrobní techniky a technologických zařízení je kladen stále větší důraz nejen na přesnost, účinnost, životnost a spolehlivost součástí, ale také na kvalitu povrchu, především na drsnost. Je to zejména v sériové a hromadné výrobě, kde je vyžadována naprostá vyměnitelnost součástí, které musí mít stejnou jakost povrchu, proto se velmi často volí nejdokonalější dokončovací operace, aby i výsledný povrch byl co nejvíce dokonalý, i když technologie, kterou bychom dosáhli dokonale hladké a rovinné plochy zatím neexistuje. Technicky to není možné, protože bychom museli úplně odstranit právě kmitání, což je prakticky nemožné. Kmitání můžeme pouze tlumit a tím pádem se k dokonalému povrchu pouze blížit.

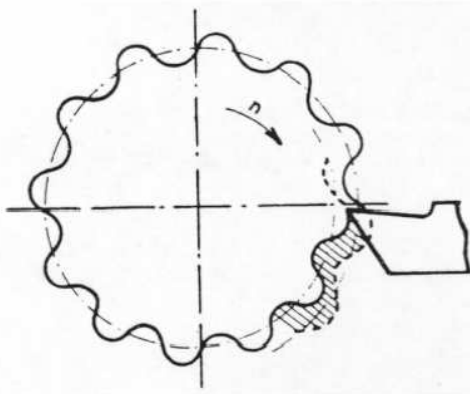
2.1 Drsnost a vlnitost

Drsností povrchu nazýváme souhrn jemných nerovností (výstupků a prohlubní), které vznikají při každém zpracování materiálu. Na obroběném povrchu to jsou nejčastěji poměrně pravidelně a směrově uspořádané stopy (rýhy) zanechávané řezným nástrojem. U některých způsobů obrábění, např. soustružení, frézování, hoblování není drsnost povrchu stejná ve všech směrech. Proto rozlišujeme drsnost příčnou, tj. drsnost ve směru kolmém na řezný pohyb (Obr. 11.) a drsnost podélnou, tj. drsnost ve směru řezného pohybu. [11]



Obr. 11. Příčná a podélná drsnost povrchu

Vlnitost povrchu obráběných ploch (obr. 12.) je způsobena příliš velkým nebo proměnným tlakem řezného nástroje, nedostatečnou tuhostí nosných částí obráběcího stroje, chvěním soustavy stroj – nástroj – obrobek a vnitřním pnutím a deformacemi obrobku. Mnohem snáze se dosáhne u obrobků povrchu o vysokém stupni hladkosti než stejnoměrnosti (vlnitosti). [11]



Obr. 12. Vlnitost

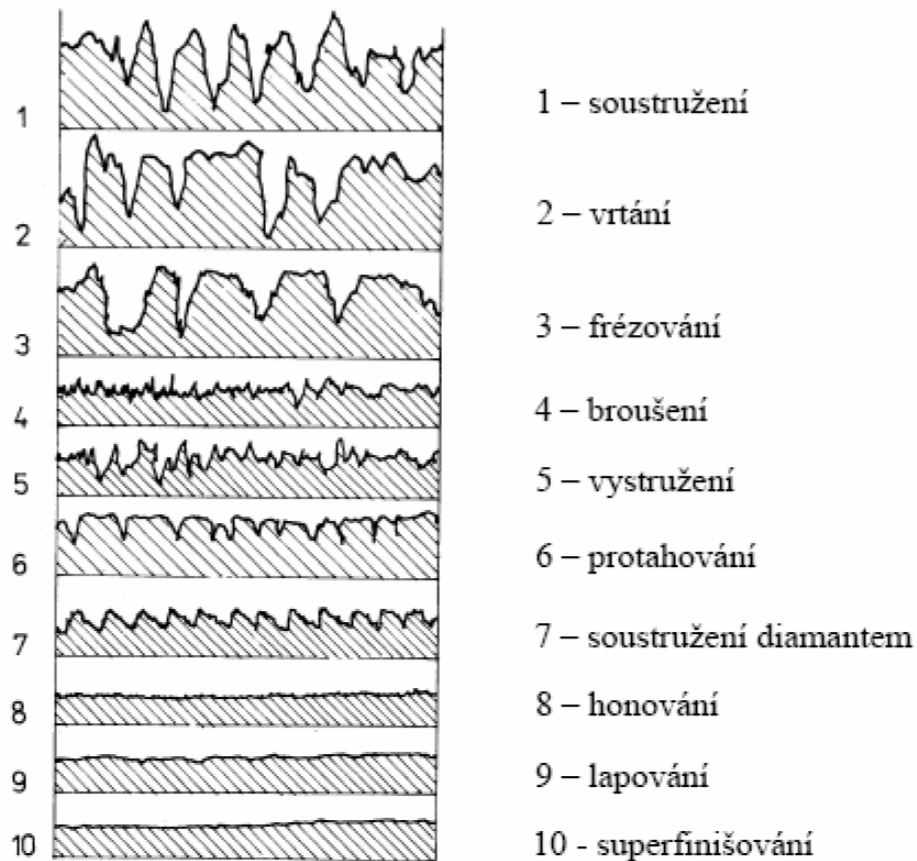
Stupeň drsnosti plochy se určuje buď porovnáním, nebo změřením profilu, který vznikne vhodně vedeným rovinným řezem přístroji založenými na optických nebo elektrických principech. Při určování stupně drsnosti porovnáváním, srovnáme obrobenou plochu s plochou, jejíž stupeň drsnosti známe nebo se speciálními vzorky, uspořádanými do vzorkovnice. Porovnává se buď přímo okem a hmatem nebo se použije mikroskopu. Nejoptimálnější výsledky dává hodnocení nehtem. [11]

Dopady snižování drsnosti:

- zvýšení nosného podílu obrobené plochy, což má za následek zvýšení životnosti obrobené plochy
- snížení koeficientu tření a tím i intenzity opotřebení ploch
- zlepšení pevnostních charakteristik, zejména při dynamickém zatěžování
- zvýšení nákladů na obrábění

Primární vliv na konečnou drsnost povrchu má především použitá technologie obrábění jak je vidět na obrázku 13. Teoreticky je možné použít postupně několik stupňů dokončovacíh operací od broušení až po superfinišování a dosáhnout tak velice vysoké přesnosti, avšak s počtem operací úměrně rostou náklady na obrábění a musíme tedy zvážit, zda je

tak vysoká přesnost potřeba. V praxi se proto volba drsnosti povrchu musí provádět z hlediska budoucích provozních požadavků na součást a z hlediska ekonomicky přijatelných nákladů.



Obr. 13. Drsnost povrchu základních způsobů obrábění

Informativní hodnoty drsnosti R_a dosažitelné běžnými způsoby obrábění jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1. Tabulka drsností

Způsob výroby	R_a	Hodnoty v mikrometrech	
Ruční pilování jemné	1,6	Hoblování	3,2 až 1,6
Soustružení	1,6 až 0,2	Protahování jemné	0,8
Vrtání, vyvrtávání	1,6 až 0,4	Vystružování	0,8
Broušení do kulata	0,4 až 0,025	Frézování	3,2 až 0,8
Broušení vnitřní	0,4 až 0,025	Lapování	0,1 až 0,05
Broušení na plocho	0,4	Honování a superfiniš	0,1 až 0,025

2.2 Hodnocení drsnosti povrchu

Tvar mikrogeometrických nerovností obrobených povrchů je velmi rozmanitý. Aby bylo možno kvantitativně hodnotit drsnost povrchů, byla přijata norma ISO 4287: Geometrická specifikace povrchu – Charakter povrchu.

Citovaná norma definuje skutečný povrch jako povrch, který ohraničuje součástku a odděluje od okolního prostředí. Naproti tomu jmenovitý povrch je ideálně hladký, kterého jmenovitý tvar je určený výkresem nebo jinou technickou dokumentací.

Veličiny drsností se vyhodnocují od základního povrchu, kterým je v prostoru patřičně posunutý jmenovitý povrch a to v řezu kolmém na základní. Příčný profil je v řezu kolmém na měř stop nerovnosti povrchu a podélný profil je definován řezem v podélném směru stop nerovností povrchu.

Vyhodnocovací délka l je délka ve směru osy X , na které se vyhodnocuje profil drsnosti. Může obsahovat jednu nebo několik základních délek (obr. 14).

Základní délka l_r je délka ve směru osy, která se používá na identifikování nepravidelnosti, které charakterizují profil, metodou nejmenších čtverců z profilu.

Veličiny drsnosti povrchu se stanovují a vyhodnocují k základní čáře.

Střední aritmetická odchylka profilu R_a je nejčastějším hodnotícím kritériem drsnosti povrchu. Je to střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky. Je vyjádřena vztahem:

$$R_a = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z(x)| dx \quad (3)$$

Střední kvadratická odchylka profilu R_q v rozsahu základní délky vyjadřuje:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x)^2 dx} \quad (4)$$

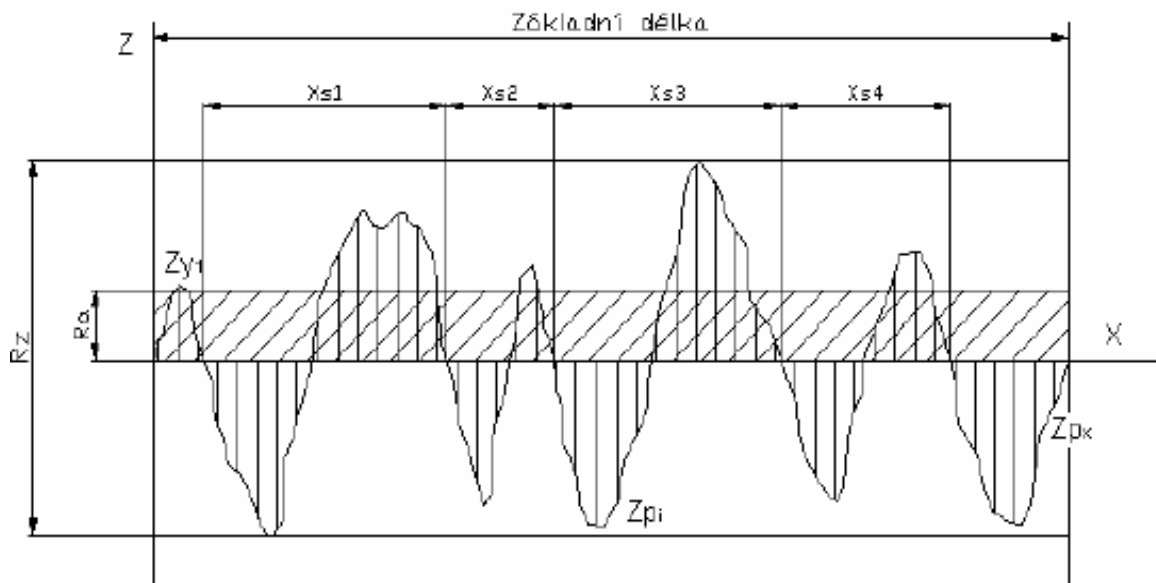
Střední délka prvku profilu R_{sm} v rozsahu základní délky je definovaná:

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (5)$$

Nejvyšší výška nerovnosti profilu R_z je výšková charakteristika drsnosti povrchu, určená vzdáleností mezi čarou profilu a čarou prohlubní profilu v rozsahu základní délky. Matematicky vyjádřena:

$$R_z = Z_{y_{p_{max}}} + Z_{p_{y_{max}}} \quad (6)$$

Tato charakteristika udává jen nejvyšší hloubku profilu kontrolované plochy v rozsahu základní délky. Jako míra drsnosti povrchu má pro funkční povrchy poměrně malý význam a používá se jen jako doplňkové kritérium drsnosti povrchu.



Obr. 14. Význam základních kritérií drsnosti povrchu

Mezi hodnotami R_z a R_a platí vztah:

$$\frac{R_z}{R_a} = 2,5 \div 7 \quad (7)$$

Pro hrubované plochy je $2,5 \div 3$, pro dokončovací plochy asi 4 a pro velmi jemné plochy, obrobené dokončovacími metodami obrábění $5 \div 7$.

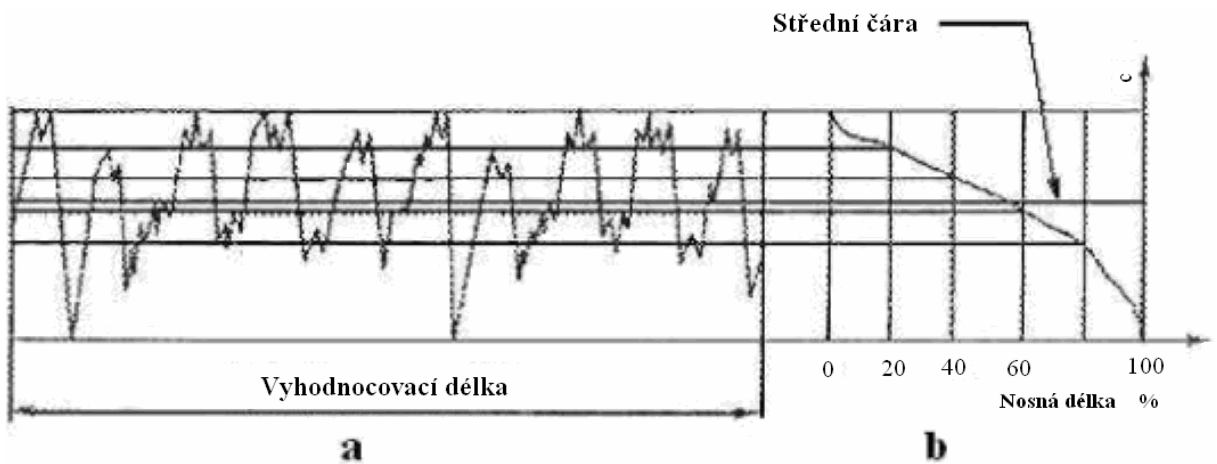
Z rozebraných charakteristik drsnosti povrchu vyplývá, že základní představu o drsnosti povrchu získáme z profilové křivky (Obr.15 a). Z ní jsou odvozeny všechny kvantitativní ukazatele drsnosti.

Z hlediska únosnosti, tření, opotřebení a celkové funkčnosti povrchu v tribosystému má důležitou úlohu nosná křivka drsnosti povrchu (Obr.15b). Tato zase ukazuje jak narůstá

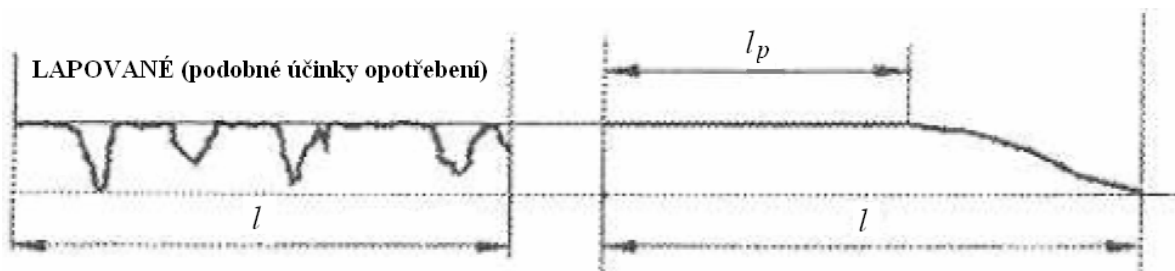
nosná délka povrchu v přechodu profilem drsnosti směrem dovnitř materiálu a v provozu též jak se zvětšuje nosná délka povrchu s postupujícím opotřebením. [12]

Z nosné křivky je možno odvodit tzv. nosný podíl drsnosti povrchu (obr.16), který je daný poměrem nosné délky profilu v konkrétní jeho hloubce, k základní délce l podle vztahu:

$$Rmr_{(p)} = \frac{l_p}{l} [\%] \quad (8)$$



Obr. 15. Profilová a nosná křivka drsnosti povrchu



Obr. 16. Nosný podíl drsnosti povrchu

3 VIBRAČNÍ ZKOUŠENÍ

Požadavky, kladené na zvyšování pracovních rychlostí a snižování hmotnosti moderních strojních a jiných zařízení, jsou příčinou toho, že nadále nepostačuje jen znalost statických vlastností, namáhání a deformací používaných konstrukčních materiálů a prvků. Nutnost zjišťování a vyšetřování dynamických vlastností materiálů, prvků a konstrukcí proto přivedla k širokému praktickému uplatnění vibračního zkoušení. [14]

3.1 Účel vibračního zkoušení

Vibrační zkoušky se spolu s klimatickými zkouškami provádějí v rámci zkoušení odolnosti proti vlivům prostředí a tvoří nedílnou součást kontroly kvality a spolehlivosti různých výrobků. Zkoušené objekty se při takových zkouškách vystavují působení mechanického chvění, jehož parametry jsou předepsány různými normami, předpisy a doporučeními.

Při vyšetřování dynamických vlastností materiálů a konstrukcí se zjišťují odezvy na působící časově proměnné síly. Na základě výsledků odpovídajících vibračních zkoušek je možno například hodnotit materiály z hlediska přenosu nebo tlumení chvění a popisovat módy vlastních kmitů konstrukcí v oblasti jejich rezonancí.

Nejvhodnějším a nejrozšířenějším zdrojem mechanických kmitů a chvění je elektrodynamický budič, často nazývaný vibrátorem. Elektrodynamický budič je elektromechanický měnič, převádějící vstupní elektrický signál na kmitavý pohyb mechanického výstupu. Spolu s budičem se zpravidla používá vhodné ovládací zařízení, zajišťující dosažení konstantní amplitudy odpovídající mechanické veličiny, například síly nebo zrychlení chvění. [14]

3.2 Princip a konstrukce elektrodynamického budiče

Elektrodynamický budič mechanických kmitů je ve smyslu základního principu shodný s běžným reproduktorem. Mechanický pohyb pohyblivého ústrojí elektrodynamického budiče je vyvoláván průchodem elektrického proudu jeho cívkou, umístěnou v magnetickém poli. Síla, vyvolávající pohyb zmíněného ústrojí, je úměrná proudu, procházejícímu cívkou, a indukci magnetického pole. Díky proudové závislosti síly je možno elektrickou cestou přesně ovládat mechanický výstup elektrodynamického budiče kmitů a chvění. [14]

Zdrojem magnetického pole malých elektrodynamických budičů je permanentní magnet, zatím co magnetické ústrojí větších a velkých budičů zpravidla obsahuje jeden nebo několik elektromagnetů. Největší přípustný proud cívkou a celkové mechanické zatížení (hmotnost pohyblivého ústrojí a objektu) určují maximální dosažitelné zrychlení generované budičem mechanických kmitů. V oblasti nízkých kmitočtů je však maximální zrychlení často navíc omezeno největší dovolenou výchylkou pohyblivého ústrojí budiče. Vlastní rezonance pohyblivého ústrojí zpravidla omezují shora pracovní kmitočtový rozsah elektrodynamického budiče. [14]

3.3 Výkonový zesilovač

Kmitočtová charakteristika elektrodynamického budiče, jehož cívkou protéká proud s konstantní amplitudou, má tři výrazně a vzájemně odlišné oblasti. Překrývající se nízké a střední kmitočty oblastí odpovídají charakteristice kombinace hmotnosti a poddajnosti pohyblivé soustavy budiče a jejího pružného uložení. Třetí oblast se nachází v pásmu vysokých kmitočtů a obsahuje osovou rezonanci pohyblivého ústrojí budiče. Tyto rezonance určují praktickou horní mez pracovního kmitočtového rozsahu elektrodynamického budiče.

Obdobně tři vzájemně odlišné oblasti obsahuje i kmitočtová charakteristika elektrodynamického budiče, jehož cívka je připojena ke zdroji napětí s konstantní amplitudou. Rezonance v pásmu nízkých kmitočtů je však podstatně více zatlumena. Proto se ve většině systémů s elektrodynamickými budiči dává přednost výkonovému zesilovači s malým výstupním odporem, pracujícímu jako zdroj napětí. V určitých případech je však výhodnější užití výkonového zesilovače s velkým výstupním odporem, t.j. zdroje proudu. Moderní výkonové zesilovače, určené k použití s elektrodynamickými budiči, zpravidla umožňují volbu malého nebo velkého výstupního odporu. [14]

3.4 Ovládací zařízení

Při praktickém použití elektrodynamického budiče se většinou požaduje konstantní charakteristika kmitů jeho mechanického výstupu na všech kmitočtech určitém pracovním rozsahu. Kmitočtová charakteristika budiče však není rovná, ale obsahuje rezonanční vrcholy. Rezonance zkoušeného objektu vedou zpravidla k dalšímu zhoršení situace. K dosažení konstantní amplitudy mechanických kmitů v širokém kmitočtovém rozsahu je proto nutné zařízení, jehož zesílení se mění v závislosti na kmitočtu. Odpovídající regulaci zajišťuje

ovládací zařízení, zpracovávající zpětnovazební signál od jednoho nebo několika snímačů chvění, mechanicky spojených se zkoušeným objektem. Hlavní části ovládacího zařízení proto tvoří zdroj budícího signálu (generátor), měřič chvění a automatický regulátor amplitudy signálu (kompresor). [14]

3.5 Piezoelektrický snímač zrychlení

Elektromechanický měnič, v současné době více či méně běžně užívaný k měření chvění, je piezoelektrický snímač zrychlení (akcelerometr). Piezoelektrický snímač zrychlení předčí v mnoha směrech jiné typy snímačů chvění. K jeho přednostem patří široký pracovní kmitočtový a dynamický rozsah, definovaná linearita v těchto rozsazích, pevná a robustní konstrukce, vysoká spolehlivost a dlouhodobá stabilita.

Velkou výhodou piezoelektrických snímačů zrychlení je také to, že patří k aktivním měničům, generujícím elektrický signál a tudíž nepotřebují vnější napájecí zdroj. Tyto snímače nemají pohyblivé části, citlivé k opotřebení. Konečně, elektrický výstupní signál těchto snímačů, úměrný zrychlení mechanického chvění, je možno integrovat odpovídajícími elektronickými zařízeními a získávat tak elektrické signály, úměrné rychlosti a výchylce chvění.

Základním prvkem piezoelektrického snímače zrychlení je výřez z piezoelektrického materiálu, zpravidla z uměle polarizované piezoelektrické keramické hmoty, vykazující výrazný piezoelektrický jev. Podstatou tohoto jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu z piezokeramiky při jeho mechanickém namáhání v tahu, tlaku či střihu. [13]

3.5.1 Konstrukce a typy snímačů zrychlení

Konstrukce piezoelektrického akcelerometru je uvedena na obrázku 17. Piezoelektrická destička je vsazená do snímače tak, že když snímač kmitá, hmota nad piezoelektrickou destičkou na ni silově působí. Toto silové působení je přímo úměrné zrychlení, jelikož platí Newtonův zákon, podle něž je síla rovna součinu hmoty a zrychlení.

V konstrukci piezoelektrických snímačů zrychlení se používají konfigurace:

Se stlačením – přídavná hmota působí na piezoelektrický člen stlačujícími silami

Se střihem – přídavná hmota vyvolává střihové namáhání piezoelektrického členu



Obr. 17. Konstrukce piezoelektrického akcelerometru

Charakteristiky a parametry různých typů snímačů zrychlení jsou v menší či větší míře přizpůsobeny oblastem použití. Snímače zrychlení s malými rozměry, například, jsou zpravidla určeny k měření chvění s velkými amplitudami a vysokými kmitočty a nebo k měření chvění lehkých, křehkých nebo poddajných předmětů, konstrukcí, panelů atd. Váha těchto malých snímačů se zpravidla pohybuje v mezích 0,5 až 2 g.

Jiné speciální snímače zrychlení mohou být určeny k současnému měření zrychlení ve třech vzájemně kolmých směrech, práci při vysokých teplotách, měření velmi malých amplitud chvění či naopak silných mechanických rázů, cejchování jiných snímačů chvění a trvalému monitorování chvění a jiných zařízení v průmyslu. [13]

3.5.2 Určení polohy a upevnění snímače zrychlení

Snímač zrychlení se upevňuje tak, aby směr, ve kterém se provádí měření, odpovídal směru osy maximální citlivosti snímače. Piezoelektrické snímače jsou také citlivé ke kmitům v příčných směrech, avšak tuto tzv. příčnou citlivost je možno ve většině případů zanedbat, protože její normální hodnoty nepřesahují 1 % citlivosti ve směru hlavní osy. Odezvy a reakce mechanických soustav a systémů na vynucené mechanické chvění jsou velmi složité, takže amplitudy i kmitočtová spektra chvění, měřeného na několika nepříliš od sebe vzdálených místech jednoho a téhož dílu či součásti se mohou vzájemně lišit. Tyto rozdíly mohou být zvláště výrazné v oblasti vysokých kmitočtů.

Způsob upevnění snímače zrychlení k měřenému objektu je jedním z nejzávažnějších činitelů, ovlivňujících celkovou přesnost praktických měření chvění. Nedokonalé upevnění snižuje rezonanční kmitočet upevněného snímače zrychlení a tudíž výrazně zmenšuje jeho

použitelný pracovní kmitočtový rozsah. Nejlepších výsledků se dosahuje při upevnění pomocí speciálních šroubů na rovném a hladkém povrchu. Celkovou tuhost je ještě možno zvýšit tenkou vrstvou mazacího tuku, nanesenou na stykové povrchy ještě před dotažením šroubového spojení. Závitový otvor v měřeném objektu musí mít dostatečnou hloubku, vylučující možnost dotažení montážního šroubu do dna závitového otvoru v základně snímače. Dosahovaný rezonanční kmitočet (31 kHz) leží velmi blízko ideálního rezonančního kmitočtu (32 kHz) snímače při cejchování, t.j. snímače, upevněného na absolutně rovném a hladkém povrchu.

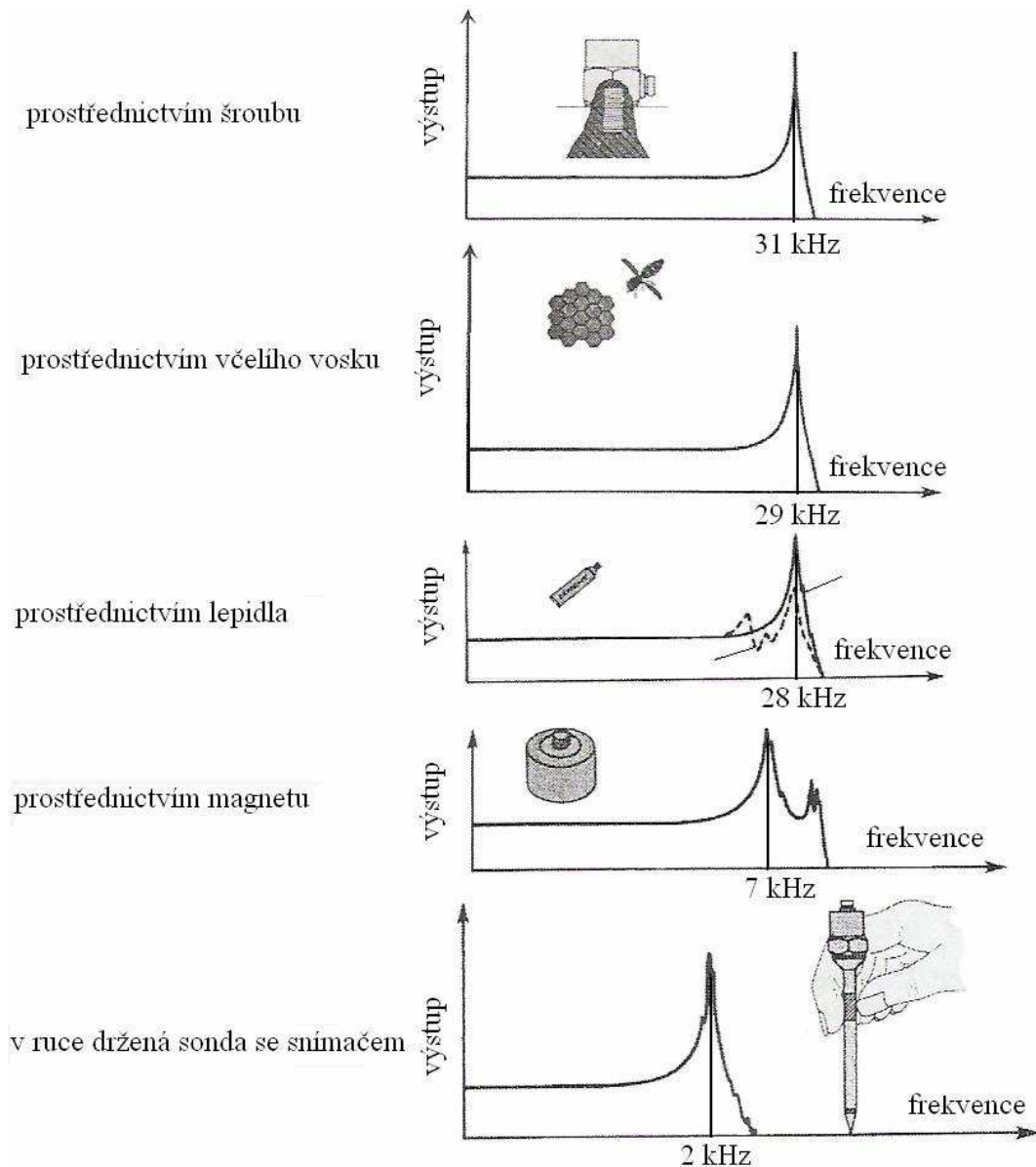
K upevnění snímačů zrychlení se v praxi často používá tenká vrstva včelího vosku. Z průběhu kmitočtové charakteristiky upevněného snímače je patrné, že použití včelího vosku jen nepatrně snižuje jeho rezonanční kmitočet (29 kHz). Protože však včelí vosk měkne při vyšších teplotách, jeho použití je omezeno na oblast do 40 °C. Při předpokladu čistých povrchů snímače i objektu je upevnění pomocí vrstvy včelího vosku spolehlivé až do zrychlení kolem 100 m/s².

Tam, kde se předpokládá opakované měření v totožných bodech a kde jsou z nějakého důvodu nežádoucí otvory se závitem pro upevňovací šrouby, je nejlepším řešením použití speciálních šroubů, připevňovaných k povrchu měřeného objektu vhodným tvrdým pojivovým materiálem (tmelem, lepidlem atd.). Jako pojivový materiál se doporučují epoxidové pryskyřice a kyanoakryláty. Použití měkkých pojivových látek zpravidla podstatně zužuje užitečný kmitočtový rozsah snímačů zrychlení.

Speciální izolované šrouby a slídové podložky se používají tam, kde je nutná elektrická izolace snímačů zrychlení. Upevnění pomocí izolovaného šroubu a tenké podložky, odštípnuté ze silnějšího kousku slídy, je spolehlivé a snižuje jen málo rezonanční kmitočet upevněného snímače (přibl. 28 kHz).

Velmi jednoduchou pomůckou k upevnění snímače zrychlení na hladkém povrchu objektů z magnetických materiálů je malý permanentní magnet, zajišťující současnou elektrickou izolaci snímače. Nevýhodou tohoto způsobu upevnění je značné snížení rezonančního kmitočtu upevněného snímače (přibl. 7 kHz) a jeho nevhodnost k trvalému použití při měření v kmitočtovém pásmu od 2 kHz výše. [13]

Srovnání frekvenčního ohraničení různých způsobů přichycení snímače je na obrázku 18.



Obr. 18. Frekvenční ohraničení pro jednotlivé způsoby přichycení snímače

3.6 Základní systém k buzení mechanických kmitů

Základní systém k buzení mechanických kmitů a chvění se skládá z budiče, výkonového zesilovače, ovládacího zařízení s generátorem, snímače zrychlení nebo síly a přizpůsobovacího zesilovače.

Výběr vhodného budiče je především ovlivňován požadovanou maximální hodnotou budící síly nebo zrychlení mechanických kmitů. V úvahu je však také nutno vzít příčné kmity, zkreslení budícího signálu a dovolené příčné namáhání budiče.

Budič je většinou pružně uložen v odpovídající nosné konstrukci tvořící jeho základnu. Soustava pružného uložení zpravidla zajišťuje dokonalou izolaci proti chvění, šířícímu se ve stavebních konstrukcích, takže základnu budiče je možno bezprostředně připevnit k tuhému stavebnímu prvku (podlaze, stěně a pod.). Při použití středních a velkých výkonových budičů je však většinou třeba omezit přenos chvění do stavebních konstrukcí pomocí vhodného uložení, např. uložení s použitím pružných členů nebo plovoucího blokového základu. [14]

3.6.1 Buzení sinusovým signálem

Sinusové signály s pevnými kmitočty nebo s plynule proměnným kmitočtem jsou v oboru vibračního zkoušení nejrozšířenějšími budícími signály. Při buzení sinusovým signálem s plynule proměnným kmitočtem se v odpovídajícím systému používá zpětnovazební smyčka, jejíž součástí tvoří samočinný regulátor (kompresor) ovládacího zařízení. Kompresor musí být dostatečně rychlý, t.j. musí být schopen reagovat na málo zatlumené rezonance při rychlém rozmítání kmitočtu signálu.

Sinusový signál je dokonale charakterizován kmitočtem a amplitudou. Amplituda se při vibračních zkouškách zpravidla vyjadřuje pomocí vrcholových hodnot (u výchylky se většinou udává rozkmit). Kmitočet se většinou nachází v rozsahu od 2 do 10 000 Hz. [14]

3.6.2 Buzení náhodným signálem

Náhodné signály, používané při vibračním zkoušení, mají většinou spojité kmitočtové spektrum a amplitudy s normálním (Gaussovým) rozložením. V určitém rozsahu jsou tedy teoreticky zastoupeny všechny kmitočty i amplitudy. Používané generátory a zesilovače však vnášejí určitá praktická omezení. Při vibračních zkouškách se obecně požadují náhodné signály, jejichž vrcholové hodnoty jsou třinásovkem odpovídajících efektivních hodnot.

Maximální síla, generovaná elektrodynamickým budičem, je omezena především ohřevem, působeným průchodem elektrického proudu. Zde je tedy rozhodující efektivní hodnota, zatím co z hlediska mezních parametrů výkonového zesilovače je nejdůležitější vrcholová hodnota. Z toho plyne, že k dosažení totožné síly je při buzení náhodným signálem nutný výkonnější výkonový zesilovač než při buzení sinusovým signálem. Základní spektrální veličinou náhodného budícího signálu je spektrální výkonová hustota nebo spektrální hustota zrychlení. [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem této diplomové práce je porovnání tlumících charakteristik polymerních materiálů a výběr těch nejvhodnějších pro konstrukci strojních součástí. Pro porovnání budou použity 3 metody měření. První metoda bude zaměřena na útlum vibrací, které projdou materiálem při různých frekvencích. Druhá metoda zkoumá průchod hluku přes stěnu z polymerního materiálu. Třetí metoda porovnává materiály z hlediska pohltivosti zvuku. Dále bude u materiálů provedena tahová zkouška, aby se zjistilo, který z materiálů má nejlepší mechanické vlastnosti. Na základě všech těchto výsledků budou materiály vyhodnoceny a bude vybrána skupina nejvhodnějších materiálů pro konstrukci strojních součástí i s ohledem na jejich cenu.

5 PŘEHLED MĚŘENÝCH POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Při měření byla k dispozici většina běžných i konstrukčních polymerů, avšak u některých metod měření byly k dispozici pouze vzorky vybraných druhů materiálů.

5.1 Polypropylén (PP)

Vlastnosti: $T_m \approx 170^\circ\text{C}$, $\rho = 0,908 - 0,912 \text{ g/cm}^3$ při 23°C , krystalinita 50 – 75%, $\sigma = 34-38 \text{ MPa}$, $E = 1100-1500 \text{ MPa}$. Křehký pod 0°C , má výborné elektroizolační vlastnosti, dobrou chemickou odolnost. Oproti HDPE má nižší hustotu, vyšší T_m – tj. vyšší tepelnou použitelnost, dobře odolává vroucí vodě a sterilizaci, krátkodobě lze použít do 135°C , má vyšší pevnost v tahu, tvrdost, větší citlivost na termooxidaci, menší propustnost pro plyny a páry.

Zpracování: vstřikováním, vytlačováním, lisováním, při teplotách do 280°C

Použití: trubky, folie, desky, předměty domácí spotřeby s vyšší tuhostí a tepelnou odolností, orientované pásky, obaly, automobilový průmysl – výplně dveří, palubní desky, ventilátory, nárazníky, vlákna, kompozity. [16]

5.2 Polyoxymetylén (POM)

Lineární vysoce krystalický polymer, patřící mezi konstrukční plasty.

Vlastnosti: $\rho = 1,41 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 97-102 \text{ MPa}$, $E = 2700-3200 \text{ MPa}$, velmi dobré mechanické vlastnosti včetně rázové houževnatosti až do -30°C , teplota tání $164-172^\circ\text{C}$, mají nejvyšší odolnost proti oděru, krystalinita 85-90% u těles, 70-80% u folií do 70°C se nerozpouští v žádném rozpouštědle, trpí korozí za napětí, je svařitelný a pokovovatelný.

Aplikace: technické dílce – ozubená kola, západky namáhané rázem, ložiska, tlakové nádoby, čerpadla, zlepšení mechanických vlastností se provádí skelným vláknem.

Zpracování: vstřikování, vytlačování, vyfukování při $200-210^\circ\text{C}$, ve formě prášku lze fluidně nanášet na kovy. [16]

5.3 Polytetrafluoretylén (PTFE)

Vlastnosti: $\rho = 2,14 - 2,20 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 17 - 26 \text{ MPa}$, $E = 350 - 410 \text{ MPa}$, $T_m = 345^\circ\text{C}$, použitelnost $150 - 260^\circ\text{C}$, nehořlavý, zdravotně nezávadný, nerozpustný, vysoce chemicky

odolný, velmi vysoká viskozita taveniny, vysoká houževnatost, vynikající elektrické izolační vlastnosti, výrazné adhezivní vlastnosti.

Zpracování: vytlačování, studené slisování (poté slinování), nanášení

Použití: těsnění, ucpávky, antiadhezní povlaky, separační povlaky, izolace vodičů, písní kroužky, hadice, armatury, trubky, kluzné elementy, povlakování povrchů. [16]

5.4 Polyamid (PA)

Polyamid 66 (NYLON)

Vlastnosti: $\rho = 1,14 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 70 \text{ MPa}$, $E = 3000 \text{ MPa}$, $T_m = 254^\circ\text{C}$, použitelnost od -30°C do 120°C

Zpracování: zvlákňování, vstřikování a vytlačování

Aplikace: folie, vlákna, obecný plast

Polyamid 6 (SILON)

Vlastnosti: $\rho = 1,13 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 70 \text{ MPa}$, $E = 2800 \text{ MPa}$, $T_m = 215\text{-}220^\circ\text{C}$, použitelnost od -30°C do 100°C dlouhodobě, houževnatý, odolný proti oděru, je silně navlhavý

Zpracování: zvlákňování, vstřikování, vytlačování, vyfukování, rotační odlévání, polymerní odlévání - NYRIM technologie

Aplikace: textilní a technická vlákna, konstrukční materiál na ložiska, ozubená kola a ovládací elementy s 30 % skelného vlákna, kluzná pouzdra, ozubená kola, kladky, atd. [16]

5.5 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Vlastnosti: $\rho = 1,18 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 67\text{-}70 \text{ MPa}$, $E = 1400 \text{ MPa}$, $T_g = 100^\circ\text{C}$, rázová houževnatost 15 KJ/m^2 , sklovitě čirý, částečně propouští UV, velmi odolný proti povětrnosti, tvarovatelný při $130\text{-}140^\circ\text{C}$. Velmi dobré elektroizolační vlastnosti, pokovovatelný, odolává vodě, kyselinám i zásadám, použitelný do 80°C , dobře obrobitelný.

Zpracování: vstřikováním, vytlačováním, tvarováním, mechanickým opracováním

Aplikace: desky, trubky, tyče, profily, kryty, kopule letadel, zubní technika [16]

5.6 Polyvinylchlorid (PVC)

Vlastnosti: $\rho = 1,36 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 35 \text{ MPa}$, $E = 2500 \text{ MPa}$, $T_g = 82 \text{ }^\circ\text{C}$, vynikající odolnost vůči vodě, kyselinám, zásadám i organickým chemikáliím, vysoká tvrdost, odolnost proti oděru a mechanická pevnost, dobré elektroizolační vlastnosti, vysoký lesk a čírost, samozhášivost.

Zpracování: vstřikování, vytlačování, lisování, válcování, tepelné tvarování

Použití: trubky, fólie, desky, armatury na odpadní vodu, profily ve stavebnictví (okna), duté

výrobky (láhve na kosmetiku a čisticí prostředky). [16]

5.7 Polytetrafluoretylén (PET)

Vlastnosti: $\rho = 1,33\text{-}1,38 \text{ g/cm}^3$, $E = 2800 \text{ MPa}$, $\sigma = 60 \text{ MPa}$, $T_m = 260 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_g = 72\text{-}81 \text{ }^\circ\text{C}$, použití od -60 do $130 \text{ }^\circ\text{C}$ (do $100 \text{ }^\circ\text{C}$ trvale), špatné tokové vlastnosti taveniny – obtížná zpracovatelnost, výborné mech. vlastnosti, tvrdost, odolnost proti oděru, dobrá rozměrová stálost.

Zpracování: zvlákňování, vstřikování a vytlačování, obrábění

Použití: lahve pro nápoje s CO_2 , fólie (nejpevnější fólie z termoplastů) [16]

5.8 Polyetylén (PE)

HDPE (vysokohustotní polyetylén)

Vlastnosti: $\rho = 0,915 - 0,925 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 9\text{-}15 \text{ MPa}$, $E = 200\text{-}400 \text{ MPa}$, $T_m = 105\text{-}115 \text{ }^\circ\text{C}$, krystalinita 50 – 70 %, dobré tokové vlastnosti, houževnatý do $-70 \text{ }^\circ\text{C}$

Zpracování: vytlačování, vyfukování, vstřikování

Použití: obalové a zemědělské fólie, trubky, desky, sáčky

LDPE (nízkohustotní polyetylén)

Vlastnosti: $T_m = 125\text{-}135 \text{ }^\circ\text{C}$, krystalinita 65-95 %, $\rho = 0,954\text{-}0,970 \text{ g/cm}^3$, $E = 700\text{-}1400 \text{ MPa}$, $\sigma = 20\text{-}33 \text{ MPa}$

Zpracování: vstřikování, vytlačování, vyfukování (do $250 \text{ }^\circ\text{C}$)

Použití: benzinové kanystry, automobilové nádrže, folie, trubky, desky [16]

5.9 Polykarbonát (PC)

Vlastnosti: $\rho = 1,2-1,5 \text{ g/cm}^3$, $\sigma = 65-70 \text{ MPa}$, $E = 2200-2450 \text{ MPa}$, vrubová rázová houževnatost $20-50 \text{ KJ/m}^2$, dobrá rozměrová stabilita až do 140°C , dobré elektroizolační vlastnosti, odolnost vůči UV, samozhášivý.

Zpracování: vstřikování při $280-310^\circ\text{C}$ (forma $80-120^\circ\text{C}$), vytlačování při $220-320^\circ\text{C}$ (nutnost sušení), lití z roztoku, třískové zpracování, svařování horkým vzduchem, výroba slitin (blends) s termoplasty, zvláště s ABS.

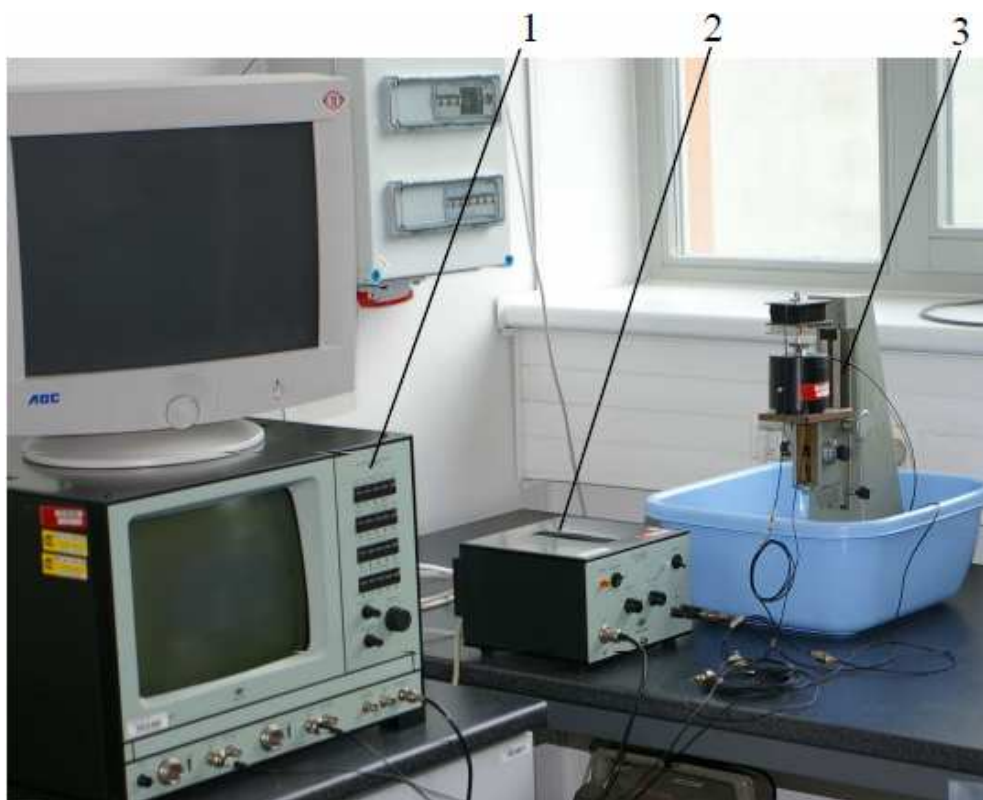
Aplikace: konstrukční díly, folie, trubky, tyče a desky, směsi s ABS – součásti automobilů, elektrotechnika, CD nosiče, konstrukční díly fotoaparátů, kamer, kryty světel, náhražka skla, folie, součásti čerpadel, ventilů, rozvodů. [16]

6 MĚŘENÍ TLUMENÍ VIBRACÍ

Cílem tohoto měření bylo zjistit, který z polymerních materiálů vykazuje největší tlumení při vibracích. Měření bylo provedeno metodou nucených kmitů, které byly ve frekvenčním rozsahu 10 – 300 Hz při teplotě okolí 20 °C. Měření bylo prováděno prakticky na všech základních polymerních materiálech a pro porovnání byla například měřena i pryž nebo PUR pěna.

6.1 Měřicí zařízení a princip měření

Měření bylo prováděno na zařízení firmy Brüel & Kjær, které se skládá z analyzátoru Brüel & Kjær 2034, vibrátoru Brüel & Kjær 4810 a výkonového zesilovače Brüel & Kjær 2706 (viz. obr.19.). Vibrátor je umístěn na stojanu v nádobě s pískem, aby bylo zabráněno přenášení chvění z budovy a jiných zdrojů vibrací.

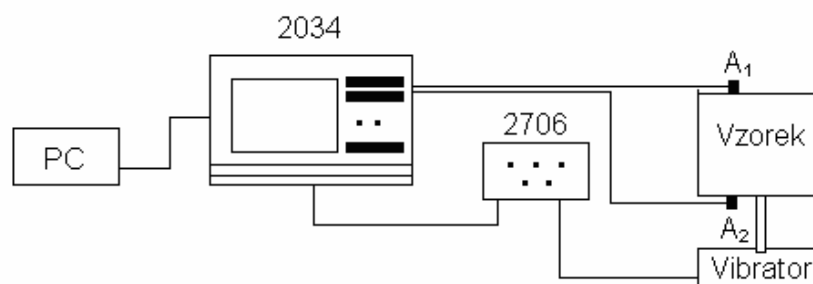


Obr. 19. Celkový pohled na měřicí aparaturu

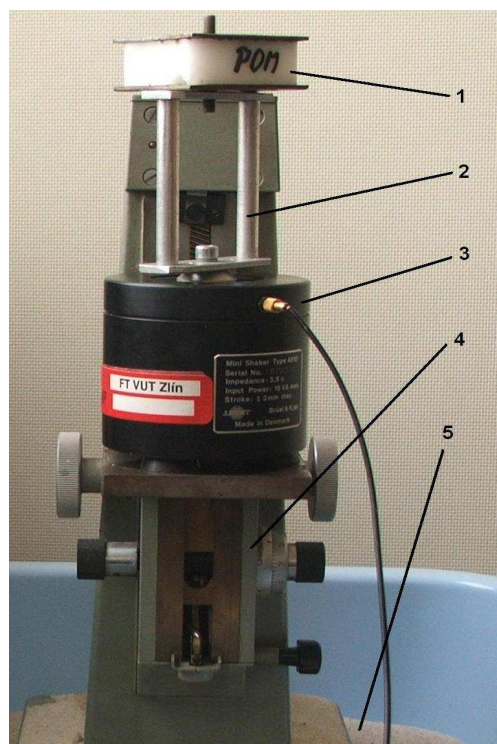
1 - analyzátor Brüel & Kjær 2034, 2 - výkonový zesilovač

Brüel & Kjær 2706, 3 - vibrátor Brüel & Kjær 4810

Měření bylo provedeno na polymerních vzorcích o rozměrech 50 x 50 x 20 mm, které byly nalepeny mezi ocelové plíšky. Tento vzorek se nejprve přišrouboval na zkonstruovaný přípravek, který umožnil přišroubování měřícího čidla vibrometru z obou stran vzorku. Poté se i s přípravkem přišrouboval na vibrátor (obr. 21.). Princip měření spočíval v měření maximální výchylky (amplitudy) na vstupní straně vzorku (A_2) a poté na druhé (volné) straně vzorku (A_1), viz. blokové schéma obr. 20. Rozdíl mezi těmito amplitudami ukazoval, jestli materiál tlumí nebo rezonuje a v jaké míře. Měření maximálních výchylek bylo prováděno vibrometrem EXTECH 407860 (Obr.22.).



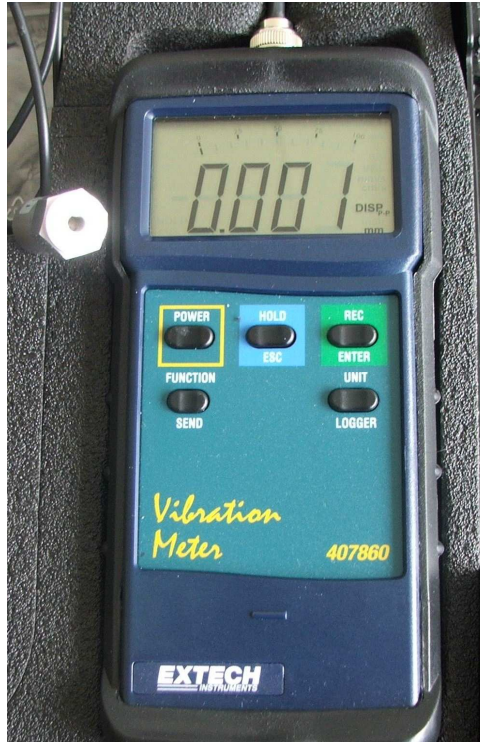
Obr. 20. Blokové schéma měřícího zařízení



Obr. 21. Vibrátor Brüel & Kjær 4810

1 – vzorek, 2 – přípravek, 3 – vibrátor,

4 – stojan, 5 – nádoba s pískem



Obr. 22. Vibrometr EXTECH 407860

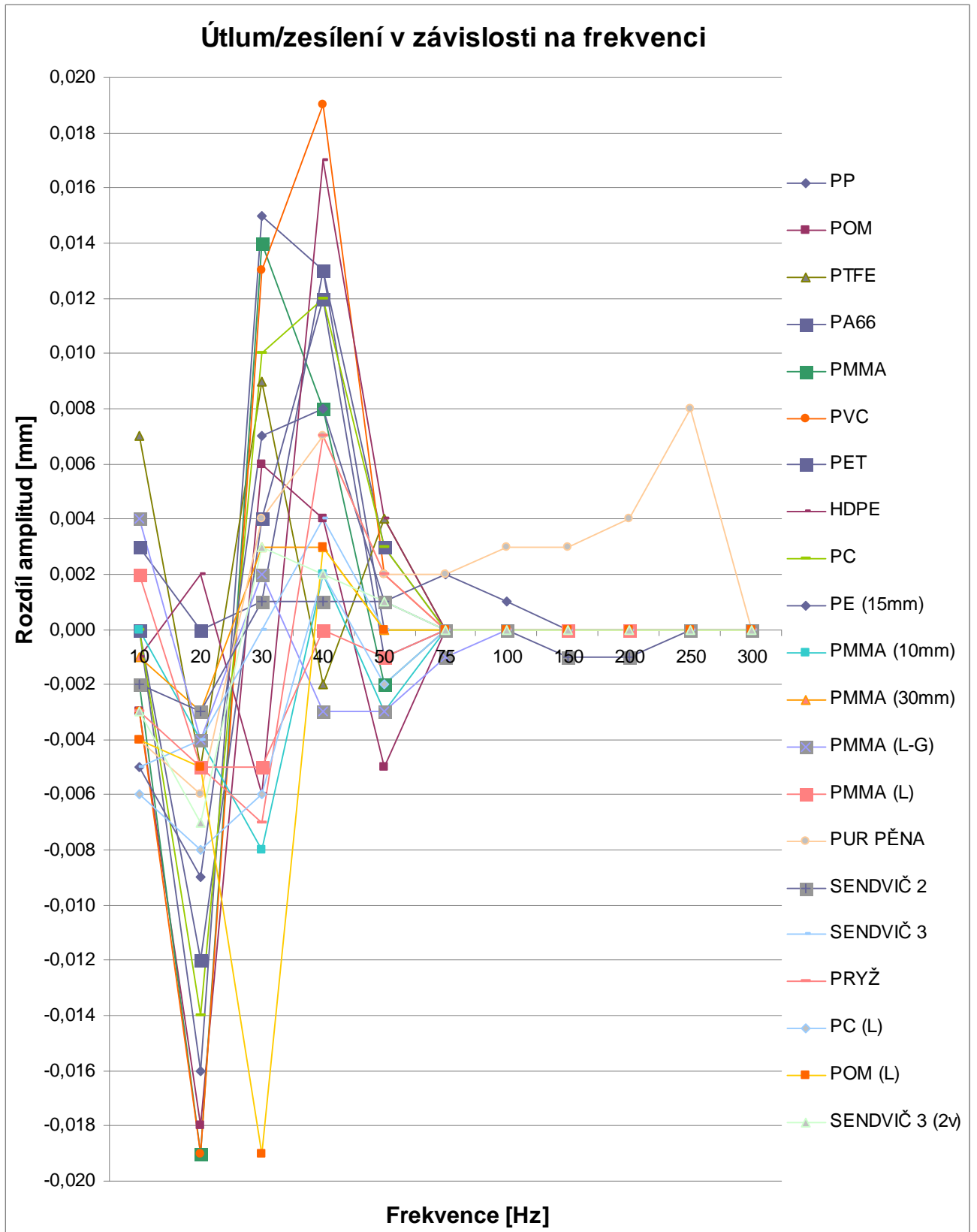
6.2 Výsledky měření

Měřením se ověřovalo několik předpokladů. V první řadě se porovnával samotný útlum různých materiálů. Dále pak vliv zpracování materiálu na tlumení, zda mají lepší tlumení vytlačované nebo lité materiály. A nakonec se ověřoval i vliv tloušťky materiálu.

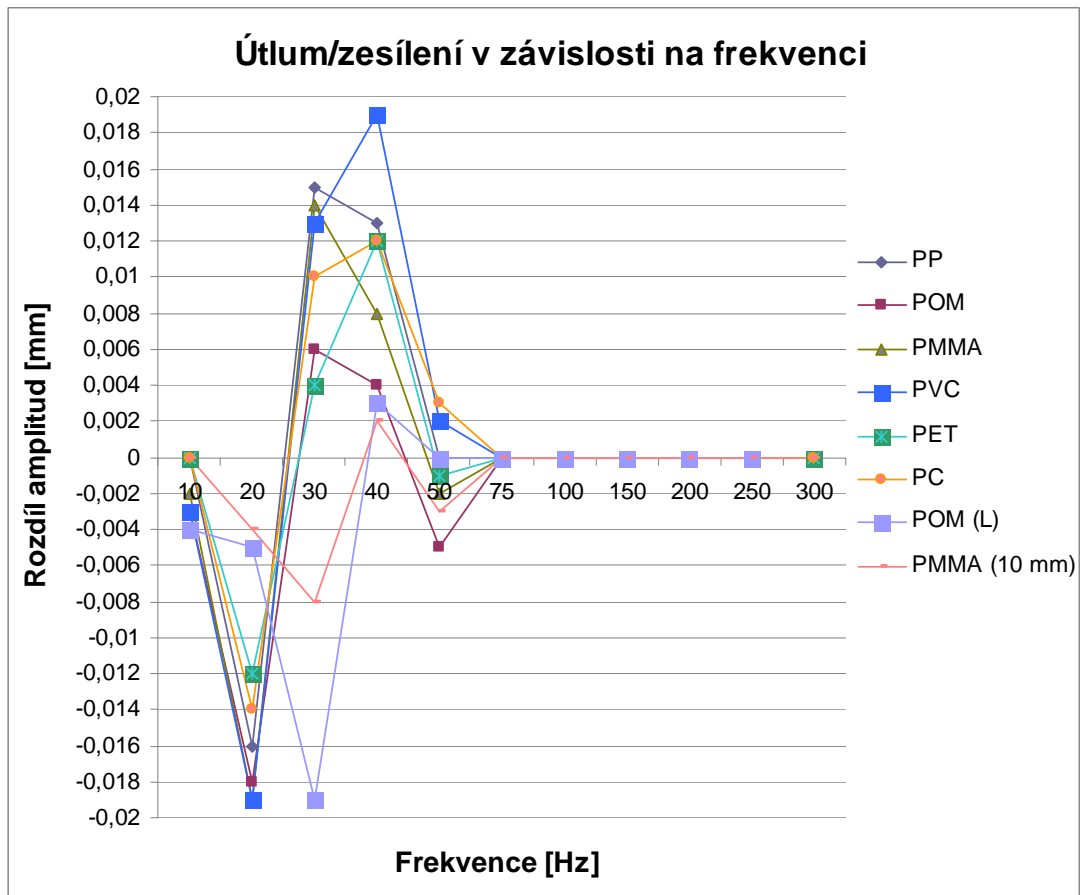
6.2.1 Porovnání tlumení jednotlivých materiálů

Na obrázku 23. je přehled všech měřených materiálů a jejich různých variant tloušťky nebo způsobu výroby. V celkovém přehledu nejsou patrné žádné velké rozdíly, jelikož se všechny materiály chovaly velmi podobně. Největší tlumení materiály vykazovaly při frekvenci 20 Hz, avšak při frekvenci 30 Hz už vykazovaly zesílení kmitání. Další část materiálů měla posunutou frekvenční charakteristiku doprava a vykazovaly největší tlumení při frekvenci 30 Hz a největší zesílení při frekvenci 40 Hz. U drtivé většiny materiálů byl rozdíl amplitud měřitelný do 100 Hz. Jedinou výjimkou byly PUR pěna a sendvičový materiál, které vykazovali zesílení respektive útlum i ve vyšších frekvencích.

Pro větší přehlednost byly vybrány materiály s největším tlumením při frekvencích 20 a 30 Hz, které jsou uvedeny na obr. 24. Mezi ně patří především PMMA, POM a POM (L).



Obr. 23. Porovnání tlumení všech měřených materiálů



Obr. 24. Porovnání tlumení materiálů s největším útlumem

6.2.2 Porovnání tlumení vytlačovaných a litých materiálů

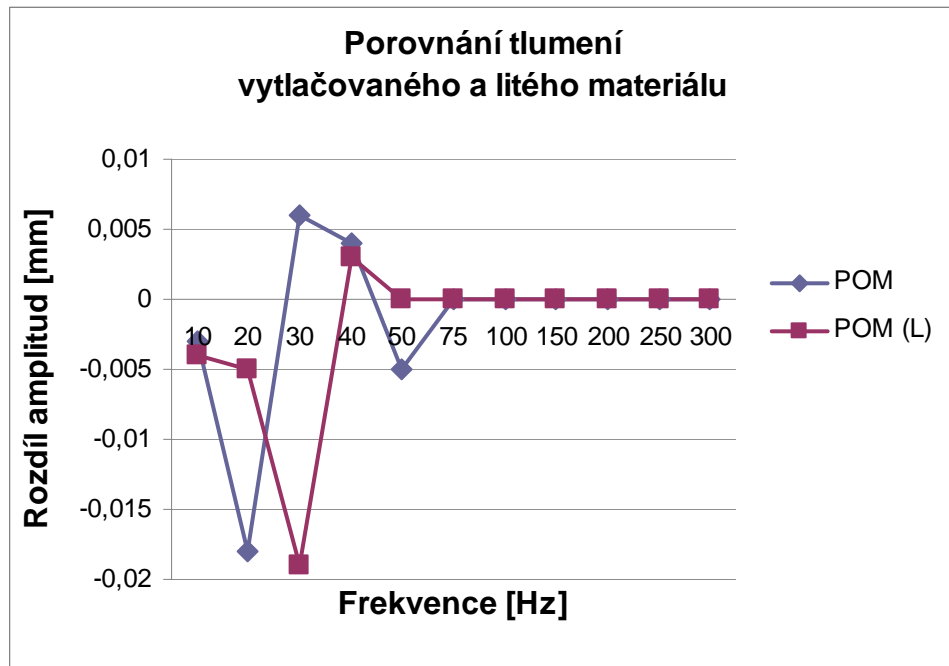
Při tomto vyhodnocení výsledků byly porovnány stejné materiály, které se však lišily způsobem výroby vzorku. První skupina vzorků byla vyřezána z vytlačovaných desek, druhá skupina byla odlévána do formy. Takto byly připraveny vzorky z materiálů POM, PMMA a PC.

U materiálu POM (obr. 25.) se vliv přípravy vzorků různou formou projevil v posunutí frekvenční charakteristiky doprava. Maximální tlumení se z frekvence 20 Hz posunulo na 30 Hz a mírně se zvýšilo. Naopak maximální rezonance se posunula z 30 na 40 Hz a mírně se zmenšila. Nelze však s jistotou říct, že by litý materiál byl lepší než vytlačovaný.

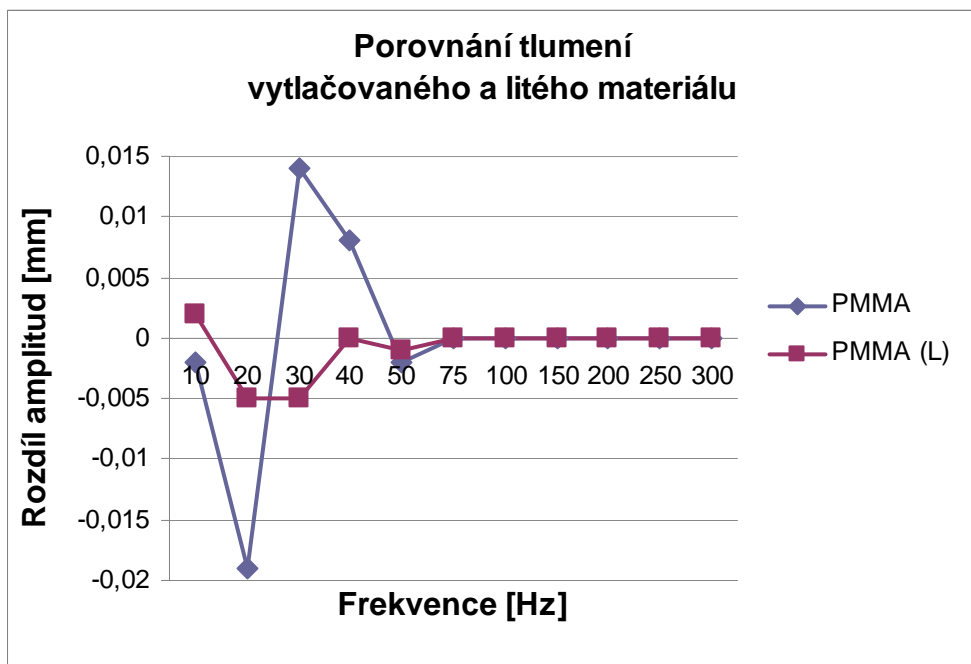
U materiálu PMMA (obr. 26.) se celkově snížily rezonance i útlum materiálu.

U materiálu PC (obr. 27.) je na první pohled patrné, že litý materiál má daleko lepší tlumící vlastnosti (s výjimkou frekvence 20 Hz) a rezonanční stavy se výrazně zmenšily a

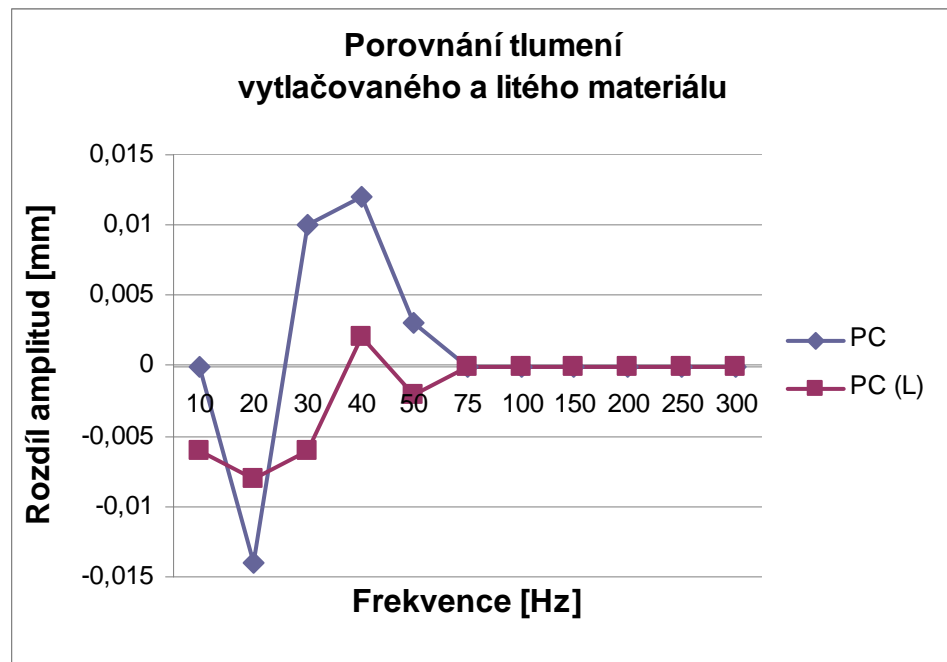
přecházejí až do útlumu. U tohoto materiálu proto lze konstatovat, že litý vzorek má oproti vytlačovanému lepší tlumící vlastnosti.



Obr. 25. Porovnání tlumení materiálu POM



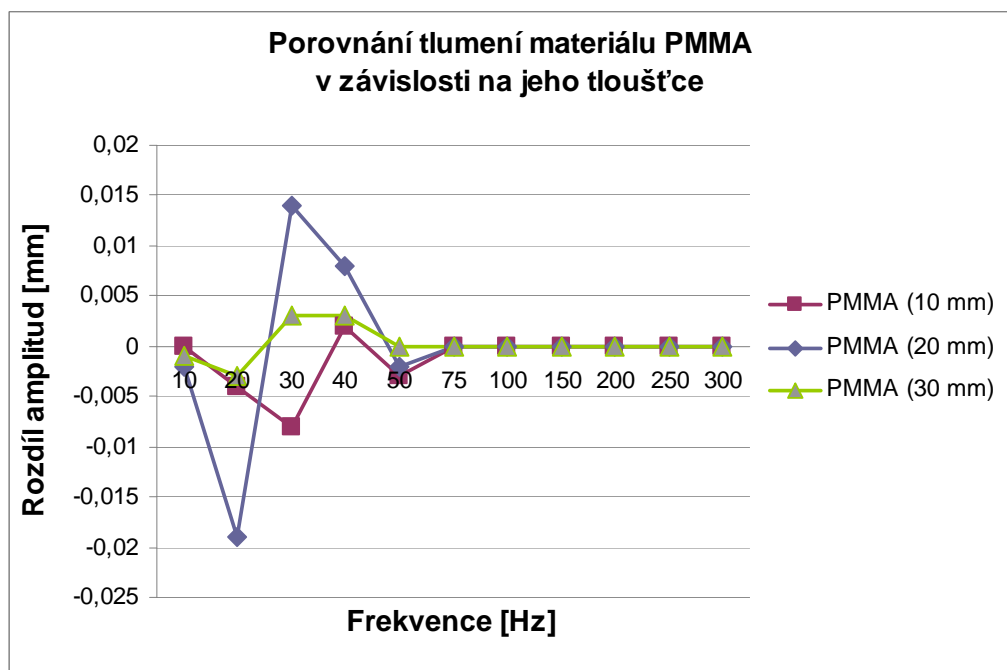
Obr. 26. Porovnání tlumení materiálu PMMA



Obr. 27. Porovnání tlumení materiálu PC

6.2.3 Porovnání vlivu tloušťky materiálu

Porovnání vlivu tloušťky materiálu bylo provedeno na materiálu PMMA, kde byly k dispozici vzorky o tloušťce 10, 20, a 30 mm. Dále byl vliv zkoumán na materiálu SENDVIČ 3, kde byl měřený vzorek nejprve jednovrstvý a poté dvouvrstvý.

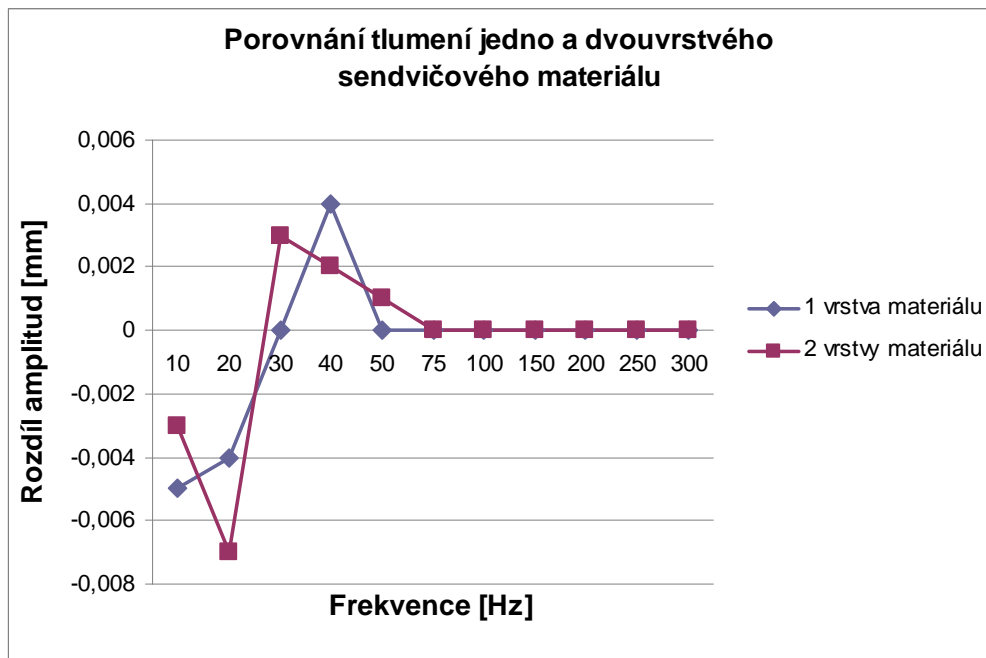


Obr. 28. Porovnání vlivu tloušťky u materiálu PMMA

U materiálu PMMA (obr. 28.) nelze pozorovat žádnou jednoznačnou závislost mezi tloušťkou a tlumením. Při frekvenci 20 Hz tlumí nejlépe vzorek o tloušťce 20 mm a při frekvenci 30 Hz tlumí nejlépe vzorek o tloušťce 10 mm. U ostatních frekvencí se vzorky chovají podobně a jen s malými rozdíly.

U sendvičového materiálu (obr. 29.) jsou výsledky podobné. Při frekvenci 20 Hz lépe tlumí dvě vrstvy materiálu, avšak u frekvence 30 Hz zase vykazují větší rezonanci. U jednovrstvého materiálu je to při těchto frekvencích opačné.

Závěr tedy zní, že vliv tloušťky materiálů na útlum vibrací nebyl ani v jednom případě jednoznačně prokázán.



Obr. 29. Porovnání vlivu tloušťky u sendvičového materiálu

7 MĚŘENÍ PRŮCHODU HLUKU PŘES POLYMERNÍ STĚNU

Cílem tohoto měření bylo zjistit, přes který z materiálů projde nejmenší množství hluku.

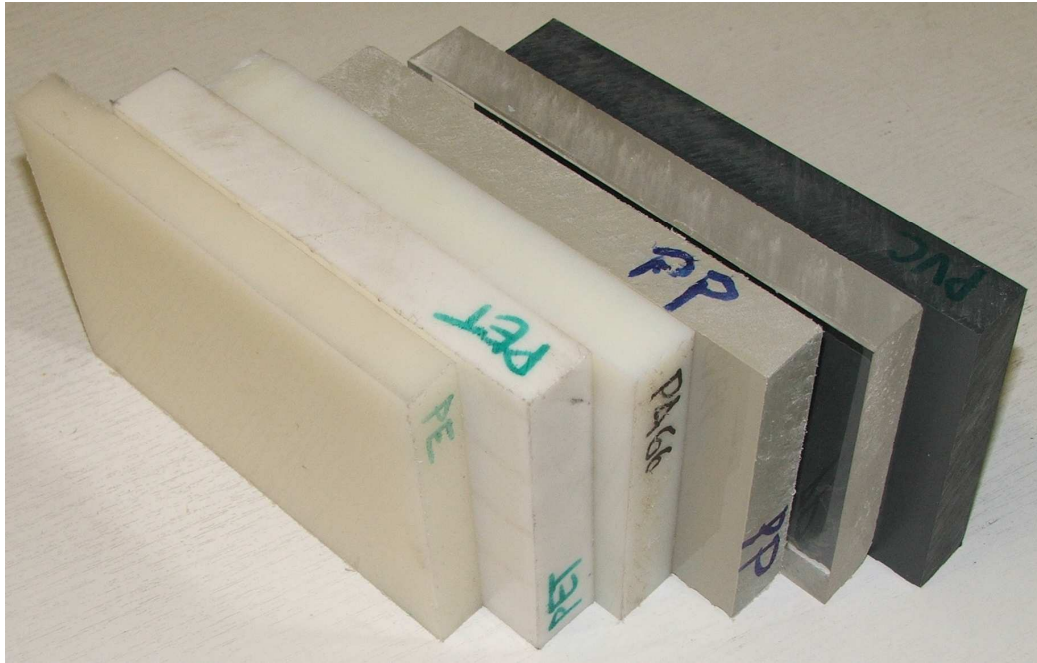
7.1 Měřicí zařízení a princip měření

Měření bylo prováděno ve zkonstruovaném přípravku, který je na obrázku 30. Přípravek je zevnitř vylepený izolační pěnou, aby nedocházelo k prostupu hluku z vnějšího okolí. V přípravku jsou vytvořeny drážky pro zasouvání měřených polymerních desek. Měřené desky byly o rozměrech 150 x 100 x 20 mm, viz. obr. 31. Dále jsou v přípravku vyvrtány dva otvory pro zasunutí měřiče hluku. Jako zdroj hluku nám posloužil vibrátor Brüel & Kjær 4810 společně s příslušnou aparaturou, jako tomu bylo u předchozí metody měření. Vibrátor sloužil pro vytvoření zvuku v požadovaných frekvencích.



Obr. 30. Zkonstruovaný přípravek pro měření průchodu hluku

1 – vibrátor, 2 – izolační pěna, 3 – měřená deska, 4 – otvory pro hlukoměr, 5 - hlukoměr



Obr. 31. Ukázka měřených polymerních desek

Princip měření spočívá v tom, že změříme hlukoměrem (obr. 32.) vybuzený hluk na straně vibrátoru, a poté změříme hluk za polymerní stěnou, který prošel. Z rozdílu hluku můžeme stanovit k jakému došlo útlumu při dané frekvenci. Tento postup opakujeme pro všechny požadované frekvence a materiály.



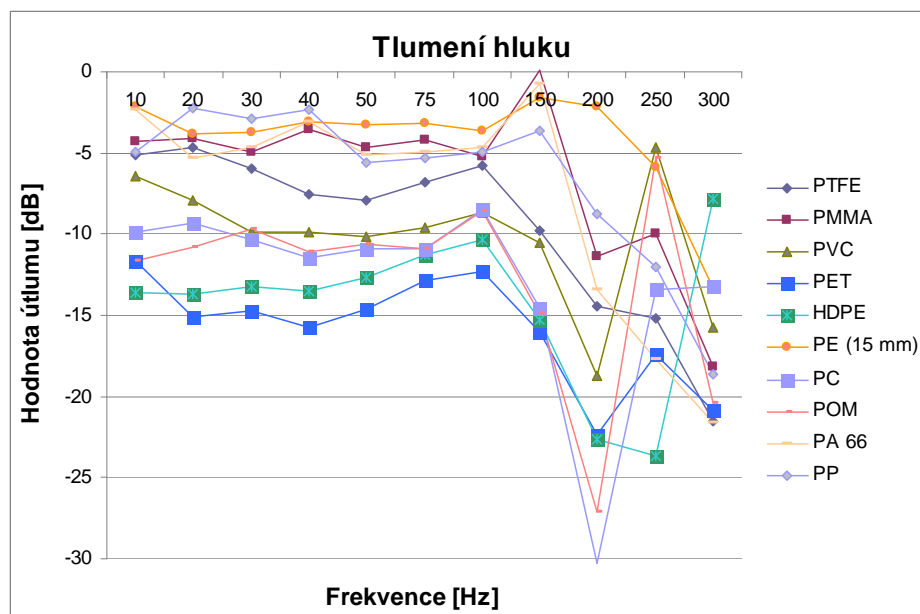
Obr. 32. Hlukoměr VOLTcraft SL - 400

7.2 Výsledky měření

Tab. 2. Výsledky tlumení hluku

f [Hz]	PP (dB)	POM (dB)	PTFE (dB)	PA66 (dB)	PMMA (dB)	PVC (dB)	PET (dB)	HDPE (dB)	PC (dB)	PE (15mm) (dB)
10	-4,9	-11,6	-5,1	-2,3	-4,3	-6,4	-11,6	-13,6	-9,9	-2,1
20	-2,2	-10,8	-4,7	-5,3	-4,1	-7,9	-15,1	-13,7	-9,3	-3,8
30	-2,9	-9,7	-6	-4,7	-4,9	-9,9	-14,7	-13,2	-10,3	-3,7
40	-2,3	-11,1	-7,5	-3,1	-3,5	-9,9	-15,7	-13,5	-11,5	-3,1
50	-5,6	-10,6	-7,9	-5,1	-4,7	-10,2	-14,6	-12,7	-10,9	-3,3
75	-5,3	-10,9	-6,8	-4,9	-4,2	-9,6	-12,9	-11,3	-10,9	-3,2
100	-4,9	-8,6	-5,8	-4,7	-5,2	-8,7	-12,3	-10,3	-8,5	-3,6
150	-3,6	-14,9	-9,8	-0,7	0,1	-10,5	-16	-15,3	-14,5	-1,6
200	-8,8	-27,1	-14,4	-13,4	-11,4	-18,7	-22,4	-22,6	-30,3	-2,1
250	-12	-5,3	-15,2	-17,7	-10	-4,7	-17,4	-23,7	-13,4	-5,9
300	-18,6	-20,4	-21,5	-21,6	-18,2	-15,7	-20,9	-7,8	-13,2	-13,3

Z naměřených dat v tabulce 2 jsem sestavil graf závislosti útlumu hluku na frekvenci budiče hluku (obr. 33.). Z grafu je patrné, že nejvyšší tlumení u většiny materiálů je kolem frekvence 200 Hz. Mezi nejlépe tlumící materiály patřily PET, HDPE, PC a POM. Naopak nejmenší útlum byl u PE. Zde je to však s největší pravděpodobností způsobeno menší tloušťkou materiálu (15mm). Všechny ostatní materiály byly tloušťky 20 mm. Vliv tloušťky materiálu nebyl u této metody zkoumán, jelikož to neumožňovala konstrukce měřícího přípravku.



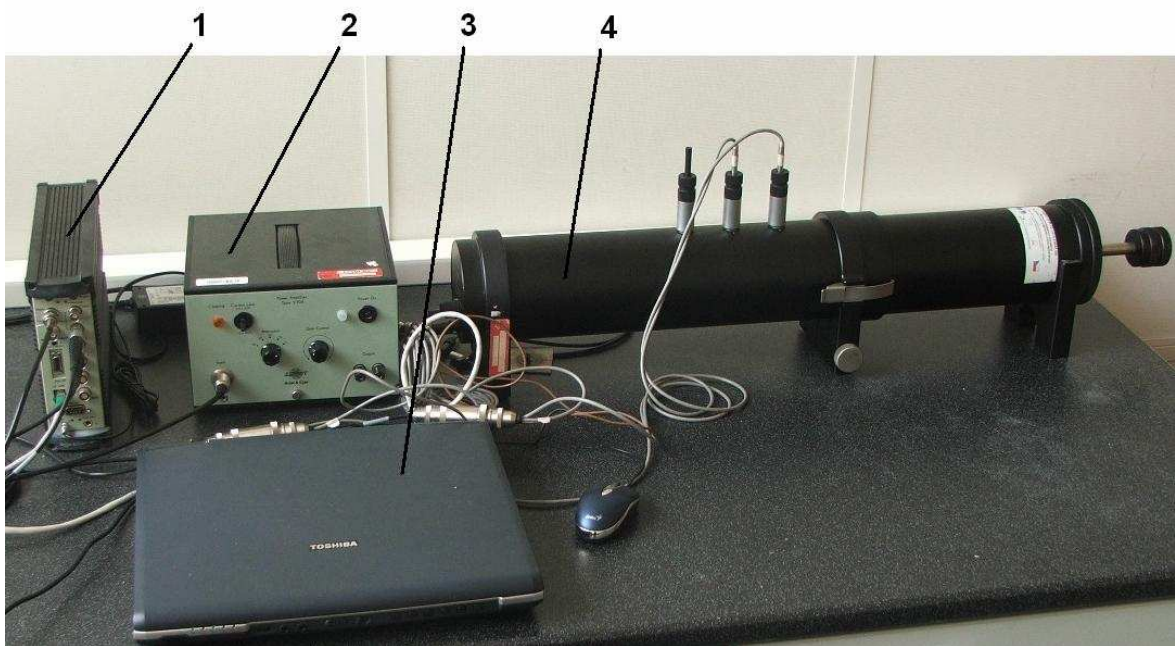
Obr. 33. Tlumení hluku

8 MĚŘENÍ POHLTIVOSTI ZVUKU

Činitel zvukové pohltivosti α je bezrozměrná veličina a je definována poměrem intenzity zvuku vlny pohlcené v daném materiálu k intenzitě zvuku dopadající vlny na daný materiál. Činitel zvukové pohltivosti leží v intervalu $\alpha \in \langle 0, 1 \rangle$. Materiál, u kterého dochází k úplnému pohlcení veškeré dopadající akustické energie, je charakterizován činitelem zvukové pohltivosti $\alpha = 1$. Naopak v případě dokonalého odrazu dopadajícího akustického vlnění od povrchu materiálu je tento materiál charakterizován činitelem zvukové pohltivosti $\alpha = 0$. [17]

8.1 Měřicí zařízení a princip měření

Měřicí aparatura, na které bylo měřeno, je uvedena na obrázku 34. Aparatura se skládá z Kundtovy impedanční trubice Brüel & Kjær 4206, tříkanálového PULSE multianalyzátoru Brüel & Kjær 3560-B-030, zesilovače Brüel & Kjær 2706 pro zesílení vstupního signálu a notebooku pro ukládání naměřených dat.



Obr. 34. Měřicí aparatura

1 – tříkanálový multianalyzátor, 2 – zesilovač,

3 – notebook, 4 - Kundtova impedanční trubice

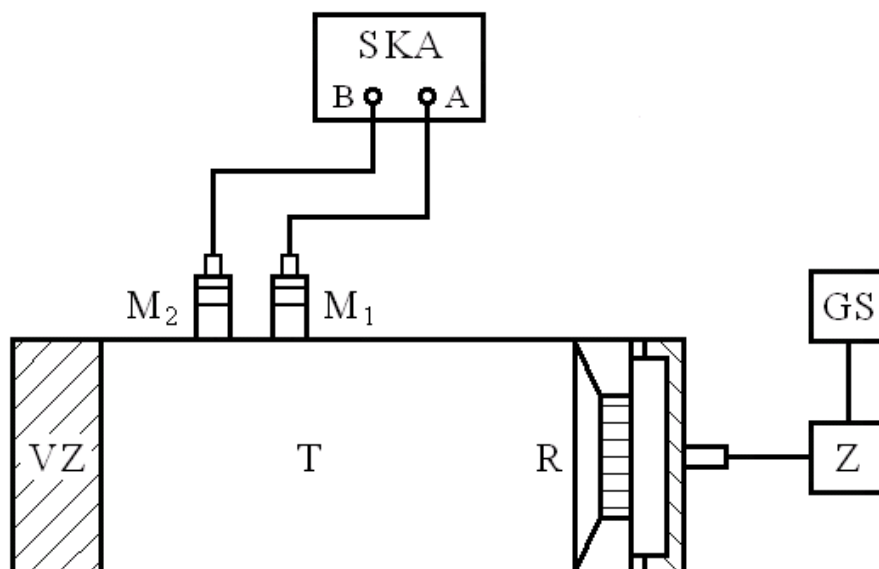
Princip měření zvukové pohltivosti se realizuje na Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce (viz. obr. 35.) podle normy ČSN ISO 10534-2. Na jednom konci trubice T je umístěný vzorek VZ, na druhém konci je umístěn reproduktor R, který je napájen generátorem signálu GS. Signál je následně zesílen v zesilovači Z. Na trubici jsou umístěny dva mikrofony M_1 a M_2 stejného druhu pro měření akustických tlaků. Naměřené veličiny jsou použity pro další zpracování v systému kmitočtové analýzy SKA. Činitel zvukové pohltivosti při kolmém dopadu akustického vlnění se potom určí z rovnice:

$$\alpha = 1 - |r|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (9)$$

Kde r je činitel odrazu akustického tlaku, r_r – reálná složka činitele odrazu akustického tlaku, r_i – imaginární složka činitele odrazu akustického tlaku. Činitel akustického tlaku je dán rovnicí:

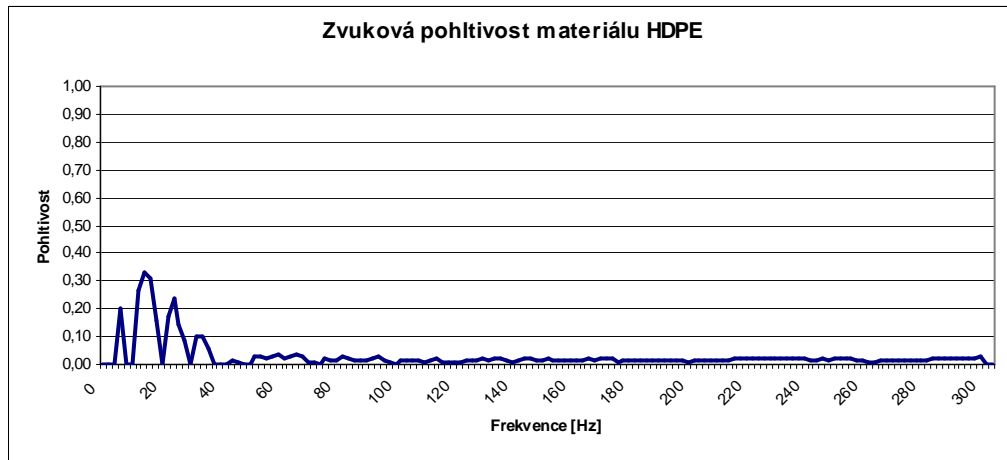
$$r = \frac{H_{12} - H_1}{H_R + H_{12}} \cdot e^{2k_0 \cdot x_l i} \quad (10)$$

Kde H_{12} je přenosová funkce mezi místy 1 a 2, H_1 – přenosová funkce pro samotnou dopadající vlnu, H_R – přenosová funkce pro samotnou odražející se vlnu, k_0 – komplexní vlnové číslo, x_l – vzdálenost mezi vzorkem a vzdálenějším mikrofonom od něj (v tomto případě od mikrofону M_1 – viz obr. 35.), i – imaginární jednotka. [17]

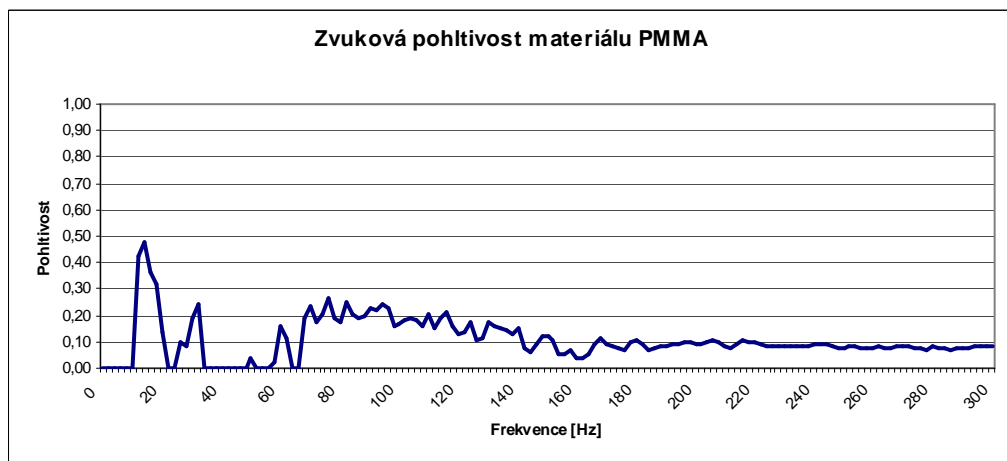


Obr. 35. Princip měření činitele zvukové pohltivosti

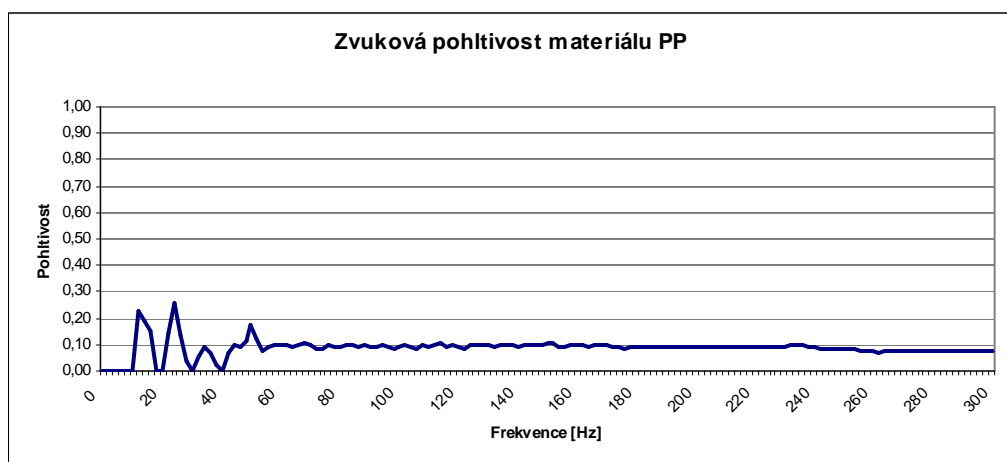
8.2 Výsledky měření



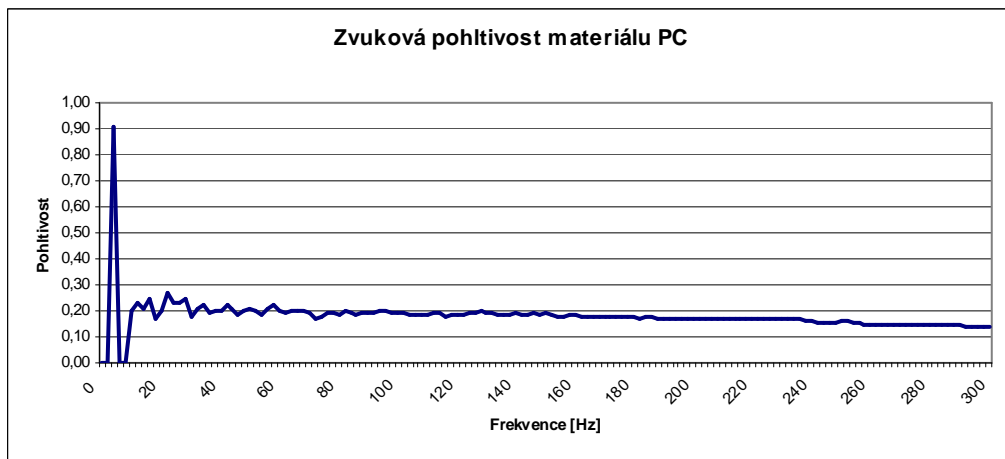
Obr. 36. Zvuková pohltivost materiálu HDPE



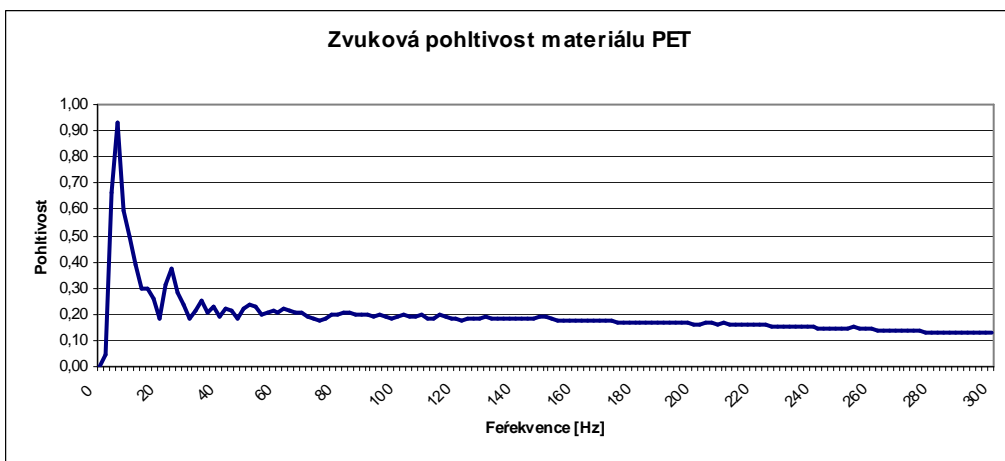
Obr. 37. Zvuková pohltivost materiálu PMMA



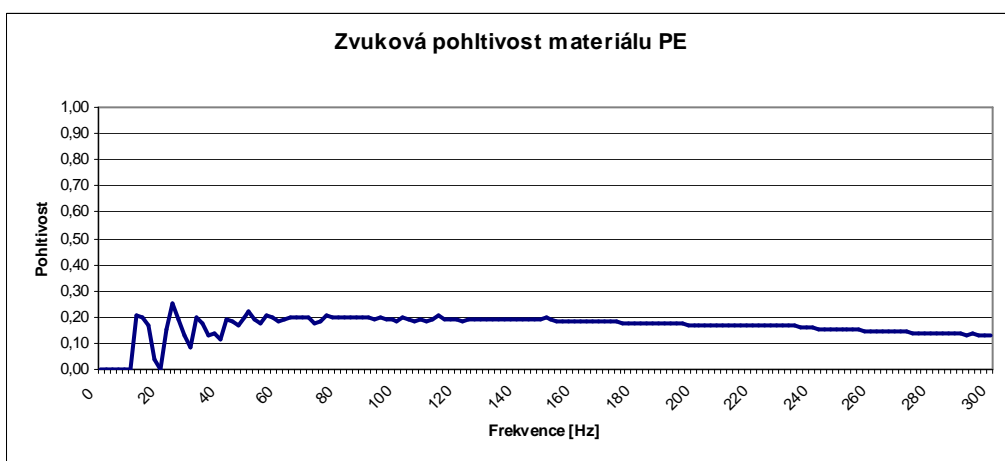
Obr. 38. Zvuková pohltivost materiálu PP



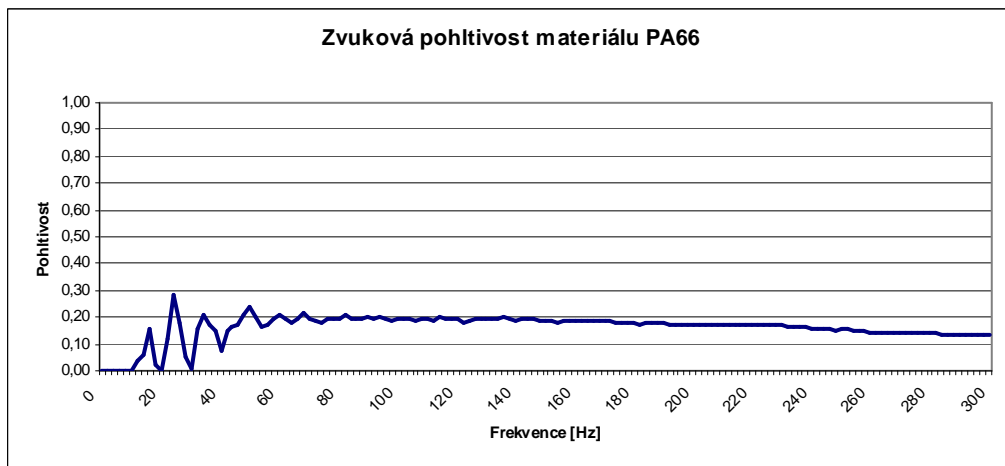
Obr. 39. Zvuková pohltivost materiálu PC



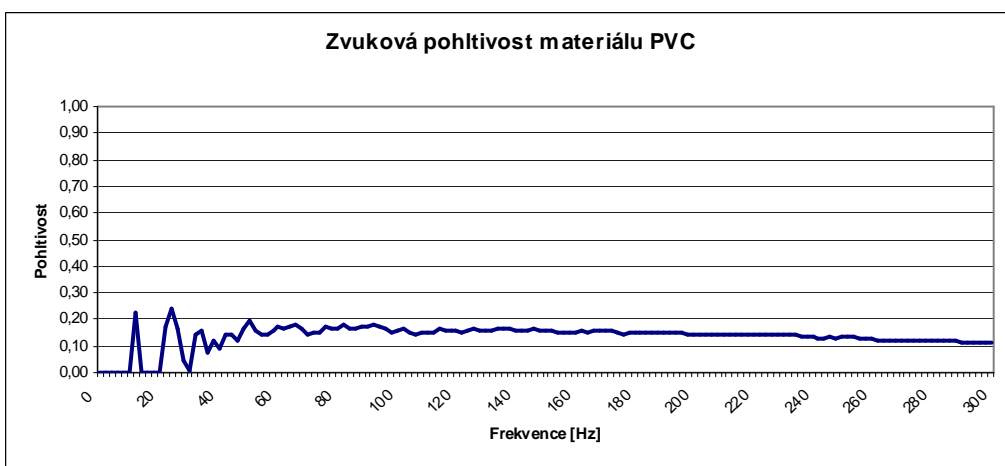
Obr. 40. Zvuková pohltivost materiálu PET



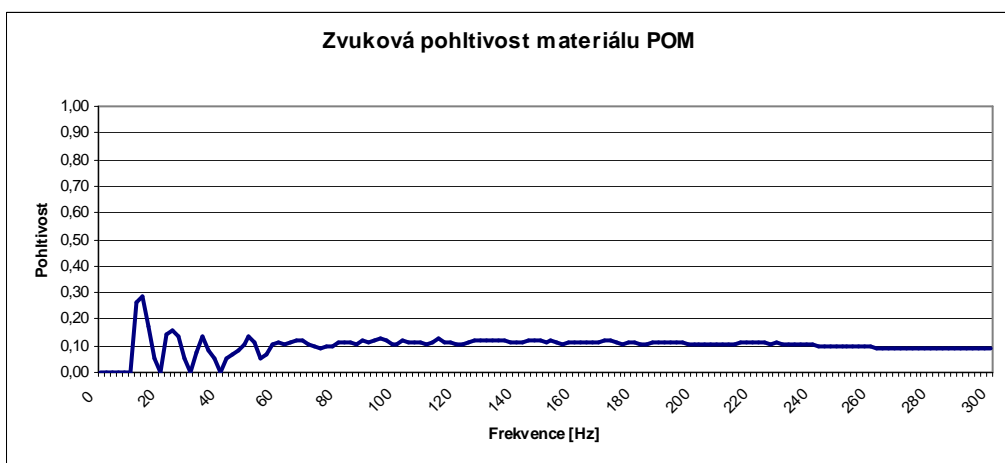
Obr. 41. Zvuková pohltivost materiálu PE



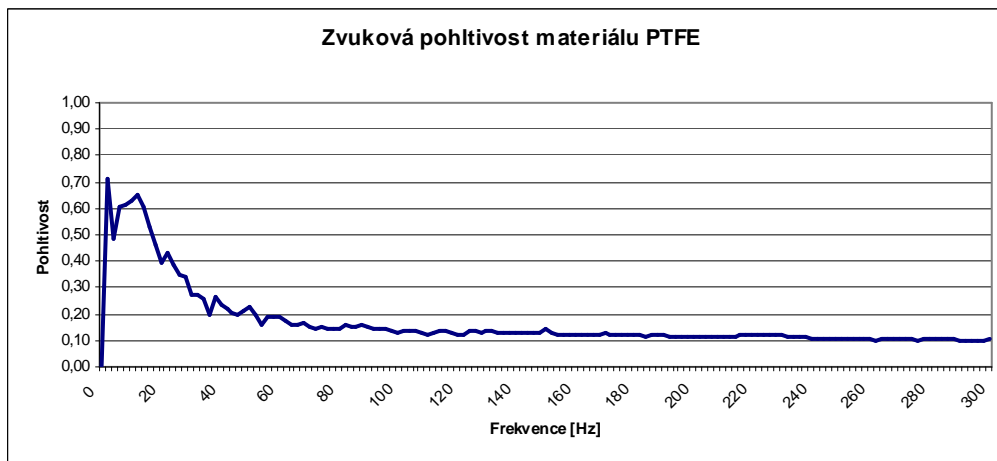
Obr. 42. Zvuková pohltivost materiálu PA66



Obr. 43. Zvuková pohltivost materiálu PVC



Obr. 44. Zvuková pohltivost materiálu POM



Obr. 45. Zvuková pohltivost materiálu PTFE

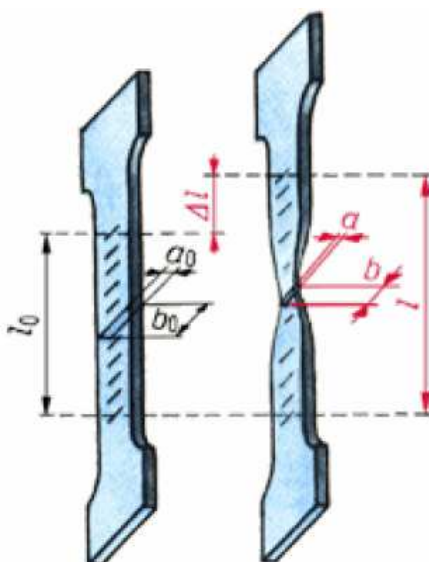
Na obr. 36 je zobrazen průběh zvukové pohltivosti materiálu HDPE. Jistá pohltivost je patrná do frekvence 40 Hz, dále je již minimální a lze ji prakticky zanedbat. Na obr. 37 je zobrazena křivka zvukové pohltivosti materiálu PMMA. Tento materiál má jistou pohltivost i při vyšších frekvencích. Obr. 38 popisuje zvukovou pohltivost u PP. Z grafu je patrné, že PP má velice malou pohltivost. Na obr. 39 je vidět velmi vysoká zvuková pohltivost materiálu PC okolo frekvence 10 Hz. Dále se již materiál chová velice podobně ostatním. Materiál PET má jednu z nejvyšších zvukových pohltivostí vzhledem k ostatním materiálům, což je jasně vidět z obrázku 40. Na obr. 41 je naopak materiál PE, který vykazoval jednu z nejnižších zvukových pohltivostí vůbec. Obr. 42 zobrazuje křivku zvukové pohltivosti materiálu PA66, která vykazovala velice konstantní pohltivost v celém spektru měřených frekvencí. Materiál PVC na obrázku 43 má velice podobný průběh jako předchozí PA66. Materiál POM se svou křivkou zvukové pohltivosti na obr. 44 patřil do skupiny materiálů s minimální zvukovou pohltivostí. Materiál s nevyšší zvukovou pohltivostí byl PTFE. Na obr. 45 je jasně vidět, že vykazuje velmi vysokou pohltivost již od nízkých frekvencí. Ve vyšších frekvencích se již choval obdobně jako ostatní materiály.

Celkově se dá konstatovat, že až na výjimky (PTFE, PET, PC) nebyl koeficient zvukové pohltivosti nijak zvlášť vysoký. Bylo to dáno z velké části i jejich lesklým povrchem, což napomáhalo k odrazu zvukových vln. Obecně byl průběh křivek zvukové pohltivosti materiálů velmi podobný a je z nich patrné, že jistou zvýšenou pohltivost vykazují do frekvence 60 Hz, což je podobný průběh výsledků jako u měření tlumení vibrací. U vyšších frekvencí se již materiály chovaly velmi podobně a vykazovaly minimální zvukovou pohltivost.

9 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Patří mezi nejdůležitějších a nejfrekventovanější statické zkoušky v technické praxi. Při zkoušce je zkušební tyčinka zatěžována statickým jednoosým tahem. Zkušební tyčinky se zatěžují na zkušebním stroji pomalu rostoucí silou až do přetržení. Ke zkoušce tahem se používají válcové nebo ploché tyčinky s předepsanými rozměry. V našem případě byly použity ploché tyčinky (obr. 46.). Metodu zkoušky tahem při teplotě okolí předepisuje norma ČSN EN 10002-1.

Tahovou zkouškou zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení, modul pružnosti, tažnost a zúžení (kontrakci) zkoušeného materiálu. V našem případě nás zajímá pouze pevnost a modul pružnosti.



Obr. 46. Plochá zkušební tyčinka

Modul pružnosti odráží tuhost vazeb mezi atomy a charakterizuje odolnost materiálu vůči elastické deformaci. Lineární závislost mezi působícím napětím a elastickou deformací popisuje Hookeův zákon. Modul pružnosti je měřítkem tuhosti a jeho převrácená hodnota je měřítkem poddajnosti v oblasti pružných deformací. Lze jej určit ze sklonu počátečního přímkového úseku tahového diagramu.

Pevnost v tahu (mez pevnosti v tahu) σ_P je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F , kterou snese zkušební tyč, a původního průřezu tyče S_0 :

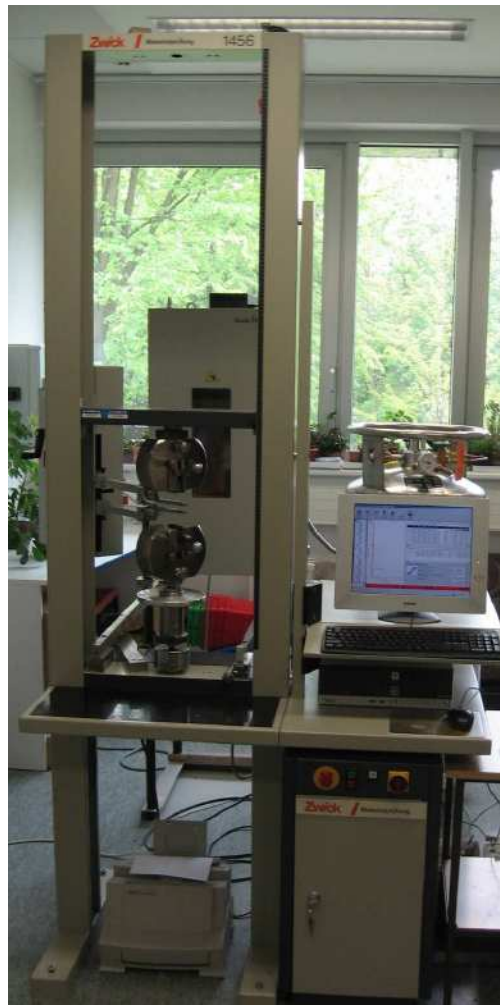
$$\sigma_P = \frac{F_{\max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

9.1 Měřicí zařízení

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním stroji Zwick 145 665 (obr. 47.) a naměřená data byla zaznamenávána v programu TestXpert 7.11.

Technické parametry stroje:

- maximální zkušební síla 20 kN
- strojová výška 1284 mm
- celková výška 2012 mm
- celková šířka 630 mm
- šířka pracovního prostoru 420 mm
- hmotnost 150 kg



Obr. 47. Zkušební stroj Zwick 145 665

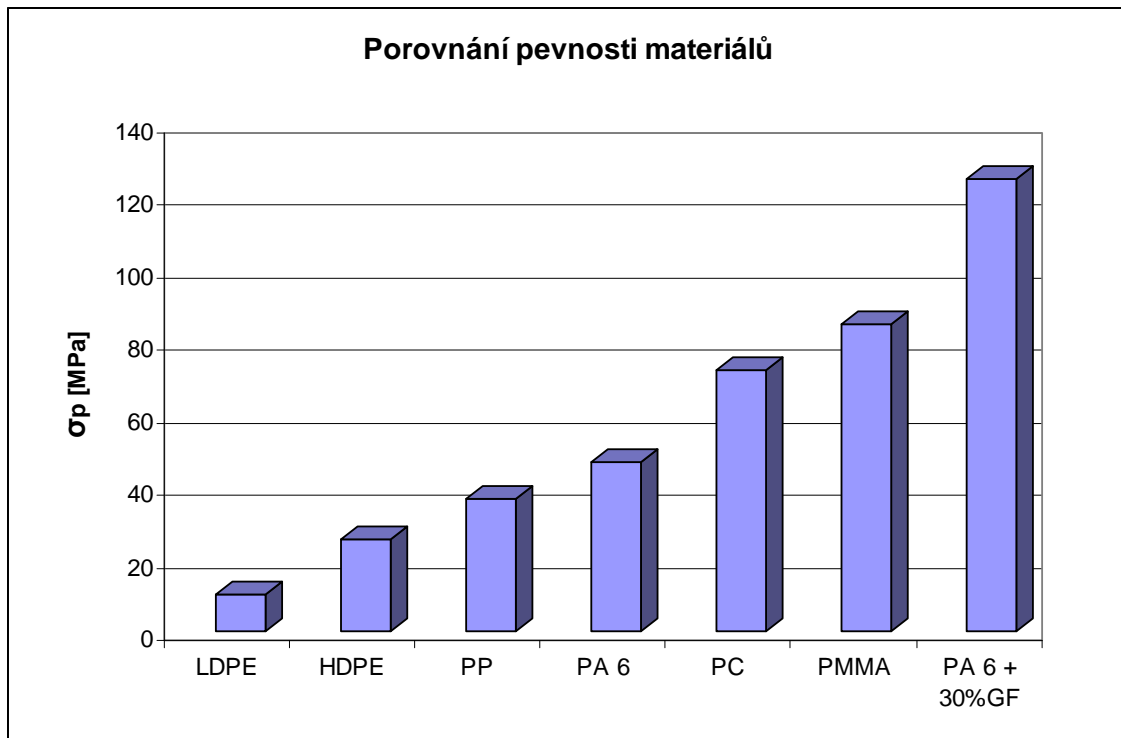
9.2 Výsledky měření

Naměřená data byla statisticky vyhodnocena přímo v měřicím softwaru TestXpert 7.11.

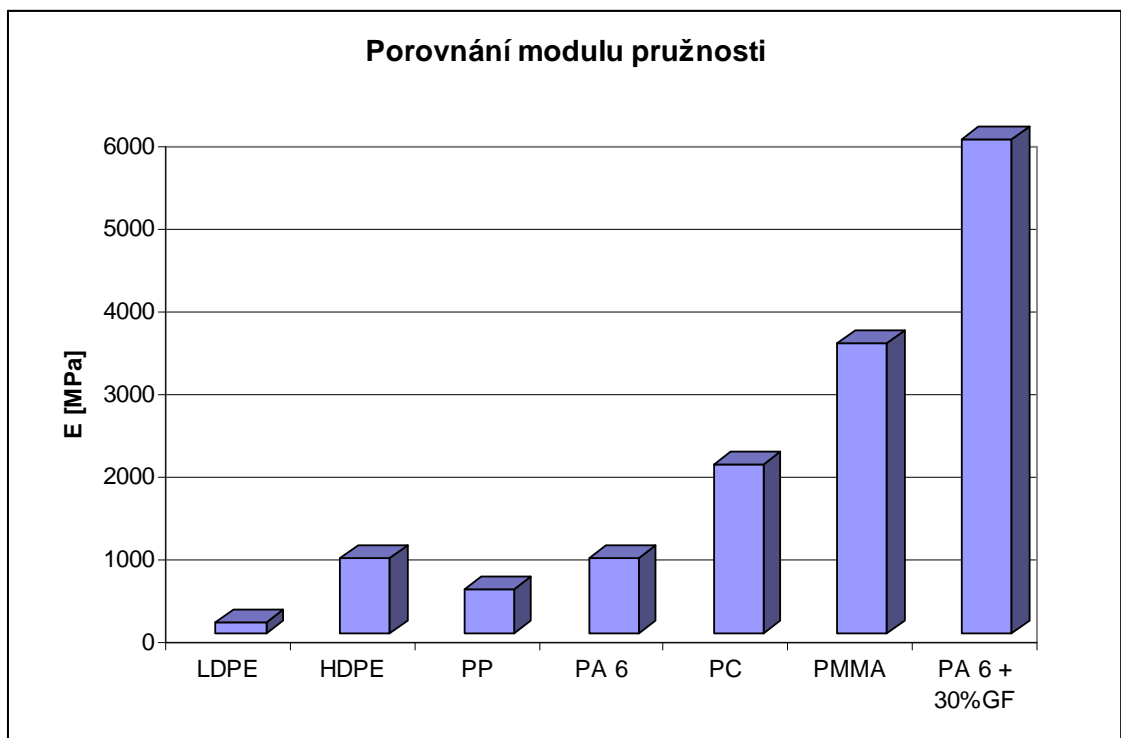
Tab. 3. Naměřené hodnoty u tahové zkoušky

Počet vzorků	a ₀ mm	b ₀ mm	σ _m N/mm ²	σ _B N/mm ²	E N/mm ²	Nominal strain mm	ε _P %	ε _B %	ε _P mm	ε _B mm	F _{max} N
n = 20	P M M A										
x	3,006	5,144	84,27	83,74	3496,43	4,11	5,17	5,81	1,03	1,16	1310,7
s	0,005	0,005	4,13	4,18	94,4	0,44	0,89	1,62	0,18	0,32	64,26
v	0,18	0,11	4,9	5	2,7	10,75	17,22	27,86	17,21	27,85	4,9
n = 20	L D P E										
x	4,022	9,935	10,07	9,48	121,21	84,2	157,73	172,55	31,56	34,53	402,3
s	0,004	0,006	0,08	0,14	4,54	2,47	45,62	47,57	9,12	9,51	2,93
v	0,1	0,06	0,76	1,47	3,75	2,94	28,92	27,57	28,91	27,56	0,73
n = 20	H D P E										
x	4,021	9,919	25,07	8,02	907,55	10,31	8,87	81,89	1,78	16,38	999,81
s	0,003	0,005	0,25	0,26	17,08	0,16	0,32	27,85	0,06	5,57	9,99
v	0,08	0,05	1,01	3,27	1,88	1,55	3,64	34,01	3,62	34	1
n = 11	P P										
x	3,891	9,989	36,51	19,95	533,06	9,94	25,83	110,08	5,17	22,02	1419,03
s	0,038	0,014	0,62	5,42	21,43	0,25	0,68	68,02	0,14	13,6	16,63
v	0,96	0,14	1,7	27,15	4,02	2,5	2,64	61,79	2,66	61,79	1,17
n = 10	P A 6										
x	3,995	9,862	46,59	41,78	896,58	45,57	64,31	261,75	12,87	52,36	1835,61
s	0,007	0,010	1,14	2,87	206,77	69,94	108,28	73,54	21,66	14,71	46,45
v	0,18	0,1	2,44	6,87	23,06	153,48	168,37	28,1	168,27	28,1	2,53
n = 10	P C										
x	3,996	9,946	71,86	56,25	2032,94	8,5	8	147,53	1,6	29,51	2856,12
s	0,007	0,005	0,28	1,26	81,04	0,08	0,1	67,32	0,02	13,46	6,08
v	0,17	0,05	0,39	2,24	3,99	0,91	1,26	45,64	1,34	45,63	0,21
n = 10	P A 6 + 30%GF										
x	3,995	9,866	124,29	120,43	5972,63	6,97	4,9	7,17	0,98	1,43	4899,03
s	0,011	0,007	1,02	1,83	320,85	0,05	0,08	0,3	0,02	0,06	40,14
v	0,27	0,07	0,82	1,52	5,37	0,78	1,61	4,23	1,6	4,2	0,82

V tabulce 3 jsou statisticky vyhodnocena naměřená data. Z naměřených hodnot jsem sestavil grafy, které porovnávají jednotlivé materiály mezi sebou. Z grafu na obrázku 48 je vidět, že nejvyšší pevnost má PA 6 s 30% obsahem skelných vláken. Naopak nejmenší pevnost má nízkohustotní polyetylén. Z grafu na obrázku 49 je patrné, že modul pružnosti koresponduje s pevností v tahu. Jedinou výjimku tvoří HDPE, u kterého byl naměřen modul vyšší.

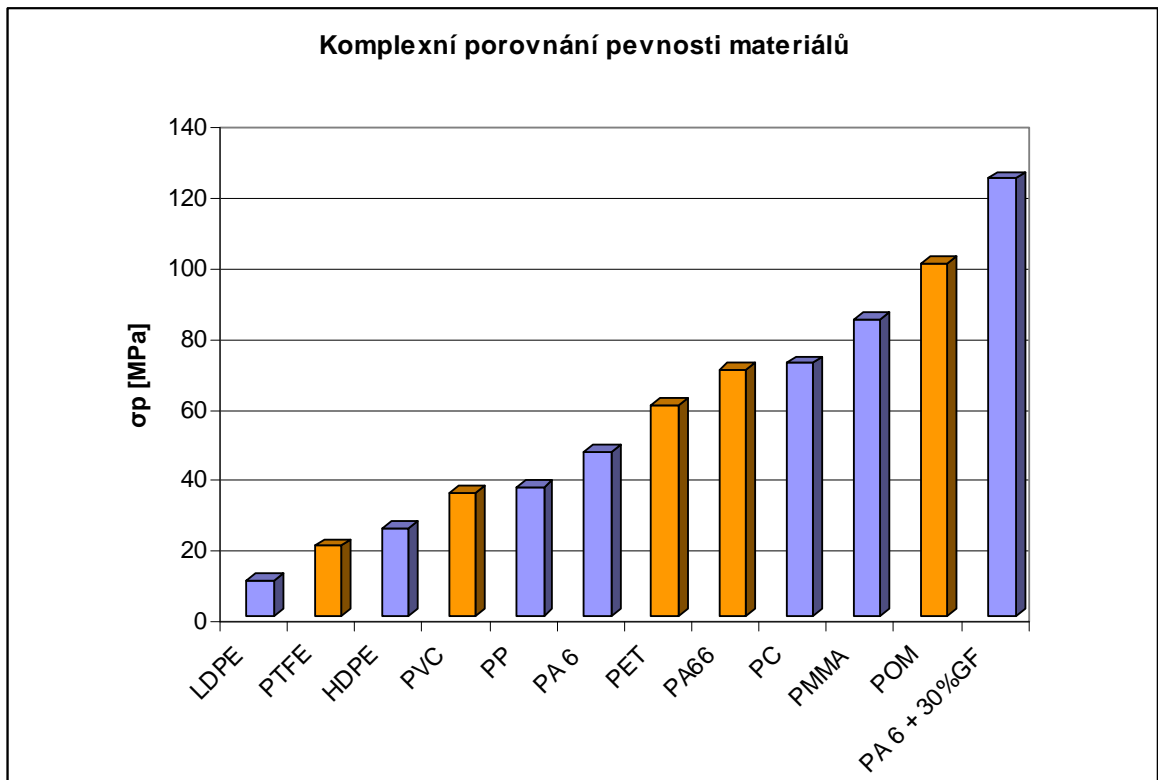


Obr. 48. Porovnání pevnosti materiálů



Obr. 49. Porovnání modulu pružnosti

Jelikož nebyly pro měření k dispozici vzorky všech materiálů, bylo nutné pro komplexní vyhodnocení doplnit pevnosti zbylých materiálů jejich středními hodnotami uvedenými v kapitole 5 u vlastností jednotlivých materiálů. Tyto doplněné materiály jsou v grafu odlišeny oranžovou barvou.



Obr. 50. Komplexní porovnání pevnosti materiálů

Na obrázku 50 můžeme vidět komplexní srovnání pevnosti jednotlivých materiálů. Když pomineme plněný materiál PA6, jehož pevnost je dána právě plněním, patří mezi nejpevnější materiály POM, PMMA, PC, PA66 a PET.

Legenda k tabulce:

a_0	tloušťka vzorku	[mm]
b_0	šířka vzorku	[mm]
σ_P	napětí na mezi pevnosti	[MPa]
σ_B	napětí při přetržení	[MPa]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
Nominal strain	prodloužení na l_E (celém tělese)	[mm]
ε_P	poměrné prodloužení na mezi pevnosti	[%]
ε_B	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ε_P	prodloužení na mezi pevnosti	[mm]
ε_B	prodloužení při přetržení	[mm]
F_{max}	síla na mezi pevnosti	[N]
n	počet měřených vzorků v sérii	[ks]
x	aritmetický průměr	
s	směrodatná odchylka	
v	variační koeficient	


















10 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ MATERIÁLŮ

V dnešní době, kdy cena materiálu hraje jednu z nejdůležitějších rolí v konečné ceně výrobku, je důležité k tomuto faktu takto přistupovat a zvážit, zda námi vybraný materiál nelze vhodně zaměnit za jiný srovnatelný materiál, avšak s výrazně nižší cenou. Obzvláště důležité je zvažovat cenu materiálu tam, kde bude vyráběna velká série výrobků. I malá úspora na jednom kusu výrobku může na celé sérii ušetřit velkou část nákladů. Proto je tato kapitola zaměřena na porovnání současných cen a jejich vývoje v budoucnu.

10.1 Porovnání současných cen materiálů a jejich vývoj

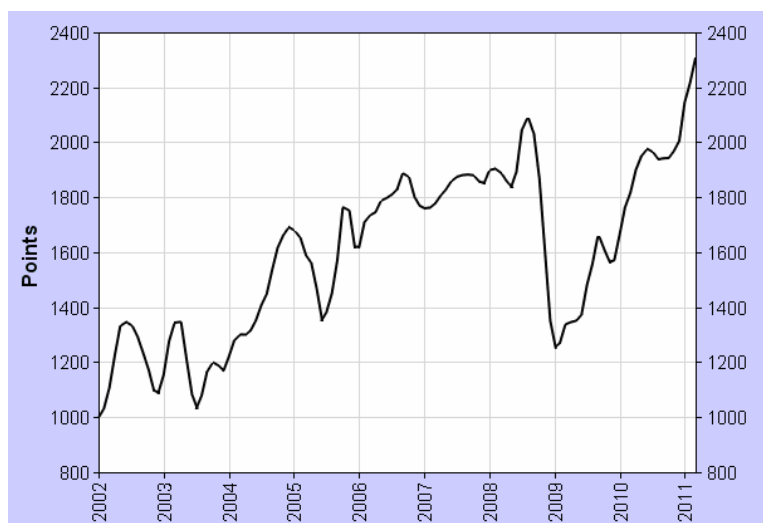
Tabulka 4 uvádí současné ceny polymerů ve střední Evropě. Mezi nejdražší patří PA66 a PC. Naopak mezi nejlevnější patří PE, PP a PET. Ceny polymerních materiálů se vyvíjejí stejně jako jiná komodita na trhu. Meziměsíčně jsou cenové výkyvy řádově několik procent, ale meziročně už to mohou být až desítky procent.

Tab. 4. Průměrné ceny plastů ve střední Evropě (Březen 2011) [15]

Typ polymeru	Průměrná cena €/kg	Změna vůči předchozímu měsí- ci	Změna vůči předchozímu roku
HDPE	1.32	 6,01 %	 22.5 %
LDPE	1.5	 2.73 %	 25.3 %
PP	1.55	 2.6 %	 27.9 %
PET	1.60	 6.62 %	 45.6 %
PA 6	2.67	 1.69 %	 12.2 %
PA 66	4.03	 2.45 %	 20.8 %
PMMA	2.75	 1.04 %	 35.1 %
POM	1.91	 5.94 %	 2.74 %
PC	3.34	 1.04 %	 32.6 %

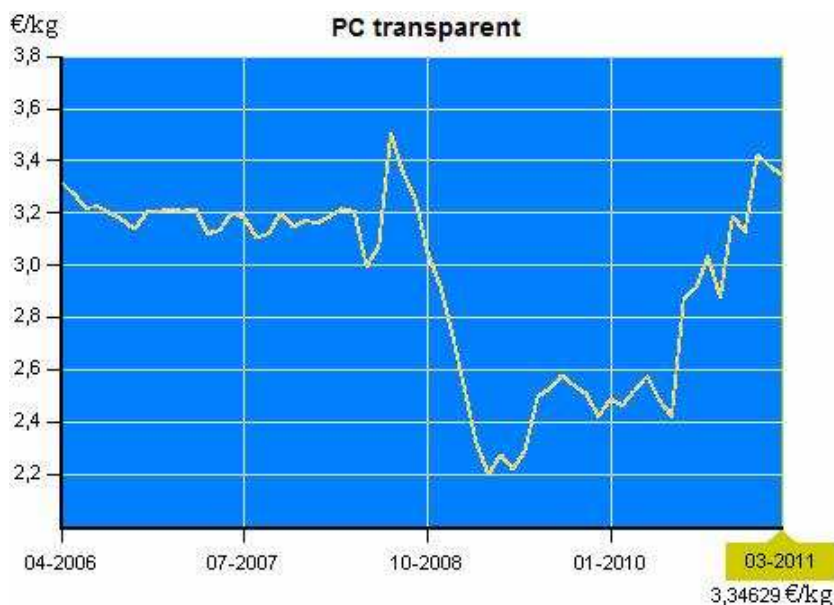
10.2 Dlouhodobý vývoj cen materiálů

Z dlouhodobého pozorování cen polymerů je patrné, že jejich cena neustále roste, což je způsobeno především růstem cen ropy na světových trzích, jelikož je ropa jedna ze základních surovin pro výrobu polymerů. Jediný výrazný pokles byl na podzim roku 2008 kdy byla ekonomická krize. Vývoj cen od roku 2002 mapuje obrázek 51. Základem pro tento graf jsou ceny v lednu 2002, které představují 1000 bodů a podle této cenové hranice se přepočítávají body současných cen.



Obr. 51. Vývoj cen termoplastických polymerů [15]

Příklad konkrétního vývoje cen je demonstrován na materiálu PC (obr.52.).



Obr. 52. Vývoj ceny u materiálu PC [15]

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo porovnání tlumících charakteristik polymerních materiálů a snaha vybrat mezi nimi ty nejvhodnější pro konstrukci strojních součástí. K experimentu byly použity 3 metody měření. První metoda zkoumá útlum vibrací, druhá průchod hluku přes polymerní stěnu a třetí pohltivost zvuku. Dále byly materiály podrobeny tahové zkoušce, abychom zjistili jejich mechanické vlastnosti. V poslední kapitole byla u materiálů porovnávána jejich aktuální cena na evropském trhu.

U první metody měření bylo k dispozici 21 vzorků, u kterých se porovnával útlum vibrací ve frekvenčním pásmu 10-300 Hz. Na vybraných vzorcích byl dále porovnáván vliv způsobu zpracování (lití vs. vytlačování) a vliv tloušťky vzorku. V celkovém srovnání materiálů nejsou patrné velké rozdíly, materiály mají velmi podobné frekvenční charakteristiky. Největší rozdíl mezi materiály byl v jejich „nejsilnější“ tlumící frekvenci. Většina materiálů měla nejvyšší tlumení při 20 Hz, menší část při 30 Hz. Mezi nejlépe tlumící materiály patřily PMMA, POM, PC(L) a POM (L). Při porovnání materiálů z hlediska způsobu výroby vzorku byly k dispozici 3 materiály (POM, PMMA a PC). U materiálu POM se u litého vzorku mírně zlepšilo tlumení, u PC se u litého vzorku výrazně zlepšilo tlumení a u materiálu PMMA nedošlo ke zlepšení tlumení. Obecně se tedy dá konstatovat, že příprava materiálu litím má na tlumení pozitivní vliv. Porovnání vlivu tloušťky materiálu bylo provedeno na dvou vzorcích. Ani v jednom případě nebyl vliv tloušťky prokázán, avšak obecně se nedá s určitostí vliv tloušťky vyloučit.

U druhé metody měření bylo na 10 vzorcích zkoumáno množství hluku, které prošlo přes polymerní stěnu při stanoveném frekvenčním pásmu hluku od 10 do 300 Hz. Ze závislosti útlumu hluku na frekvenci budiče hluku byl sestaven graf, ve kterém jsou porovnány jednotlivé materiály. Mezi nejlépe tlumící materiály patřily PET, HDPE, PC a POM.

U třetí metody byla zkoumána zvuková pohltivost jednotlivých materiálů. Měření se provádělo na Kundtově impedanční trubici metodou přenosové funkce ve frekvenčním pásmu do 300 Hz. Z naměřených dat byla u každého materiálu sestavena křivka závislosti zvukové pohltivosti na frekvenci a jednotlivé materiály byly mezi sebou porovnány. V celkovém měřítku se materiály chovaly velmi podobně a vykazovaly velmi nízkou zvukovou pohltivost. Mezi materiály s nejvyšším činitelem zvukové pohltivosti patřily PTFE, PET a PC.

Další hledanou vlastností byla pevnost materiálů, která se zjišťovala z tahové zkoušky. Ke zkoušce bylo k dispozici pouze 7 vybraných vzorků materiálů. U zbylých materiálů, které

nebyly k dispozici, bylo nutné jejich hodnoty pevností doplnit z literatury, aby bylo možné provést komplexní zhodnocení. Z naměřených a doplněných dat pevností materiálů byl sestaven graf a jednotlivé materiály byly mezi sebou porovnány. Mezi nejpevnější materiály patřily POM, PMMA, PC, PA66 a PET.

Poslední, a v dnešní době jednou z nejdůležitějších porovnávaných vlastností, byla cena materiálů. Mezi ty nejlevnější plasty patří HDPE, LDPE, PP, PET, které jsou nazývány komoditní. Naopak mezi ty nejdražší patří POM, PMMA, PA6, PC a PA66, které patří mezi konstrukční. Cenu materiálu určuje zejména objem jeho spotřeby.

Při celkovém komplexním zhodnocení materiálů, kde jsou zahrnuty všechny metody měření tlumení, tahová zkouška i srovnání cen, se jako nejvhodnější materiály pro konstrukci strojních součástí jeví PC, PET a POM. Tyto materiály vykazovaly při všech metodách měření jedny z nejlepších výsledků. Jedinou jejich nevýhodou je vyšší cena, s výjimkou materiálu PET, ten svou cenou patří k levnější skupině komoditních plastů. Možností jak u těchto materiálů ještě zvýšit jejich tlumící vlastnosti je výroba strojních součástí odléváním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORÁK, Z., KRUPKA, F. Fyzika: Příručka pro vysoké školy technického směru. 1st ed. Praha: SNTL/ALFA, 1976. 424 p.
- [2] ZEMAN, V., HLAVÁČ, Z. Kmitání mechnických soustav. 2nd ed. Plzeň: Zápa-
dočeská univerzita v Plzni, 2004. 218 p. ISBN 80-7043-337-X.
- [3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika: Část 2 Mechanika - Ter-
modynamika. 5th ed. Praha: VUTIUM a PROMETHEUS, 1997.
- [4] NESLUŠAN, M., et al. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina:
Žilinská univerzita, 2007.
- [5] LIEMERT, G. - DRÁBEK, F. - ONDRA, J. - VAVŘÍK, I.: Obrábění. Praha,
SNTL 1974. 352 s.
- [6] KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické
nakladatelství CERM Brno, s.r.o., prosinec 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [7] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1998. 177 p. ISBN 80-
214-1262-3.
- [8] BUDA, J. – BÉKÉŠ, J.: Teoretické základy obrábania kovov. Alfa Bratislava,
1997.
- [9] NOVÝ, R.,: Hluk a chvění. Vydavatelství ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-
02246-3
- [10] PUŠKÁR, A.,: Vnútorne tlmenie materiálov. VSDS v Žilíně, 1995
- [11] LUKOVICS, I.: Technické kreslení. SNTL Praha, 1988.
- [12] BÁTORA, J. – VASILKO, K.: Obrobené povrchy – technologická dědičnost,
funkčnost. Trenčianská univerzita v Trenčíně, 2000
- [13] Bruel & Kjaer: Měření chvění. Dostupný z WWW:
<http://www.spectris.cz/sv/download/literatura/Mereni_chveni.pdf>
- [14] Bruel & Kjaer: Vibrační zkoušení. Dostupný z WWW:
<http://www.spectris.cz/sv/download/literatura/Vibracni_zkouseni.pdf>
- [15] Ceny polymerů, 2011. PlasticPortal. <http://www.plasticportal.eu/cs> .

- [16] Obadal, M.: Přednášky z předmětu Konstrukční polymery, UTB Zlín
- [17] Laboratorní cvičení z Environmentální fyziky. *Měření zvukové pohltivosti materiálů* [online]. . Available from
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_lab_02.pdf .

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	Modul pružnosti (MPa)
σ	Napětí (MPa)
η	Činitel vnitřního tlumení (-)
ε	Poměrné prodloužení (-)
I_q	Část intenzity chvění přeměněné na teplo (W/m^2)
I	Celková intenzita chvění (W/m^2)
E_{Im}	Imaginární část modulu pružnosti (W/m^2)
E_{Re}	Reálná část modulu pružnosti (W/m^2)
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu (μm)
Rq	Střední kvadratická odchylka profilu (μm)
Rsm	Střední délka prvku profilu (μm)
Rz	Nejvyšší výška nerovnosti profilu (μm)
Tm	Teplota tání ($^{\circ}C$)
ρ	Hustota (g/cm^3)
Tg	Teplota skelného přechodu ($^{\circ}C$)
a_0	Tloušťka zkušební tyčinky (mm)
b_0	Šířka zkušební tyčinky (mm)
σ_P	Napětí na mezi pevnosti (MPa)
σ_B	Napětí při přetržení (MPa)
ε_P	poměrné prodloužení na mezi pevnosti (%)
ε_B	poměrné prodloužení při přetržení (%)
ε_P	prodloužení na mezi pevnosti (mm)
ε_B	prodloužení při přetržení (mm)
Fmax	síla na mezi pevnosti (N)

n	Počet vzorků v sérii (ks)
x	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
v	Variační koeficient
S_0	Původní průřez zkušební tyčinky (mm^2)
l_0	Původní délka zkušební tyčinky (mm)
l	Délka tyčinky pro přetržení (mm)
α	Pohltivost zvuku

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Mechanický model lidského těla	14
Obr. 2. Prahové křivky slyšitelnosti.....	15
Obr. 3. Příklady signálů kmitavého pohybu	19
Obr. 4. Časový průběh vlastních kmitů	20
Obr. 5. Přehled činitelů vnitřních ztrát η pro kovy a stavební materiály.....	24
Obr. 6. Tlumící pouzdro s olejem	25
Obr. 7. Tlumič Lanchester	26
Obr. 8. Hahnův tlumič vyvrtávací tyče, aplikace Lanchesterova tlumiče	26
Obr. 9. Tlumič s přestavitelnou tlumící hmotou	27
Obr. 10. Aktivní tlumič s automatickou regulací.....	27
Obr. 11. Příčná a podélná drsnost povrchu	28
Obr. 12. Vlnitost	29
Obr. 13. Drsnost povrchu základních způsobů obrábění.....	30
Obr. 14. Význam základních kritérií drsnosti povrchu.....	32
Obr. 15. Profilová a nosná křivka drsnosti povrchu	33
Obr. 16. Nosný podíl drsnosti povrchu.....	33
Obr. 17. Konstrukce piezoelektrického akcelerometru	37
Obr. 18. Frekvenční ohraničení pro jednotlivé způsoby přichycení snímače.....	39
Obr. 19. Celkový pohled na měřící aparaturu.....	47
Obr. 20. Blokové schéma měřícího zařízení.....	48
Obr. 21. Vibrátor Brüel & Kjær 4810.....	48
Obr. 22. Vibrometr EXTECH 407860.....	49
Obr. 23. Porovnání tlumení všech měřených materiálů.....	50
Obr. 24. Porovnání tlumení materiálů s největším útlumem	51
Obr. 25. Porovnání tlumení materiálu POM.....	52
Obr. 26. Porovnání tlumení materiálu PMMA	52
Obr. 27. Porovnání tlumení materiálu PC.....	53
Obr. 28. Porovnání vlivu tloušťky u materiálu PMMA.....	53
Obr. 29. Porovnání vlivu tloušťky u sendvičového materiálu	54
Obr. 30. Zkonstruovaný přípravek pro měření průchodu hluku	55
Obr. 31. Ukázka měřených polymerních desek.....	56
Obr. 32. Hlukoměr VOLTCRAFT SL - 400	56

Obr. 33. Tlumení hluku.....	57
Obr. 34. Měřicí aparatura.....	58
Obr. 35. Princip měření činitele zvukové pohltivosti	59
Obr. 36. Zvuková pohltivost materiálu HDPE	60
Obr. 37. Zvuková pohltivost materiálu PMMA.....	60
Obr. 38. Zvuková pohltivost materiálu PP	60
Obr. 39. Zvuková pohltivost materiálu PC	61
Obr. 40. Zvuková pohltivost materiálu PET.....	61
Obr. 41. Zvuková pohltivost materiálu PE	61
Obr. 42. Zvuková pohltivost materiálu PA66.....	62
Obr. 43. Zvuková pohltivost materiálu PVC	62
Obr. 44. Zvuková pohltivost materiálu POM	62
Obr. 45. Zvuková pohltivost materiálu PTFE.....	63
Obr. 46. Plochá zkušební tyčinka	64
Obr. 47. Zkušební stroj Zwick 145 665	65
Obr. 48. Porovnání pevnosti materiálů	67
Obr. 49. Porovnání modulu pružnosti.....	67
Obr. 50. Komplexní porovnání pevnosti materiálů	68
Obr. 51. Vývoj cen termoplastických polymerů [15]	71
Obr. 52. Vývoj ceny u materiálu PC [15]	71

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Tabulka drsností	30
Tab. 2. Výsledky tlumení hluku.....	57
Tab. 3. Naměřené hodnoty u tahové zkoušky.....	66
Tab. 4. Průměrné ceny plastů ve střední Evropě (Březen 2011) [15].....	70

SEZNAM PŘÍLOH

P I CD s plnou verzí diplomové práce včetně všech naměřených dat