

Analýza frekvenčních závislostí reproduktorových soustav v závislosti na tvaru a materiálu ozvučnice

Jiří Jirásek

Diplomová práce
2014

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav fyziky a mater. inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří JIRÁSEK**
Osobní číslo: **T10347**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Analýza frekvenčních závislostí reproduktorových soustav v závislosti na tvaru a materiálu ozvučnice**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

Rešerše na téma:

1. Zvuk, hluk a vibrace.
2. Akustické vlastnosti materiálů.
3. Reproduktory a reproduktorové systémy.

II. Praktická část

1. Experimentální měření frekvenčních závislostí jednoduchého reproduktorového systému.
2. Experimentální měření vibračních charakteristik jednoduchého reproduktorového systému.
3. Příprava a výroba reproduktorové skříně z vybraných materiálů.
4. Experimentální měření frekvenčních a vibračních charakteristik reproduktorové skříně.
5. Analýza naměřených hodnot a vyhodnocení.
6. Návrh ozvučnice na základě vyhodnocených výsledků.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Smetana C., **Hluk a vibrace, Sdělovací technika, 188 s. (1998). ISBN 80-90 1936-2-5**
2. Toman K., **Reproduktory a reprosoustavy II, 326 s. (2010).**
3. Škvor Z., **Akustika a elektroakustika, 528 s. (2001). ISBN 80-200-0461-0**

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Dušan Fojtů, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

7. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:


30. května 2014

Ve Zlíně dne 13. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan




doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Jirásek Jiří

Obor: Materiálové 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 28.5.2014



.....

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 nevdělečně 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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

ABSTRAKT

Byly sledovány akusticko-mechanické vlastnosti reproduktorových soustav v závislosti na tvaru a materiálu ozvučnice. Byly navrženy a zkonstruovány ozvučnice na bázi partikulárních kompozitních materiálů. U těchto materiálů byly stanoveny mechanické a akustické vlastnosti. Experimentálně byly naměřeny a vyhodnoceny frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku a akcelerace odezvy materiálu. Získané výsledky byly konfrontovány s výsledky naměřenými ve firmě AQ s.r.o. Pro tato měření byly použity ozvučnicové desky z vybraných materiálů s morfologicky modifikovanými povrchy - křemičitý písek v reaktoplastické matrici v kombinaci epoxidové a polyesterové pryskyřice. Byla navržena a zkonstruována reproduktorová soustava s ohledem na nejoptimálnější morfologii povrchu.

Klíčová slova:

Reproduktorová soustava, ozvučnice, hustota, modul pružnosti v tahu, frekvence, zrychlení, křemičitý písek, kompozit, epoxidová pryskyřice, polyesterová pryskyřice, morfologie, akustické vlastnosti

ABSTRACT

There were measured acoustic - mechanical properties of the speaker, depending on the shape and material of the baffle. They were designed and built enclosure - based particulate composite materials. There were determined mechanical and acoustic properties for these materials. The frequency dependence of the sound pressure and acceleration response of the material were experimentally measured and evaluated. The results were compared with results measured in company AQ. Baffle of selected materials with morphologically modified surfaces - quartz sand in a thermosetting matrix in the combination of epoxy and polyester resins were used for these measurements. Speaker was designed and constructed with respect to the optimal surface morphology.

Keywords:

Speaker, baffle, density, tensile modulus, frequency, acceleration, silica sand, composites, epoxy resin, polyester resin, morphology and acoustic properties

Nejprve bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Dušanu Fojtů, Ph.D., bez kterého by tato práce nevznikla. Dále děkuji všem zaměstnancům Ústavu fyziky a materiálového inženýrství za jejich podporu a trpělivost. Jmenovitě pánům Ing. Martinu Juříčkovi Ph.D. a Ing. Petru Smolkovi, Ph.D. za jejich pomoc. Dále panu Ing. Ondřeji Bílkovi, Ph.D. a paní Haně Michalíkové. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu a úsilí, které mi věnovali nejen během studií.

Veliký dík patří také panu Ing. Vladimíru Saporovi za jeho ochotu při konzultacích a za svolení ke zveřejnění výsledků měření provedených ve firmě AQ s.r.o.

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

OBSAH

ABSTRAKT.....	6
ÚVOD.....	11
I TEORETICKÁ ČÁST.....	13
1 ZVUK.....	14
1.1 KMITAVÉ DĚJE.....	14
1.2 HARMONICKÝ OSCILÁTOR.....	20
1.0.1 Energie harmonického oscilátoru.....	21
1.3 TLUMENÉ KMITY.....	22
1.4 ŠÍŘENÍ ZVUKOVÉ VLNY PROSTŘEDÍM.....	23
1.5 ODRAZ ROVINNÉ VLNY.....	23
1.6 STOJATÉ VLNĚNÍ.....	25
1.7 ABSORPCE ZVUKU.....	26
1.8 REZONANCE.....	27
1.9 INTERFERENCE.....	28
1.10 HLUK.....	29
1.10.1 Dělení hluku podle časového průběhu.....	29
1.10.2 Dělení hluku podle původu.....	29
1.10.3 Dělení hluku podle působení.....	29
1.10.4 Měření hluku.....	30
1.1 PARAMETRY CHARAKTERIZUJÍCÍ ZVUK.....	31
1.2 AKUSTICKÉ VELIČINY.....	32
1.3 HLADINY AKUSTICKÝCH VELIČIN.....	33
1.4 HLASITOST ZVUKU.....	34
1.4.1 Citlivost lidského ucha.....	34
1.4.2 Hmatový práh.....	35
1.5 VIBRACE.....	35
1.5.1 Vliv vibrací na člověka.....	36
1.5.2 Měření vibrací akcelerometrem.....	36
2 REPRODUKCE ZVUKU.....	37
2.1 HISTORIE.....	37
2.2 MODERNÍ OZVUČOVACÍ SYSTÉMY.....	37
2.3 VĚRNOST REPRODUKCE.....	38
2.4 PŘÍSTUPY K OZVUČENÍ.....	38
2.4.1 Průmysl.....	38
2.4.2 Kino.....	38
2.4.3 Hudba.....	39
3 REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY.....	40

3.1	DRUHY REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV.....	40
3.2	NÁROKY NA REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY.....	40
3.3	KONSTRUKCE REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV A JEJICH SOUČÁSTI.....	41
3.3.1	Reproduktory - elektroakustické měniče.....	41
3.4	VÝHYBKY.....	47
3.5	REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ.....	47
3.5.1	Nároky na reproduktorové skříně.....	47
3.5.2	Často řešené problémy stavby reproduktorových skříní.....	48
3.5.3	Speciální konstrukční řešení.....	52
3.6	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO VÝROBU REPRODUKTOROVÝCH SKŘÍNÍ.....	56
3.7	REPRODUKTOROVÉ SESTAVY.....	56
4	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ.....	58
4.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	58
4.1.1	Mezní stavy.....	58
4.1.2	Tahová zkouška.....	59
4.2	STANOVENÍ HUSTOTY.....	60
5	REFERENČNÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA AQ.....	62
6	KOMPOZITNÍ MATERIÁLY.....	63
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	64
7	CÍLE PRÁCE.....	65
8	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	66
8.1	PŘÍPRAVA MATERIÁLŮ NA BÁZI PARTIKULÁRNÍHO KOMPOZITU.....	66
8.1.1	Značení vzorků a materiálů.....	66
8.2	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ TAHOVÉ ZKOUŠKY.....	67
8.3	STANOVENÍ HUSTOTY.....	68
8.4	PŘÍPRAVA A VÝROBA REPRODUKTOROVÝCH SKŘÍNÍ.....	69
8.4.1	Výroba formy s pyramidovou úpravou.....	73
8.5	SESTAVENÍ REPRODUKTOROVÉ SKŘÍNĚ.....	75
8.6	OSAZENÍ VÝHYBKAMI A REPRODUKTORY.....	75
8.6.1	Vnitřní prostor reproduktorové skříně.....	76
8.6.2	Povrchová úprava.....	76
8.7	MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH ZÁVISLOSTÍ ZKONSTRUOVANÝCH REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV.....	77
8.8	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ FREKVENČNÍCH ZÁVISLOSTÍ ZKONSTRUOVANÝCH REPRODUKTOROVÝCH SOUSTAV....	79
8.8.1	Vyhodnocení laboratorních měření.....	79
8.8.2	Vyhodnocení měření provedených firmou AQ s.r.o.....	81
9	MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VIBRAČNÍCH CHARAKTERISTIK SLEDOVANÝCH MATERIÁLŮ.....	82

10	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	83
10.1	NÁVRH OZVUČNICE NA ZÁKLADĚ VYHODNOCENÝCH VÝSLEDKŮ.....	84
	ZÁVĚR.....	85
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	92
	SEZNAM TABULEK.....	95
	SEZNAM PŘÍLOH.....	96

ÚVOD

Akustické vlastnosti materiálů sehrávají v posledních desetiletích velmi významnou úlohu v mnoha odvětvích průmyslových aplikací, například v bytové architektuře. Akustická pohoda každého člověka v jeho životním prostředí je velmi důležitá, jak tomu odpovídá vývoj legislativy nejen na území České republiky, ale i Evropské Unie.

S technologickým pokrokem se zvyšuje nejen úroveň reproduktorových soustav, ale také náročnost posluchače. Na základě těchto skutečností se na vývoji reproduktorových soustav také do jisté míry podílí estetické hledisko s nejrůznějšími originálními výstřelky, ovšem s ohledem na ergonomické vlastnosti konečného výrobku, tedy reproduktorové soustavy.

Silně vypovídajícím kritériem celkové kvality a zvukového projevu soustavy je v mnoha ohledech frekvenční charakteristika, neboli závislost hladiny akustického tlaku na frekvenci. Tvar křivky frekvenční charakteristiky dobře vypovídá o akustických vlastnostech, a proto je tato grafická závislost nejčastěji měřeným parametrem.

Současný trend firem zabývajících se výrobou reproduktorových soustav je hledání takových materiálů a takových konstrukčních modifikací, které naplno uspokojí požadavky zákazníka nejen z hlediska kvality, ale také vzhledu. Stále více zákazníků vyžaduje designovou hodnotu, případně zohledňují toto hledisko jako rozhodující při vybírání mezi produkty podobné kvality. Nové materiály navíc umožňují výrobu ozvučnic kvalitních, ale také vzhledově zajímavých. Například kulového, kuželového, nebo šnekovitého tvaru. Výrobci se tomu musí přizpůsobit a navrhovat svoje výrobky s ohledem na všechny požadavky trhu. Tento segment trhu navíc vykazuje velice rychlý růst a zákazníci jsou ochotni za kvalitní vybavení zaplatit čím dál vyšší částky. Toho mohou využít hlavně výrobci audia s vysokým standardem kvality, kteří neváhají vynaložit nemalé finanční prostředky na vývoj materiálů a technologií.

Tato diplomová práce je také příspěvkem k této široké problematice a výsledky naznačí dalším pokračovatelům v řešené problematice jakýsi směr výzkumu. V závěru této práce budou specifikovány a analyzovány vztahy mezi mechanickými vlastnostmi materiálu s jeho frekvenčními charakteristikami.

Introduction

Acoustic properties of materials have been playing a very significant role in many branches of industrial applications over the last few decades - for example in dwelling architecture.

Personal acoustical convenience in one's own living environment appears to be very important, as even the progress in legislation of the Czech Republic and the EU in general indicates.

Not only the quality of the speaker sets, but also the demands of the user increase together with the technological progress. On the grounds of above listed facts, esthetical point of view also influences the development, including several fancy eccentricities, naturally taking the ergonomic qualities of the final product into consideration. Frequency characteristic (dependence of level of the acoustic pressure and frequency) belongs among highly informational criteria of the overall quality and acoustic characteristics of the speaker set. The shape of the frequency characteristic curve is highly reflective of acoustic properties and because of that this graphic dependence is one of the most frequently measured parameters. Current tendency of the companies concerned for production of loudspeakers and audio sets lies in searching for construction modifications, that could fully satisfy customer demands from the point of view of both quality and visual aspects. Increasing number of customers asks for design values, or at least they take into account the design of the speakers when deciding amongst products of the same level. In addition, the new materials allow production of high-quality enclosures of unusual interesting shapes, such as globular, cone or conch-like. It is up to the producers to adapt to the fact and project their products regarding all of the market demands. Besides, this branch of market evinces great progress at the time and the customers are ready to pay more for the first-rate acoustic equipment. This is the chance for producers of high-quality audio sets, who are able to expend large funds on development of new materials and technology. This thesis intends to contribute to this wide topic and to indicate to any potential successors one of the possible courses of the research.

Closing part of the thesis contains specifications and analysis of relations between mechanical properties of a material and its frequency characteristics.

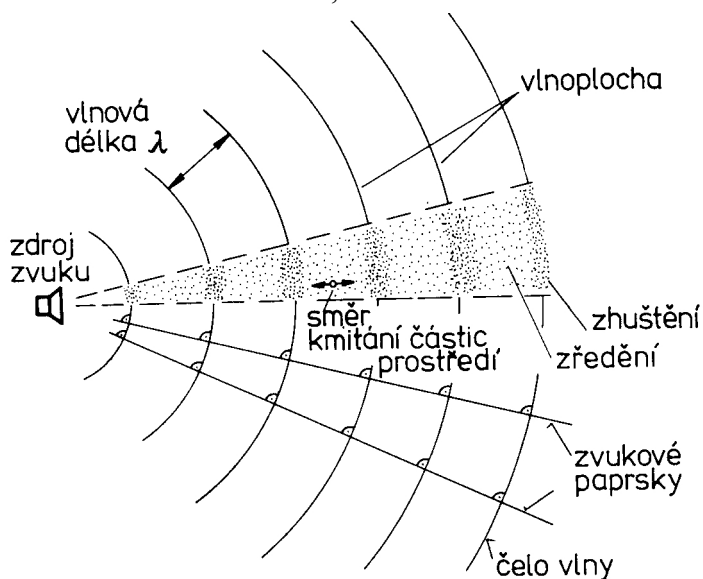
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZVUK

Zvuk můžeme definovat jako mechanické vlnění v plynech, kapalinách a pevných látkách o dané frekvenci. Je to děj, při kterém dochází ke kmitání v látkovém prostředí a šíření zvukové vlny. Dochází ke kmitání postupnému, a to podélnému, nebo pouze v prostředí pevného skupenství též k příčnému. V případě postupného kmitání podélného kmitají částice ve směru osy šíření vlny. V případě postupného vlnění příčného kmitají částice ve směru kolmém na směr šíření vlny. Pokud se proti sobě šíří prostředím dvě vlny o stejné frekvenci a amplitudě, vzniká stojaté vlnění. Takové vlnění nepostupuje prostředím a v takzvaných uzlech, které jsou od sebe vzdáleny $\frac{1}{2}$ vlnové délky, je výchylka trvale nulová. Nalezneme též místa vzdálená $\frac{1}{2}$ vlnové délky, kde je výchylka trvale maximální, tato místa se nazývají kmitny.

1.1 Kmitavé děje

Pokud vnější dynamické síly vyvolají v pružném prostředí kmitání, vzniká následně chvění. Jsou-li částice prostředí uvedeny do mechanického kmitání, hovoříme se o rozruchu

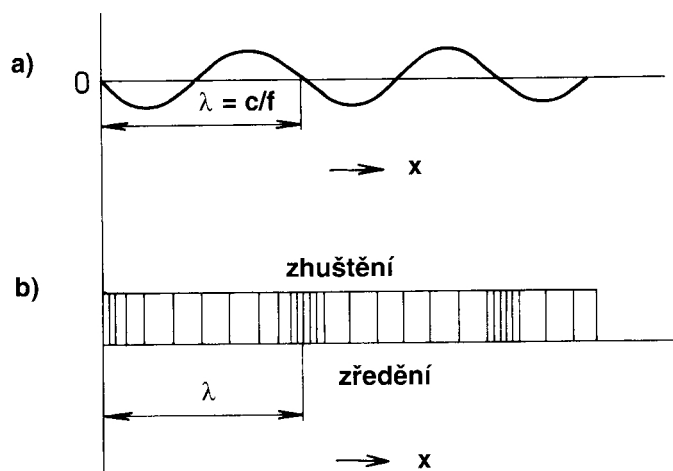


Obr. 1: Šíření zvukové vlny prostředím v podobě vlnoplochy a zvukový paprsek[1]

předávaném pružnými vazbami sousedícím částicím. Šířením rozruchu vzniká vlnění. Místa do kterých dorazí vlnění ve stejném okamžiku je vlnoplocha. Tvar vlnoplochy je dán tvarem, rozměrem a chováním samotného zdroje kmitání.

Místa kam v daném okamžiku vlna dorazila nazýváme čelo vlny. Směry kterými se vlnoplochy šíří se nazývají paprsky. V prostředí ve kterém jsou vlastnosti prostředí směrově nezávislé jsou paprsky kolmé na vlnoplochu. V případě, že nejsou uplatněny žádné vnější vlivy, šíří se paprsky všemi smě-

ry přímočaře od zdroje.

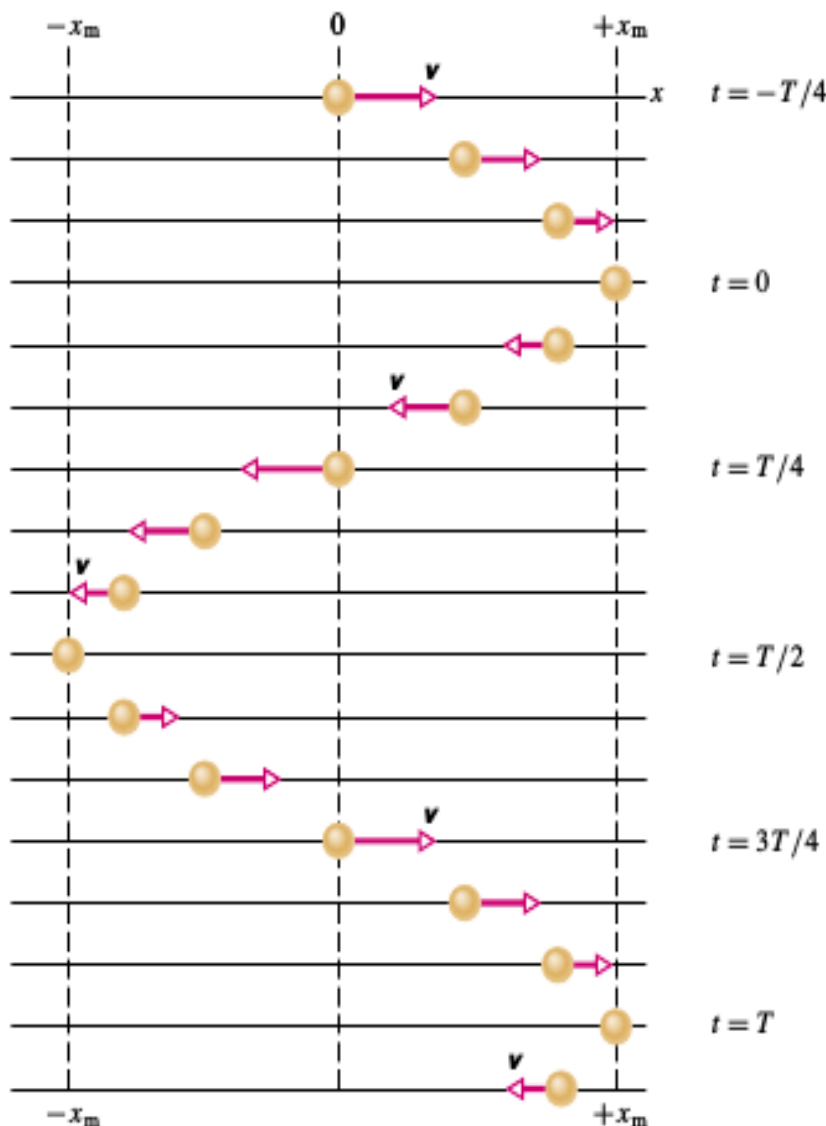


Obr. 2: Grafické znázornění průběhu výchylek příčného a podélného vlnění

a) tuhé prostředí b) kapalné a plynné prostředí [1]

Bez působící dynamické síly jsou částice prostředí v takzvané klidové poloze. Vlivem šíření rozruchu jsou částice vychylovány a oscilují kolem rovnovážné polohy. Tato oscilace je předávána dalším částicím. Částice se mohou vychylovat příčně ke směru šíření, nebo podélně, čímž v určitých částech homogenního pružného prostředí dochází ke zvětšování hustoty částic a v jiných ke snižování. Toto vyvolává například ve vzduchu změny tlaku plynu oproti své statické hodnotě. Superpozicí této proměnné složky složky ku atmosférickému tlaku dostaneme akustický tlak. Jedná se o veličinu skalární, která je udána pouze velikostí.

Pokud částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění, jedná se o vlnění podélné. V případě kmitání částic kolmo na směr šíření jde o vlnění příčné. Zda se prostředím šíří vlny podélné nebo příčné, určují vlastnosti prostředí. Příčné vlny se mohou šířit za předpokladu, že při posuvu jedné vrstvy prostředí vůči druhé vznikají smyková napětí, která navrací vrstvu do původní polohy. Podélné vlnění nastává v případě šíření vlny rozpínáním a stlačováním prostředí. Nejjednodušší případ jednorozměrného postupného vlnění, lze realizovat pružnou bodovou řadou. Postupné příčné vlnění lze přiblížit kmitáním volného konce rozkmitaného provazu. Postupné podélné vlnění rozkmitáním velmi dlouhé spirálové pružiny. Částice prostředí se ovšem ani v jednom případě nepohybují s vlnou. Pouze kmitají kolem rovnovážné polohy.

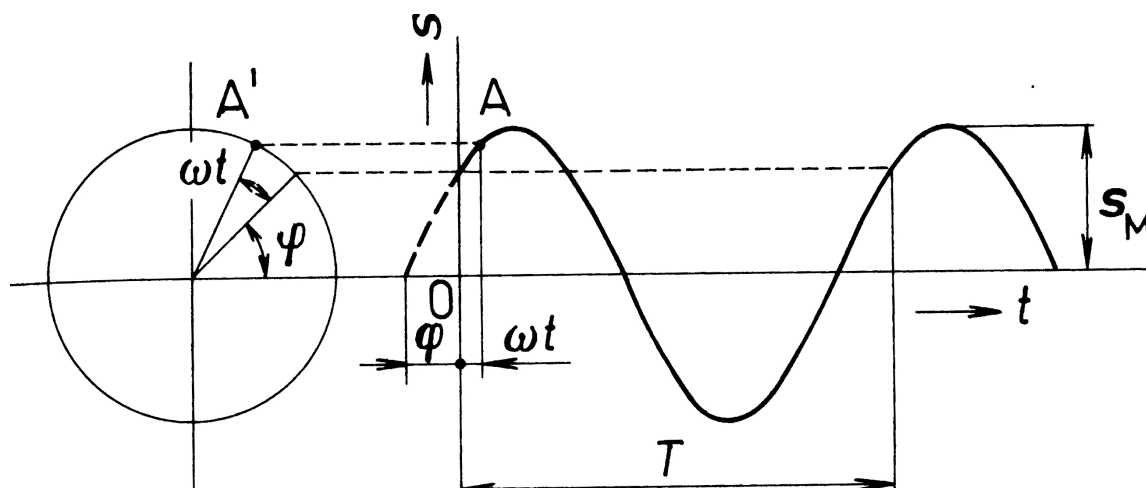


Obr. 3: Znárodnění kmitání částic při průchodu zvukové vlny[2]

Při netlumeném kmitání je amplituda stejná, ale rozdílná je fáze. U příčné vlnění je dále důležitá, rovina kmitů částice. Tato rovina je označována jako rovina kmitů, též polarizační rovina. Příčné vlnění může být několika druhů (torzní, pohybové, povrchové - Rayleighovo vlnění). O vlnění torzní se jedná, pokud na tyč působí budící kroutící moment. Když na tyč působí budící síla kolmá k ose tyče, vznikne vlnění pohybové. V případě proudění média kolem tělesa mohou vzniknout také povrchové vlny.

Pravidelným kmitáním částic kolem rovnovážné polohy vzniká harmonické kmitání, jež má sinusový průběh.

To znamená, že rozložení průběhu výchylky částic v čase dosahují maxima kladných a záporných výchylek přes střední hodnotu se sinusovým průběhem.



Obr. 4: Časové rozvinutí harmonického kmitání[1]

Doba kmitu, neboli perioda, je dána časem mezi dvěma sousedícími kladnými maximálními výchylkami určuje i úhlový kmitočet a frekvenci. Frekvenci rozumíme počet celých kmitů za daný časový úsek. Běžně za jednu sekundu. Pokud v náhodně zvoleném časovém okamžiku počátku sledovaného děje není uvažovaná částice v rovnovážné poloze, má periodický děj počáteční fázový úhel.

Zmiňované veličiny jsou časově vázány vztahy:

$$s = s_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

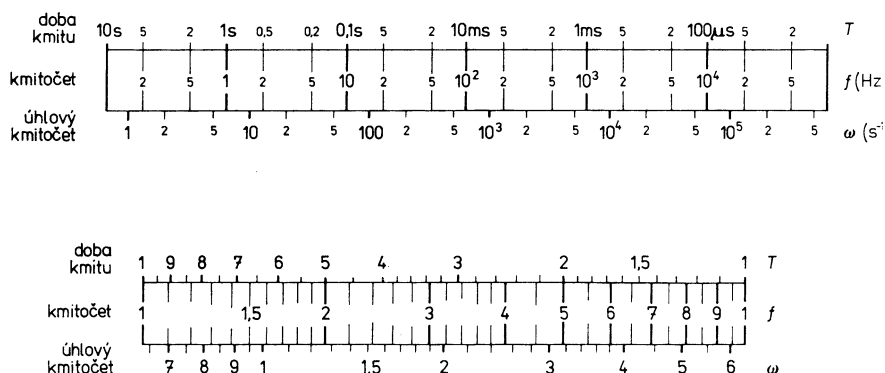
$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

$\omega t + \varphi$ je fáze harmonicky proměnné veličiny. Pokud probíhají dva harmonicky kmitavé děje se shodnou frekvencí, ale různými fázovými úhly, je rozdíl těchto úhlů fázový posun. Mezi ději je možné také najít časový rozdíl, o který jsou posunuty.

$$\Delta t = (\varphi_1 - \varphi_2) / \omega \quad (4)$$

Z nomogramu můžeme vyčíst hodnoty doby kmitu, kmitočtu a kruhového kmitočtu



Obr. 5: Nomogram závislosti doby kmitu, kmitočtu a úhlového kmitočtu (hrubé a jemné hodnoty)[1]

Pohyb částic lze popsat také pohybovou rychlostí a jejím zrychlením

$$\cos \alpha = \sin \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) \tag{5}$$

Podle tohoto vztahu můžeme pro okamžitou rychlost uvést

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_{max} \cos(\omega t + \varphi) = v_{max} \sin \left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2} \right) \tag{6}$$

z čehož plyne, že posuv fáze rychlosti kmitání oproti fázi výchylky je roven

$$\frac{\pi}{2} [rad] = 90^\circ \tag{7}$$

Pro jednoduchý harmonický signál těž lze psát

$$v = j \omega s = j 2 \pi f \cdot s \tag{8}$$

j je imaginární složka výrazu.

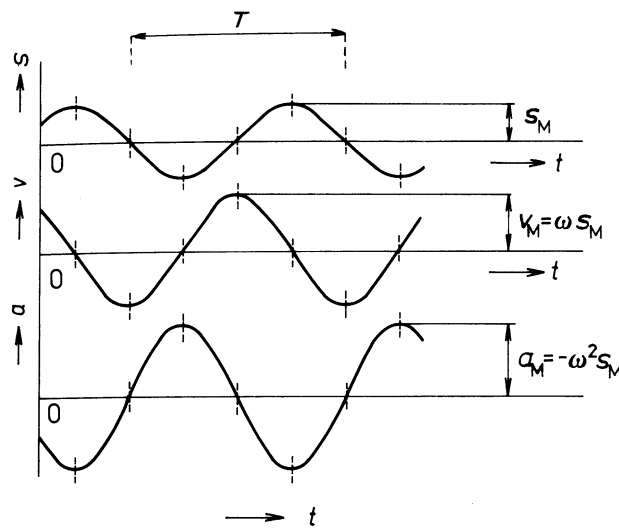
Z Newtonova zákona je zrychlení měřítkem síly působící na částici

$$F = m \cdot a \tag{9}$$

Okamžité zrychlení je dáno časovou změnou rychlosti, a odvozeně druhou derivací okamžité výchylky podle času

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 s}{dt^2} = -\omega v_{max} \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s_{max} \sin(\omega t + \varphi) = a_{max} \sin(\omega t + \varphi) \tag{10}$$

Fáze zrychlení je tedy proti fázi rychlosti posunuta o dalších 90° a proti výchylce o 180°, tzn. že je s ní v protifázi. Podobně jako u rychlosti můžeme pro harmonický signál stanovit - viz obr.6.



Obr. 6: Časové rozvinutí průběhu výchylky, rychlosti a zrychlení hmotného bodu při jeho harmonickém kmitání[1]

$$a = j\omega v = -\omega^2 s \quad (11)$$

a

$$v = \frac{1}{j}\omega a = j\omega s \quad (12)$$

Podobně jako rychlost částic je i zrychlení částic veličinou vektorovou, tedy je udáno velikostí a směrem.

Rychlost kmitání a rychlost šíření vlny jsou dvě nezaměnitelné veličiny. Rychlost šíření vlny je závislá na hustotě, teplotě a dalších veličinách. V homogenním prostředí není rychlost závislá na směru šíření, zatímco v nehomogenním ano.

Tab. 1: Přibližné rychlosti šíření zvuku v různých materiálech[1]

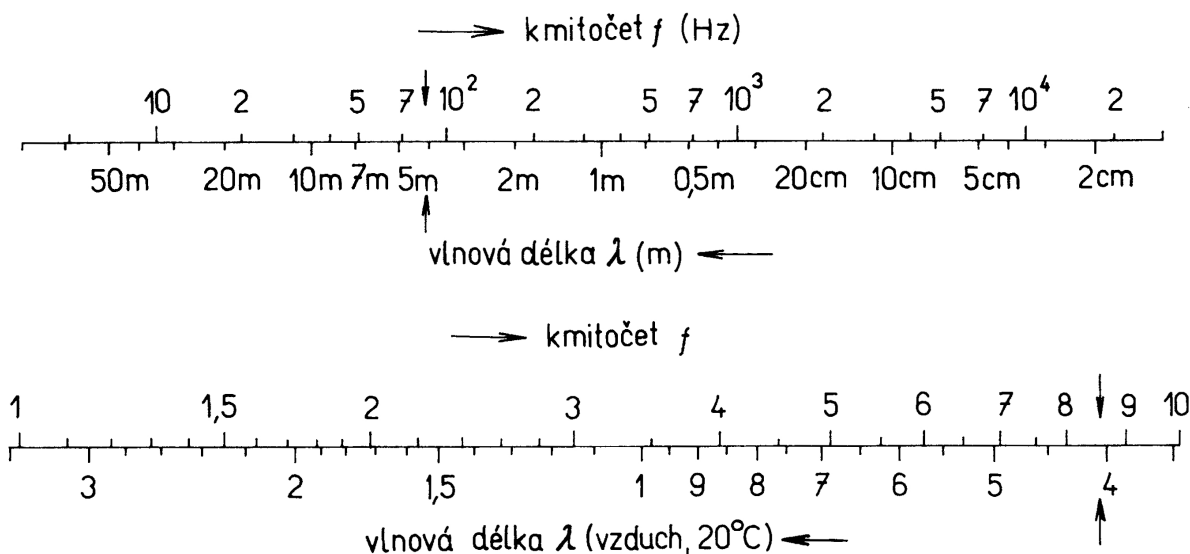
Prostředí	Rychlost [ms ⁻²]	Prostředí	Rychlost [ms ⁻²]
Vzduch	340	Papír	2000
Ocel	5200	Beton	3000
Hliník	4900	Voda	1450
Sklo	5300	PVC	850
Mosaz	3500	Pryž	60

Uvažujeme-li vlnoplochu jako geometrické místo bodů, se současně dosaženými místy maximálního zhuštění a zředění prostředí, jsou nejbližší vlnoplochy při vyzařování jednoduchého signálu s daným kmitočtem od sebe vzdáleny o vlnovou délku, která závisí na rychlosti šíření vlny. V tabulce jsou uvedeny závislosti kmitočtu na vlnové délce ve vzduchu při běžném atmosferickém tlaku a teplotě 20°C.

Tab. 2: Závislost vlnové délky na kmitočtu[1]

Kmitočet [Hz]	Vlnová délka [m]	Kmitočet [Hz]	Vlnová délka [cm]	Kmitočet [Hz]	Vlnová délka [cm]
16	21,3	250	136	4000	8,50
32	10,6	500	68	8000	4,25
63	5,4	1000	34	16000	2,13
125	2,7	2000	17	32000	1,06

Řádové hodnoty převodu kmitočet – vlnová délka jsou uvedeny v horní části nomogramu, přesné hodnoty v dolní části.



Obr. 7: Přepočítání kmitočtu na vlnovou délku (Hrubé a jemné závislosti)[1]

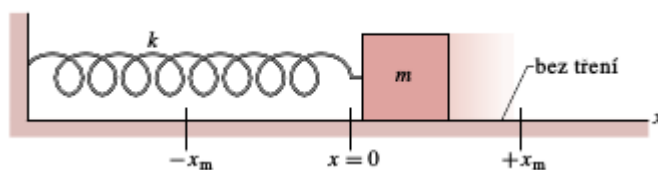
Někdy je také udáváno tzv. vlnové číslo

$$\kappa = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = 2\frac{\pi}{\lambda} \tag{13}$$

[1]

1.2 Harmonický oscilátor

Na pohyb částic vyvolaný zvukovou vlnou je možné hledět jako na harmonický oscilátor. Harmonickým oscilátorem je myšlena soustava pružiny o tuhosti k a tělesa o hmotnosti m . Síla F působící na těleso je pro harmonický oscilátor úměrná první mocnině výchylky.



Obr. 8: Model harmonických kmitů tělesa na pružině[2]

$$F = m \cdot a = -k \cdot x \quad (14)$$

Úhlová frekvence kmitů se řídí vztahem

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (15)$$

a perioda kmitů

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (16)$$

1.0.1 Energie harmonického oscilátoru

Energie harmonického oscilátoru je dána součtem jeho potenciální E_p a kinetické energie E_k .

$$E = E_p + E_k \quad (17)$$

Potenciální energie harmonického oscilátoru je dána výchylkou pružiny a její tuhostí.

$$E_p(t) = \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} kx_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (18)$$

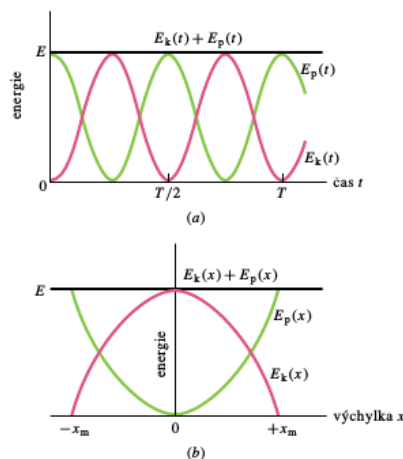
Zatímco kinetická energie je dána hmotností tělesa a jeho rychlostí

$$E_k(t) = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} kx_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \quad (19)$$

Z výše uvedeného vyplývá

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} kx_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} kx_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} kx_m^2 \quad (20)$$

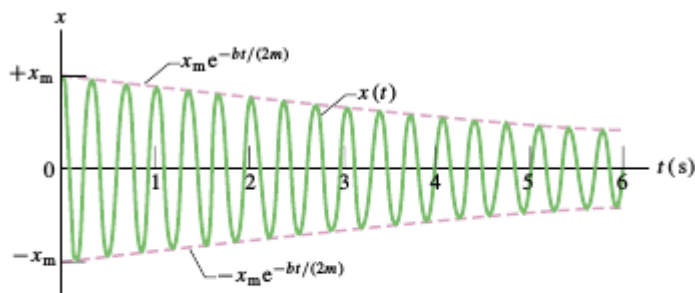
Energie harmonického oscilátoru je tedy nezávislá na čase a je konstantní. [2][3]



Obr. 9: Grafické znázornění harmonického oscilátoru v čase[3]

1.3 Tlumené kmity

Pokud je pohyb částic tlumený vnější silou působící v opačném směru F_b , jedná se o tlumený oscilátor. Energie sestavy se potom v čase snižuje.



Obr. 10: Časová závislost výchylky kmitu tlumeného oscilátoru[2]

Tlumící síla je závislá na rychlosti pohybu a součiniteli útlumu

$$F_b = -bv \tag{21}$$

Síla působící na těleso je poté rovna

$$F_v = -kx - bv \tag{22}$$

Jelikož je rychlost v čase proměnná

$$F_v = -kx - b \frac{dx}{dt} \tag{23}$$

Výchylku lze určit dosazením do druhého Newtonova zákona

$$x(t) = x_m e^{\frac{-bt}{(2m)}} \cos(\omega' t + \varphi) \tag{24}$$

Úhlová frekvence tlumeného oscilátoru je dána výrazem

$$\omega' = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}} \quad (25)$$

1.4 Šíření zvukové vlny prostředím

Zvuková vlna se šíří prostorem v podobě kulové vlnoplochy.

Zvuková vlna se z bodového zdroje šíří rovnoměrně ve všech směrech. Se vzrůstající vzdáleností od zdroje se tedy zvětšuje i plocha. Při zanedbání ztrát vlněním je možné předpokládat, že výstupní výkon zdroje prochází sférickou plochou o poloměru r .

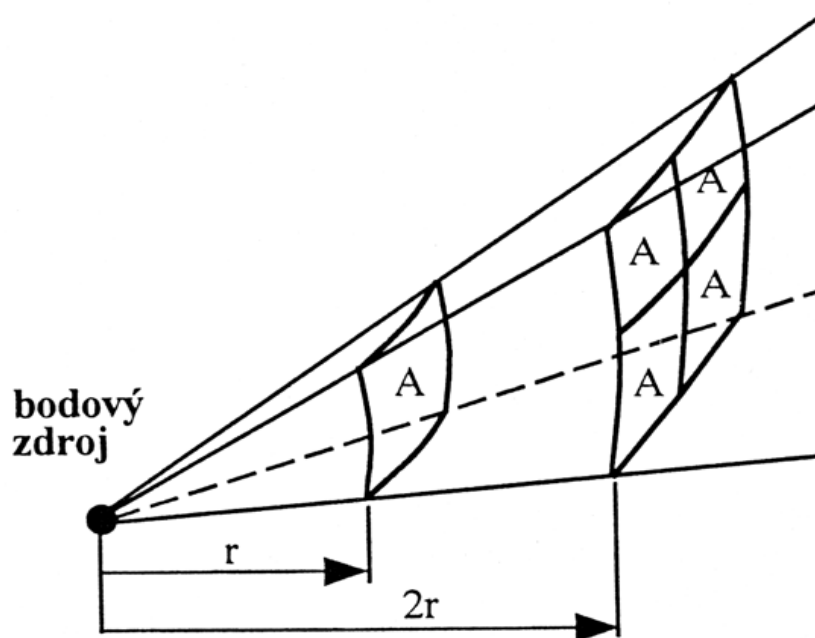
Poté je akustická intenzita této plochy

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (26)$$

Ve vzdálenosti od zdroje $2r$ je

$$I_2 = \frac{P}{4\pi (2r)^2} = \frac{I_1}{4} \quad (27)$$

Akustická intenzita tedy klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje. Z čehož vyplývá pokles akustické intenzity o 6 dB s dvojnásobkem vzdálenosti. [4]



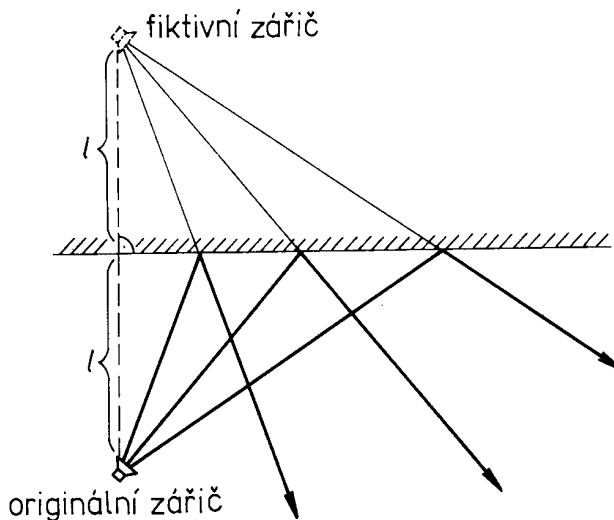
Obr. 11: Šíření zvuku v podobě kulové vlnoplochy[4]

1.5 Odraz rovinné vlny

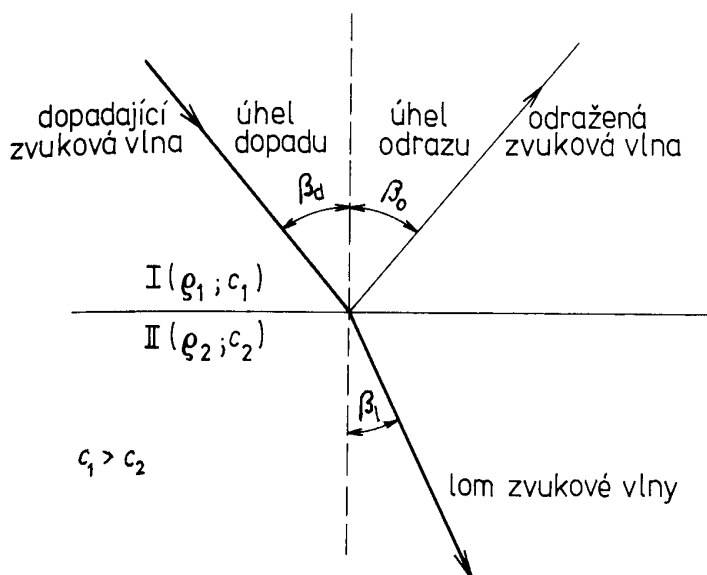
Odraz zvukové vlny nastává, je-li vlnová délka rovna nebo menší než rozměry dopadové plochy ve všech směrech. Jedná-li se o složený signál, dochází k odrazu pouze pro frekvence splňující tuto

podmínku. Intenzita odrazu je závislá na vlastnostech povrchu, na který vlna dopadá a na vlnové délce signálu.

Dochází-li k odrazu od rovinné plochy, řídí se odraz zvukové vlny zákonem odrazu (Úhel odrazu je roven úhlu dopadu). Geometricky lze odraz znázornit metodou zrcadlově obráceného fiktivního zdroje.[1]



Obr. 12: Konstrukce odrazu paprsků pomocí zrcadlového odrazu[1]



Obr. 13: Lom a odraz paprsku na rozhraní s danou hustotou a rychlostí šíření paprsku[1]

Předpokládáme-li vlnu s amplitudou A, a odraženou vlnu s amplitudou B, definujeme komplexní

koeficient odrazu R jako poměr akustického tlaku vlny odražené a dopadající.

$$R = \frac{B e^{jkx}}{A e^{-jkx}} \quad (28)$$

Na rozhraní prostředí ($x=0$) můžeme výraz zjednodušit na

$$R = \frac{B}{A} \quad (29)$$

Za předpokladu spojitosti akustického tlaku i akustické rychlosti na rozhraní prostředí charakterizovanými vlnovými odpory $\rho_0 c_0$ a $\rho_1 c_1$, je akustický tlak v levé části daný tímto vztahem v bodě $x=0$ spojitý, pokud

$$\rho_0(A+B) = \rho_1 A_1 \quad (30)$$

Podobně ze vztahu 51 pro akustickou rychlost dostaneme

$$\frac{1}{c_0}(A-B) = \frac{1}{c_1} A_1 \quad (31)$$

Vyloučením A_1 získáme

$$(A+B) = (A-B) \frac{\rho_1 c_1}{\rho_0 c_0} \quad (32)$$

Koeficient odrazu R je pak roven

$$R = \frac{\rho_1 c_1 - \rho_0 c_0}{\rho_1 c_1 + \rho_0 c_0} \quad (33)$$

Zavedením koeficientu odrazu do rovnice specifické akustické impedance lze odvodit vztah pro tyto dvě veličiny v libovolné poloze odrážejícího rozhraní

$$z = z_0 \frac{1+R}{1-R} \quad (34)$$

a

$$R = \frac{z - z_0}{z + z_0} \quad (35)$$

$z_0 = \rho_0 c_0$ je vlnový odpor prostředí o hustotě ρ_0 a rychlosti šíření vlny c_0

Odrážení rovinné vlny je nejčastější příčinou vzniku proti sobě postupujících sinusových vln.[1]

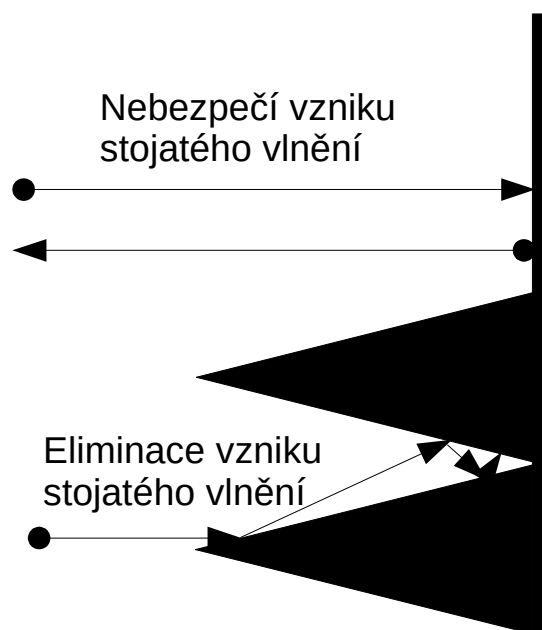
1.6 Stojaté vlnění

Pokud dopadá zvuková vlna na dokonale tuhé rozhraní, je akustická rychlost s ohledem na podmínku spojitosti nulová. Zvuková vlna se odráží se stejnou fází a amplitudou. Vzniká stojaté vlnění. Takové vlnění nepostupuje prostředím $z \rightarrow \infty$ a v takzvaných uzlech, které jsou od sebe vzdáleny $\frac{1}{2}$ vlnové délky, výchylka je trvale nulová. Existují též místa vzdálená $\frac{1}{2}$ vlnové délky, kde je výchylka trvale maximální (kmitny). Vznik stojatého vlnění v reproduktorové skříni je považován za negativní jev. [5]

Běžně je pro minimalizaci stojatého vlnění používáno tlumících materiálů (polyuretan, celulóza, netkané textilie a další), vložených do reproduktorové skříně.

Eliminovat stojaté vlnění je možné též vhodnou morfologií povrchu. Základním předpokladem vzniku stojatého vlnění je odraz zvukové vlny od překážky kolmé na směr šíření vlny.

Například pyramidové výstupky s úhlem svíraným stěnami 45° a méně, tento jev výrazně omezují.



Obr. 14: Porovnání odrazu vlny na rovinné desce a na pyramidových výstupcích

1.7 Absorpce zvuku

Jelikož je šíření zvuku látkou podmíněno pohybem částic prostředí, jejich interakcemi, a tedy přídáváním energie mezi částicemi, dochází k disipaci energie a k úbytku energie zvukové vlny, tedy k absorpci zvuku. To má za následek pokles akustické intenzity. Rychlost tohoto poklesu je silně závislá na vlastnostech prostředí, jako hustota, homogenita, viskozita tekutého prostředí, teplota, tvar a frekvence samotné zvukové vlny.

Akustická absorpce, neboli pohltivost, je dána jako podíl energie absorbované povrchem a energie dopadající na povrch. Definuje ji součinitel pohltivosti α .

$$\alpha = \frac{\text{energie dopadající}}{\text{energie absorbovaná}} = 1 - |R|^2 \quad (36)$$

R je součinitel odrazu definovaný jako podíl akustického tlaku odražené zvukové vlny a zvukové vlny dopadající.

Součinitel pohltivosti α se pohybuje v rozmezí

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (37)$$

Pokud je

$$\alpha = 0 \quad (38)$$

je pohlcená energie nulová, pokud je

$$\alpha = 1 \quad (39)$$

je pohltivost maximální, tedy je pohlcena veškerá energie zvukové vlny. [4]

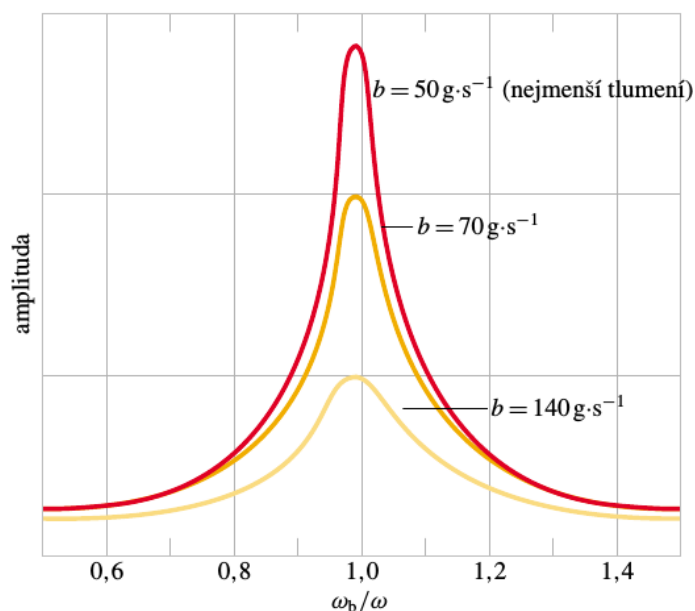
1.8 Rezonance

Rezonance vznikají při vzájemném působení dvou oscilátorů, které kmitají stejnou frekvencí společně ve fázi. Amplituda výsledných kmitů se poté blíží maximu. Útlum je minimální. Rezonance taktéž nastává, pokud dochází v materiálu k nuceným kmitům o frekvenci rovné vlastní frekvenci materiálu. Materiál je opět rozkmitán s maximální možnou výchylkou.

K rezonanci tedy dochází je-li splněna podmínka rovnosti úhlových frekvencí budící síly a rezonátoru

$$\omega_b = \omega \quad (40)$$

Při konstrukci reproduktorových sestav je vznik rezonancí nežádoucí. V ideálním případě leží frekvence vlastních kmitů mimo frekvenční rozsah reproduktorů. Reálně je snaha o co nejmenší amplitudu rezonancí a o co nejvyšší rezonanční frekvenci.[2]



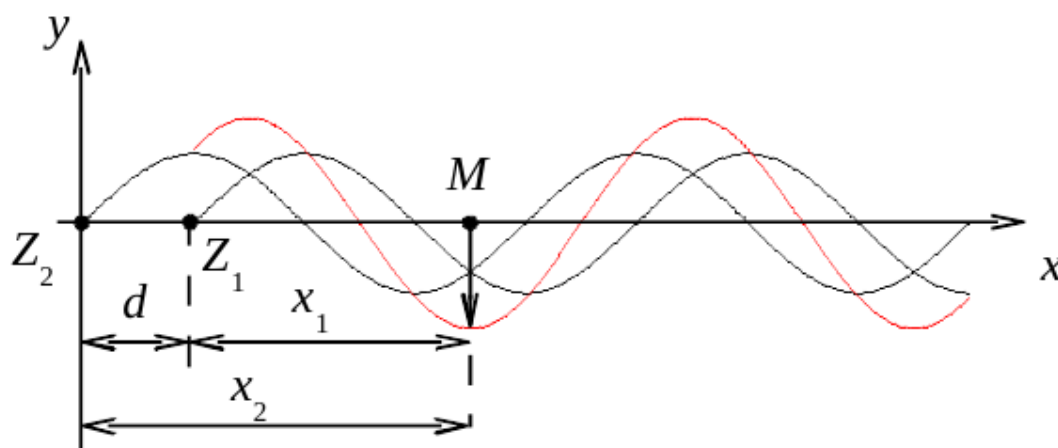
Obr. 15: Příklad nárůstu amplitudy při rezonanci[2]

1.9 Interference

Interferencí zvukových vln je myšleno vzájemné překrývání dvou a více zvukových vln při průchodu pružným prostředím. Při interferenci může docházet ke jejich zesilování, nebo zeslabení.

Modelovým příkladem může být interference dvou vln se stejnou fázovou rychlostí, stejným směrem šíření, mající stejnou amplitudu a vlnovou délku.

Výsledkem interference vln je vlna vzniklá jejich superpozicí.



Obr. 16: Interference dvou vln[6]

Ve vzdálenosti x od zdroje vlnění v čase

$$t=0 \quad (41)$$

s fází

$$\varphi = 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (42)$$

Pro první vlnu

$$\varphi_1 = \frac{2\pi x_1}{\lambda} \quad (43)$$

Pro druhou vlnu

$$\varphi_2 = \frac{2\pi x_2}{\lambda} \quad (44)$$

Výsledkem je

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d \quad (45)$$

Interferenční maximum leží v

$$d = 2k \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (46)$$

1.10 Hluk

Hlukem se rozumí jakýkoliv zvuk, který negativně ovlivňuje chování, nebo vnímání člověka. Hluk vydávaný zdrojem můžeme charakterizovat podle jeho časového průběhu, původu a působení na člověka.

1.10.1 Dělení hluku podle časového průběhu

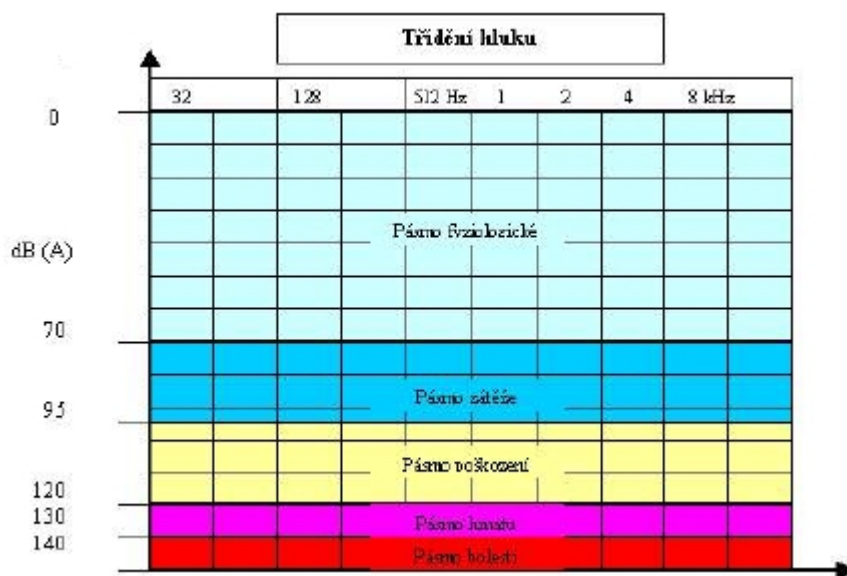
- Hluk ustálený - hladina akustického tlaku nekolísá o více než 5 dB
- Hluk proměnný - hladina akustického tlaku kolísá o více než 5 dB
- Hluk impulsivní - krátkodobé impulsy o trvání max. 2s s rozestupy do 10s
- Hluk vysokofrekvenční - hluk o vysokých frekvencích často až za prahem slyšitelnosti

1.10.2 Dělení hluku podle původu

- Mechanický hluk - je způsoben mechanickým kmitáním těles o frekvenci odpovídající slyšitelnému spektru. Často je také zesilován přenosem na další konstrukce. Z toho důvodu je důležité například stroje vhodně izolovat od dalších konstrukcí. Častým zdrojem tohoto hluku jsou rotační části, jako například hřídele motorů, turbíny. Dále ventilové rozvody, spalovací motory, třecí plochy, ložiska, vibrační stroje ...
- Aerodynamický hluk - vzniká při obtékání těles plynem, pohybem plynů vysokou rychlostí, pulzujícím prouděním, nebo hořením a rozpínáním plynů. Zdrojem vysokých hladin zvuku je hlavně turbulentní proudění, které bývá často spojeno se vznikem mechanického hluku, pokud dojde k rozkmitání konstrukce.

1.10.3 Dělení hluku podle působení

- Pásmo fyziologické - do 69 dB
- Pásmo zátěže - 70 - 94 dB
- Pásmo poškození - 95 - 119 dB
- Pásmo hmatu - 120 - 129 dB
- Pásmo bolesti - od 130 dB



Obr. 17: Hladiny akustického tlaku odpovídající daným pásmům[7]

[1]

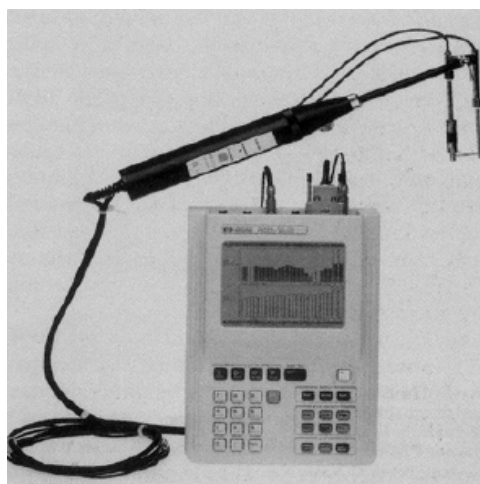
1.10.4 Měření hluku

Intenzita hluku je měřena hlukoměry, jejichž snímacím prvkem je intenzitní sonda, která se skládá ze dvou mikrofonů. Důležité je přesné fázování kanálů. Intenzitní sonda měří gradient tlaku, který je úměrný rychlosti.

Akustickou intenzitu vypočítáme podle vzorce

$$I = -\frac{p_2 + p_1}{2\rho \Delta l} \int_0^t (P_2 - P_1) dt \tag{47}$$

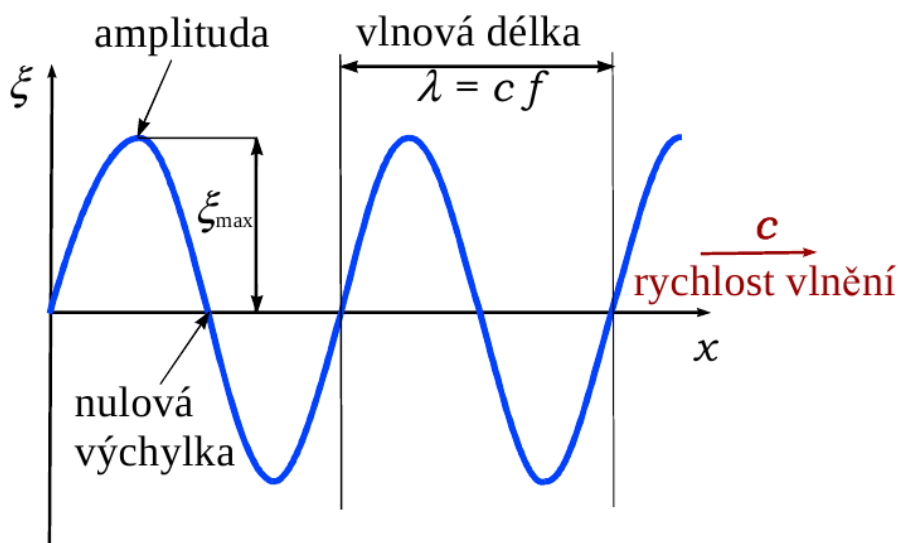
[8]



Obr. 18: Hlukoměr[8]

1.1 Parametry charakterizující zvuk

Zvukovou vlnu popisují následující parametry



Obr. 19: Sinusový průběh zvukové vlny[9]

- Vlnová délka - Vlnová délka je délka periodicky opakujícího se úseku vlny.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (48)$$

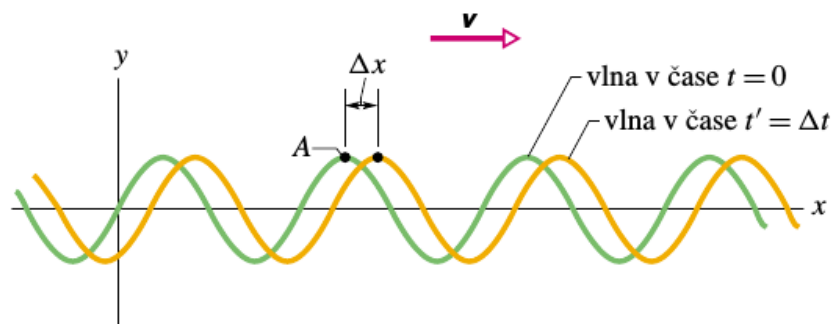
- Frekvence - Frekvencí rozumíme počet vlnových délek, které vlna urazí za 1 sekundu.
- Mezi vlnovou délkou, frekvencí a rychlostí vlnění figuruje vztah

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (49)$$

- Úhlová frekvence - Udává frekvenci vynesenu na jednotkou kružnici

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (50)$$

- Rychlost vlnění - Rychlost vlnění vyjadřuje rychlost šíření vlny daným prostředím.



Obr. 21: Šíření zvukové vlny prostředím[2]

$$v = v_{max} \cdot \cos(\omega t) \quad (51)$$

- Amplituda - Amplitudou nazýváme maximální výšku výchylky zvukové vlny

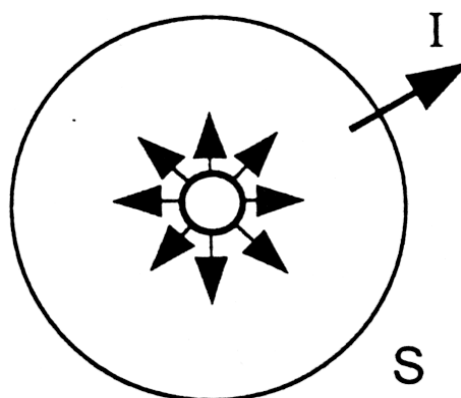
- Akustická impedance - Akustická impedance je definována jako poměr akustického tlaku a akustické rychlosti

$$z = \frac{p}{v} \quad (52)$$

1.2 Akustické veličiny

- Akustická energie - Energií vyzařovanou zdrojem ve všech směrech je možné spočítat jako součin střední akustické intenzity a celkového povrchu imaginární měřící plochy kolem zdroje, podle vztahu

$$W = I \cdot S \quad (53)$$



Obr. 22: Znárodnění šíření energie v podobě kulové vlnoplochy[4]

- Akustický výkon - Akustickým výkonem P rozumíme energii zvukových vln vyzařenou zdrojem, případně prošlou plochou nebo dopadající na plochu za jednu sekundu. Jedná se tedy o výkon přenášený akustickým vlněním.

Okamžitá hodnota akustického výkonu je definována vzorcem

$$P_{(t)} = \frac{dE}{dt} \quad (54)$$

- Měrný akustický výkon - Podíl akustického výkonu a plochy, kterou akustický výkon prochází, se nazývá měrný akustický výkon a platí pro něj vztah

$$N_{(t)} = \frac{dP}{dS} \quad (55)$$

- Časová střední hodnota akustického výkonu - Časovou střední hodnotu akustického výkonu získáme časovou integrací po dobu jedné periody a vydělením periody.

$$\bar{P}_{(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{(t)} dt \quad (56)$$

- Akustická intenzita - Akustickou intenzitu můžeme popsat jako střední hodnotu měrného akustického výkonu $N_{(t)}$, nebo také I

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N_{(t)} dt \quad (57)$$

- Objemová hustota akustické energie - Objemová hustota akustické energie je definována jako poměr střední časové energie vlny, která se nachází v objemu dV , k témuž objemu.

$$w = \frac{d\bar{E}}{dV} \quad (58)$$

- Akustický tlak - Pro akustický tlak platí vztah

$$p = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho_0 \omega |A| \sin(\omega t - kx + \varphi_A) \quad (59)$$

- Akustická rychlost - Akustická rychlost se řídí vztahem

$$p = \rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \rho_0 \omega |A| \sin(\omega t - kx + \varphi_A) \quad (60)$$

1.3 Hladiny akustických veličin

Jelikož vnímání intenzity zvuku lidským uchem odpovídá podle Weber - Fechnerova zákona logaritmickému měřítku, byly zavedeny hladiny akustických veličin.

Tyto hladiny jsou dány logaritmickým poměrem měřené veličiny ku referenční hodnotě, jejíž jednotkou je Bel. V praxi je používána její desetinová hodnota decibel [dB].

Obecně

$$H = \log \frac{V}{V_0} \quad (61)$$

- Hladina akustické intenzity - Hladina akustické intenzity v decibelech je dána jako logaritmický poměr akustické intenzity ku referenční hodnotě I_0 , která byla stanovena na $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (62)$$

- Hladina akustického tlaku - Hladina akustického tlaku je dána jako logaritmický poměr akustické intenzity ku referenční hodnotě I_0 , která byla stanovena na $p_0 = 20^{-5} \text{ Pa}$.

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (63)$$

- Hladina akustického výkonu - Hladina akustického tlaku je dána jako logaritmický poměr akustické intenzity ku referenční hodnotě I_0 , která byla stanovena na $P_0 = 10^{-12}$ W

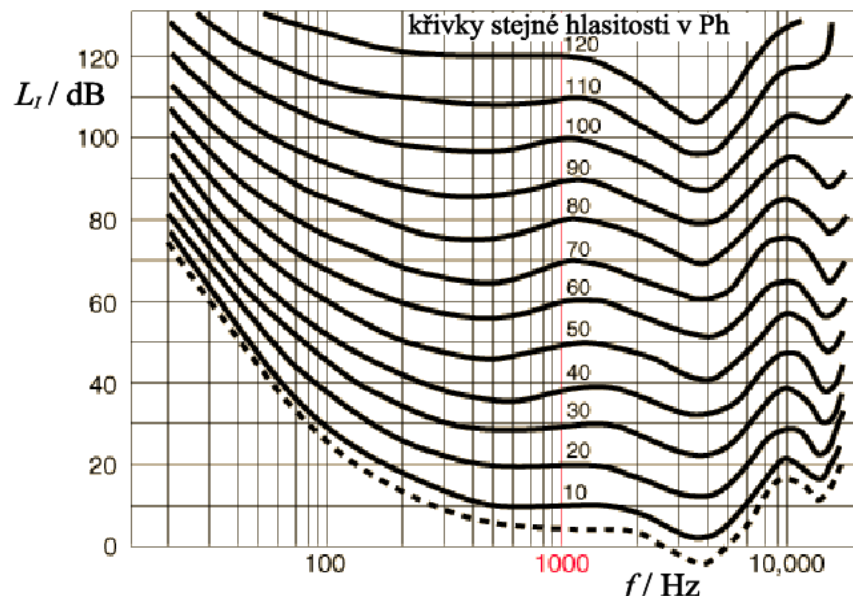
$$L_p = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad (64)$$

[9]

1.4 Hlasitost zvuku

Hlasitost zvuku je subjektivně vnímaná hlasitost závislá na frekvenci. Pokud chceme docílit stejné pocitové hlasitosti zvuku při různé frekvenci, je nutné měnit intenzitu zvuku. Výsledkem zápisu jsou pak Barkhausenovy křivky. Pokud tón o frekvenci 1 kHz splňuje podmínku rovnosti hladiny hlasitosti a hladiny akustického tlaku, pak se jedná o takzvaně referenční zvuk.

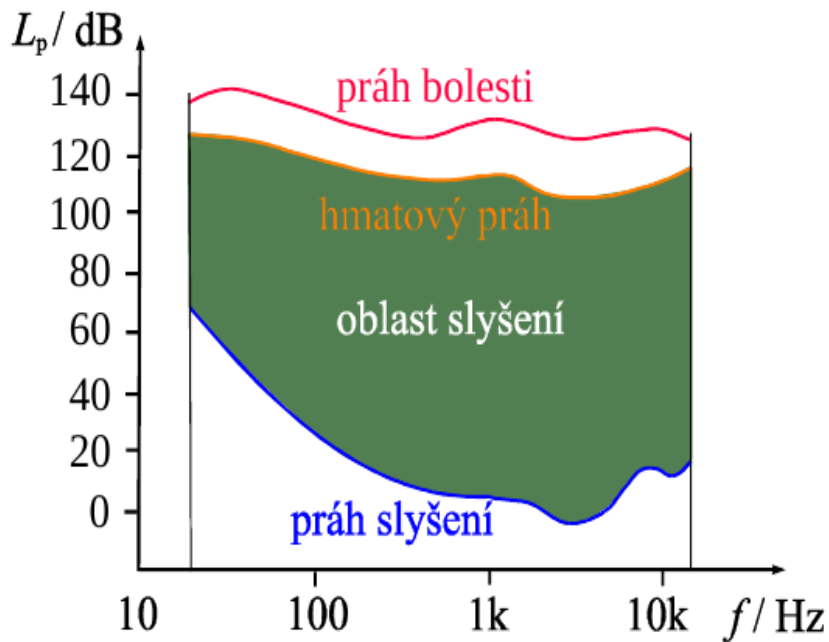
[1]



Obr. 23: Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti[9]

1.4.1 Citlivost lidského ucha

Lidské ucho je jak vidno různě citlivé na různé frekvence, a tudíž je i různě vnímá s ohledem na práh slyšitelnosti a práh bolesti. Zatímco práh bolesti se pohybuje na všech frekvencích v podobných hodnotách akustického tlaku, práh slyšitelnosti je na frekvenci silně závislý.



Obr. 24: Hranice slyšitelnosti, hmatový práh a práh bolesti[9]

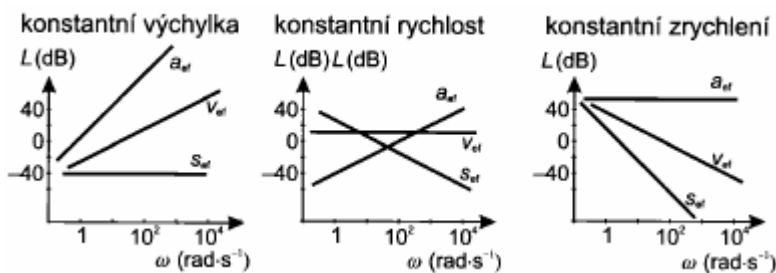
1.4.2 Hmatový práh

Jako hmatový práh je označena nejnižší hladina akustického tlaku při dané frekvenci, při které již v uchu nastává hmatový vjem.

1.5 Vibrace

Vibrace jsou druhem mechanického kmitání, podobně jako rázy a vlny. Pokud těleso nebo body tělesa vykonávají oscilační pohyb kolem rovnovážné polohy těleso vibruje. U vibrujícího tělesa můžeme určit frekvenci a amplitudu vibrací. V reálném případě však dochází k vibracím těles na více frekvencích s různou amplitudou. Podobně jako u zvuku můžeme měřit frekvenční závislosti. Tyto závislosti můžeme měřit za konstantní výchylky, rychlosti, nebo frekvence - viz. obr. 25.

[8]



Obr. 25: Frekvenční závislosti základních veličin vibrací[8]

1.5.1 Vliv vibrací na člověka

V životním prostředí se vyskytuje mnoho zdrojů vibrací. Může se jednat o přírodní zdroje, nebo zdroje vibrací spojené s lidskou činností. Zdroje vibrací spojené s lidskou činností mohou být pro člověka nebezpečné, protože dosahují vysokých amplitud. Obzvláště nebezpečné mohou být vibrace přenášené na člověka z výrobních zařízení, těžkých strojů, nebo stavební techniky. Nadměrné vystavení člověka vibracím může vést k závažným zdravotním problémům. Například k nedokrvení částí těla, bolestem zad a kloubů nebo bolestem hlavy.

1.5.2 Měření vibrací akcelerometrem

Vibrace se měří na přístrojích měřících výchylku, rychlost nebo zrychlení

- snímače výchylky - bezdotykové sondy
- snímače rychlosti - velometry
- snímače zrychlení - akcelerometry

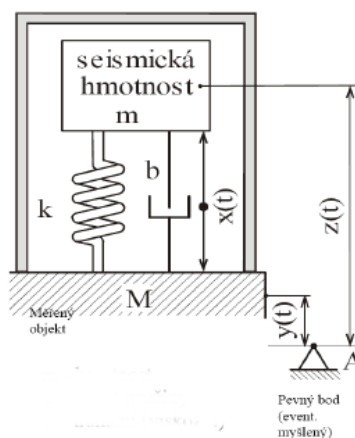
Pokud měříme energii vibrací, je výhodné přepočítat zrychlení na rychlost a provést sumaci, protože průměrná potenciální a průměrné kinetická energie jsou shodné a platí pro ně

$$E = m \cdot v_{ef}^2 \quad (65)$$

Většinou se pro měření používají akcelerometry měřící zrychlení. Další veličiny je potřeba přepočítat podle následujících vztahů.

$$s(t) = \int v(t) dt \quad (66)$$

$$v(t) = \int a(t) dt \quad (67)$$



Obr. 26: Obecné schéma akcelerometru[]

Měřením výchylek $x(t)$ vůči pouzdru senzoru je vyhodnocováno zrychlení. [8]

2 REPRODUKCE ZVUKU

Reprodukcí zvuku je možné považovat za vytváření zvukové vlny odpovídající dané předloze. Nemusí se tedy nutně jednat o duplikování konkrétního záznamu za pomoci snímání signálu a následné reprodukce. Do reprodukce zvuku je možné počítat také záznam zvuku v psané podobě, nebo v podobě zapamatování si podoby zvuku a následné reprodukce.

2.1 Historie

Snahy lidstva o reprodukci zvuku sahají až do pravěku. Již v této rané době lidského vývoje byly prokazatelně užívány první primitivní hudební nástroje. Šlo o dřevěné a kostěné píšťaly nebo jednoduché perkusní nástroje. Hudba této doby byla nejspíše pouze rytmická, bez melodie. Sloužila zřejmě k náboženským účelům.

Ve starověku a středověku došlo k významnému rozvoji hudby. Hudební nástroje prošly zdokonalením a nedílnou součástí se stal také zpěv. Z této doby pocházejí první psané zmínky o hudbě a záznamy doprovodných textů písní.

Revoluci v reprodukci zvuku vyvolala záznamová zařízení. Jednalo se zprvu o mechanické systémy, jež byly spíše automatickými hudebními nástroji. Jednalo se o nepřímý záznam, například kuličky na válci, které při pohybu vyvolaly slyšitelné vibrace. Za první přímé záznamové zvukové zařízení je považován fonograf. Záznam zvuku je zapisován přímo na záznamové médium (váleček) pomocí snímače a zapisovače. Jedná se o zápis spojitého signálu v podobě drážky na nosiči. Principem zpětné reprodukce zvuku je rozkmitání hrotu jehly, která je v kontaktu s médiem odpovídající frekvence a následné zesílení zvuku. Modernějším zařízením tohoto typu je gramofon. Záznam probíhá na gramofonovou desku. Převodníkem na zvukový signál byl původně opět hrot jehly a zesilovač v podobě hubice gramofonu. Moderní gramofony nezesilují přímo slyšitelné vlnění jehly, ale elektromagneticky snímají výchylku jehly a pomocí elektroniky přenášejí signál do reproduktorů.

Nejmodernější záznamová zařízení převádějí signál na digitální informaci. To přináší změnu celkového pohledu na záznam zvuku. Nespojitě zapsaný signál přináší ztrátu kvality, ale také možnost dalších úprav a hlavně možnost záznamu velkého objemu zvukových dat na malý nosič.[10]

2.2 Moderní ozvučovací systémy

Základ moderního ozvučovacího systému tvoří několik komponent. Prvním z nich je záznamové médium. Jedná se často o digitální média, ale také o gramofonové desky nebo magnetické pásky. Další nutnou součástí je čtecí zařízení. Může se jednat o digitální zařízení, gramofon nebo magnetofon. Pokud není záznam v podobě spojitě křivky a je potřeba získaný signál převádět, musí být systém opatřen DAC (digital analog converter) převodníkem. Zpracovaný signál zesiluje předzesi-

lovač a zesilovač, který jej distribuuje k samotným reproduktorům. Ty zajišťují samotnou reprodukci zvuku.

2.3 Věrnost reprodukce

Trendem v moderním ozvučení je přibližování věrné reprodukci. Tento termín je velice často používaný pro jednoduché vyjádření kvality ozvučovacích systémů. O věrné reprodukci můžeme mluvit jako o reprodukci zvuku v co nejbližší podobě originálu. Takový přístup je jednoznačně správný zřejmě pouze pro výzkumné účely. Z hlediska poslechu hudby nebo zvukové stopy filmu není hledisko jednoznačné. Žádná součást celé nahrávací a reprodukční sestavy není ideální, a proto lze dosáhnout vysoké podobnosti výstupního signálu se vstupním pouze za pomoci dalších úprav. Většinou se jedná o elektronické vyhlazení signálu nebo speciální konstrukční prvky. Hudební signál je ovšem velice komplikovaný a takovéto úpravy mají vliv na subjektivní dojem. Ztrácí se často dynamika, harmonické tóny a zvuk je takzvaně plochý. „Líbivost“ hudebního projevu sestavy je navíc subjektivní dojem ovlivněný mnoha faktory a osobními preferencemi. Pro různé styly hudby je vhodné různé ladění. Například pro poslech klasické hudby volíme reproduktory s vyrovnanou charakteristikou, zatímco pro heavy-metal je vhodné ladění s výraznými basy a výškami. Často proto zasahujeme do konečného projevu equalizerem, protože žádná poslechová místnost také není ideální a ucho nevnímá všechny frekvence stejně. Z toho vyplývá, že čistě technicky dobré řešení, kdy se vstup přibližuje výstupu, nemusí být vždy nejlepší.

2.4 Přístupy k ozvučení

K ozvučení můžeme přistupovat s odlišnými nároky. Podle použití jsou kladeny rozdílné nároky na kvalitu, hlasitost i konstrukci ozvučovacího systému.

2.4.1 Průmysl

Průmyslové ozvučovací systémy nevyžadují vysokou kvalitu reprodukováného zvuku, ale to neznamená, že by na ně nebyly kladeny vysoké nároky. Jedním z nich je dostatečný výkon. Hlavním účelem těchto systémů je přenos důležité informace, který musí být vždy dostatečně hlasitý a rozpoznatelný. Například požární hlásiče, interní komunikace nebo bezpečnostní pokyny. Z tohoto důvodu je též velice důležitá spolehlivost. Jedná se tedy o systémy s vysokým krytím proti povětrnostním vlivům, teplotám, prachu a podobně.

2.4.2 Kino

Komerčně významným odvětvím ozvučení je zábavní průmysl. Ať se jedná o hudební, či filmové odvětví. Ozvučení filmů je založeno na celkovém dojmu spojení obrazového a zvukového vjemu.

Je tedy kladen důraz hlavně na dostatečný výkon, výrazné basy a prostorový zvuk.

2.4.3 Hudba

Reprodukce hudby je jedním z nejproblémovějších odvětví reprodukce zvuku z hlediska kvality samotné reprodukce. Posluchač vnímá samotný zvuk a soustředí se pouze na něj. Všimá si tedy více detailů a drobných chyb. Jedná se navíc o subjektivní dojem a tudíž je zapotřebí nejen technická kvalita, ale též „líbivost“ projevu.

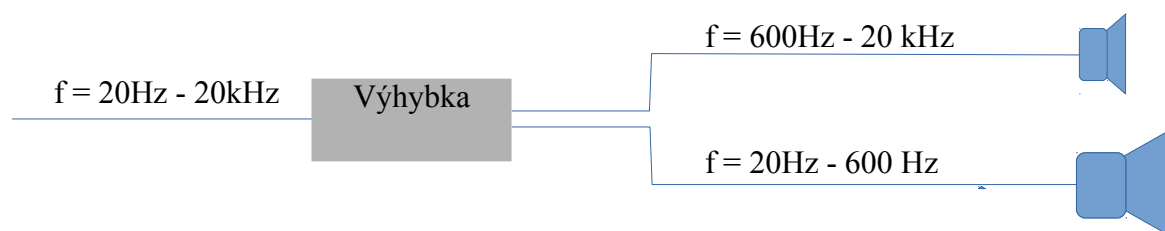
Zde dochází mnohdy k rozporům v hodnocení kvality a směru, jakým se výrobci vydávají. Většinou mladší a moderní výrobci audiosystémů se snaží o vysokou technickou kvalitu. Jejich základním kritériem pro hodnocení kvality je změna vstupního signálu na výstupu. Opravdu špičkoví a zkušení výrobci berou technickou kvalitu jako jedno z kritérií. Dále se zaměřují ještě na celkový hudební dojem. Zaměstnávají zkušené „ladiče“, kteří rozhodují o dodatečných změnách v produktech a jejich nastaveních. Takové produkty jsou ovšem často velice drahé, ale poskytují opravdový zážitek z hudby. Často také nabízejí jen několik produktových řad. Celá řada bývá složena z technicky velice podobných nebo totožných produktů, ovšem v několika typech ladění. Liší se charakterem zvuku. Na poslech klasické hudby je třeba reproduktorů vyvážených, které neobtěžují přebytkem basů a vysokých tónů. Opačné ladění je vhodné pro dynamickou hudbu (rocková, metal). Příznivci elektronické hudby požadují často vysoké množství basů, tedy i takové ladění kvalitních reproduktorů někteří výrobci nabízejí. Jedná se většinou o moderní výrobce.

3 REPRODUKTOROVÉ SOUSTAVY

Reproduktorové soustavy se skládají z několika základních částí. Jsou to: ozvučnice, reproduktor, u vícepásmových soustav výhybka, tlumící prvky a spojovací materiály. Každý tento prvek má zásadní vliv na kvalitu celkové reprodukce. Jednotlivé komponenty je důležité dobře volit s ohledem na účel, k jakému bude soustava sloužit. Například ozvučnice může mít nejen funkci přenosu vlny, ale také tlumícího boxu. Pak je nutné volit jiné materiály.

3.1 Druhy reproduktorových soustav:

Jednopásmové - Jednopásmové reproduktorové soustavy obsahují pouze jeden reproduktor (nebo více reprodukcí stejné spektrum signálu), většinou širokopásmový. Jsou konstrukčně jednoduché a je možné je zapojit přímo na koncový zesilovač.



Obr. 27: Zapojení vícepásmové reproduktorové soustavy

Vícepásmové - Vícepásmové reproduktorové soustavy obsahují více reproduktorů, které přenášejí různé spektrum frekvencí. Distribuci signálu o daném spektru (pásmu) zajišťují výhybky. Ty přivádí dané pásmo k příslušnému reproduktoru. Standardně jsou vyráběny reproduktorové soustavy dvou a tří pásmové. Výhodou tohoto uspořádání je, že reproduktory reprodukcují pouze frekvenční pásma, které dokáží přenést nejlépe a jsou pro ně konstruované. Nevýhodou je konstrukční složitost a nutnost použití kvalitních výhybek. Frekvenční pásma jednotlivých reproduktorů mohou na sebe navazovat, nebo se částečně překrývat.

3.2 Nároky na reproduktorové soustavy

Na reproduktorové soustavy jsou kladeny vysoké nároky obzvláště při reprodukci hudby. Mohou být ovšem rozdílné, jde-li o soustavy pro domácí poslech, o profesionální ozvučení například koncertních sálů nebo nahrávacích studií.

Reproduktorové soustavy pro domácí poslech nemusejí dosahovat takových výkonů jako profesionální. Důležitější je celkově dobré podání zvuku při relativně nižším zatížení, veliký frekvenční rozsah a často také přijatelné rozměry.

Na profesionální reprosoustavy jsou kladeny mnohem větší kvalitativní nároky z hlediska konstrukce a životnosti při vysokém zatížení. Naopak není kladen důraz na design.

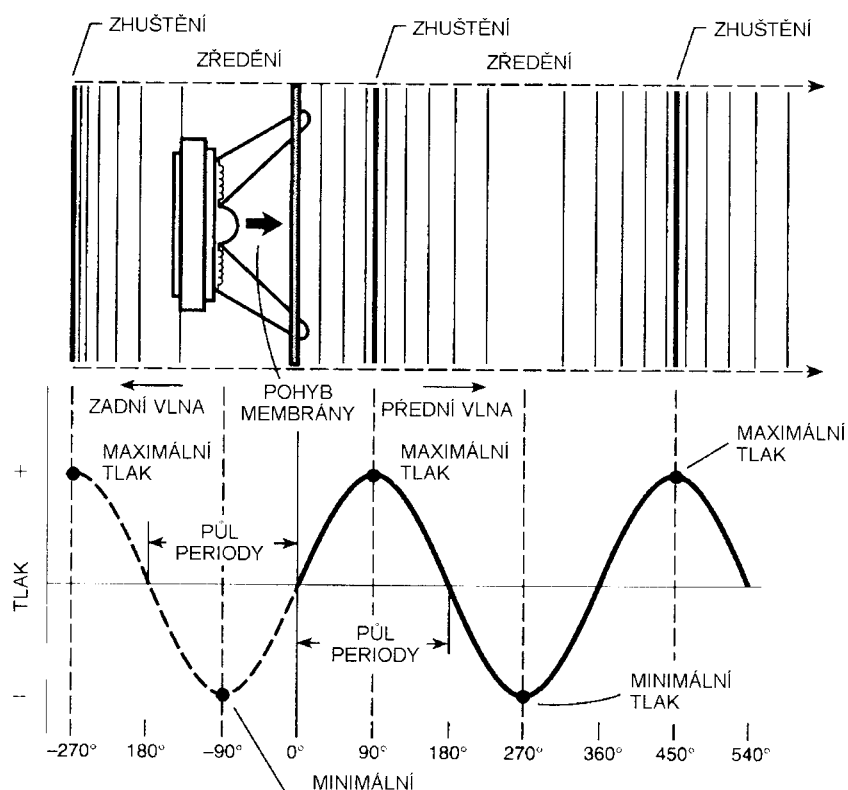
3.3 Konstrukce reproduktorových soustav a jejich součásti

Reproduktorové soustavy je možné sestavovat ve velikém množství variant použitých materiálů a komponent. Důležitá je nejen kvalita, ale i kombinace těchto částí.

3.3.1 Reproduktry - elektroakustické měniče

Jako reproduktor označujeme zařízení určené pro přeměnu elektrického signálu na slyšitelný zvuk. Reproduktor přeměňuje elektrický signál na mechanický pohyb membrány, čímž dochází k cyklické změně tlaku vzduchu před reproduktorem a tím i šíření zvukové vlny.

Vlastnosti reproduktorů a měření charakteristik upravuje norma ČSN EN 60268-5 [16]



Obr. 28: Vznik a průběh zvukové vlny za a před reproduktorem [12]

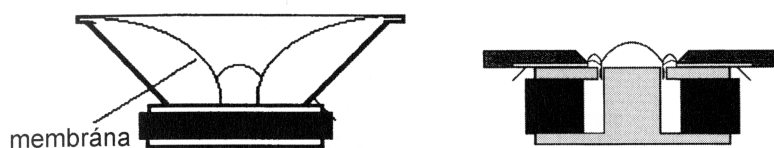
Reproduktorů rozlišujeme několik typů podle frekvenčního rozsahu generovaných zvukových vln:

Reproduktry hlubokotónové - Hlubokotónové reproduktory jsou určeny pro reprodukci nejnižších frekvencí zvuku slyšitelného spektra. Jsou na ně kladeny vysoké nároky z hlediska zatížitelnosti, mechanických vlastností a dynamiky. Basové reproduktory bývají největších rozměrů v celé soustavě. Membrána kmitá s nejnižší frekvencí, ale pohybuje největším objemem, a tedy i hmotností vzduchu. Hlubokotónový reproduktor tedy musí mít dostatečně tuhou membránu a vysoký výkon. Důležitá je takzvaná dynamika reproduktoru. Tedy zrychlení membrány při její výchylce.

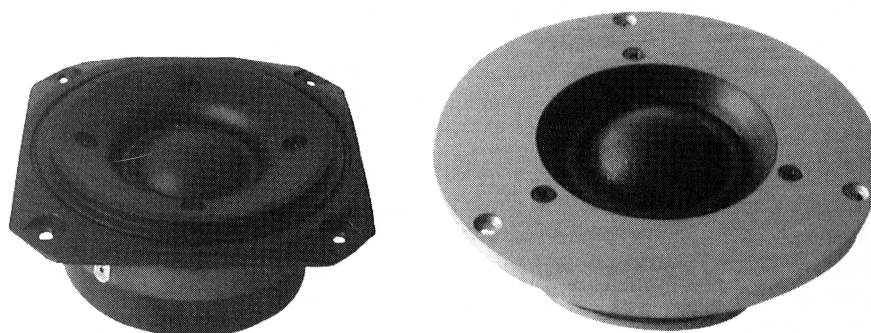


Obr. 29: Hlubokotónové reproduktory[12]

Reproduktory středotónové - Středotónové reproduktory jsou určeny pro reprodukci frekvencí zvuku navazující (v praxi mírně se překrývající) na pásmo reproduktorů hlubokotónových až po pásmo reproduktorů vysokotónových. Konstrukčně se může jednat o klasický elektrodynamický reproduktor s kuželovou nebo kalotovou membránou. Z hlediska kvality by se mělo jednat o nejdůležitější prvek, protože lidské ucho je v tomto pásmu velice citlivé, navíc se zde nachází frekvence mluvené řeči, zpěvu i veliké části hudebních akustických nástrojů.

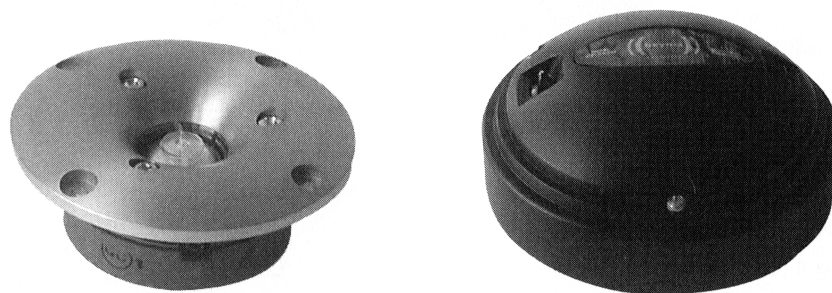


Obr. 30: Řez středotónovými reproduktory s kuželovou a kalotovou membránou[12]



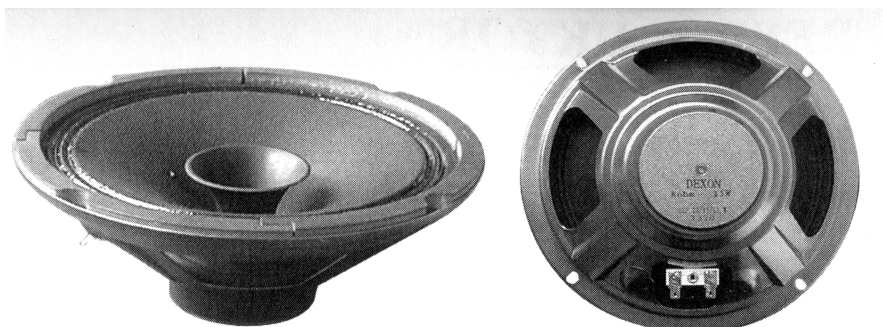
Obr. 31: Středotónové reproduktory s kuželovou a kalotovou membránou[12]

Reproduktory vysokotónové - Vysokotónové reproduktory jsou určeny pro reprodukci vyšších frekvencí zvuku, než které reprodukují středotónové reproduktory. Opět se může jednat reproduktory s kalotovou nebo kuželovou membránou. Pro speciální aplikace bývá využíváno též piezoelektrických reproduktorů a kompresních jednotek.



Obr. 32: Kalotový reproduktor a kompresní jednotka[12]

Reproduktory širokopásmové - Širokopásmové reproduktory jsou určeny pro reprodukci celého slyšitelného pásma frekvencí zvuku, nebo jeho podstatné části s ohledem na účel použití. Jelikož je problematické zkonstruovat reproduktor, který by opravdu dokázal přenášet celé slyšitelné spektrum, výrobci často využívají koaxiálních a triaxiálních konstrukcí. V podstatě se jedná o více-pásmové reproduktory spojené v jeden celek.



Obr. 33: Širokopásmový koaxiální reproduktor[12]

Toto označování reproduktorů není nijak standardizováno a frekvenční pásma určená danému typu reproduktoru nemají dané ostré hranice. Vždy je důležité hledat reproduktory vhodné do konkrétní soustavy s ohledem na použité výhybky a požadované celkové vlastnosti soustavy.

Reproduktory lze také dělit dle konstrukce na:

Elektromagnetické reproduktory

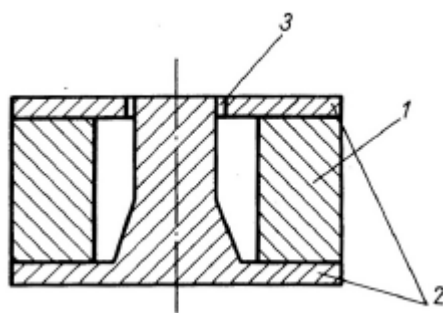
Síla vychylující membránu je generována pohybem kmitací cívky v magnetickém poli. Prochází-li vinutím cívky reproduktoru elektrický proud, magnetické pole působí silově na pevně uložený magnetický obvod i samotnou cívku, která je vinuta na membráně. Silové působení vychýlí cívku s membránou ve směru závislém na polaritě střídavého proudu. Kmitavý pohyb membrány generuje zvukovou vlnu, jejíž frekvence odpovídá frekvenci změny polarity střídavého proudu vloženého do obvodu cívky.

Elektrodynamické reproduktory

Elektrodynamické reproduktory principiálně vycházejí z reproduktorů elektromagnetických. Permanentní magnet je ovšem doplněn elektromagnetickým obvodem. Tím je dosaženo větších sil a tím i rychlejší výchylky membrány reproduktoru. Jedná se o nejčastěji používané reproduktory. Jsou vhodné pro reprodukci všech frekvenčních pásem. Poskytují vysokou kvalitou reprodukce. Jedná se o nejpoužívanější reproduktory, proto budou podrobněji popsány.

Elektrodynamický reproduktor se skládá z těchto hlavních součástí:

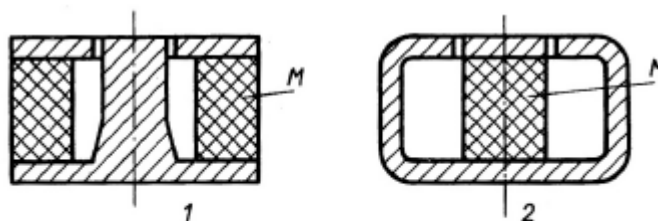
Elektromagnetický obvod - Elektromagnetický obvod je složen z permanentního magnetu doplněného o pólové nástavce, které soustřeďují maximum energie do pracovní vzduchové mezery.



Obr. 34: Elektromagnetický obvod[11]

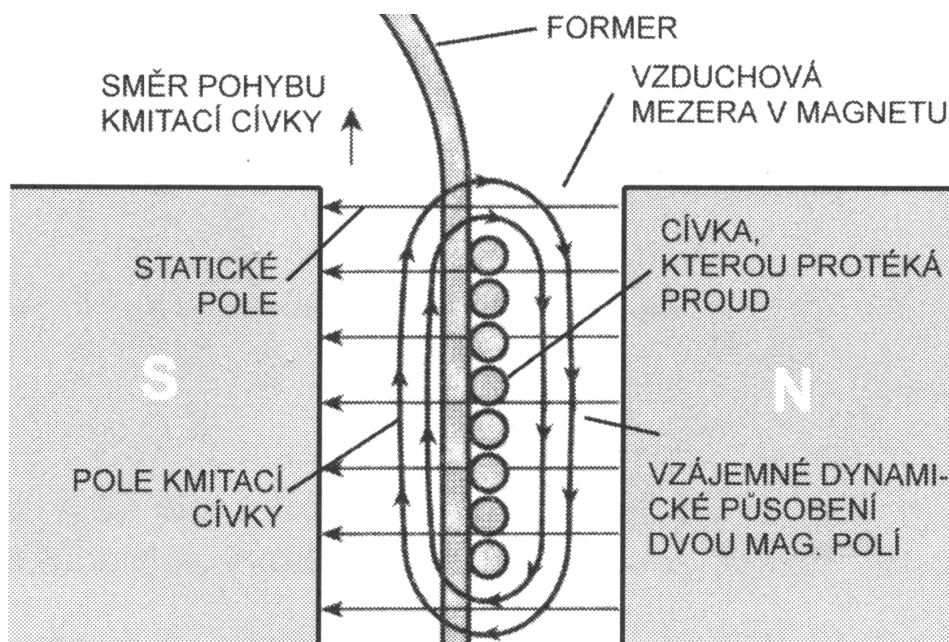
1. Permanentní magnet, 2. Magneticky měkká část obvodu, 3. Pracovní vzduchová mezera

Využívá se též obvodu s vnitřním magnetem



Obr. 35: Elektromagnetické obvody s vnitřním a vnějším magnetem[11]

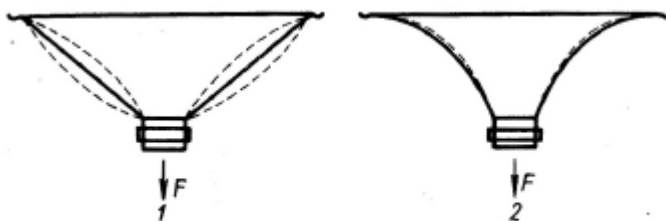
Kmitací cívka - síla vychylující membránu je generována pohybem kmitací cívky v magnetickém poli. Prochází-li vinutím cívky reproduktoru elektrický proud, magnetické pole působí silově na pevně uložený magnetický obvod i samotnou cívku, která je vinuta na membráně. Silové působení vychýlí cívku s membránou ve směru závislém na polaritě střídavého proudu. Kmitací cívka je obvykle navinuta na papírovou podložku smaltovaným drátem ve dvou vrstvách a pevně uchycena. (běžně přilepena) k membráně. [11]



Obr. 36: Kmitací cívka v magnetickém obvodu[2]

Membrána - Membrána reproduktorů je běžně vyráběna z papíru. Kvalitní reproduktory jsou osazeny membránami kovovými (dural, slitiny titanu), keramickými, nebo kompozitními (karbon, kevlar v polymerní matrici). Papírové membrány mohou být po obvodu opatřeny zúžením vlnového průřezu, který umožňuje pohyb samotné membrány v axiálním směru. Tuhé membrány jsou ke koši reproduktoru uchyceny unašeči. Většinou pryžovými.

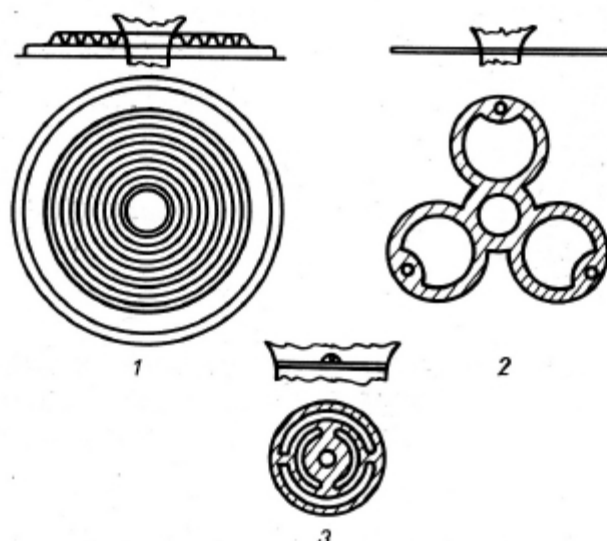
Na membrány reproduktoru jsou kladeny vysoké požadavky z hlediska přesnosti výroby a fyzikálních vlastností. Membrána musí být dostatečně tuhá, ale lehká kvůli setrvačným silám působícím proti změně pohybu membrány. Tuhost je důležitá, kvůli zamezení deformace a následných vibrací samotné membrány. Tuhost membrány je možné zvýšit použitím „nerozvinutelného“ tvaru. [2]



Obr. 37: Rozvinutelný a nerozvinutelný tvar membrány[12]

Koš - Koš reproduktoru bývá obvykle vylisován z ocelového plechu a profilován pro dosažení vysoké tuhosti.

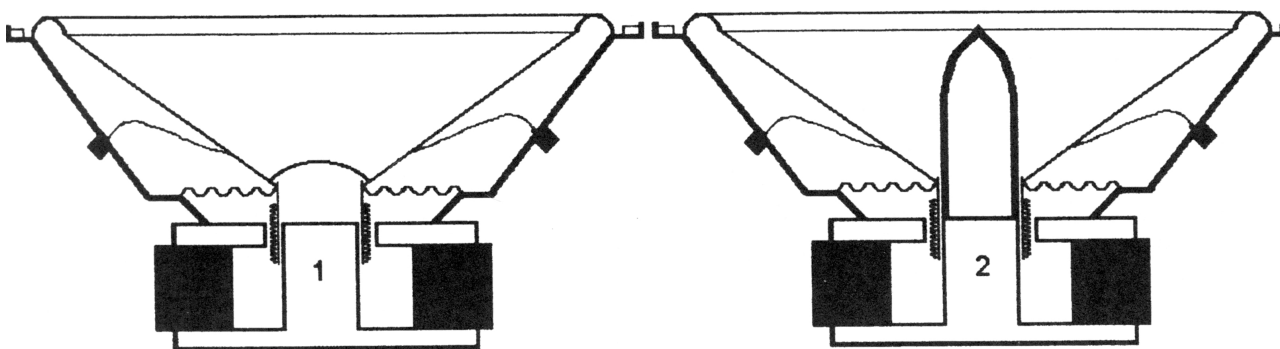
Středící prvek - Středící prvky udržují cívku ve správné poloze v ose kmitání, aby nedocházelo ke tření cívky a elektromagnetického obvodu. Musí ovšem dovolovat pohyb cívky v ose kmitání. Může se jednat o středící membránu, takzvané brýle, nebo pavoučka.



Obr. 38: Středící prvky v podobě středící membrány, brýlí a pavoučku[11]

Další části reproduktorů

Prachovka - Má za účel ochránit kmitací cívku před vlivem prostředí. Vhodnou konstrukcí může také vylepšit vlastnosti reproduktoru. Pokud je prachovka lehká, ale také tuhá, slouží jako výztuž membrány. Kovové prachovky také chladí kmitací cívku. Tvarované prachovky, ovlivňující zvukový projev reproduktoru změnou proudění vzduchu uvnitř kuželu membrány, se nazývají akustické impedanční equalizéry.



Obr. 39: Reproduktor s klasickou prachovkou a akustickým impedančním equalizérem[12]

Terminál - Terminál slouží k zapojení přírodních kabelů. Toto zapojení je standardně provedeno pájením.

Elektrostatické reproduktory

Vynikají vysokou kvalitou reprodukce, ale jsou velice drahé, výroba je náročná a jsou vhodné pouze pro vysokotónové až středotónové reproduktory. Síla vychylující membránu je generována jako silové působení elektrického pole dvou elektrod na elektricky vodivou membránu.

Piezelektrické reproduktory

Síla vychylující membránu je generována smršťováním a rozpínáním piezokrystalu zatíženého elektrickým proudem. Tyto reproduktory nemusí nutně obsahovat membránu, zvuk může být generován přímo krystalickou destičkou. Jsou vhodné pro vysoké frekvence.

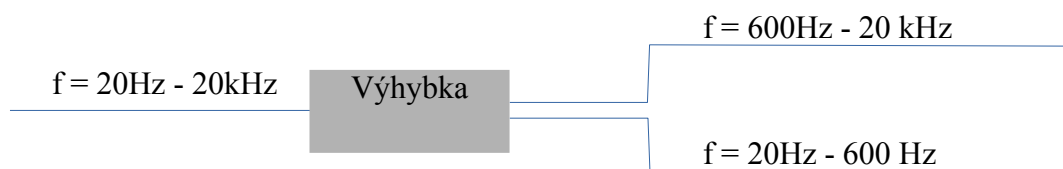
3.4 Výhybky

Přestože existují reproduktory označované jako širokopásmové, není možné je použít do soustav s nízkým zkreslením. Pokud uvažujeme pro akustický výkon vzorec ve tvaru

$$P_a = 0,859 S_d^2 x \cdot f^4 \quad (68)$$

Vyplývá z něho, že pro reproduktor s dostatečně malou plochou membrány pro výškový reproduktor by byla výchylka na nízkých frekvencích několik metrů. Již pro reproduktor s plochou $0,01\text{m}^2$, frekvenci 50Hz a akustický tlak 80dB vychází výchylka 15 cm, což je konstrukčně nerealizovatelné.

Výhybky tedy rozdělují signál ze zesilovače k reproduktorům podle toho, kterým frekvencím odpovídá. Reproduktor poté zpracovává pouze to zvukové pásmo, které dokáže nejlépe interpretovat. [12]



Obr. 40: Funkce výhybky

3.5 Reproduktorové skříně

V reproduktorové skříně je uložen vlastní reproduktor. Jsou na ni tedy kladeny vysoké nároky z hlediska mechanických vlastností.

3.5.1 Nároky na reproduktorové skříně

Pro stavbu reproduktorových skříní existuje model takzvané ideální reproduktorové skříně. Jedná se o reproduktor uložený v nekonečně tuhé nekonečné desce s nekonečným prostorem za deskou. Takové uložení samozřejmě není možné. Jedná se pouze o model, který přibližuje ideální vlastnosti reproduktorové skříně. Nekonečně vysoká tuhost materiálu brání šíření vlny samotnou skříní. Dále nekonečné rozměry zajišťují dokonalé oddělení obou stran reproduktoru. A nekonečný prostor, který eliminuje odrazy zvukových vln a vliv poklesu a nárůstu tlaku v prostředí reproduktoru. V praxi se výrobci snaží tomuto modelu alespoň částečně přiblížit. Vhodným návrhem reproduktorové skří-

ně lze měnit zvukový charakter celkové soustavy a „ladit reproduktory“. Eliminovat některé nežádoucí vlastnosti je možné také vhodnou úpravou skříně, jako je zkosení a zaoblení hran, povrchová úprava, nekonvenční materiál, nebo tvar ozvučnice.

3.5.2 Často řešené problémy stavby reproduktorových skříní

1) Problémy spojené se změnou tlaku

a) Deformace stěn reproduktorové skříně.

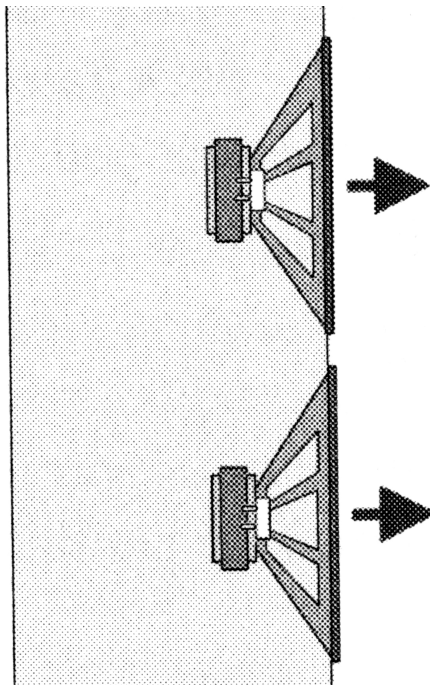
Deformace stěn vyvolaná změnami tlaku nastává v každém reproduktoru. Tento efekt je možné částečně potlačit. Nejvíce se tento problém týká hlavně reproduktorových soustav osazených basovými reproduktory s velkou plochou a zdvihem membrány. Nejjednodušším řešením je použití vhodného dostatečně tuhého materiálu s jeho dostatečnou tloušťkou. Dalším možným řešením je použití „otevřené konstrukce“, ve které dochází k proudění vzduchu z okolí do reproduktorové skříně a naopak. Díky tomu nedochází k tak významným změnám tlaku uvnitř reproduktorové skříně. Toto řešení je však konstrukčně i výpočetně náročnější. Samozřejmostí je pak dostatečný prostor uvnitř skříně.

b) Brzdění membrány reproduktoru.

Jedná se o problém vzniklý stejnou příčinou jako předešlý. V reproduktorové skříně dochází za reproduktorem ke změně tlaku a vzniku síly ve smyslu opačném k pohybu membrány, což má za následek brzdění jejího pohybu. Tento problém lze částečně řešit dostatečně velkým prostorem ve skříně nebo zapojením dalšího reproduktoru, který přidává další silový prvek. Takové zapojení může být klasické dvoureproduktorové, push - pull, front to front isobaric, back to back isobaric, nebo piggyback isobaric.

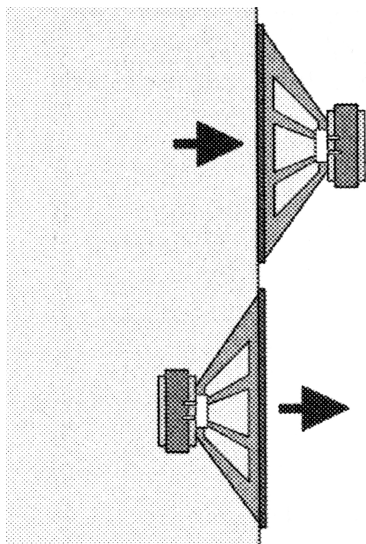
Klasické dvoureproduktorové zapojení

Takové zapojení neřeší problémy spojené s objemem reproduktorové skříně (vyžaduje dvojnásobný objem), ale přidává 3dB citlivosti na výstupu.



Obr. 41: Zapojení dvou reproduktorů
v klasickém uspořádání[12]

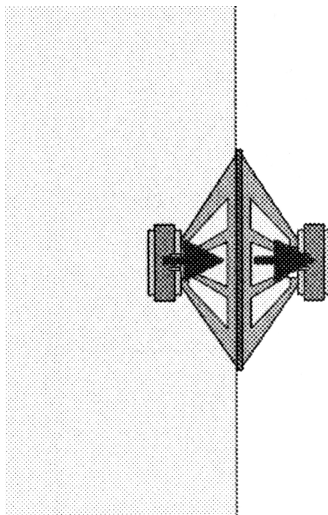
Zapojení push - pull. - V tomto zapojení jsou reproduktory zapojeny proti sobě a s opačnou fází. Opět neřeší problémy spojené s objemem, ale snižuje výskyt sudých harmonických tónů.



Obr. 42: Zapojení dvou reproduktorů
v uspořádání Push - pull[12]

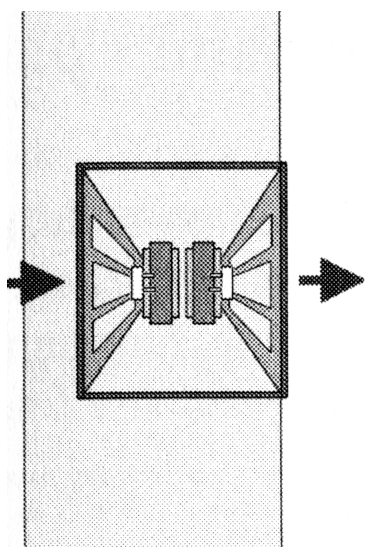
Front to front isobaric

Dva reproduktory zapojené proti sobě s opačnou fází. Narozdíl od zapojení push - pull svírají reproduktory konstantní objem vzduchu přímo mezi sebou. Je zapotřebí polovičního objemu skříně. Dochází ovšem ke snížení citlivosti o 3dB na výstupu.



Obr. 43: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání Front to front isobaric[12]

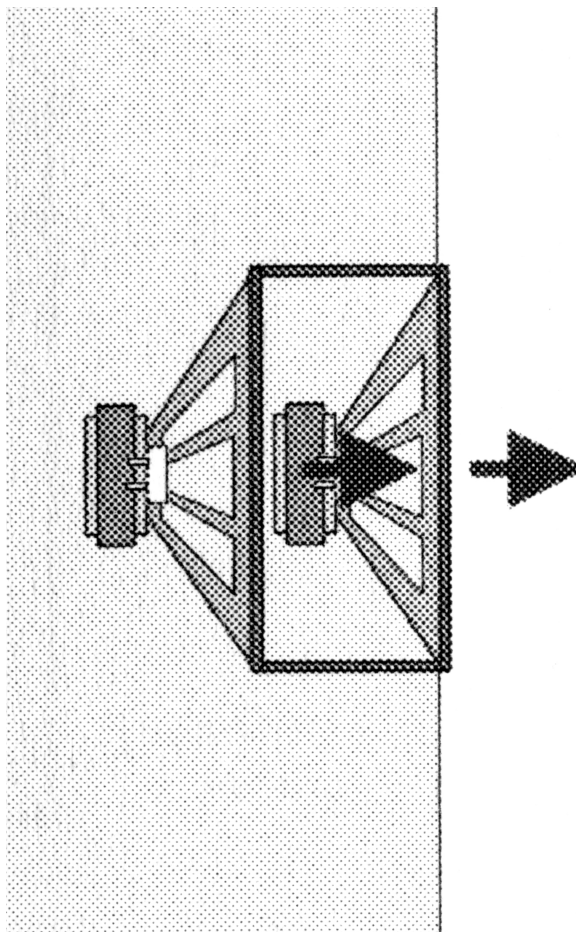
Back to back isobaric - Zapojení proti sobě s opačnou fází zadními stranami. Opět je zapotřebí poloviční objem skříně, ale je třeba subozvučnice, což přináší konstrukční problémy s návrhem samotné subozvučnice a s chlazením. Citlivost na výstupu klesá o 3dB.



Obr. 44: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání Back to back isobaric [12]

Piggyback isobaric

Zapojení souhlasné a se souhlasnou fází. Opět je potřeba subzvučnice a klesá citlivost o 3dB. Nastávají stejné problémy jako u zapojení Back to back isobaric. Ani jedno z těchto dvou zapojení není doporučováno pro vysoké konstrukční nároky a poměrně malý efekt.[12]



Obr. 45: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání piggyback isobaric[12]

2) Problémy spojené s šířením vlny

a) Šíření vlny materiálem reproduktorové soustavy

Zvuková vlna se šíří všemi komponenty reproduktorové soustavy. Šíření vlny částmi reproduktoru jde jen velice těžko ovlivnit s ohledem na konstrukční požadavky. (Zkreslení vzniklé pohybem vlny například cívkou reproduktoru je zanedbatelné oproti zkreslení a úbytku výkonu, které by vzniklo použitím konstrukčně nevhodného materiálu nebo změnou uložení cívkou). Je velice účinné řešit problémy s šířením zvukové vlny materiálem reproduktorové skříně. Jedná se o natolik významný problém, že většina výrobců reproduktorových sestav řeší pouze výrobu reproduktorové skříně a osazení vhodnými komponenty, které nakupují od subdodavatelů.

b) Šíření vlny prostředím:

Samotné prostředí, ve kterém se nachází posluchač a reproduktorová skříň, lze jen stěží ovlivnit. Je ovšem vhodné se soustředit na problémy vzniklé na rozhraní prostředí uvnitř reproduktoru a samotné konstrukce reproduktorové skříně. Na tomto rozhraní dochází k jevům, které je třeba při stavbě reproduktorových sestav řešit hlavně..

- **Odraz** - Samotný odraz zvuku je popsán v jedné z předešlých kapitol. Řeší-li se problém odrazů uvnitř reproduktorů, je důležité předejít hlavně odrazům mezi rovnoběžnými stěnami, kvůli možnosti vzniku stojatého vlnění, jehož vznik je nežádoucí. Předejít vzniku stojatého vlnění je možné profilací ozvučnice, navrhnutím tvaru reproduktorové skříně bez rovnoběžných stěn nebo použitím tlumících prvků.
- **Pohlčení** - Z energetického hlediska se jedná o předání energie vlny okolnímu prostředí. Část energie je přeměněna na teplo, ale část je předána ve formě pohybové energie. Ta působí deformace materiálu a jeho kmity. Obě hlediska jsou konstrukčně velice důležité. Teplota ovlivňuje akustické vlastnosti materiálu a také vlastnosti elektronických obvodů reproduktoru a výhybek. Deformace ozvučnice a její kmity jsou dalším zdrojem zvuku a velice významně se podílejí na celkovém projevu reproduktorové soustavy. Proto je volba vhodného materiálu ozvučnice velice důležitá. Různé materiály vykazují rozlišné akustické vlastnosti a je důležité je tedy vhodně volit. Zjednodušeně by bylo ideální volit materiály s maximálním útlumem, aby byl zvukový signál generován pouze samotným reproduktorem. Ovšem vhodným návrhem ozvučnice a jejího materiálu lze některé vlastnosti využít ke zlepšení celkových vlastností. Například lze významně ovlivnit směrovou charakteristiku reproduktorové soustavy. Stěny ozvučnice se chovají jako samostatný zdroj zvuku a konstruktér může volbou materiálu, tloušťky a tvaru tuto charakteristiku měnit.

3.5.3 Speciální konstrukční řešení

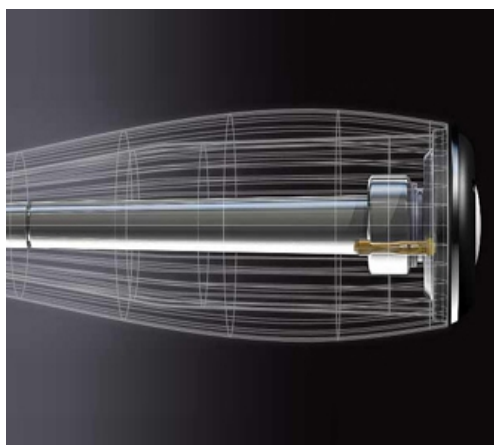
Pro dosažení vysoké kvality reproduktorové skříně je někdy nutné použít nestandardních řešení tvaru a materiálu ozvučnice. Zpracování, návrh i samotný materiál jsou pak velice nákladné.

Kulové ozvučnice. - Kulový tvar ozvučnice zaručuje vysokou tuhost. Zvuková vlna se šíří právě ve tvaru kulové vlnoplochy, tudíž jsou teoreticky deformace ve všech místech stejné.[13]



Obr. 46: Reproduktorové soustavy s kulovou ozvučnicí [13]

Kuželové ozvučnice - Tento tvar byl použit například na reproduktorových soustavách B&W Nautilus, které jsou zřejmě nejdražší a nejlepší poslechové reproduktory současnosti. Zvuková vlna je při průchodu materiálem kónického tvaru utlumována. Navíc dochází k minimalizaci rizika stojatého vlnění. Tento tvar také zaručuje vysokou tuhost v ose namáhání kmitáním reproduktorové membrány.

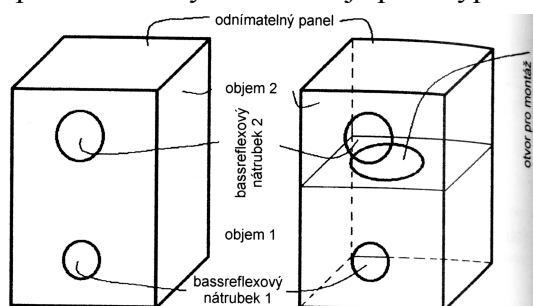


Obr. 47: Detail reproduktorové soustavy B&W Nautilus s kuželovou ozvučnicí [14]

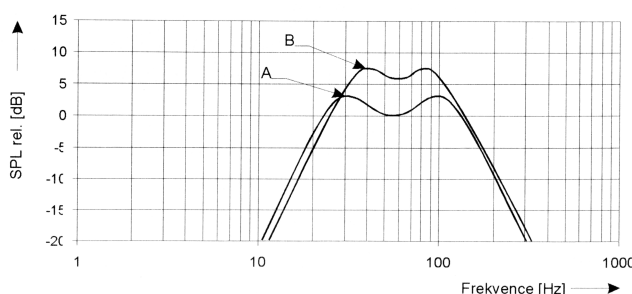


Obr. 48: Reproduktorové soustavy B&W Nautilus s kuželovou ozvučnicí[14]

Ozvučnice band - pass - Ozvučnice s pásmovou propustností mají funkci jakési výhybky. Jedná se o systém, ve kterém reproduktor hraje celé spektrum frekvencí, které je schopen přenést, ale tato ozvučnice filtruje daná spektra podle jejího návrhu. Základní charakteristikou je rozdělení vnitřního prostoru na dvě a více komor (v praxi 3 komory se 4 reproduktory v zapojení push - pull) a basreflexový náústek. Návrh takového reproduktoru je poměrně složitý. Pro zjednodušení můžeme uvést, že základní hledané parametry dvoukomorové ozvučnice jsou objem ozvučnice, poměr objemů komor a rezonanční frekvence přední komory. Z daného je poté vypočítán průměr a délka náústku.

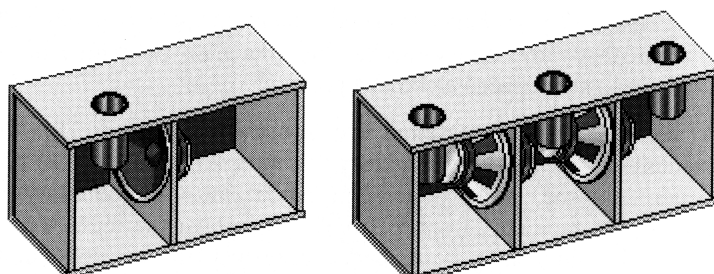


Obr. 49: Band - pass reproduktorová skříň[12]



Obr. 4.7.3-3 Charakteristika ozvučnice typu band - pass

Obr. 50: Frekvenční charakteristiky různě navrhnutých ozvučnic Band - pass[12]



Obr. 51: Dvou a tří komorové skříně band - pass[12]

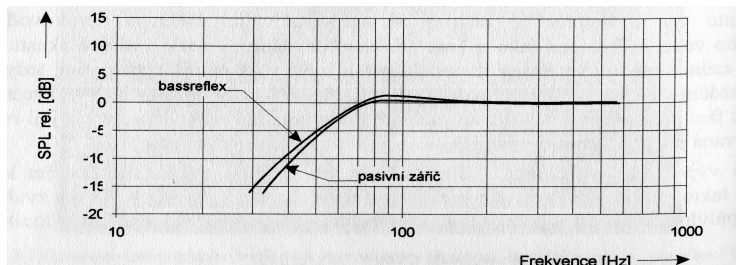
Ozvučnice transmission – line - Soustavy s pasivním zářičem

Taková soustava využívá akustického tlaku vzniklého za zadní stranou reproduktoru. Délka vedení musí být pak navržena s ohledem na podmínku

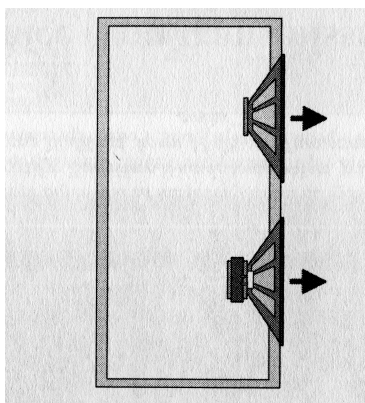
$$l = \frac{\lambda}{k} = \frac{c_0}{k \cdot f_m} \tag{69}$$

l je délka vedení, λ vlnová délka, k násobky harmonických tónů, f_m frekvence

Reproduktorovou soustavou s pasivním zářičem je myšlena reproduktorová skřín osazená klasickým reproduktorem a reproduktorem bez hnacího ústrojí. Takový reproduktor plní funkci basreflexového náústku. Jeho charakteristika je ovšem odlišná.



Obr. 52: Frekvenční charakteristiky soustavy s pasivním zářičem a bassreflexem[12]



Obr. 53: Řešení reproduktorové skříně s pasivním zářičem[12]

3.6 Materiály používané pro výrobu reproduktorových skříní

M.D.F. - Materiál většinou ve formě desek vyrobených ze směsi dřevěných pilin a celulózy, případně dalšího pojiva. Jedná se o velice hojně používaný materiál, který má výborný soubor vlastností, jako vnitřní tlumení, pružnost, a pro běžné použití i přijatelnou hustotu a pevnost. Nehodí se pro profesionální použití vzhledem k vyšší hustotě, nízké mechanické odolnosti a nízké odolnosti vlhkosti.

- **D.T.D** - Lisované dřevotřískové desky s podobnými vlastnostmi jako má M.D.F. Jedná se o levnější řešení, ale s menší tuhostí.
- **Překližka** - Materiál s horším vnitřním tlumením než M.D.F., ale s podstatně vyšší mechanickou odolností. Hojně používaný materiál pro stavbu profesionálních sestav.
- **Lamináty** - Laminováním vhodných vrstev materiálu lze potlačit vznik rezonancí. Tato metoda je ovšem velice náročná na zpracování. Dutiny mezi vrstvami mohou být příčinou „zvonění“.
- **Beton** - Materiál s výbornou tuhostí. Celkově jeden z nejlepších materiálů. Aplikaci znesnadňuje vysoká hustota.
- **Kámen** - Používané jsou břidlice, mramor a pískovec. Kamenné ozvučnice mají tendenci „zvonit“ a jsou těžké. Tento materiál má ovšem vysokou tuhost a pevnost.
- **Plasty** - Plasty jsou většinou používány pro nízkou cenu materiálu. Ovšem vhodný polymerní materiál (často plněný) může mít vynikající vlastnosti.
- **Injektovaná celulóza** - Celulóza strojově injektovaná plnivem. Materiál vhodný pro výrobu subwooferů, díky vysoké tuhosti a tvrdosti. Nevýhodou je nesnadné opracování, které je nutné provádět diamantovými nástroji.[12]

3.7 Reproduktorové sestavy

Reproduktorové soustavy se zapojují do zesilovačů v několika kusech podle potřeby a tvoří tak hraví reproduktorové sestavy. Níže je uvedeno několik nejčastějších variant zapojení do sestav.

- **Monofonní reproduktorová sestava** - je složena pouze z jedné soustavy. Je vhodná pro průmyslové ozvučení. Nenabízí prostorový zvuk, zvuk je srozumitelný a je konstrukčně jednoduchá.
- **Stereofonní sestava** - je složena ze dvou reproduktorových soustav. Zesilovač upravuje zpoždění signálu tak, aby bylo dosaženo prostorového efektu. Tato sestava je velice vhodná pro poslech hudby.

- Quadrofonní sestava - je složena ze čtyř reproduktorových soustav. Zesilovač opět ovlivňuje zpoždění signálu. Vhodné pro hudbu i domácí kino. Ovšem oproti stereu dochází ke zvýšení nákladů neúměrně ke zvýšení subjektivního prožitku, z tohoto důvodu dostávají přednost kvalitní stereo soustavy.
- Reproduktorové sestavy X.1 (3.1, 5.1, 7.1) - složené z více reproduktorových soustav doplněných o subwoofer. Taková sestava je vhodná pro domácí kino, díky umocnění prožitku z výrazných basů a prostorového zvuku.

4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ

Fyzikálních vlastností lze měřit veliké množství mnoha způsoby. Pro tuto práci jsou stěžejní měření hustoty a tahová zkouška.

4.1 Tahová zkouška

4.1.1 Mezní stavy

Každý výrobek prochází svojí materiálovou historií, která začíná při prvním zpracování, pokračuje přes teplotní změny a namáhání při tváření, pokračuje skladování a používáním výrobku a končí jeho vyřazením z používání. Během této doby se materiál dostane do mnoha stavů, které mění jeho vlastnosti. Velice důležité jsou takzvaně mezní stavy. V těchto stavech dochází ke kvalitativním změnám vlastností, které vedou až k vyřazení výrobku. Do mezních stavů se může dostat více vlastností výrobku, ale k označení stavu jako mezního stačí, pokud je alespoň jedna změna natolik výrazná, že ohrožuje nebo zcela znemožňuje jeho použití. Takového stavu může výrobek nabýt již ve výrobě. Například chybou výrobního postupu, jako je výskyt trhlin vlivem tepelného namáhání při chlazení, tvarovou deformací při mechanickém obrábění a podobně. Kdy se výrobek dostane do mezního stavu, určují vnitřní a vnější faktory.

1) Vnější faktory

- Mechanické namáhání
- Působení energetických polí
- Působení záření
- Teplota
- Chybné použití
- a další

2) Vnitřní faktory

- Nevhodně zvolený materiál
- Nedodržení výrobního postupu
- Chemické reakce uvnitř materiálu

Mezní stav pružnosti - Pokud je těleso z nezatíženého stavu uváděno do stavu zatíženého a naopak, dochází k cyklickému zatěžování. Důležité z hlediska mezních stavů je, zda se materiál dostane do stavu, který není přípustný. Zpravidla nad oblast elastické deformace. Mezní stav pružnosti je nejčastěji vyšetřovaným mezním stavem. V oblasti elastické deformace je dostatečně reprezentativní a bezpečný. Výpočty jsou totiž praktikovány v elastické oblasti, protože plastická deformace je jen komplikovaně početně předvídatelná. Výsledky pak dávají nižší hodnoty, než jsou skutečné.

K mezním stavům souvisejícím s porušováním materiálu dochází při cyklickém zatěžování, při kterém dochází vzniku trhlin v materiálu, které mohou vést až k destrukci v podobě lomu. Tento stav je velice nebezpečný jedná-li se o lom křehký.

- Jednou variant lomu je tvárný lom. Tvárnému lomu předchází plastická deformace a vznik trhlin a dutin. Materiál je ovšem určitou dobu schopen plnit účel. Pokud je díl dobře navržen, je tato doba natolik dlouhá, že je možné defekty odhalit a součást vyměnit nebo opravit.
- Křehký lom nastává bez předchozí plastické deformace a téměř okamžitě po vzniku prvních defektů. Tento lom je z konstrukčního hlediska velice nebezpečný.
- Lom koroze pod napětím nastává vlivem okolí působícího na povrch materiálu. Prostředí urychluje vznik a šíření trhlin, což se negativně projevuje na životnosti výrobku. Nejčastěji jde o korozi, tedy chemickou reakci nebo elektrochemickou reakci. V případě plastů může jít o vznik trhlin vlivem vysokoenergetického záření. V takto narušeném materiálu vyvolá lom podstatně nižší napětí.
- Je-li materiál vystaven působení proměnlivých vnějších sil, může dojít k lomu, i když nebyla překročena mez kluzu. Takový lom je nazýván únavový
- Ke creepovému lomu dochází po dlouhodobému konstantním zatížení silou vyvolávající pomalou deformaci materiálu. [15]

4.1.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška slouží k experimentálnímu zjištění materiálových charakteristik. Je prováděna za konstantní rychlosti prodloužení nebo za konstantního zatížení. Výsledkem je tahová křivka, neboli závislost napětí na deformaci. Často je také sledována příčná deformace. Tahová zkouška je jednou z nejdůležitějších mechanických zkoušek. Je možné získat veliké množství parametrů a informací o materiálu. Jedním z nejdůležitějších je modul pružnosti v tahu.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (70)$$



Obr. 54: Trhací stroj Shimadzu

4.2 Stanovení hustoty

Hustota, neboli měrný objem, je definována jako podíl hmotnosti daném objemu.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (71)$$

Při měření hustoty látek je třeba brát v potaz několik parametrů.

- Teplota - Teplota ovlivňuje hustotu látek všech skupenství.
- Tlak - Vliv tlaku je rozhodující předně při měření hustoty plynů, zatímco kapaliny považujeme při běžném měření za prakticky nestlačitelné.
- Pórovitost - Pokud měříme hustotu samotného materiálu, je potřebné vliv pórů eliminovat. Například při pyknometrickém měření nebo měření hydrostatickými vahami je důležité póry vyplnit kapalinou. Mohou ovšem nastat případy, kdy naopak měříme hustotu celé soustavy. Například u pěnových materiálů.

Stanovení hustoty je možné provádět mnoha způsoby.

- Pyknometricky - touto metodou měříme hustotu kapalin, je možné stanovit též hustotu plynu a pevné látky.
- Hustoměrem - hustoměry využíváme ke stanovení hustoty kapalin.
- Mohrovými vahami - lze stanovit hustotu kapalinou

- Vibračními hustoměry - používají se pro přesné stanovení hustoty kapalin.
- Měřením na automatických hydrostatických vahách - metoda vhodná pro stanovení hustoty pevných látek. Je vhodná především pro stanovení hustoty nepravidelných vzorků pevných látek.

5 REFERENČNÍ REPRODUKTOROVÁ SOUSTAVA AQ

Jako referenční vzorek byla vybrána reproduktorová soustava AQ Tango 85 výrobce AQ s.r.o., která byla přímo výrobcem upravena jako uzavřená konstrukce bez náústku bassreflex. Jedná se o tří-pásmovou soustavu osazenou reproduktory značky Lyeco a výhybkou navrženou v AQ s.r.o. Reproduktorová skříň je vyrobena z MDF desek. Vnitřní objem činí 16 l, průměrná tloušťka desek je 20mm.

Tab. 3: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně AQ Tango 85

Vlastnosti reproduktorové skříně AQ Tango 85					
Materiál	Vnější rozměry v. x š. x h. [m]	Vnitřní objem [l]	Tloušťka stěny [mm]	Hmotnost [kg]	Morfologie
M.D.F desky	0,420 x 0,255 x 0,260	16l	20	8,2	Hladká stěna

6 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou heterogenní materiály složené ze dvou a více složek, jejichž výsledné vlastnosti jsou lepší než prostý součet vlastností samotných materiálů. Pro kvalifikaci materiálu jako kompozitního je důležitá podmínka heterogenity, kterou nespĺňují například slitiny kovů. Druhou podmínku nespĺňují například materiály lehčené.

Kompozitní materiály jsou se skládají z matrice (neboli prostředí) a výztuže na kterou je přenášeno napětí. Matrice bývají polymerní, keramické, nebo kovové. Výztuže je možné rozlišovat nejen podle materiálů, které bývají obdobné matricím, ale také podle tvaru výztuže. Jedná se především o krátká a dlouhá vlákna, whisklery, nebo partikulární výztuže.

Partikulární kompozitní materiály jsou nejčastěji používané kompozitní materiály. Jejich využití je hojné především ve stavebnictví a to hlavně díky poměrně jednoduchému zpracování. Jedná se o plněný beton, plast-beton a podobně. [18]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE PRÁCE

Současný trend firem zabývajících se výrobou reproduktorových soustav je hledání takových materiálů a takových konstrukčních modifikací, které naplno uspokojí požadavky zákazníka nejen z hlediska kvality, ale také vzhledu. Stále více zákazníků vyžaduje designovou hodnotu, případně zohledňují toto hledisko jako rozhodující při vybírání mezi produkty podobné kvality. Nové materiály navíc umožňují výrobu ozvučnic kvalitních, ale také vzhledově zajímavých.

S ohledem na zvyšující se nároky na konstrukci reproduktorových soustav a na materiály reproduktorových skříní, jsou výrobci tlačeni k používání nestandardních řešení. Může se jednat o speciální tvary reproduktorových soustav, použití například kompozitních materiálů, nebo o profilaci ozvučnice.

Cílem této práce je shrnutí základních teoretických poznatků, týkajících se akustických vlastností materiálů, jako jsou například pohltivost, odraz zvuku, hladiny akustických veličin, dále problematika fyzikálních vlastností materiálů a přístupy k ozvučení. Dále bude zpracována rešerše na téma reprodukce zvuku, vlastnosti a konstrukční řešení reproduktorových soustav a samotné konstrukce reproduktorů.

V další části této práce budou vybrány a vyrobeny partikulární kompozitní materiály materiály na bázi polyesterové a epoxidové pryskyřice. Z těchto materiálů bude sestrojena samotná reproduktorová soustava s různou morfologií povrchu. Dále bude provedeno měření frekvenčních charakteristik, vibračních charakteristik v daném spektru budících frekvencí a měření fyzikálních a mechanických vlastností materiálů.

Takto laboratorně získané výsledky budou konfrontovány s výsledky měření realizovanými firmou AQ s.r.o., která touto problematikou dlouhodobě zabývá nejen na českém trhu a disponuje vlastními měřicími aparaturami a laboratorními zařízeními.

V poslední části této práce bude provedeno vyhodnocení na základě všech získaných výsledků a bude navrženo optimální řešení z hlediska frekvenčních charakteristik za cílem hledání nejlepšího kompromisu mezi materiálovým složením a morfologií povrchu měřených reproduktorových soustav.

Závěrem budou korelovány získané poznatky s ohledem na estetiku, ergonomii a konstrukční a materiálové řešení s ohledem na získané hodnoty měření.

8 PŘÍPRAVA VZORKŮ

8.1 Příprava materiálů na bázi partikulárního kompozitu

Jako materiál pro výrobu samotných ozvučnic byl zvolen plast-beton a to z několika důvodů. Křemičitý písek je jako plnivo směsí pro výrobu ozvučnic používán, a to i ve spolupracující firmě AQ s.r.o., která z něj vyrábí dva typy ozvučnic. Jeden kaprovitého a druhý kulového tvaru. Reaktoplastická matrice byla volena s ohledem na zpracování směsi. Jako zkušební tělesa byly odlity vzorky s různým plněním. Cílem bylo dosažení co nejvyššího plnění. Nejlepšího souboru vlastností bylo dosaženo při plnění 75%. Při nižším plnění byly zřetelné defekty vzniklé odpařováním pryskyřic při zpracování ve formě.

Plnivem kompozitního materiálu byl zvolen křemičitý písek o hrubosti zrn 0 - 2 mm. Matricí byla polyesterová pryskyřice a epoxidová pryskyřice - viz. přílohy P XVI a PXVII.

8.1.1 Značení vzorků a materiálů

Materiály s rozdílnou polymerní matricí byly značeny písmeny A a B, vzorky použité pro měření čísla 1 - 5, jak je uvedeno v tab.4.

Tab. 4: Značení materiálů

Materiál	Matrice
A	Polyesterová
B	Epoxidová

Byly připraveny vzorky ve tvaru lopatek pro měření na trhacím stroji Shimadzu. Byl kladen důraz na fyzikálně-mechanické vlastnosti korespondovaly s vlastnostmi vyrobených materiálů použitých pro výrobu ozvučnic - viz. obr. 55.



Obr. 55: Vzorky použité pro tahovou zkoušku

Tab. 5: Tabulka rozměrů vzorků materiálu A

Vzorek č.	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Pracovní délka [mm]
1	5,1426	9,9352	100
2	5,2800	9,8198	100
3	4,5080	9,8928	100
4	5,2964	9,8668	100
5	4,1980	9,9504	100

Tab. 6: Tabulka rozměrů vzorků s materiálu B

Vzorek č.	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]	Pracovní délka [mm]
1	4,6412	10,1298	100
2	4,6800	10,1300	100
3	4,6478	10,2986	100
4	4,9364	10,0946	100
5	4,9342	9,9682	100

8.2 Měření a vyhodnocení tahové zkoušky

Na trhacím stroji Shimadzu AG-X byly naměřeny tahové křivky všech vyrobených vzorků a výsledky těchto zkoušek jsou popsány v tabulkách 7 a 8. Na základě těchto měření byly vyhodnoceny moduly pružnosti v tahu jednotlivých materiálů.

Tahové křivky sledovaných materiálů jsou uvedeny v přílohách P I - P X.

Při vyhodnocení tahové zkoušky materiálu A nebyl uvažován vzorek č. 1 a vzorek č 4 materiálu B, kvůli vysoké odchylce od ostatních naměřených hodnot, způsobené pravděpodobně materiálovou vadou

Tab. 7: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou vzorků materiálu A

Materiál č.	Maximální napětí [N/mm ²]	Maximální deformace [mm]	Modul pružnosti v tahu [N/mm ²]
1	7,549	0,364	2165,53
2	6,835	0,317	3294,70
3	8,294	0,283	3024,04
4	7,403	0,341	3528,92
5	10,382	0,346	2631,88
Průměr			3120±380

Tab. 8: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou vzorků materiálu B

Materiál č.	Maximální napětí [N/mm ²]	Maximální deformace [mm]	Modul pružnosti v tahu [N/mm ²]
1	15,633	0,588	3419,27
2	13,261	0,510	3440,42
3	12,009	0,434	3482,10
4	12,772	0,465	1347,09
5	13,504	0,513	3400±100

8.3 Stanovení hustoty

Pro stanovení hustoty byla použita metoda vážení hydrostatickými vahami. Hodnota hustoty materiálu A byla stanovena na 1,124 g.cm⁻³ a hodnota hustoty materiálu B 2,2039 g.cm⁻³.

Vzorový výpočet hustoty

$$\rho_s = \frac{m_1 \rho_l}{m_1 - m_2} = \frac{5,159 \cdot 0,998}{5,159 - 2,3695} = 1,8457 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \quad (72)$$

Tab. 9: Tabulka naměřených hustot materiálu A

Materiál č.	Hmotnost m1 [g]	Hmotnost materiálu ponořeného ve vodě m2 [g]	Rozdíl hmotností Δm [g]	Hustota ρ [g.cm ⁻³]
1	5,1591	2,3695	2,7896	1,8457
2	5,2829	2,3131	2,9698	1,7753
3	4,9482	2,3079	2,6403	1,8704
4	5,5937	2,4403	3,1534	1,7703
5	4,8681	2,1695	2,6986	1,8003
Průměr				1,812±0,044

Tab. 10: Tabulka naměřených hustot materiálu B

Materiál č.	Hmotnost ml [g]	Hmotnost materiálu ponořeného ve vodě m2 [g]	Rozdíl hmotností Δm [g]	Hustota ρ [g.cm ⁻³]
1	3,9912	1,7651	2,2261	2,2567
2	5,0109	2,2953	2,7156	2,1787
3	4,6737	2,1543	2,5194	2,1651
4	4,9687	2,3131	2,6556	2,1438
5	5,3207	2,3337	2,9870	2,2754
Průměr				2,204±0,058

8.4 Příprava a výroba reproduktorových skříní

Navrhovaná reproduktorová skříň byla vyrobena se stejnými rozměry jako referenční reproduktorová skříň dodaná firmou AQ s.r.o. Ozvučnice byla vyrobena z hladkých kompozitních desek o tloušťce 20mm. Zadní stěna byla vyrobena z hladkých desek a z desek s pyramidovými výstupky o výšce 1,2cm a úhlem na vrcholu 45°. Reproduktorová skříň byla zkonstruována tak, aby umožňovala výměnu zadní hladké stěny. Důvodem byla kritičnost této části skříně z hlediska možnosti vzniku stojatého vlnění.

Rozměry zkonstruovaných reproduktorových skříní a jejich hmotnosti jsou uvedeny v tabulkách 11 až 14.

Tab. 11: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně A1

Vlastnosti reproduktorové skříně A1					
Materiál	Vnější rozměry v. x š. x h. [m]	Vnitřní objem [l]	Tloušťka stěny [mm]	Hmotnost [kg]	Morfologie
Polyesterová matrice plněná křemičitým pískem (zrna 0 - 2 mm)	0,420 x 0,255 x 0,235	16l	20	18,9	Hladká stěna

Tab. 13: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně B1

Vlastnosti reproduktorové skříně B1					
Materiál	Vnější rozměry v. x š. x h. [m]	Vnitřní objem [l]	Tloušťka stěny [mm]	Hmotnost [kg]	Morfologie
Epoxidová matrice plněná křemičitým pískem (zrna 0 - 2 mm)	0,420 x 0,255 x 0,235	16l	20	20	Hladká stěna

Tab. 14: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně B2

Vlastnosti reproduktorové skříně B2					
Materiál	Vnější rozměry v. x š. x h. [m]	Vnitřní objem [l]	Tloušťka stěny [mm]	Hmotnost [kg]	Morfologie
Epoxidová matrice plněná křemičitým pískem (zrna 0 - 2 mm)	0,420 x 0,255 x 0,235	16l	20	20,4	Stěna s pyramidovými výstupky

Reproduktorové skříně byly osazeny třípásmovými reproduktory o hudebním výkonu 190W - viz. tab. 15.

Tab. 15: Specifikace použitých reproduktorů

Vlastnosti použitých reproduktorů		
Počet pásem	Výrobce	Hudební výkon [W]
3	Leyco	190

Vzorky reproduktorových skříní byly vyrobeny z připravených ozvučnicových desek, tvořenými partikulárními kompozity s polyesterovou a epoxidovou matricí - viz tab. 4. Dále byly vyrobeny formy, které byly vytmeleny silikonem a povrch formy impregnován parafínem.

Zkoušeno bylo několik separátorů (PE folie, silikonový olej, minerální olej), avšak parafin vykazoal nejlepší vlastnosti. Jeho přilnavost k pryskyřicím je nízká, nedochází k deformacím teplem a nanesení je poměrně jednoduché. Zbylý materiál je navíc možné tepelně odstranit z odlitku.

Postup impregnace formy:

- Roztavení parafinu na plotýnkovém vařiči - viz. obr. 56
- Nátěr formy parafínem - viz. obr. 57
- Odstranění přebytečného parafinu- viz. obr. 58



Obr. 56: Roztavený parafin



Obr. 57: Nátěr formy parafínem



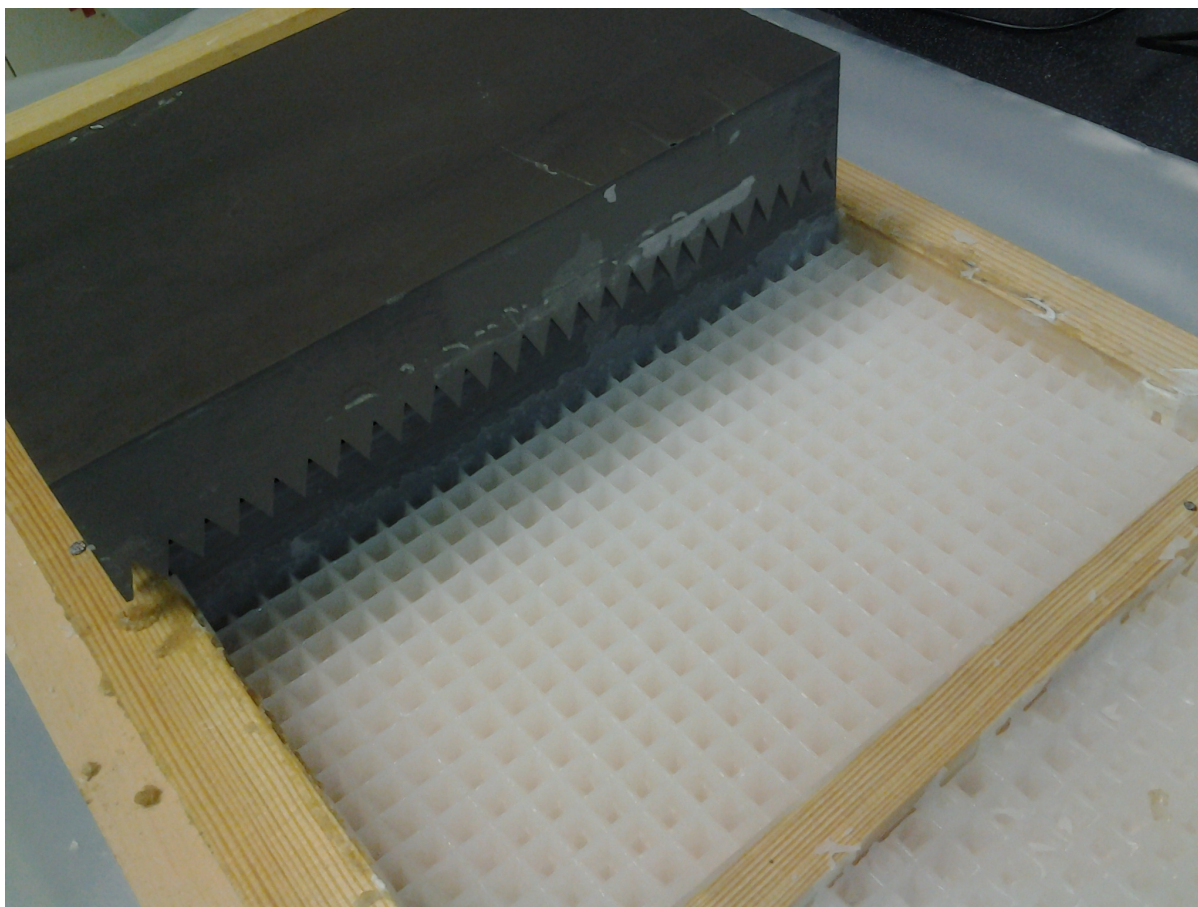
Obr. 58: Odstranění přebytečného parafínu při impregnaci formy

8.4.1 Výroba formy s pyramidovou úpravou

Výroba takto rozměrných forem se ukázala jako velice komplikovaná. Uvažováno bylo několik možností.

- Výroba negativní formy obrobením na CNC stroji. Tato možnost se ukázala jako nerealizovatelná s ohledem na velikost a komplikovaný tvar formy.
- Výroba pozitivního kopyta na CNC a následné vytvoření negativu ze silikonu. Zde vyvstalo několik překážek. První byla adheze na mikroporézní polyuretanové kopyto. SeparáčnÍ folii nebylo možné vzhledem k tvaru kopyta možné použít a veškeré pokusy s nátěry separátoru se ukázaly neúčinné. Separátory se rychle vsakovaly hluboko do materiálu a neplnily účel. Zkoušeny byly mýdlové roztoky, akrylátové nátěry, silikonové a minerální oleje.
- Výroba kopyta a výroba negativu z parafínu. Do rovinné formy byl nalit roztavený parafín a vloženo kopyto. Po zatuhnutí bylo kopyto vyjmuto a do vzniklého negativu byl odlit konečný produkt.

Třetí z možností se ukázala jako jednoznačně nejlepší a jediná realizovatelná. Z tohoto důvodu byly desky vyrobeny výše uvedeným způsobem - viz. obr. 59.



Obr. 59: Výroba parafínové formy

Po vyjmutí odlitku bylo nutné odstranit parafín tepelně, protože mechanické odstranění nebylo s ohledem na vysokou adhezi možné - viz. obr. 60.



Obr. 60: Nepracovaná zadní stěna s částečně odstraněnou parafínovou formou

Konečným výsledkem přípravy a výroby byla ozvučnicová deska s pyramidovými výstupky - viz. obr. 61. Stejným způsobem byly připraveny také hladké ozvučnicové desky.



Obr. 61: Detail ozvučnice s pyramidovými výstupky

8.5 Sestavení reproduktorové skříně

Spojování desek ozvučnic bylo provedeno šrouby 3,5 x 40 mm a hmoždinkami. Pro vrtání otvorů pro hmoždinky bylo zapotřebí použít vidiové vrtáky. Spoje šrouby umožnily výměnu zadních desek ozvučnice, která by za použití lepených spojů nebyla možná. Spoje byly utěsněny silikonem - viz obr. 62.



Obr. 62: Čelo reproduktorové skříně

8.6 Osazení výhybkami a reproduktory

Do ozvučnicových desek byly navrtány otvory a jako vložky otvorů byl použit dvousložkový epoxid, do kterého byly šrouby zašroubovány. Tento spoj je trvanlivější, než šroubování přímo do ozvučnice, protože nehrozí „vymačkání“ spojů a drolení materiálu - viz. obr. 63.



Obr. 63: Osazení reproduktorové skříně výhybkou

8.6.1 Vnitřní prostor reproduktorové skříně

Vnitřní prostor reproduktorové skříně byl vystlán netkanou textilií, jako tomu bylo u referenčního reproduktoru - viz. obr. 64.



Obr. 64: Vnitřní prostor reproduktorové skříně

8.6.2 Povrchová úprava

Stejně jako komerční produkty byla reproduktorová skříň ošetřena povrchovou úpravou, a to nátěrem Balakryl Special plasty. Povrchová úprava chrání materiál ozvučnice a dodává finální vzhled - viz. obr. 65.

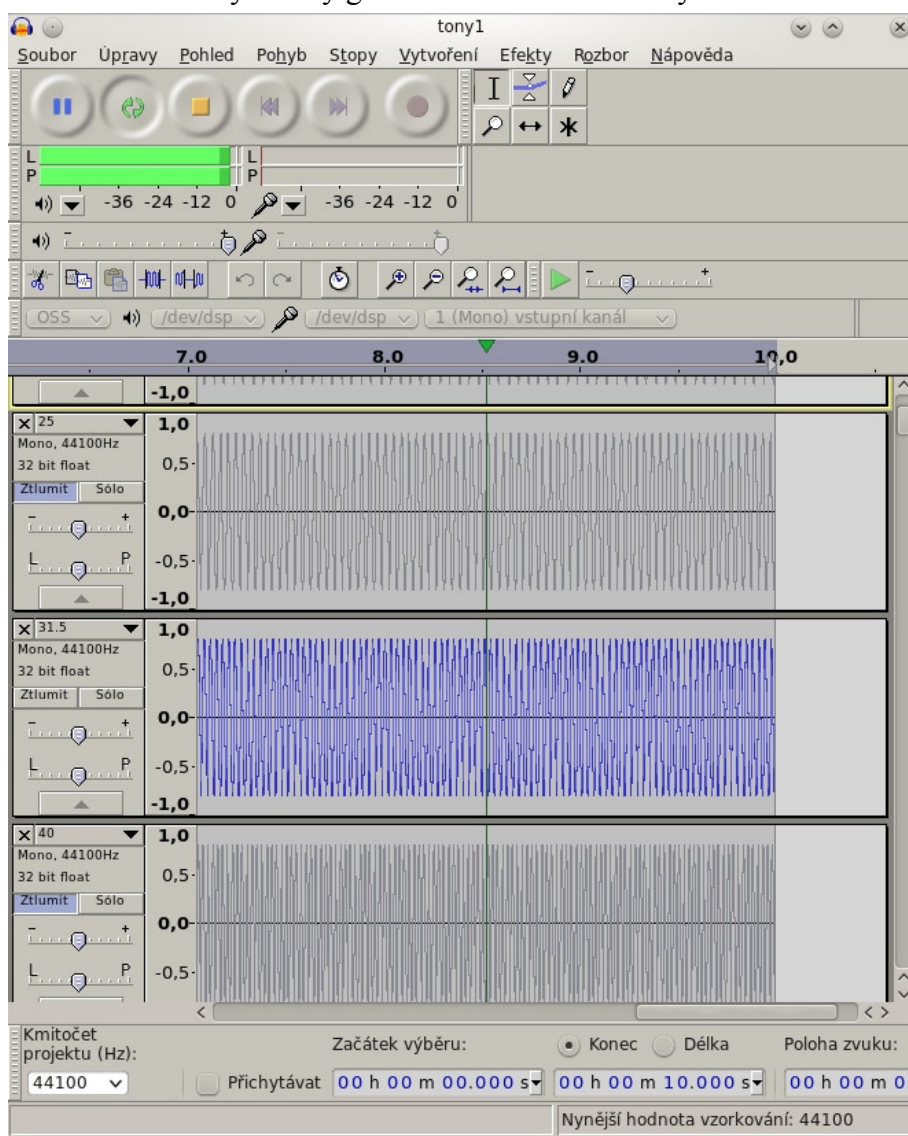


Obr. 65 Hotová reproduktorová soustava s povrchovou úpravou

8.7 Měření frekvenčních závislostí zkonstruovaných reproduktorových soustav

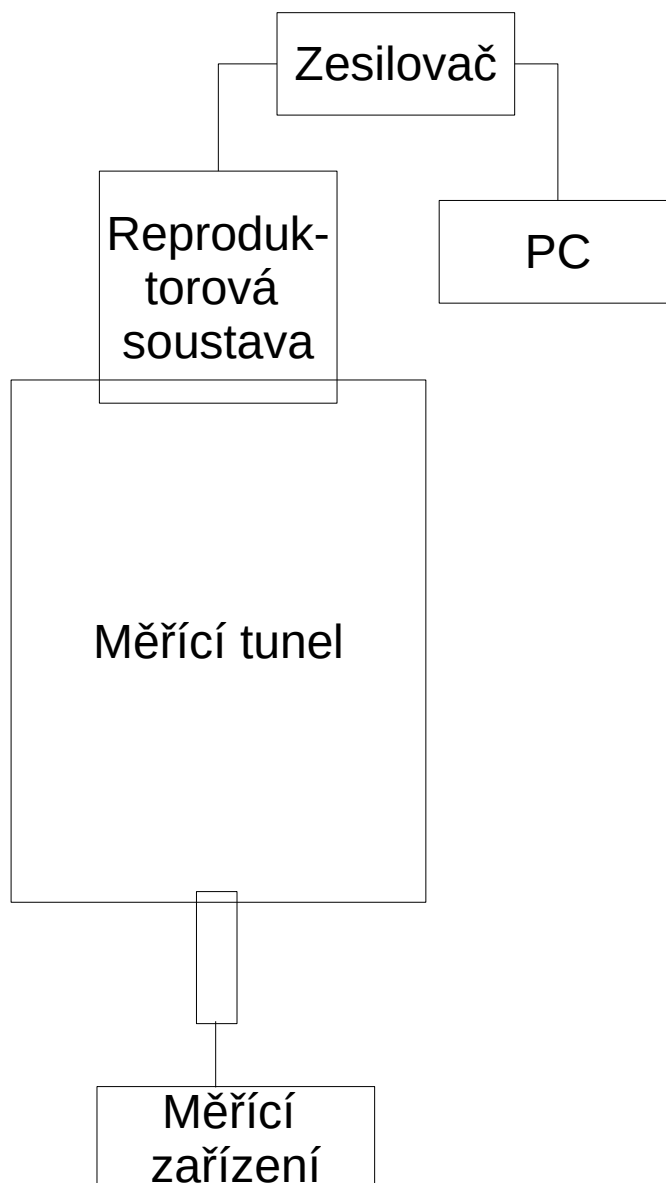
Frekvenční závislosti reproduktorových sestav byly měřeny v laboratoři na multianalyzátoru hladiny zvuku Brüel & Kjaer typ 2146, a také byly měřeny přístroji s vysokým rozlišením firmou AQ s.r.o.

Jako budicí systém byl zvolen zesilovač Technics a signál zdroje PC HP 4730s se zvukovou kartou Intel HDA PCH 92HC87B1/3 vybavený generátorem tónů Audacity-Linux - viz. obr. 66.



Obr. 66: Prostředí programu Audacity-Linux

Měření bylo uskutečněno ve frekvenčním pásmu 25Hz - 20 kHz ve vzdálenosti 56cm mezi stěnou reproduktoru a snímacím reproduktorem. Pro minimalizaci odrazů vln v prostředí byl celý systém vložen do měřicího tunelu, jehož stěny byly obloženy tlumícím materiálem v podobě polyuretanové pěny s pyramidovými výstupky. Měření bylo provedeno jako směrové, tedy z přední, zadní a boční strany - viz. obr. 67.



Obr. 67: Schéma měřící sestavy

Na budícím zařízení byla nastavena hodnota hladiny akustického tlaku 70dB při frekvenci 1000Hz. Výsledky měření frekvenčních charakteristik sledovaných materiálů jsou uvedeny v přílohách P XIII - P XV.

Obdobným způsobem bylo měření provedeno firmou AQ s.r.o. Naměřené frekvenční závislosti jsou uvedeny v přílohách P XI a P XII.

8.8 Vyhodnocení měření frekvenčních závislostí zkonstruovaných reprodukčních soustav

8.8.1 Vyhodnocení laboratorních měření

U naměřených laboratorních hodnot byla sledována strmost křivky s ohledem na význam nízkých frekvencí (25Hz - 100Hz) při subjektivním vnímání zvuku. Dále byl sledován průběh závislosti hodnot hladin akustického tlaku v oblastech 25 Hz - 500Hz pro nízké frekvence, 500Hz - 2000Hz pro střední frekvence a 2000Hz - 20000Hz pro vysoké frekvence.

Na základě naměřených frekvenčních charakteristik materiálů A a B s hladkou deskou a s deskou s pyramidovými výstupky pro přední stranu - viz. příloha P XIII - vyplývá, že nejvyšší strmosti zvyšující se hodnoty hladiny akustického tlaku dosahuje materiál A s hladkým povrchem. Naopak nejmenší změny nárůstu hodnot hladiny akustického tlaku vykazuje materiál B s hladkým povrchem. Ve frekvenčním rozmezí 25 Hz - 500Hz dosahuje nejvyšších hodnot hladin akustického tlaku materiál B s hladkým povrchem. Nejnižších hodnot ve frekvenčním rozmezí 25Hz - 100Hz byla naměřena frekvenční závislost u materiálu A s pyramidovými výstupky, který v rozmezí 100Hz - 500Hz má obdobnou frekvenční charakteristiku jako materiál A s hladkým povrchem, tedy také nejnižší. Pro frekvenční rozmezí 500Hz - 20000Hz byla u materiálu A jak s hladkým povrchem, tak s povrchem s pyramidovými výstupky sledována frekvenční charakteristika s nejnižšími hodnotami hladin akustického tlaku a naopak u materiálu B s hladkým povrchem byla stanovena tato charakteristika s nejvyššími hodnotami.

Z naměřených frekvenčních charakteristik materiálů A a B s hladkou deskou a s deskou s pyramidovými výstupky pro zadní stranu - viz. příloha P XIV - lze říci, že nejvyšší strmost zvyšujících se hodnot hladin akustického tlaku vykazuje materiál A s hladkým povrchem. Nejmenší změny hodnot hladiny akustického tlaku při nízkých frekvencích byl naměřen u materiálu B s hladkým povrchem. Ve frekvenčním rozmezí 100 Hz - 500Hz dosahuje nejvyšších hodnot hladin akustického tlaku materiál B s hladkým povrchem. Nejnižších hodnot ve frekvenčním rozmezí 100Hz - 500Hz byla naměřena frekvenční závislost u materiálu B s pyramidovými výstupky. Ve frekvenčním rozmezí 500Hz - 2000Hz byla sledována u materiálu B s hladkým povrchem nejvyšší hladina akustického tlaku. V tomto rozmezí (500Hz - 2000Hz) dosahoval nejnižších hodnot hladin akustického tlaku materiál B s pyramidovými výstupky. V rozmezí nejvyšších frekvencí (2000Hz - 20000Hz) byly naměřeny nejvyšší hladiny akustického tlaku u materiálu B s pyramidovými výstupky, zatímco nejnižších hladin akustického tlaku dosahoval materiál A s pyramidovými výstupky.

Měřením charakteristik materiálů A a B s hladkou deskou a s deskou s pyramidovými výstupky pro zadní stranu - viz. příloha P XIV - lze vyvodit, že nejvyšší strmosti nárůstu hladin akustického tlaku

vykazuje materiál A s hladkým povrchem. Nejvyšší hladiny akustického tlaku byly naměřeny v celém rozsahu u materiálu B s hladkým povrchem. Ve frekvenčním rozmezí 25Hz - 2000Hz byly naměřeny nejnižší hladiny akustického tlaku u materiálu A s hladkým povrchem a materiálu A s pyramidovými výstupky. V rozmezí 2000Hz - 20000Hz byly naměřeny nejnižší hodnoty hladin akustického tlaku u materiálu B s pyramidovými výstupky.

Z teoretického hlediska by měla být splněna podmínka, že nejvyšších hodnot hladin akustického tlaku by měly dosahovat materiály s hladkým povrchem, naopak nejnižších hodnot materiály s pyramidovými výstupky. Na základě celkových výsledků - viz. tab 17 a tab. 18 - lze konstatovat, že teoretickému předpokladu nejlépe odpovídajících hodnot dosahuje materiál B.

Tab. 16: Značení reproduktorových skříní

Značení	Matrice	Morfologie
A1	Polyesterová	Hladká
A2	Polyesterová	Pyramidové výstupky
B1	Epoxidová	Hladká
B2	Epoxidová	Pyramidové výstupky

Tab. 17 Nejvyšší naměřené hodnoty hladin akustického tlaku

Nejvyšší hodnoty hladin akustického tlaku			
	Frekvence [Hz]		
	25 - 500	500 - 2000	2000 - 20000
Přední strana	B1	B1	B1
Zadní strana	B1	B1	B2
Boční strana	B1	B1	B1

Tab. 18: Nejnižší naměřené hodnoty hladin akustického tlaku

Nejnižší hodnoty hladin akustického tlaku			
	Frekvence [Hz]		
	25 - 500	500 - 2000	2000 - 20000
Přední strana	A1	B2	B2
Zadní strana	A1	B2	B2
Boční strana	A1	A2	B2

8.8.2 Vyhodnocení měření provedených firmou AQ s.r.o.

Pro vyhodnocení frekvenčních charakteristik byla sledována oblast 60Hz - 20000Hz. Byla sledována hladkost křivky frekvenční závislosti a porovnání vlivu složení materiálu a morfologické úpravy povrchu na tuto hladkost. Všechna měření jsou uvedena v přílohách P XI, P XII a P XVIII.

Z frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku materiálu A i B - viz. příloha P XI - je patrné, že v celém frekvenčním rozmezí vykazuje tato grafická závislost velmi podobný průběh. Nepatrně lepší výsledky vykazuje materiál A. Proto jsou v dalších přílohách uvedeny naměřené hodnoty pro materiál A, kde byl sledován vliv morfologie povrchu ozvučnice v porovnání s průmyslově vyráběnou reproduktorovou soustavou T 85 firmou AQ s.r.o.

Z grafické závislosti hladiny akustického tlaku na frekvenci u materiálu A s hladkým povrchem a materiálu A s pyramidovými výstupky - viz příloha P XII - lze stanovit, že větší hladkosti křivky dosahuje materiál A s pyramidovými výstupky. Jinými slovy lze říci, že podstatnější vliv na akustické vlastnosti reproduktorové soustavy má morfologie povrchu ozvučnice, než materiál z kterého je ozvučnice vyrobena s ohledem na zvolený druh materiálu, tedy plast-beton.

Při porovnání frekvenčních charakteristik zkonstruované reproduktorové soustavy z materiálu A a reproduktorové soustavy AQ Tango 85 lze konstatovat, že ve frekvenčním rozmezí 60 Hz - 1000Hz dosahuje vyšších hodnot hladin akustického tlaku AQ Tango 85. Naopak nižší hodnoty tato reproduktorová soustava vykazuje ve frekvenčním rozmezí 1000Hz - 2000Hz. V rozmezí 2000Hz - 20000Hz jsou frekvenční charakteristiky u reproduktorové soustavy vyrobené z materiálu A s pyramidovými výstupky a reproduktorové soustavy AQ Tango 85 podobné.

Na základě všech těchto výsledků je možné vyhodnotit jako lepší materiál z hlediska vyrovnanosti frekvenční charakteristiky materiál A s pyramidovými výstupky než materiál B.

Porovnání frekvenčních závislostí získaných laboratorním měřením potvrdilo teoretický předpoklad, že díky morfologické úpravě materiálu dochází ke snížení hladiny akustického tlaku vně reproduktorové skříně více v porovnání s materiálem bez této úpravy. Měření frekvenčních závislostí s vysokým rozlišením firmou AQ s.r.o. potvrdilo zvýšení vyrovnanosti frekvenční charakteristiky a tedy zlepšení akustických vlastností ozvučnice.

9 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VIBRAČNÍCH CHARAKTERISTIK SLEDOVANÝCH MATERIÁLŮ

Vibrační charakteristiky sledovaných materiálů byly měřeny na přístroji Bruel/Kjaer 3560-B-030, na vzorcích ozvučnic o ploše 60 x 60mm. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v přílohách P XIX - P XXII.

Pro vyhodnocení byla uvažována frekvenční oblast 1Hz - 6400Hz.

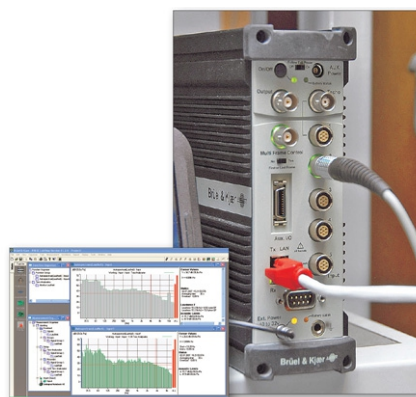
Z grafické závislosti zrychlení na frekvenci pro materiál A s hladkým povrchem - viz. P XIX - lze konstatovat, že ke vzniku rezonancí dochází v okolí frekvence 5kHz. V materiálu A s pyramidovými výstupky docházelo k rezonancím v okolí frekvence 2,55kHz. Pro materiál B s hladkou morfologií povrchu byl naměřen vznik rezonancí v okolí frekvence 2,55kHz. Materiál B s pyramidovými výstupky vykazoval rezonance v okolí frekvence 4,05kHz.

Tab. 19: Tabulka rezonančních frekvencí

Materiál	Rezonanční frekvence [kHz]
A1	5,00
A2	2,55
B1	2,55
B2	4,05

U materiálu A2 s pyramidovými výstupky došlo ke vzniku rezonancí ve dvou oblastech 2,55kHz a 2,70kHz. Pro vyhodnocení byla uvažována oblast 2,55kHz, protože nízké rezonanční frekvence jsou z hlediska výroby ozvučnic kritické.

Na základě naměřených vibračních charakteristik lze říci, že nejvyšší rezonančních frekvencí dosáhl materiál A1 5,00kHz, zatímco nejnižší A2 2,55kHz a B1 2,55kHz. Lze tedy konstatovat, že z hlediska akusticko-vibračních dosahuje nejlepších výsledků materiál A1.



Obr. 68: Tříkanálový Pulse Multi analyzátor Bruel/Kjaer a pracovní prostředí

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout optimální řešení konstrukce reproduktorové soustavy z hlediska frekvenčních charakteristik za cílem hledání nejlepšího kompromisu mezi materiálovým složením a morfologií povrchu měřených reproduktorových soustav.

Byly naměřeny a vyhodnoceny fyzikální vlastnosti materiálů (hustota, modul pružnosti v tahu), frekvenční charakteristiky reproduktorových soustav ve spektru 25 Hz - 20 kHz a vibrační charakteristiky ve spektru 1,6 Hz - 6,4 kHz. Z těchto měření byly vyvozeny výsledky, které sloužily pro návrh nejlepšího možného řešení stavby reproduktorové skříně. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při aplikaci zadní stěny s pyramidovými výstupky z materiálu s polyesterovou pryskyřicí. Tyto výsledky korespondovaly s teoretickým předpokladem. Cílem pokusu bylo významné omezení stojatého vlnění díky zadní stěně s pyramidovými výstupky. Odražená složka vlny dopadající na takový výstupek je odražena pod úhlem, který eliminuje vznik stojatého vlnění. Odražená složka vlny je dále odrážena pod tupými úhly mezi výstupky, nikoliv zpět.

Byly připraveny materiály na bázi partikulárních kompozitních materiálů, které byly plněny křemičitým pískem s velikostí zrn 0 - 2 mm. Matrice byly z epoxidové pryskyřice a z polyesterové pryskyřice. Morfologie povrchů materiálů byla s pyramidovými výstupky a s hladkou stěnou. Z těchto materiálů byly vyrobeny ozvučnicové desky, z kterých byly zkonstruovány reproduktorové soustavy. Z teoretického hlediska by měla být splněna podmínka, že nejvyšších hodnot hladin akustického tlaku by měly dosahovat materiály s hladkým povrchem, naopak nejnižších hodnot materiály s pyramidovými výstupky. Na základě celkových výsledků lze konstatovat, že teoretickému předpokladu nejlépe odpovídajících hodnot dosahuje materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z epoxidové pryskyřice.

Takto laboratorně získané výsledky byly konfrontovány s výsledky měření realizovanými firmou AQ s.r.o., která touto problematikou dlouhodobě zabývá nejen na českém trhu a disponuje vlastními měřicími aparaturami a laboratorními zařízeními. Z těchto výsledků je patrné, že nejlepší akustické vlastnosti pro stavbu reproduktorových sestav vykazuje materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s pyramidovými výstupky.

Vibrační charakteristiky sledovaných materiálů byly měřeny na přístroji Bruel/Kjaer ve frekvenčním rozmezí 1Hz - 6400Hz. Na základě měření lze vyhodnotit, že ke vzniku rezonancí dochází v materiálu

Z naměřených vibračních charakteristik lze usoudit, že nejvyšší rezonančních frekvencí dosáhl materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s hladkým

povrchem, zatímco nejnižší materiály partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s pyramidovými výstupky a materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z epoxidové pryskyřice s hladkým povrchem.

Lze tedy konstatovat, že z hlediska akusticko-vibračních dosahuje nejlepších výsledků materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s hladkým povrchem.

10.1 Návrh ozvučnice na základě vyhodnocených výsledků

Na základě všech měření a získaných výsledků lze vyhodnotit, že pro stavbu ozvučnice reprodukto-rové sestavy se jeví jako neoptimálnější materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s pyramidovými výstupky. Rezonanční frekvence tohoto materiálu nebyla vyhodnocena jako nejvyšší, což by znamenalo jako nejlepší. Přesto byl tento materiál vybrán jako nejlepší s ohledem na výsledky měření frekvenčních závislostí, ve kterých dosahoval nejhladšího průběhu křivky. Frekvenční charakteristika je souborem všech akustických vlastností reprodukto-rové soustavy, proto byl na výsledky tohoto měření při výběru nejlepšího materiálu kladen největší důraz.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se ve své teoretické části zabývá kmitavými ději, šířením zvukové vlny prostředím a také parametry charakterizujícími zvuk. V této části je také zpracována problematika reprodukce zvuku s charakteristikou a popisem přístupů k ozvučení, reproduktorových soustav a jejich konstrukce. V poslední části je analyzována a popsána konstrukce reproduktorových soustav. V praktické části byly sledovány akusticko-mechanické vlastnosti reproduktorových soustav v závislosti na tvaru a materiálu ozvučnice.

Byly navrženy a zkonstruovány ozvučnice na bázi partikulárních kompozitních materiálů. U těchto materiálů byly stanoveny mechanické a akustické vlastnosti. Experimentálně byly naměřeny a vyhodnoceny frekvenční závislosti hladiny akustického tlaku a akcelerace odezvy materiálu. Získané výsledky byly konfrontovány s výsledky naměřenými ve firmě AQ s.r.o. Pro tato měření byly použity ozvučnicové desky z vybraných materiálů s morfologicky modifikovanými povrchy - křemičitý písek v reaktoplastické matrici v kombinaci epoxidové a polyesterové pryskyřice. Byla navržena a zkonstruována reproduktorová soustava s ohledem na neoptimálnější morfologii povrchu.

Z naměřených vibračních charakteristik lze usoudit, že nejvyšší rezonančních frekvencí dosáhl materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s hladkým povrchem, zatímco nejnižší materiály partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s pyramidovými výstupky a materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z epoxidové pryskyřice s hladkým povrchem.

Na základě všech měření a získaných výsledků lze vyhodnotit, že pro stavbu ozvučnice reproduktorové sestavy se jeví jako neoptimálnější materiál partikulárního kompozitního materiálu s matricí z polyesterové pryskyřice s pyramidovými výstupky. Rezananční frekvence tohoto materiálu nebyla vyhodnocena jako nejvyšší, což by znamenalo jako nejlepší. Přesto byl tento materiál vybrán jako nejlepší s ohledem na výsledky měření frekvenčních závislostí, ve kterých dosahoval nejhladšího průběhu křivky. Frekvenční charakteristika je souborem všech akustických vlastností reproduktorové soustavy, proto byl na výsledky tohoto měření při výběru nejlepšího materiálu kladen největší důraz.

Při výběru materiálu pro konstrukci ozvučnice je nutné si uvědomit, že reproduktorová soustava je složitá soustava prvků, které výrazně ovlivňují celkový zvukový projev reproduktorové soustavy. To je velice důležité z hlediska výběru vhodných komponent. Tyto komponenty, mezi které patří i reproduktorová skříň, je důležité volit s ohledem na předpokládaný výsledek. Rozhodujícím kritériem při výběru reproduktorové soustavy je totiž pro posluchače subjektivní dojem. Ten je ovlivněn druhem aplikace reproduktorové soustavy. Jiné vlastnosti jsou vyžadovány od reproduktorových

skříní používaných pro profesionální ozvučení, domácí poslech, nebo průmyslové aplikace. Při poslechu hudby je také důležitý „charakter“ zvuku. Pro různé styly hudby se tedy hodí reproduktorové soustavy s různým projevem, například s důrazem na nízké, nebo střední frekvence.

CONCLUSION

This thesis , in its theoretical part deals with oscillating storyline, the spread of the sound wave environment and the parameters characterizing the sound. This section also handles the problem sound reproduction characteristics with a description of the approach to sound , speaker systems and their design . The last part is analyzed and described the structure of the speaker . In the practical part were monitored acousto - mechanical properties of the speaker , depending on the shape and material of the baffle.

They were designed and built enclosure -based particulate composite materials. For these materials were determined mechanical and acoustic properties. Experimentally measured and evaluated the frequency dependence of the sound pressure and acceleration response of the material. The results were compared with results measured in company AQ sro For these measurements were used soundboards of selected materials with morphologically modified surfaces - quartz sand in a thermosetting matrix in the combination of epoxy and polyester resins . Was designed and constructed speaker with respect to the optimal surface morphology .

From the measured vibration characteristics can be concluded that the highest resonant frequency of the material has reached a particulate composite material having a matrix of polyester resin having a smooth surface , while the lowest materials particulate composite material having a matrix of polyester resin with pyramidal protrusions and the material of the particulate composite material having a matrix of epoxy resin smooth surface.

On the basis of the measurement and the results obtained can be evaluated , for the construction of the speaker baffle assembly seems neoptimálnější material particulate composite material having a matrix of polyester resin with pyramidal protrusions . The resonant frequency of this material have not been evaluated as the highest , which would be the best . Nevertheless , this material was chosen as the best , the results of measurements of frequency dependence , which were reached in the course of the smoothest curve. Frequency response is a set of acoustic characteristics of the speaker , so it was the results of this measurement in selecting the best material placed greatest emphasis .

When selecting the material for the construction of the baffle is important to realize that the speaker system is a complex system of elements which significantly affect the overall audio performance loudspeaker system. It is very important for the selection of suitable components. These components , which include the speaker cabinet , it is important to vote with respect to the expected result.

The key criterion in the selection of the speaker to the listener is the subjective impression. He is influenced by the type of speaker system. Other properties required of the speaker cabinets used for professional sound systems, home listening , or industrial applications. While listening to music is also an important "character" of sound. For the different styles of music are well suited loudspeaker system with different expressions , for example , with an emphasis on low or medium frequencies.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 188 s., 1998, ISBN 80-901-9362-5.
- [2] HALLIDAY, David. *Fyzika: [vysokoškolská učebnice obecné fyziky]*. 2. přeprac. vyd. Brno: VUTIUM, 2 svazky. Překlady vysokoškolských učebnic (VUTIUM). 2013, ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] SCHAUER P. Mechanické kmity [online]. 2010 [cit. 28.5.2014]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/mechanicke_kmity.pdf
- [4] MIŠUN, Vojtěch. *Vibrace a hluk*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 177 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). 1998, ISBN 80-214-1262-3.
- [5] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 146 s. 2002, ISBN 80-010-2460-1.
- [6] Vlnění [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.e-fyzika.cz/kapitoly/16-vlneni.pdf>
- [7] MENCL L. Hluk a vibrace z dopravy a jejich působení na lidský organismus [online]. [cit. 28.5.2014]. Dostupné z: http://envi.upce.cz/pisprace/ks_pce/menc.pdf
- [8] JAKSCH I. Technická diagnostika Základy akustiky a hlukové diagnostiky. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P7_hluk_ESF.pdf
- [9] SCHAUER P. Vybrané statě z akustiky [online]. 2008 [cit. 28.5.2014]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf
- [10] ADÁMKOVÁ HEIDROVÁ H. Dějiny hudby. Ostrava: Janáčkova konzervatoř a Gymnázium v Ostravě, 2010.
- [11] TOMAN K. Reprodukory a reprosoustavy II. . Orlová: Dexon Czech s.r.o., 2010.
- [12] SVOBODA L., ŠTEFAN M. Reprodukory a reproduktorové soustavy. . Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1976.
- [13] Katalog AQ s.r.o. [online]. [cit. 28.5.2014]. Dostupné z: http://www.aq.cz/images/d5_UK-catalogues/6-file-File-AQ-cz_2000.pdf
- [14] Bowers & Wilkins [online]. [cit. 28.5.2014]. Dostupné z: http://www.bowers-wilkins.eu/Speakers/Home_Audio/Nautilus/Technologies.html

-
- [15] HORNÍKOVÁ, Jana. *Pružnost a pevnost: Interaktivní učební text*. 1. vyd. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-720-4268-8.
- [16] ČSN EN 60268-5. *ČSN EN 60268-5: Elektroakustická zařízení - Část 5: Reprodukory*.
- [17] Komputerswiat [online]. [cit. 28.5.2014] Dostupné z: <http://www.komputerswiat.pl/media/1320117/pomiar2-prezentacja-op.jpg>
- [18] JIRÁSEK, Jiří. *Studium tepelných vlastností kompozitních materiálů*: Bakalářská práce, Zlín, UTB ve Zlíně, 2010

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

κ	Vlnové číslo [m^{-1}]
ω	Úhlová frekvence [s^{-1}]
c	Rychlost zvuku [ms^{-1}]
F	Síla [N]
m	Hmotnost [kg]
a	Zrychlení [m.s^{-2}]
k	Tuhost pružiny [Nm^{-1}]
π	Ludolfovo číslo
x	Výchylka [m]
e	Eulerovo číslo [-]
b	Součinitel útlumu [s^{-1}]
φ	Fáze kmitu
E	Energie [J]
v	Rychlost [m.s^{-1}]
P	Výkon [W]
I	Intenzita [dB]
T	Perioda kmitů [s]
f	Frekvence [s]
α	Součinitel pohltivosti
R	Koeficient odrazu
j	Imaginární složka rovnice
ρ	Hustota [kg.m^{-3}]
z	Vlnový odpor [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]
d	Interferenční maximum [m]
p	Tlak [Pa]
t	Čas [s]
$\overline{N}_{(t)}$	Měrný akustický výkon [W.m^{-2}]
$\overline{P}_{(t)}$	Střední hodnota akustického výkonu [W.s^{-1}]
w	Objemová hustota akustické energie [W.s.m^{-3}]
Φ	Fázový úhel [rad]
L_1	Hladina akustické intenzity [dB]
L_p	Hladina akustického tlaku [dB]
I_0	Referenční hodnota akustické intenzity
P_0	Referenční hodnota akustického tlaku
l	Délka [m]
a	Zrychlení [m.s^{-2}]
$x(t)$	Relativní pohyb seismické části vůči pevnému bodu [m]
$y(t)$	Absolutní pohyb seismické části vůči pevnému bodu [m]
$z(t)$	Absolutní pohyb báze vůči pevnému bodu [m]
m	Metr
mm	Milimetr
kg	Kilogram
MLSSA	Maximum length sequence system analyser
Hz	Hertz
kHz	Kilohertz
dB	Decibel
cm	Centimetr
s	Sekunda
N	Newton
J	Joule

Pa	Pascal
rad	Radián
W	Watt
Obr.	Obrázek
Tab.	Tabulka
P_I	Příloha
viz.	Lze vidět
E	Modul pružnosti v tahu [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$]
σ	Napětí [Pa]
ε	Deformace[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Šíření zvukové vlny prostředím v podobě vlnoplochy a zvukový paprsek[1].....	14
Obr. 2: Grafické znázornění průběhu výchylek příčného a podélného vlnění a) tuhé prostředí b) kapalně a plynné prostředí [1].....	15
Obr. 3: Znázornění kmitání částic při průchodu zvukové vlny[2].....	16
Obr. 4: Časové rozvinutí harmonického kmitání[1].....	17
Obr. 5: Nomogram závislosti doby kmitu, kmitočtu a úhlového kmitočtu (hrubé a jemné hodnoty) [1].....	18
Obr. 6: Časové rozvinutí průběhu výchylky, rychlosti a zrychlení hmotného bodu při jeho harmonickém kmitání[1].....	19
Obr. 7: Přepočítání kmitočtu na vlnovou délku (Hrubé a jemné závislosti)[1].....	20
Obr. 8: Model harmonických kmitů tělesa na pružině[2].....	21
Obr. 9: Grafické znázornění harmonického oscilátoru v čase[3].....	22
Obr. 10: Časová závislost výchylky kmitu tlumeného oscilátoru[2].....	22
Obr. 11: Šíření zvuku v podobě kulové vlnoplochy[4].....	23
Obr. 12: Konstrukce odrazu paprsků pomocí zrcadlového odrazu[1].....	24
Obr. 13: Lom a odraz paprsku na rozhraní s danou hustotou a rychlostí šíření paprsku[1].....	24
Obr. 14: Porovnání odrazu vlny na rovinné desce a na pyramidových výstupcích.....	26
Obr. 15: Příklad nárůstu amplitudy při rezonanci[2].....	27
Obr. 16: Interference dvou vln[6].....	28
Obr. 17: Hladiny akustického tlaku odpovídající daným pásmům[7].....	30
Obr. 18: Hlukoměr[8].....	30
Obr. 19: Sinusový průběh zvukové vlny[9].....	31
Obr. 20: Šíření zvukové vlny prostředím[2].....	31
Obr. 21: Šíření zvukové vlny prostředím[2].....	31
Obr. 22: Znázornění šíření energie v podobě kulové vlnoplochy[4].....	32
Obr. 23: Barkhausenovy křivky stejné hlasitosti[9].....	34

Obr. 24: Hranice slyšitelnosti, hmatový práh a práh bolesti[9].....	35
Obr. 25: Frekvenční závislosti základních veličin vibrací[8].....	35
Obr. 26: Obecné schéma akcelerometru[].....	36
Obr. 27: Zapojení vícepásmové reproduktorové soustavy.....	40
Obr. 28: Vznik a průběh zvukové vlny za a před reproduktorem[12].....	41
Obr. 29: Hlubokotónové reproduktory[12].....	42
Obr. 30: Řez středotónovými reproduktory s kuželovou a kalotovou membránou[12].....	42
Obr. 31: Středotónové reproduktory s kuželovou a kalotovou membránou[12].....	42
Obr. 32: Kalotový reproduktor a kompresní jednotka[12].....	43
Obr. 33: Širokopásmový koaxiální reproduktor[12].....	43
Obr. 34: Elektromagnetický obvod[11].....	44
Obr. 35: Elektromagnetické obvody s vnitřním a vnějším magnetem[11].....	44
Obr. 36: Kmitací cívka v magnetickém obvodu[2].....	45
Obr. 37: Rozvinutelný a nerozvinutelný tvar membrány[12].....	45
Obr. 38: Středící prvky v podobě středící membrány, brýlí a pavoučku[11].....	46
Obr. 39: Reproduktor s klasickou prachovkou a akustickým impedančním equalizérem[12].....	46
Obr. 40: Funkce výhybky.....	47
Obr. 41: Zapojení dvou reproduktorů v klasickém uspořádání[12].....	49
Obr. 42: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání Push - pull[12].....	49
Obr. 43: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání Front to front isobaric[12].....	50
Obr. 44: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání Back to back isobaric [12].....	50
Obr. 45: Zapojení dvou reproduktorů v uspořádání piggyback isobaric[12].....	51
Obr. 46: Reproduktorové soustavy s kulovou ozvučnicí [13].....	53
Obr. 47: Detail reproduktorové soustavy B&W Nautilus s kuželovou ozvučnicí[14].....	53
Obr. 48: Reproduktorové soustavy B&W Nautilus s kuželovou ozvučnicí[14].....	54
Obr. 49: Band - pass reproduktorová skříň[12].....	54
Obr. 50: Frekvenční charakteristiky různě navržených ozvučnic Band - pass[12].....	54

Obr. 51: Dvou a tři komorové skříně band - pass[12].....	55
Obr. 52: Frekvenční charakteristiky soustavy s pasivním zářičem a bassreflexem[12].....	55
Obr. 53: Řešení reproduktorové skříně s pasivním zářičem[12].....	55
Obr. 54: Trhací stroj Shimadzu.....	60
Obr. 55: Vzorčky použité pro tahovou zkoušku.....	66
Obr. 56: Roztavený parafín.....	71
Obr. 57: Nátěr formy parafínem.....	72
Obr. 58: Odstranění přebytečného parafínu při impregnaci formy.....	72
Obr. 59: Výroba parafínové formy.....	73
Obr. 60: Neopracovaná zadní stěna s částečně odstraněnou parafínovou formou.....	74
Obr. 61: Detail ozvučnice s pyramidovými výstupky.....	74
Obr. 62: Čelo reproduktorové skříně.....	75
Obr. 63: Osazení reproduktorové skříně výhybkou.....	75
Obr. 64: Vnitřní prostor reproduktorové skříně.....	76
Obr. 65: Hotová reproduktorová soustava s povrchovou úpravou.....	76
Obr. 66: Prostředí programu Audacity-Linux.....	77
Obr. 67: Schéma měřicí sestavy.....	78
Obr. 68: Tříkanálový Pulse Multi analyzátor Bruel/Kjaer a pracovní prostředí.....	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přibližné rychlosti šíření zvuku v různých materiálech[1].....	19
Tab. 2: Závislost vlnové délky na kmitočtu[1].....	20
Tab. 3: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně AQ Tango 85.....	62
Tab. 4: Značení materiálů.....	66
Tab. 5: Tabulka rozměrů vzorků materiálu A.....	67
Tab. 6: Tabulka rozměrů vzorků s materiálu B.....	67
Tab. 7: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou vzorků materiálu A.....	67
Tab. 8: Hodnoty naměřené tahovou zkouškou vzorků materiálu B.....	68
Tab. 9: Tabulka naměřených hustot materiálu A.....	68
Tab. 10: Tabulka naměřených hustot materiálu B.....	69
Tab. 11: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně A1.....	69
Tab. 12: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně A2.....	70
Tab. 13: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně B1.....	70
Tab. 14: Fyzikální vlastnosti reproduktorové skříně B2.....	70
Tab. 15: Specifikace použitých reproduktorů.....	70
Tab. 16: Značení reproduktorových skříní.....	80
Tab. 17 Nejvyšší naměřené hodnoty hladin akustického tlaku.....	80
Tab. 18: Nejnižší naměřené hodnoty hladin akustického tlaku.....	80
Tab. 19: Tabulka rezonančních frekvencí.....	82

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha_P I: tahová křivka vzorku č. 1 materiálu A

Příloha_P II: Tahová křivka vzorku č. 2 materiálu A

Příloha_P III: Tahová křivka vzorku č. 3 materiálu A

Příloha_P IV: Tahová křivka vzorku č. 4 materiálu A

Příloha_P V: Tahová křivka vzorku č. 5 materiálu A

Příloha_P VI: Tahová křivka vzorku č. 1 materiálu B

Příloha_P VII: Tahová křivka vzorku č. 2 materiálu B

Příloha_P VIII: Tahová křivka vzorku č. 3 materiálu B

Příloha_P IX: Tahová křivka vzorku č. 4 materiálu B

Příloha_P X: Tahová křivka vzorku č. 5 materiálu B

Příloha_P XI: Frekvenční charakteristika materiálů A, B s pyramidovými výstupky

Příloha_P XII: frekvenční charakteristika materiálu a bez pyramidových výstupků a s výstupky

Příloha_P XIII: Frekvenční charakteristiky materiálů A, B s hladkou deskou a s pyramidovými výstupky – přední strana

Příloha_P XIV: Frekvenční charakteristiky materiálů A, B s hladkou deskou a s pyramidovými výstupky – zadní strana

Příloha_P XV: Frekvenční charakteristiky materiálů A, B s hladkou deskou a s pyramidovými výstupky – boční strana

Příloha_P XVI: Technický list pryskyřice Polyester 109

Příloha_P XVII: Technický list Epoxidové pryskyřice CHS-Epoxy 371 (epoxy 1200)

Příloha_P XVIII: Frekvenční charakteristika materiálu A s pyramidovými výstupky a AQ Tango 85

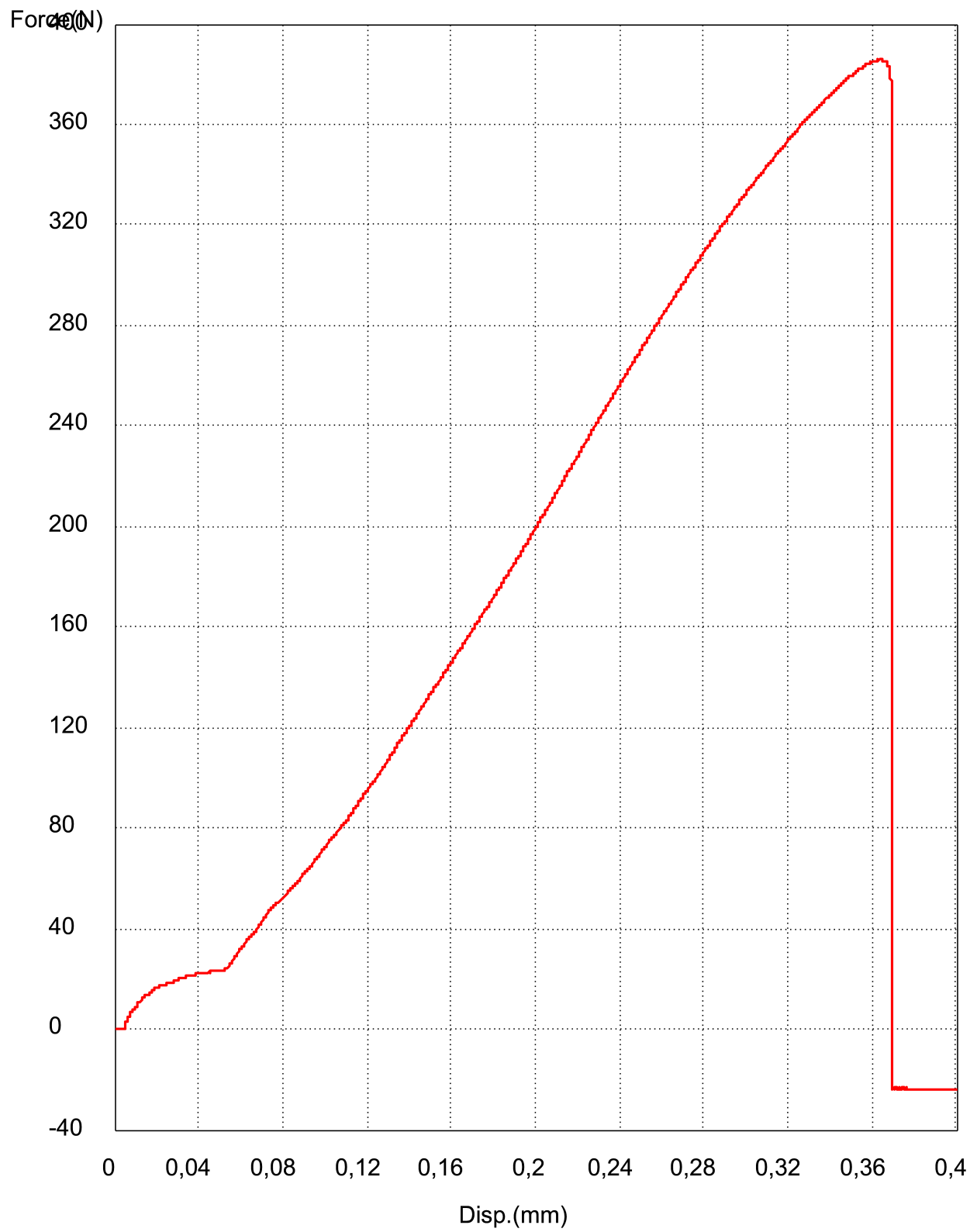
Příloha_P XIX Vibrační charakteristika materiálu A s Hladkým povrchem

Příloha_P XX Vibrační charakteristika materiálu A s pyramidovými výstupky

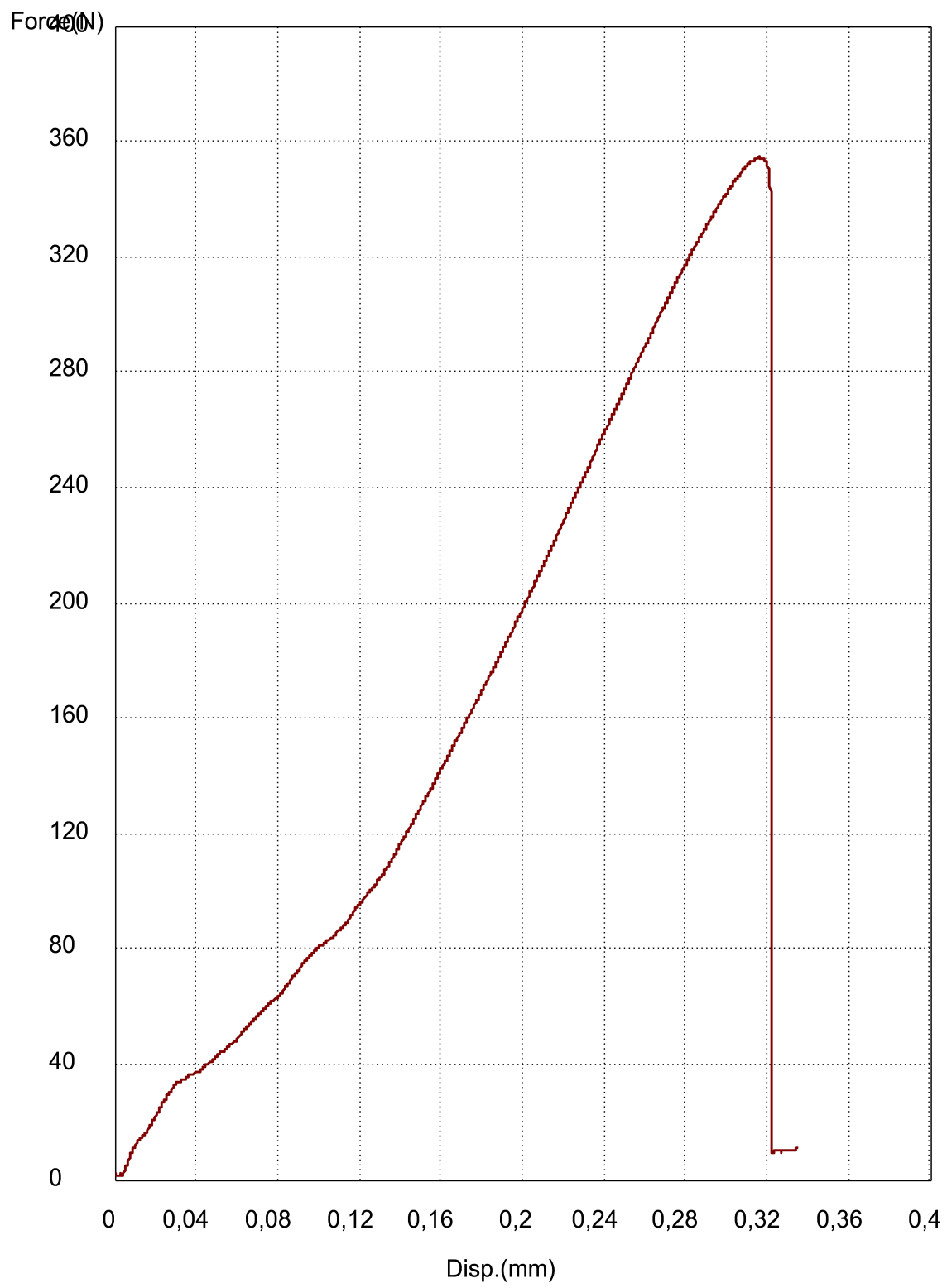
Příloha_P XXI Vibrační charakteristika materiálu B s Hladkým povrchem

Příloha_P XXII Vibrační charakteristika materiálu B s pyramidovými výstupky

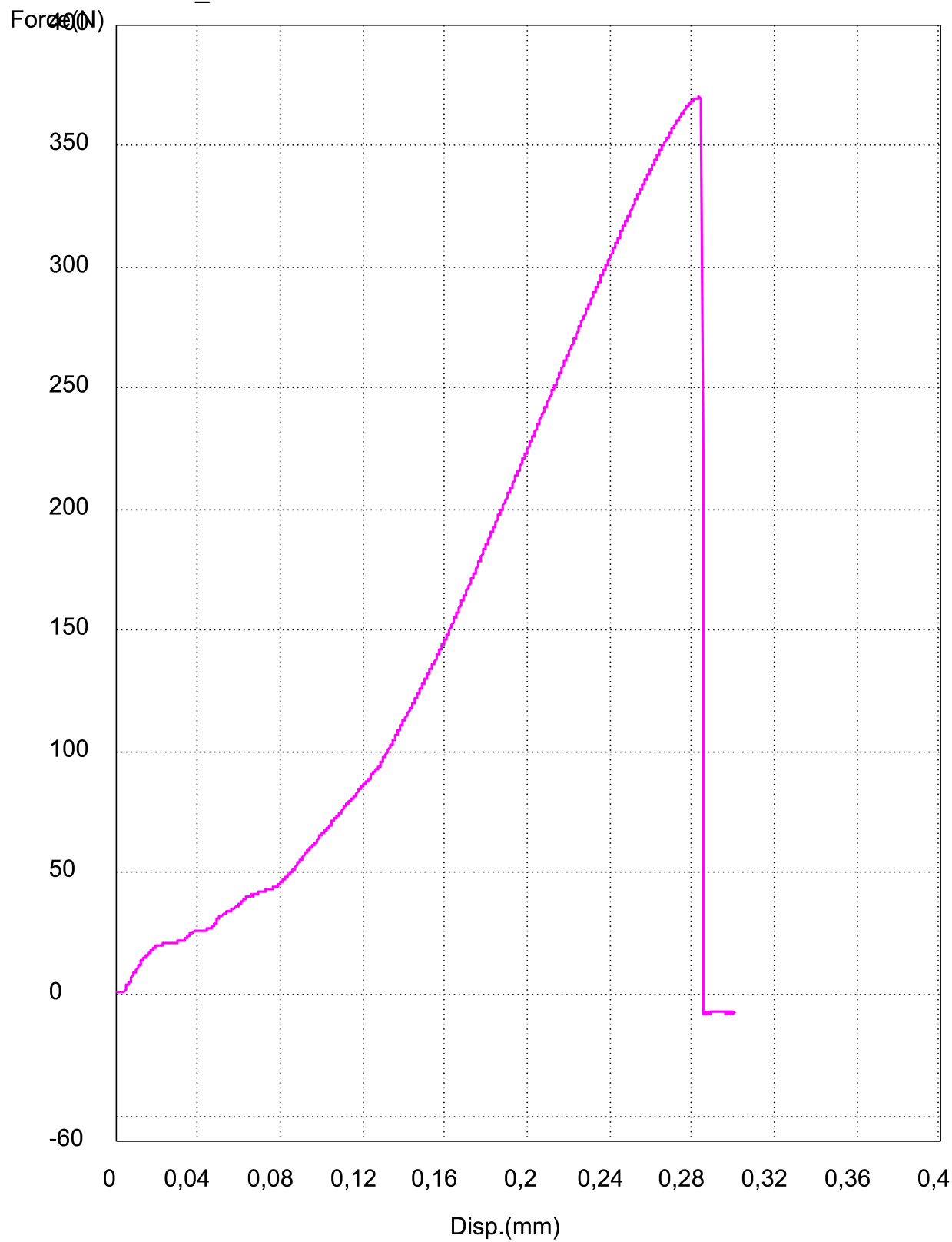
PŘÍLOHA_P I: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 1 MATERIÁLU A



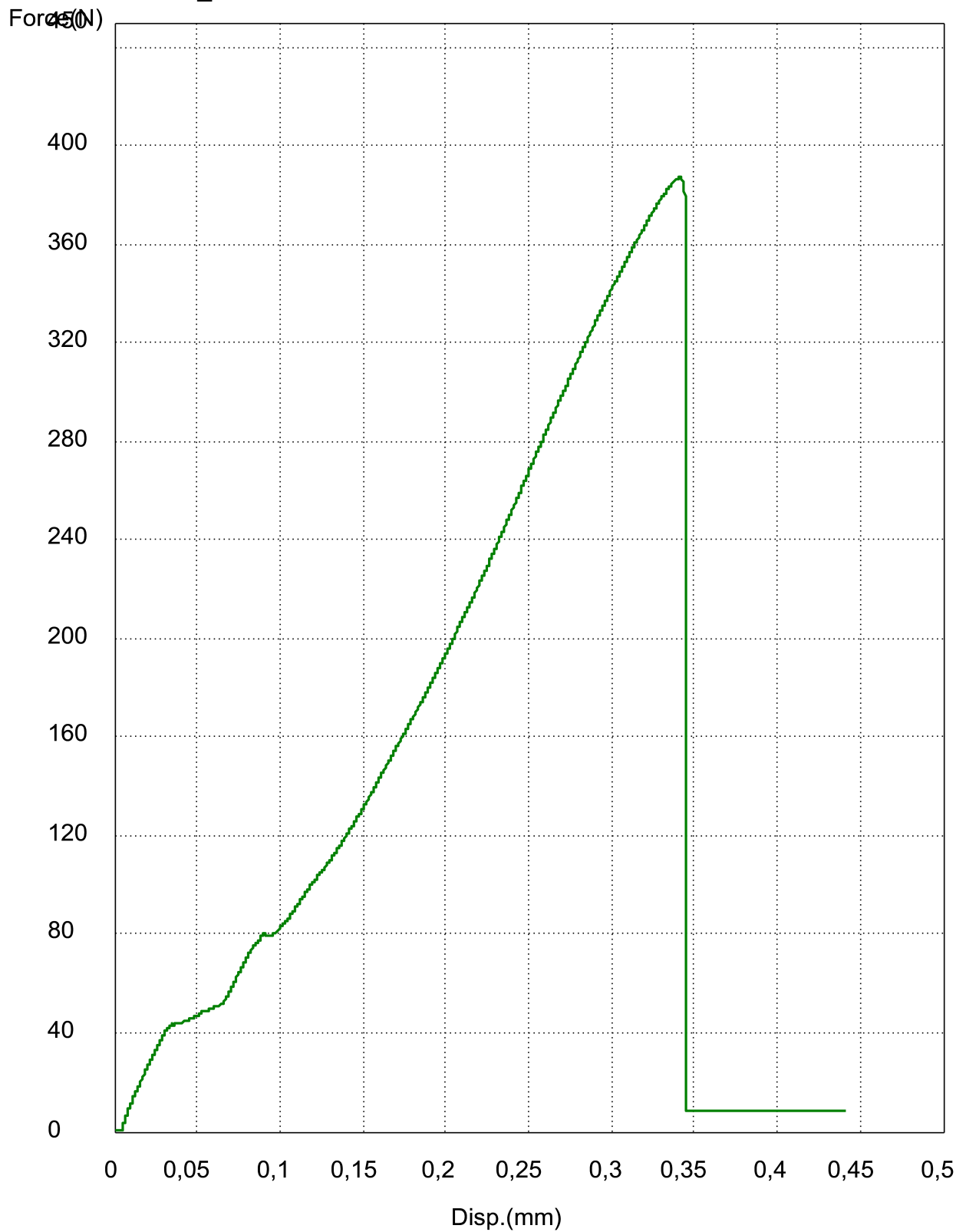
PŘÍLOHA_P II: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 2 MATERIÁLU A



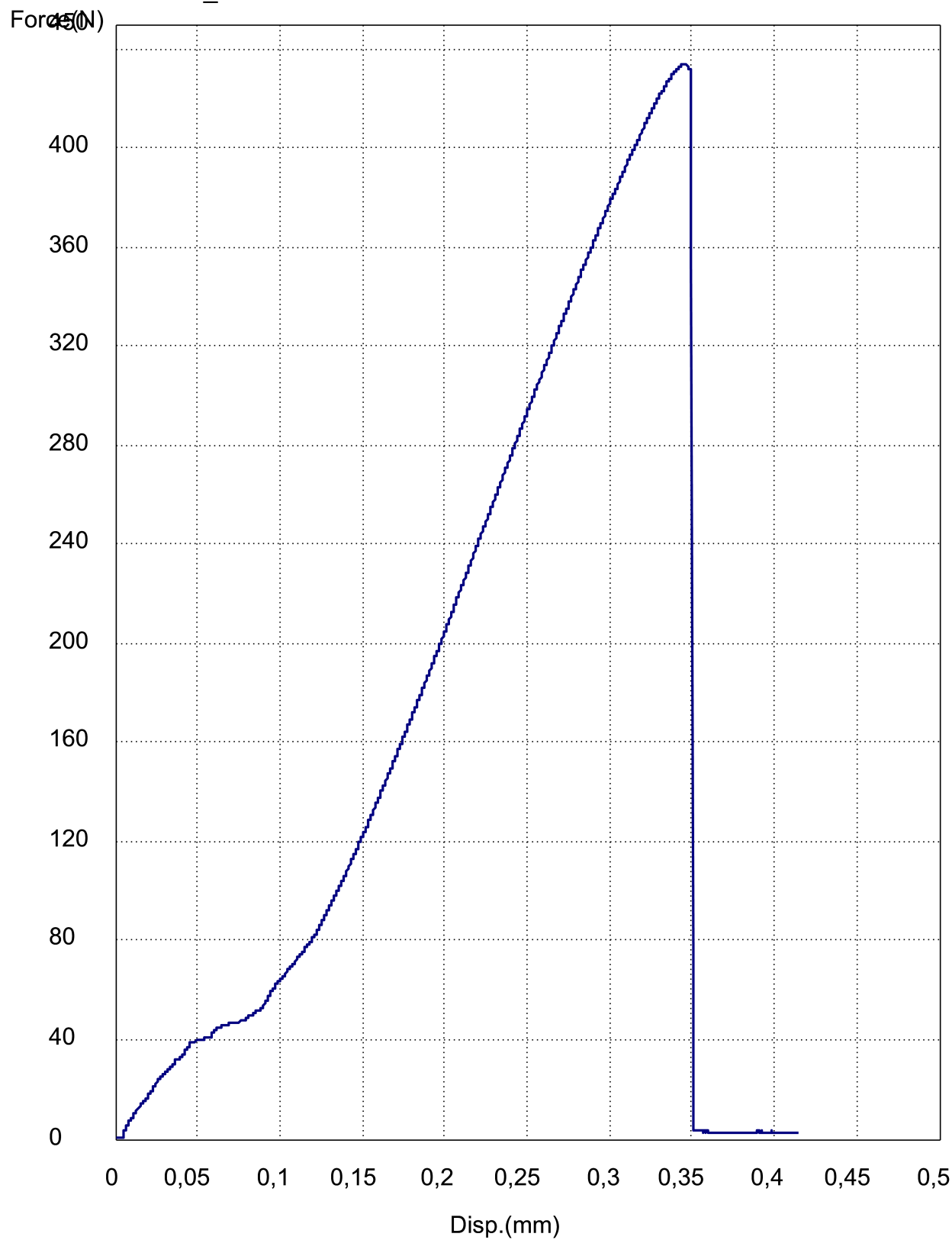
PŘÍLOHA_P III: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 3 MATERIÁLU A



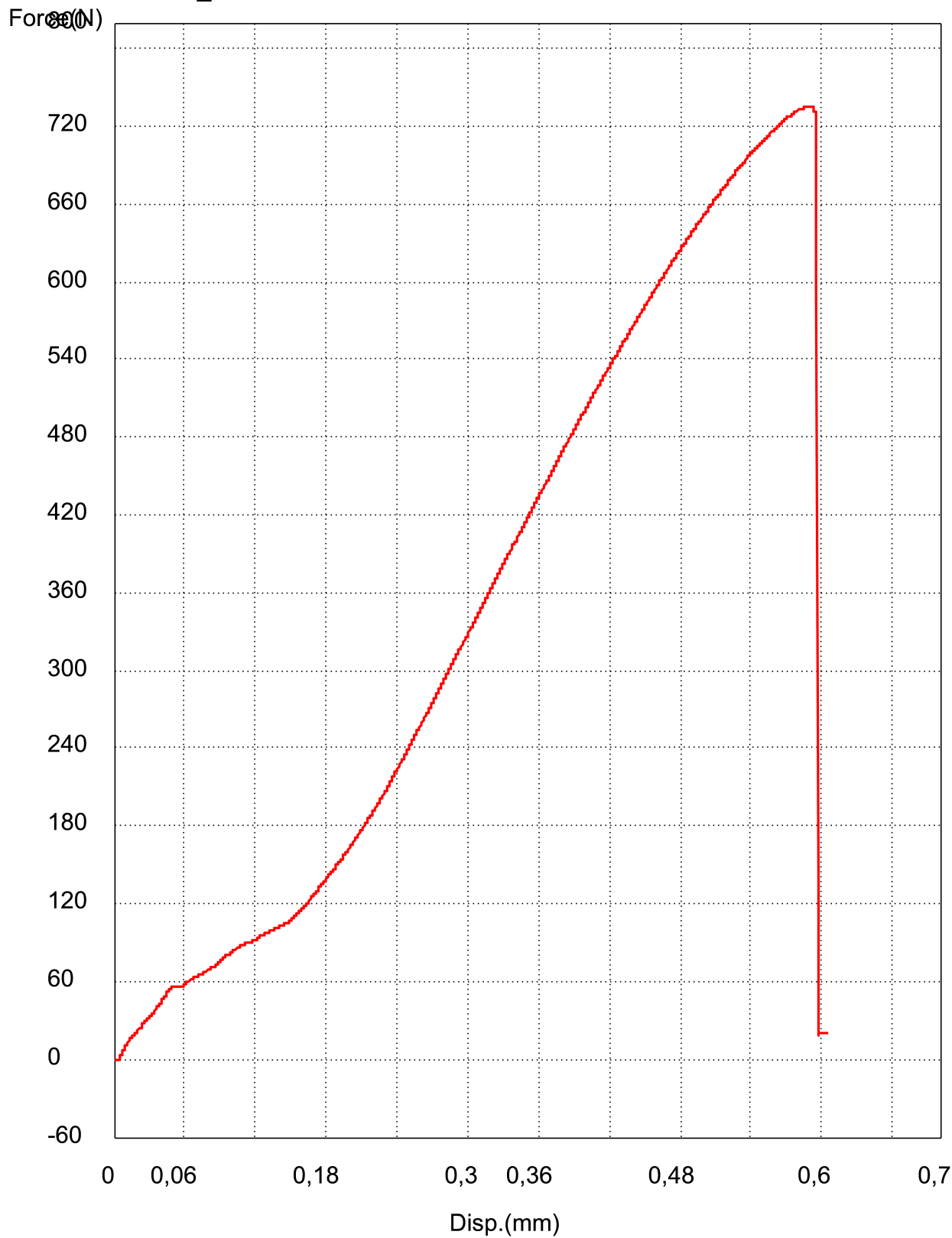
PŘÍLOHA_P IV: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 4 MATERIÁLU A



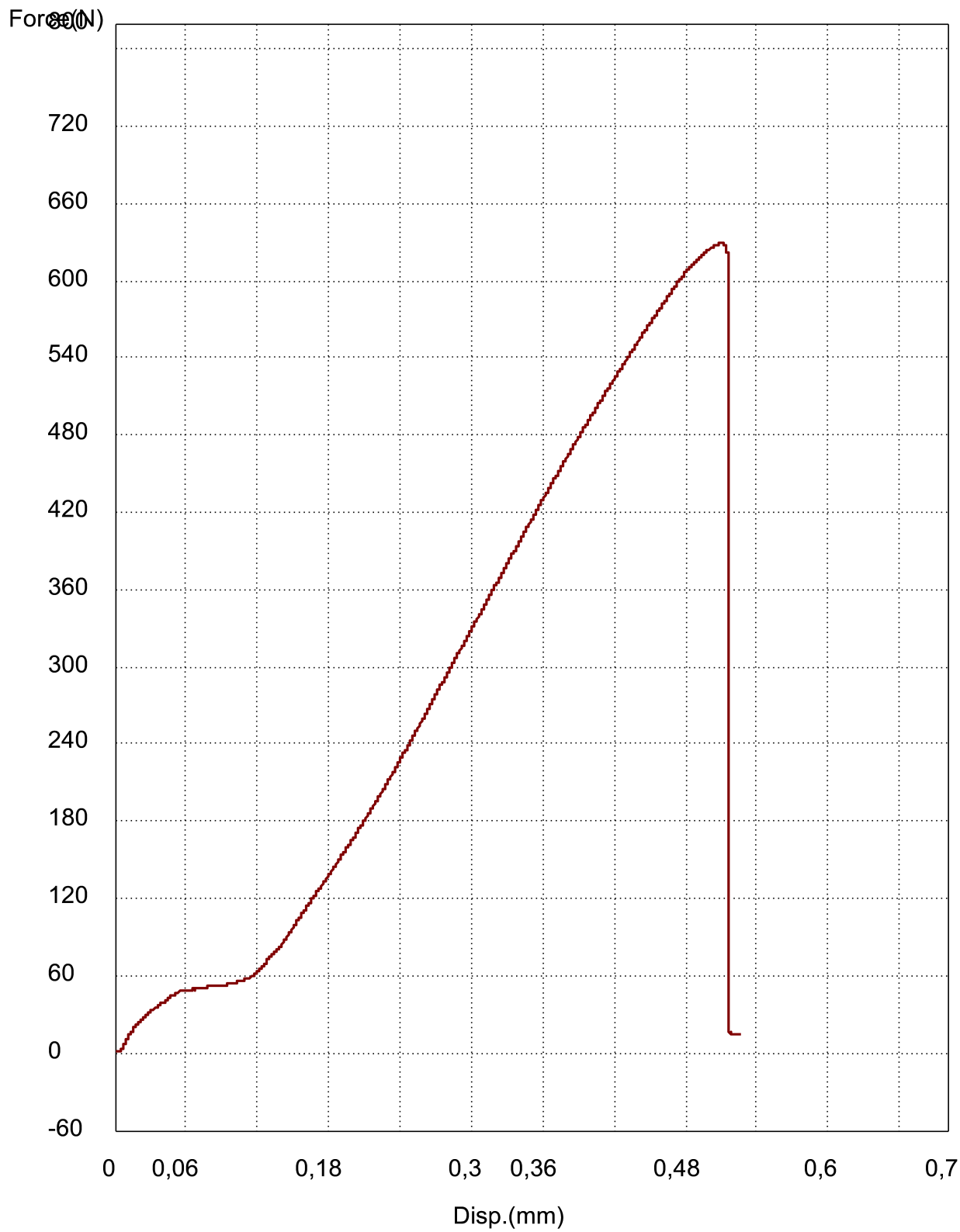
PŘÍLOHA_P V: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 5 MATERIÁLU A



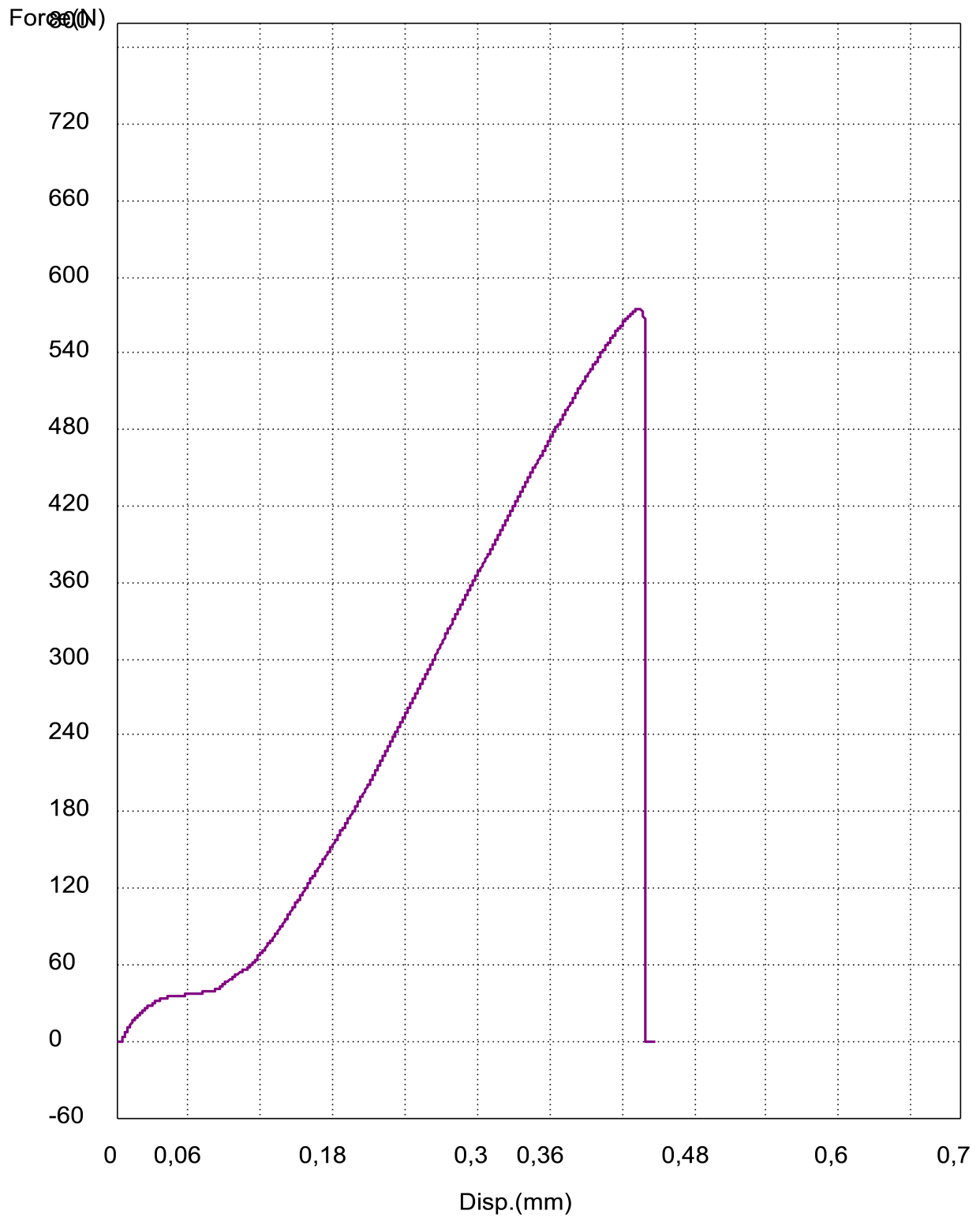
PŘÍLOHA_P VI: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 1 MATERIÁLU B



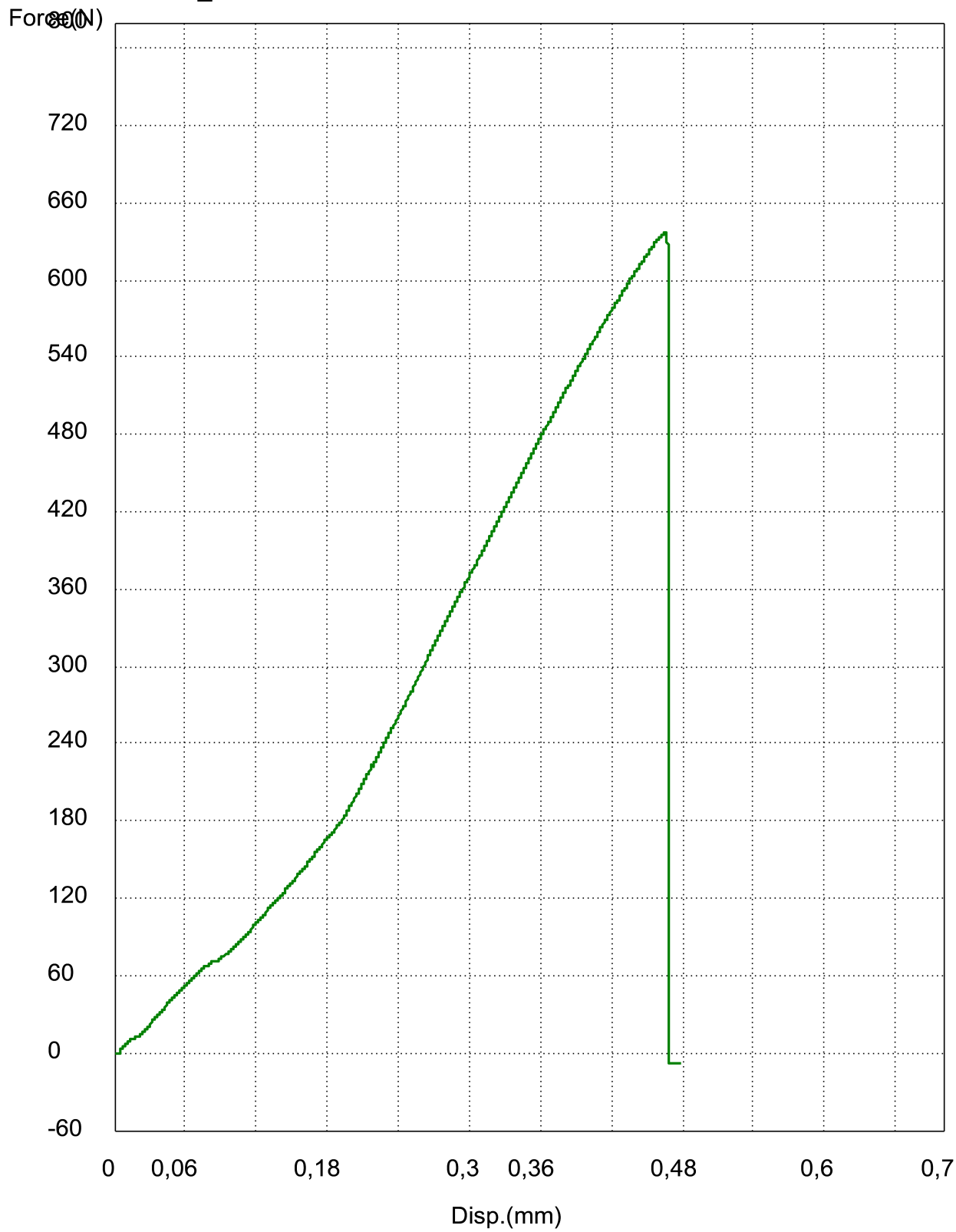
PŘÍLOHA_P VII: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 2 MATERIÁLU B



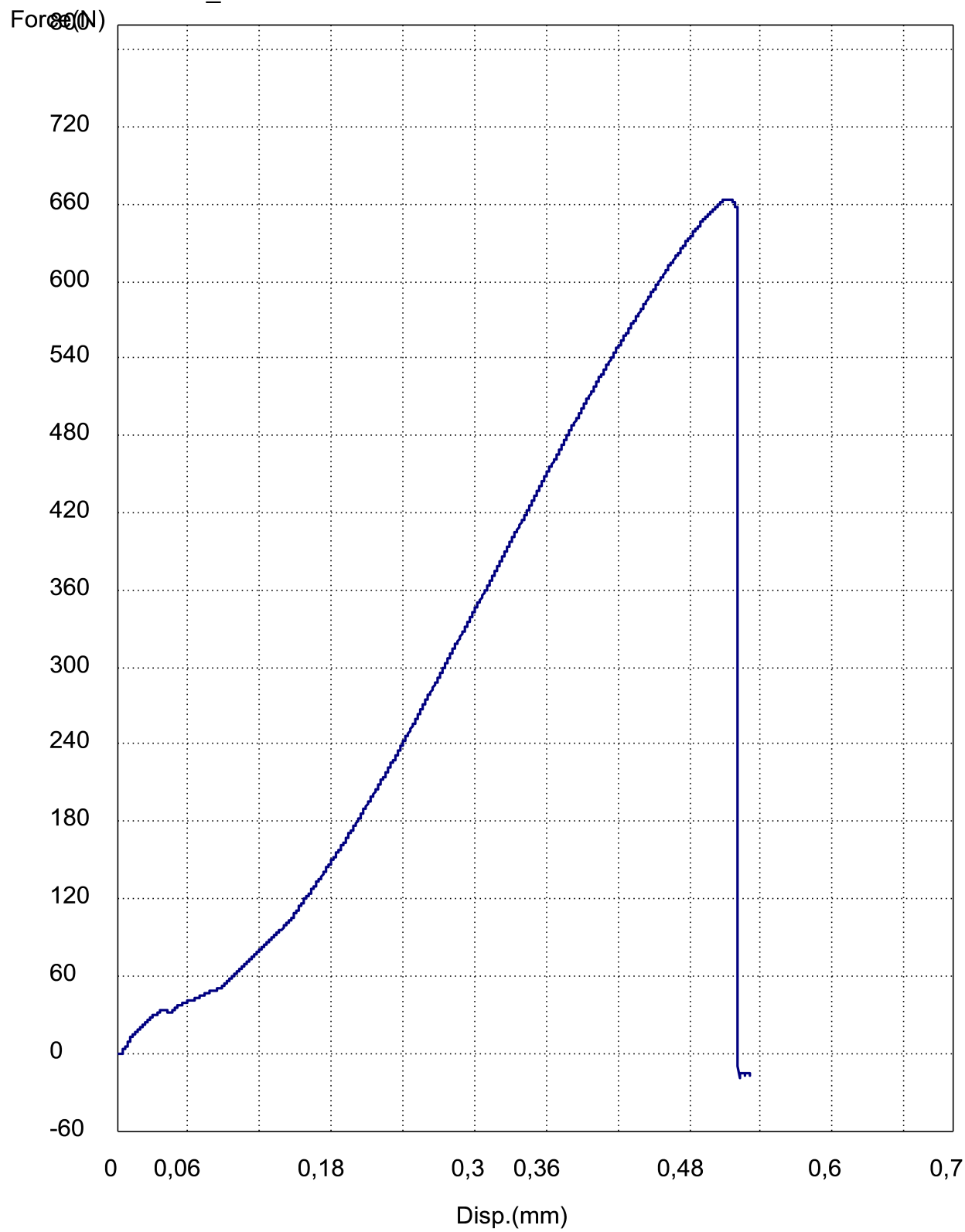
PŘÍLOHA_P VIII: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 3 MATERIÁLU B



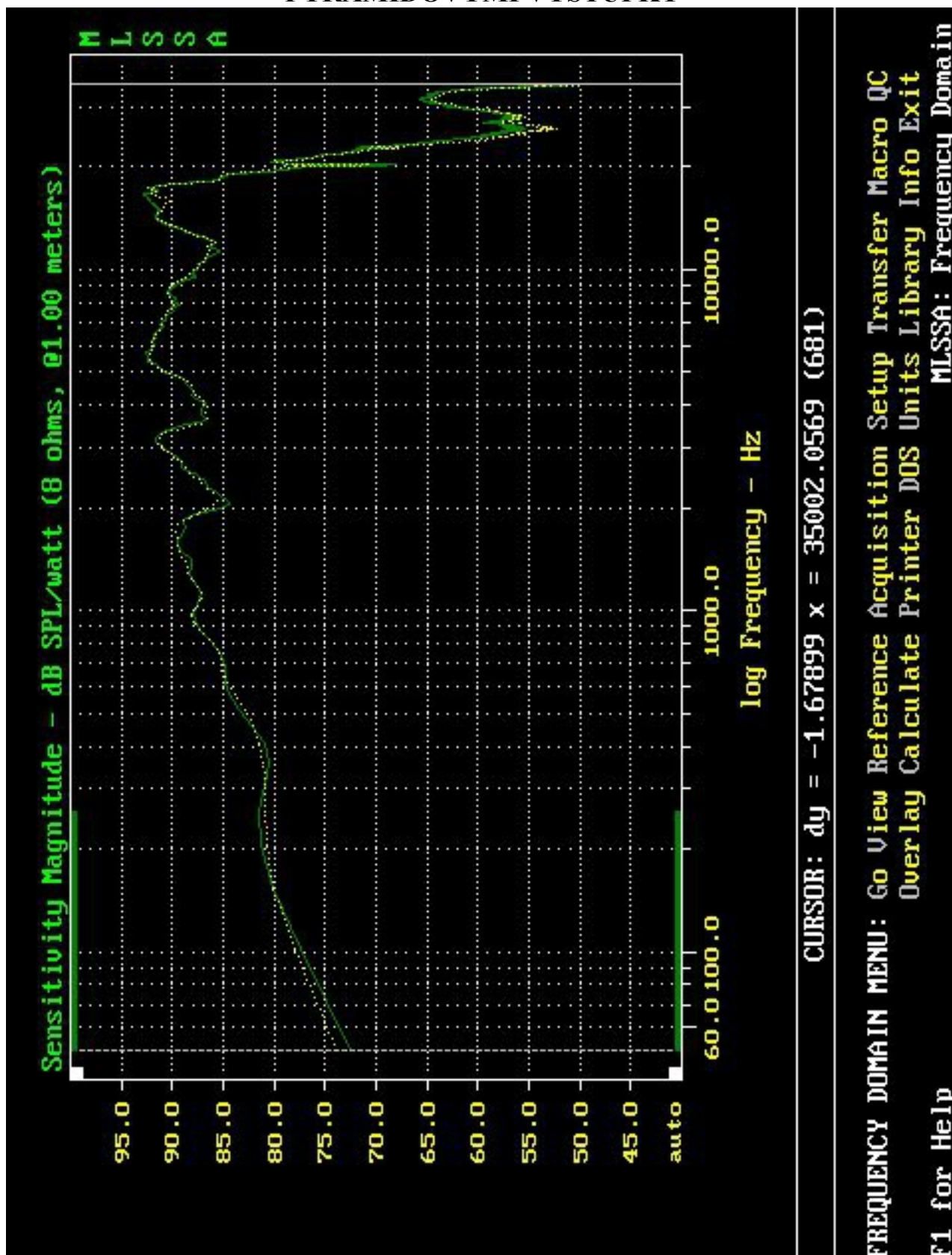
PŘÍLOHA_P IX: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 4 MATERIÁLU B



PŘÍLOHA_P X: TAHOVÁ KŘIVKA VZORKU Č. 5 MATERIÁLU B



PŘÍLOHA_P XI: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ A, B S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY



PŘÍLOHA_P XII: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU A
BEZ PYRAMIDOVÝCH VÝSTUPKŮ A S VÝSTUPKY

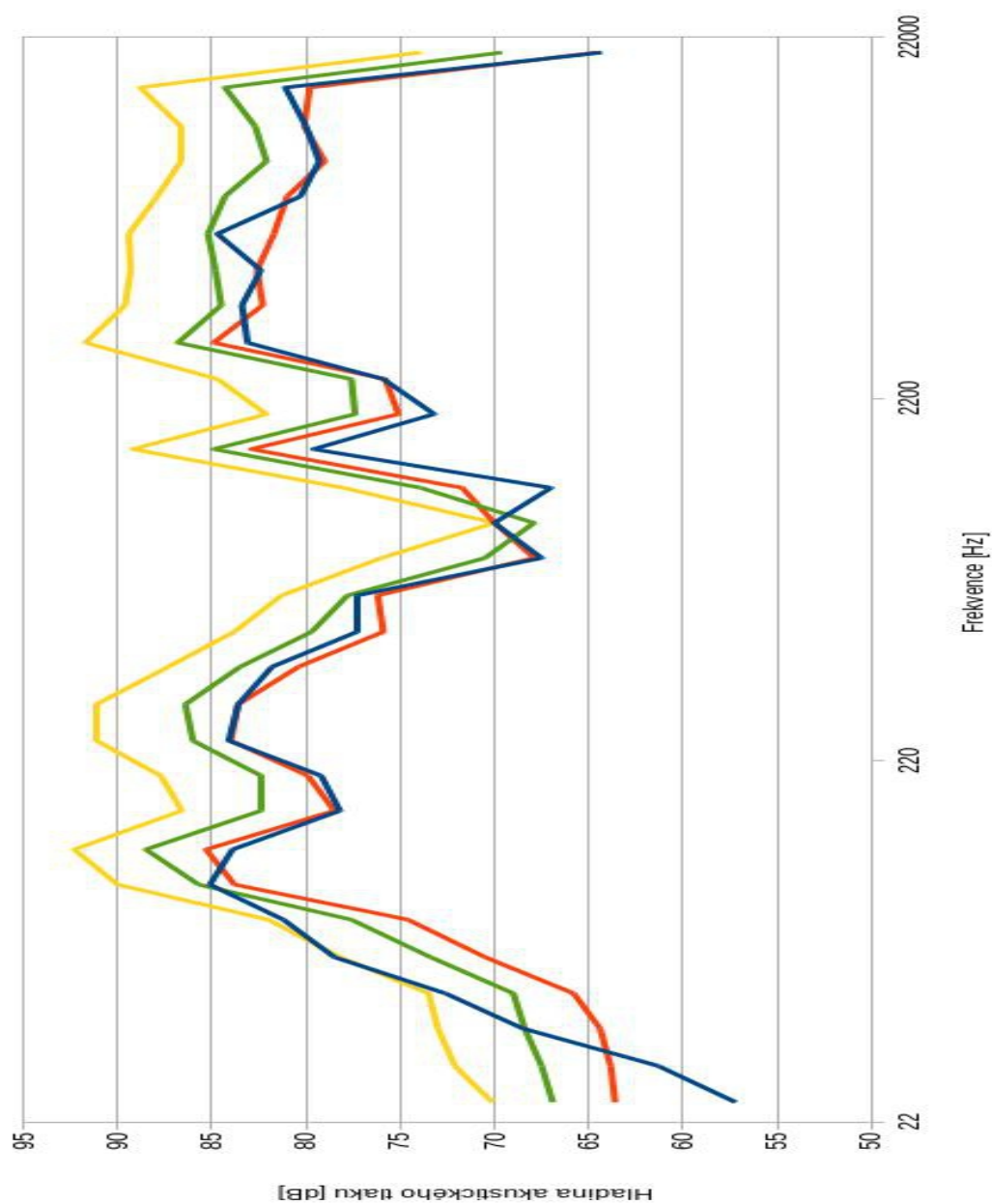


PŘÍLOHA_P XIII: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLŮ A, B S HLADKOU DESKOU A S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY – PŘEDNÍ STRANA

STRANA

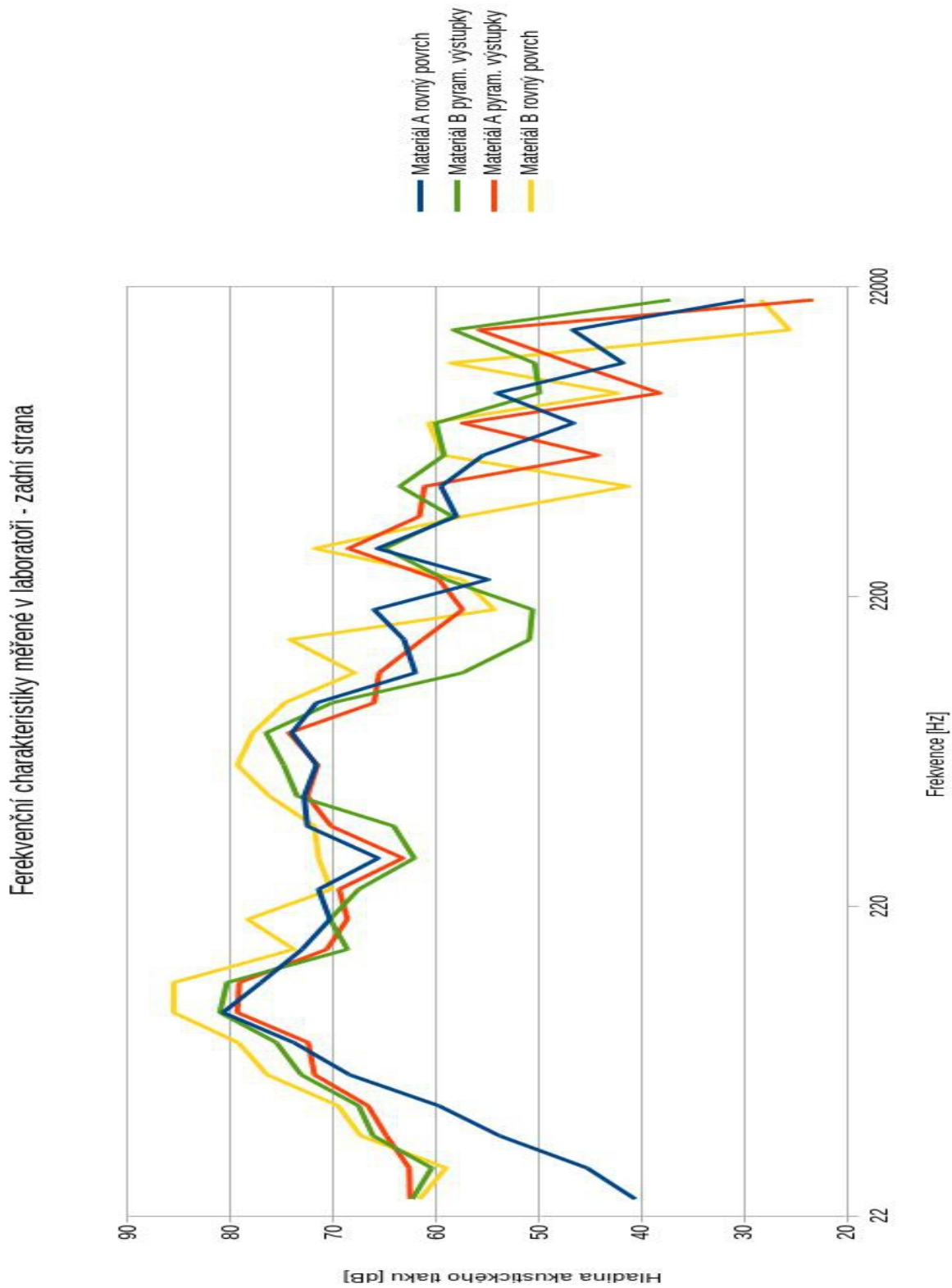
- Materiál A roviny povrch
- Materiál B pyram. výstupky
- Materiál A pyram. výstupky
- Materiál B roviny povrch

Frekvenční charakteristiky měřené v laboratoři - přední strana



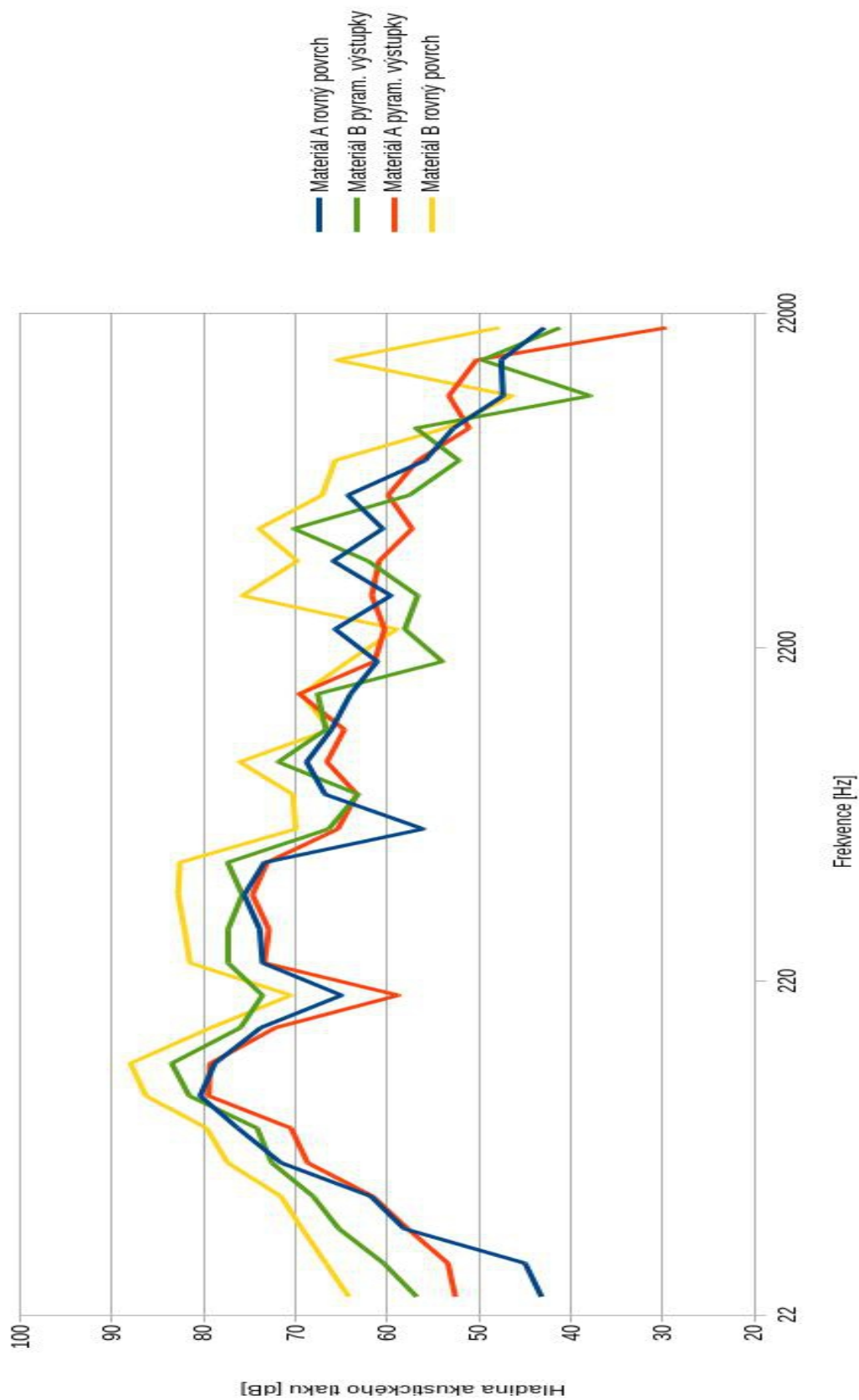
PŘÍLOHA_P XIV: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLŮ A, B S HLADKOU DESKOU A S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY – ZADNÍ

STRANA



PŘÍLOHA_P XV: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY MATERIÁLŮ A, B S HLADKOU DESKOU A S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY – BOČNÍ STRANA

Frekvenční charakteristiky měřené v laboratoři - boční strana



PŘÍLOHA_P XVI: TECHNICKÝ LIST PRYSKYŘICE POLYESTER 109



TECHNICKO-APLIKAČNÍ LIST

SPECIÁLNÍ MATERIÁLY

POLYESTER 109

• POPIS	Nenasycená polyesterová pryskyřice ve směsi se styrenem.
• POUŽITÍ	K výrobě technického laminátu, opravám laminovaných předmětů (např. lodí, sportovních potřeb, kapotází, autodílů apod.). K výrobě deskových konglomerátů z přírodního a umělého kamene. Dobře snáší minerální plniva. Nesmí být použit pro výrobu předmětů běžného použití a zařízení, která přicházejí do styku s požívatiny a pitnou vodou. Polyesterová pryskyřice ani natužená směs před aplikací nesmí být zředována přísadkou jakéhokoliv rozpouštědla či ředidla.
• VLASTNOSTI	<i>Vzhled:</i> čirá, nažloutlá, viskózní kapalina zapáchající po styrenu <i>Hustota (20 °C):</i> 1,1 g.cm ³ <i>Viskozita (23 °C):</i> 270 mPa.s <i>Obsah netěkavých látek :</i> 61 % <i>Číslo kyselosti:</i> max. 30 mg KOH/g
• PŘÍPRAVA POVRCHU	Povrch musí být suchý, čistý, odmaštěný a zbavený mechanických nečistot (prach po broušení, atd.), nejlépe mírně zdrsňený. Teplota podkladu by měla dosahovat 15–25 °C při max. 80% relativní vlhkosti vzduchu. Nevytvrzenou kompozici lze z povrchu náradí umýt acetonem.
• TUŽENÍ	poměr hmotnostní / poměr objemový Polyester 109 : Urychlovač : Iniciátor 100 : 0,25 : 1 Polyester 109 : Urychlovač : Iniciátor 100 : 0,33 : 1,03
• APLIKAČNÍ POMŮCKY	<ul style="list-style-type: none"> • štětec • váleček s krátkým chlupem
• ZPRACOVÁNÍ	Do Polyesteru 109 se nejprve zamíchá urychlovač , těsně před zpracováním iniciátor . Iniciátor a urychlovač se nesmí smísit předem dohromady, protože může dojít k explozivnímu rozkladu. Nutno dodržet předepsaný mísicí poměr, vyšší přísada iniciátoru snižuje dobu zpracovatelnosti. <i>Zpracovatelnost:</i> 8 – 15 minut při 20–23 °C, Při vyšší teplotě se doba zpracovatelnosti zkracuje! <i>Vytvrzení:</i> 15 – 23 minut při 20–23 °C <i>Vylévání do forem:</i> Komponenty se rovnoměrně zhomogenizují a vibrační se odstraní vzduchové bubliny. Směs se nalévá do forem (dřevo, sklo, leštěná ocel, termoplasty atd.), po vytvrzení se blok vyjme z formy a dále se brousí a popřípadě leští korundovými kameny. Výrobky mají dobrou trvanlivost, odolnost vůči oděru, vysoký lesk, lze je vyrábět v menší tloušťce (cca 10 mm).
• UPOZORNĚNÍ	POZOR! Natužením velkého množství polyesterové pryskyřice dochází k vývinu tepla a tím ke zkrácení doby zpracovatelnosti! POZOR! Nikdy nesmíchejte dohromady Iniciátor a Urychlovač - může dojít k vzplanutí směsi! Nezaměňujte pořadí přidávaných složek!
• UŽITNÉ VLASTNOSTI	<i>Pevnost v tahu:</i> 62 MPa <i>E modul v tahu:</i> 3800 MPa <i>Protažení:</i> 2 % <i>Pevnost v ohybu:</i> 126 MPa <i>E modul v ohybu:</i> 3900 MPa <i>Rázová houževnatost:</i> 6,1 mJ/mm ² <i>Tvarová stálost za tepla:</i> 72 °C <i>Tvrdość Barcol:</i> 43–44

IČ: 25248294, DIČ: CZ25248294, www.sincolor.cz

Pižeň: ČS č. ú.: 720008369/0800, tel.: +420 377 416 511, 512, 513, 521, fax: +420 377 416 510, prodej@dch-sincolor.cz

K. Vary: ČSOB č. ú.: 109410716/0300, tel.:/fax: +420 353 565 571, mobil: +420 602 459 808, +420 777 150 030, info@dch-sincolor.cz

PŘÍLOHA_P XVII: TECHNICKÝ LIST EPOXIDOVÉ PRYSKYŘICE



APLIKAČNÍ LIST

Strana 1 (celkem 2)

CHS-EPOXY 371

1. Charakteristika výrobku

CHS-EPOXY 371 je středně molekulární viskózní epoxidová pryskyřice modifikovaná nereaktivním zvláčňovadlem. Vytvrzuje se smísením s vhodnými tvrdidly při normální nebo zvýšené teplotě.

2. Použití

CHS-EPOXY 371 se používá k přípravě lepicích kompozic pro lepení kovů, skla, keramiky, porcelánu, dřeva, eternitu, výrobků z močovinoformaldehydových pryskyřic a jiných materiálů, dále k přípravě stěrkových hmot a tmelů.

3. Vlastnosti výrobku

3.1 Vlastnosti nevytvrzené pryskyřice

Hustota při 23°C	cca 1,13	g/cm ³
Epoxidový hmot. ekvivalent	330-400	g/mol
Epoxidový index	2,5-3,0	mol/kg
Viskozita při 25°C (informativní)	30-50	Pa.s
Viskozita při 23°C	40-70	Pa.s
Obsah celkového chlóru	max. 0,5	%

3.2 Vlastnosti vytvrzené pryskyřice

3.2.1 Typ kompozice:

CHS-EPOXY 371	hmot.díly	100
ChS-Tvrdidlo P 11	hmot.díly	6,5

Doba želatince	max. 150	minuta
Tvrdość po 24 hodinách	min. 100	MPa
Mez pevnosti ve smyku (Informativně)	min. 20	MPa
Mez pevnost v odlupu	min. 400	N

4. Technologický postup zpracování

CHS-EPOXY 371 se nejčastěji zpracovává ve formě tmelů, které se připravují smísením pryskyřice s vhodnými plnivy, jako jsou např. vysušený křemenný písek, porcelánová, skelná nebo křemenná moučka, mletá břidlice, živec, kaolin, portlandský cement, mikroasbest, hliníkový nebo jiný kovový prášek, dřevěné piliny apod. Množství plniva je závislé na měrné hmotnosti plniva, velikosti částic a viskozitě pryskyřice. Stupeň plnění a druh plniva je rovněž závislý na účelu a způsobu aplikace tmelu. Pro tmelení svislých ploch je výhodné kombinovat plnivo s tixotropními přípravky (např. SILOXID, výrobce SILCHEM Ústí - Neštěmice), aby se zabránilo stékání tmelů.

CHS-EPOXY 371 se před vlastním použitím mísí s některým z níže uvedených vhodných tvrdidel.

4.1 Mísící poměry

SYSTEM	Hm.díly
CHS-EPOXY 371-CHS-Tvrdidlo P-11	100: 6,5
CHS-EPOXY 371-Telalit 410	100: 11
CHS-EPOXY 371-Telalit 60	100: 18
CHS-EPOXY 371-Telalit 95	100: 28
CHS-EPOXY 371-Telalit 0563	100: 18

4.2 Informativní typické aplikační hodnoty

Tvrdidlo	Dob zprac. [min]	Doba gelace [min]
P 11	26	60
Telalit 95	20	53
Telalit 410	14	30
Telalit 60	14	32
Telalit 0563	24	111

4.3 Informativní typické užité vlastnosti:

Tvrdidlo	Mez pevnosti ve smyku [MPa]	
	po 7 dnech při 23°C	24 h /23°C a 2h při 120°C
P 11	18	22
Telalit 95	18	19
Telalit 410	18	22
Telalit 60	17	17
Telalit 0563	18	26

¹⁾ Měřeno po 48 h při 23°C

²⁾ Měřeno po 8 dnech při 23°C

Následně se za stálého míchání přidává odpovídající množství plniva. Takto připravená kompozice se nanáší na suché podklady předem zbavené všech nečistot, příp. původních povrchových úprav (staré nátěry ap.). Podle povahy nežádoucích nečistot a druhu materiálu se jejich odstranění provádí zbrúšením, chemickými prostředky, prach a jiné mechanické nečistoty se odstraní vysavačem.

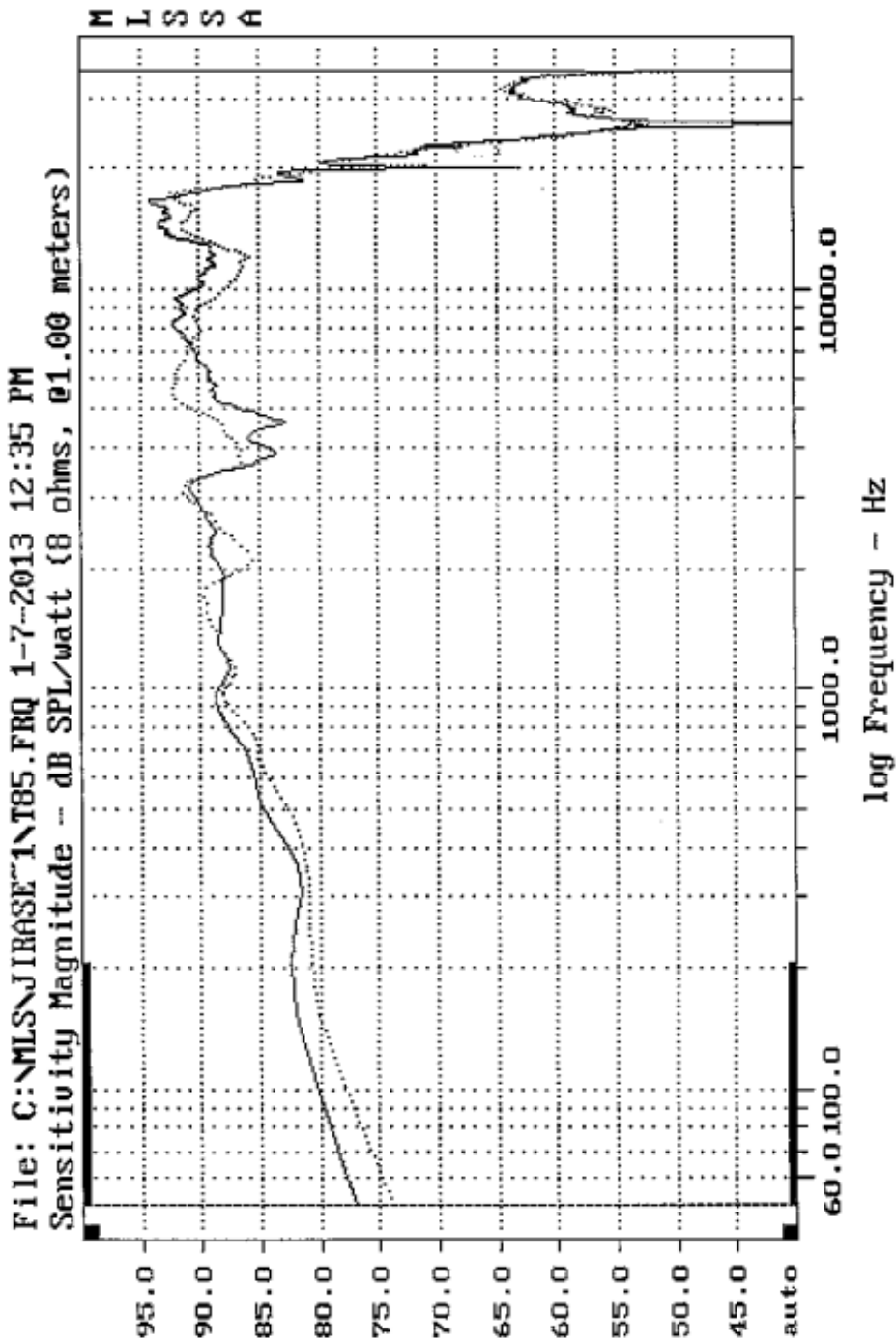
Tmel se na vodorovné i svislé plochy nanáší stěrkou nebo špachtlí. Vytvrzení tmelu při normální teplotě proběhne do 24 hodin. Tmel připravený z CHS-EPOXY 371 slouží k vyrovnání nerovností a při opravách prasklin stavebních a dalších konstrukčních materiálů apod.

Chemex v.o.s.

Ke Klíčovu 160/7, 190 00 Praha 9
tel. 26603 2140 (41), 26603 5150
fax : 26603 5149

www.chemex.cz
e-mail : chemex@chemex.cz

PŘÍLOHA_P XVIII: FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU A
S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY A AQ TANGO 85



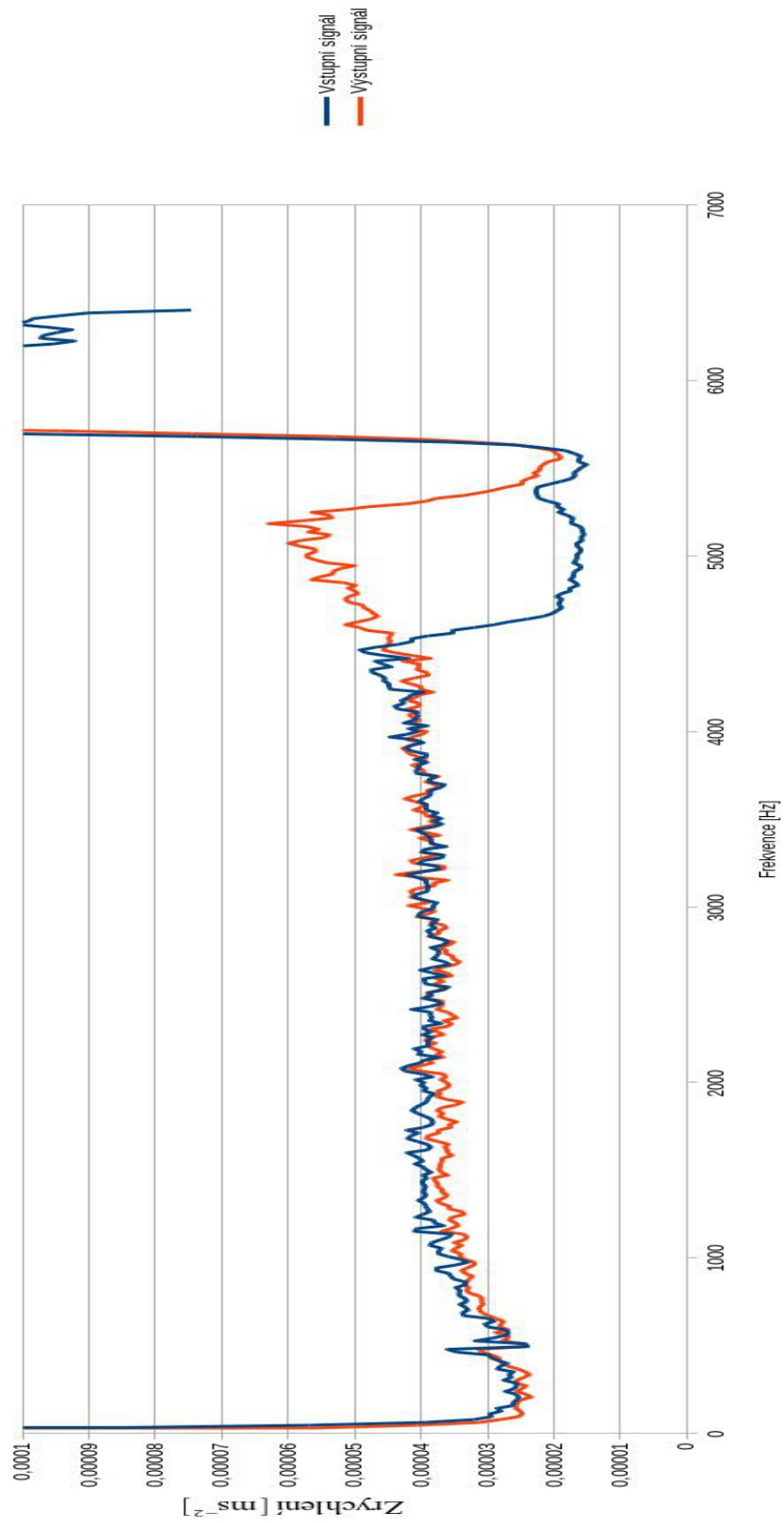
T85 x T85 PE pyramid 1 m

1-7-2013 12:37 PM

MLSSA: Frequency Domain

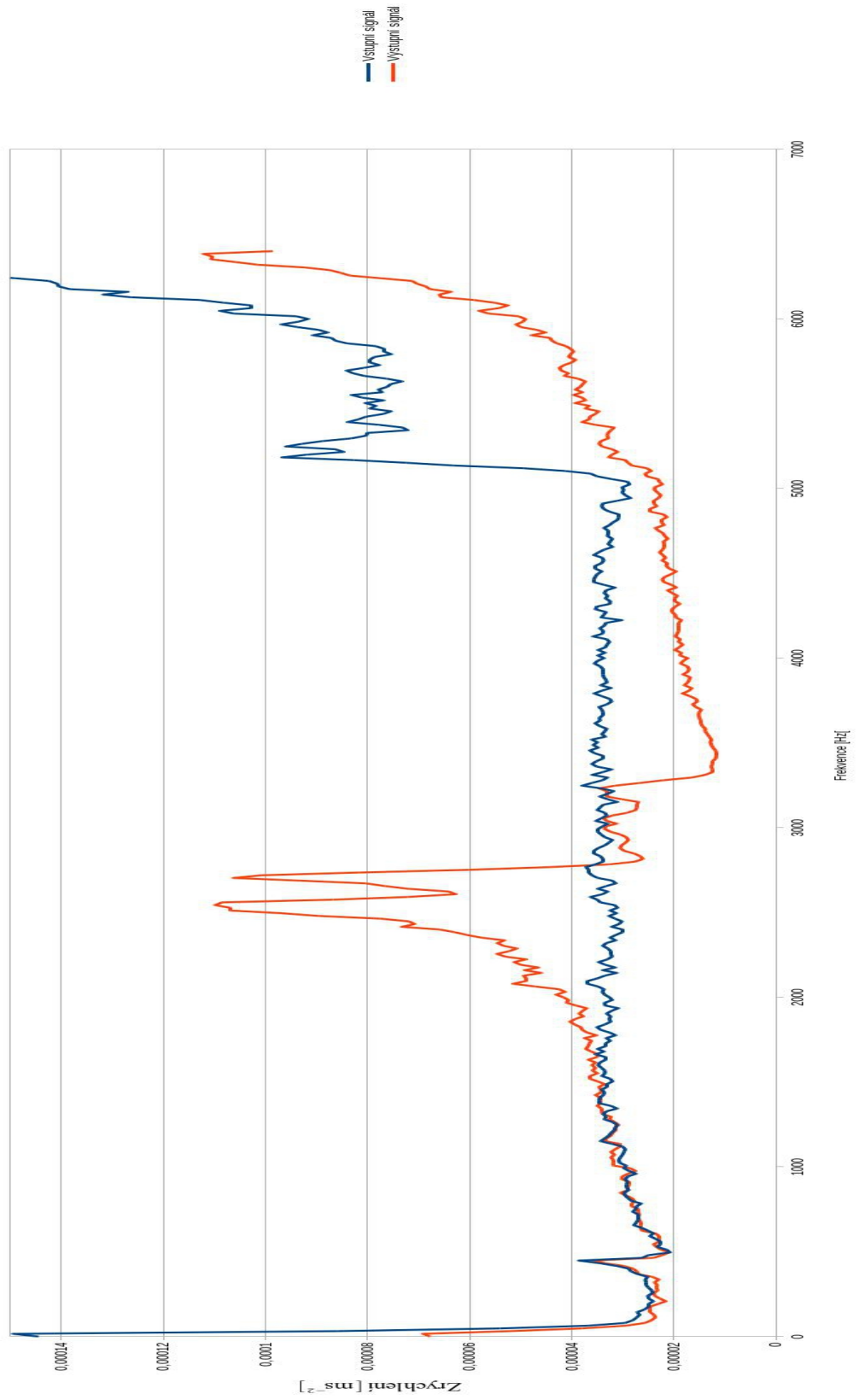
PŘÍLOHA_P XIX VIBRAČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU A S HLADKÝM POVRCHEM

Grafická závislost zrychlení na frekvenci materiálu s polyesterovou maticí a hladkým povrchem



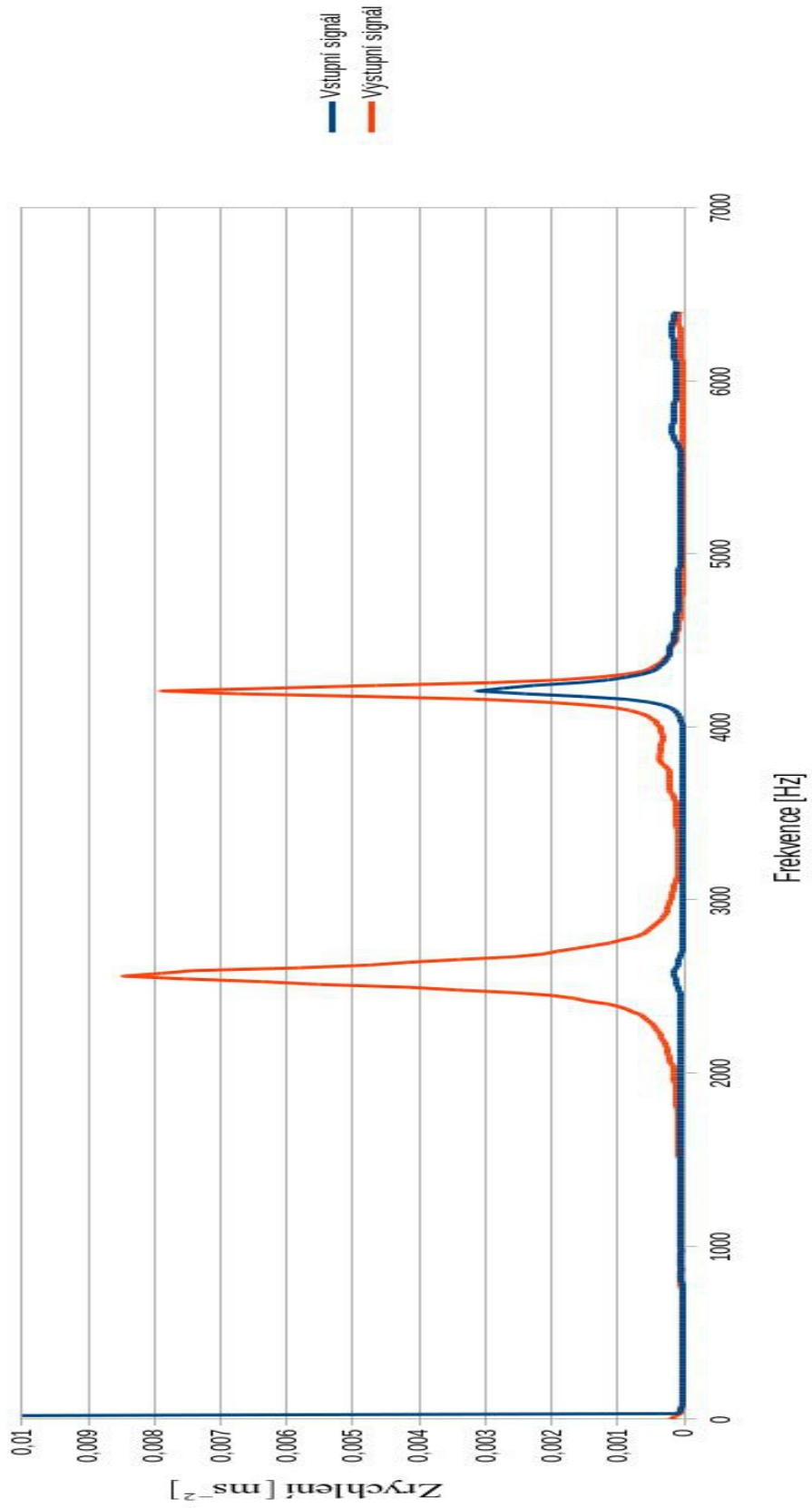
PŘÍLOHA_P XX VIBRAČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU A S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY

Grafická závislost zrychlení na frekvenci materiálu s polyesterovou maticí a pyramidickým výstupky



PŘÍLOHA_P XXI VIBRAČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU B S HLADKÝM POVRCHEM

Grafická závislost zrychlení na frekvenci materiálu s epoxidovou maticí a hladkým povrchem



PŘÍLOHA_P XXII VIBRAČNÍ CHARAKTERISTIKA MATERIÁLU B S PYRAMIDOVÝMI VÝSTUPKY

Grafická závislost zrychlení na frekvenci materiálu s epoxidovou maticí a pyramidickým výstupky

