



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY
A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VLIV POLOHY UŠNÍHO BUBÍNKU NA PŘENOS ZVUKU DO VNITŘNÍHO UCHA

INFLUENCE OF AERDRUM POSITION ON SOUND TRANSMISSION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAROSLAV KRBÁLEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. KAREL PELLANT, CSc.

BRNO 2008

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2007/08

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Krbálek Jaroslav

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Vliv polohy ušního bubínku na přenos zvuku do vnitřního ucha

v anglickém jazyce:

Influence of eardrum position on sound transmission

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dnešní úroveň výpočetní techniky a programového vybavení umožňuje s dostatečnou přesností analyzovat a početně simulovat mechaniku přenosu zvuku ze zevního prostředí až do místa smyslového vnímání zvuku. Pro vlastní matematické modelování jsou hlavně používány metody konečných a hraničních prvků. Pomocí modelování jsou analyzovány přenosové charakteristiky jednotlivých subsystémů ucha a je prováděna diskuse jejich vzájemných interakcí. Z lékařského hlediska je v této souvislosti zajímavá otázka optimálního náklonu bubínku vzhledem k ose lidského zvukovodu

Cíle bakalářské práce:

- 1) Vypracování rešerše dostupné literatury v oblasti řešeného problému
- 2) Vytvoření jednoduchého konečnoprvkového modelu zevního zvukovodu ve tvaru válce zakončeného šikmo uloženým elastickým bubínkem
- 3) Modální analýza akustického subsystému zevního zvukovodu a subsystému bubínku s cílem zjištění vlastních frekvencí
- 4) Zjištění vlivu elasticity bubínku na modální frekvence zvukovodu
- 5) Harmonická analýza modelu zevního zvukovodu. Provedení diskuse vlivu náklonu bubínku na amplitudu jeho kmitů při buzení v ústí zvukovodu. Diskuse případného vlivu koincidenčního jevu.

Seznam odborné literatury:


D. Dušek: Modelování mechaniky lidského sluchu pomocí MKP. Pojednání ke státní doktorské zkoušce, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky FSI VUT v Brně, 2006
http://www.neurophys.wisc.edu/h&b/textbook/sound_transmission.html,
<http://www.wadalab.mech.tohoku.ac.jp/>

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Karel Pellant, CSc.

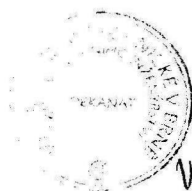
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/08.

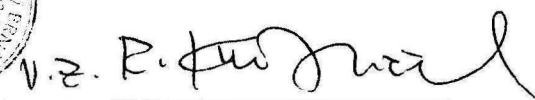
V Brně, dne 11.10.2007

L.S.



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu





doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně
Dne 19. 5. 2008

Podpis autora

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. RNDr. Karlu Pellantovi, CSc. za odborné vedení a cenné náměty a připomínky při tvorbě této práce.

ABSTRAKT

Lidský ušní bubínek je vzhledem k ose zevního zvukovodu skloněn pod úhlem 50°. Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jaký vliv může mít tento sklon na přenos zvuku přes bubínek do středního ucha.

Ve výpočtovém programu ANSYS byl vytvořen jednoduchý konečnoprvkový model. Výpočtový model zahrnoval akustický subsystém zevního zvukovodu, elastický bubínek a tuhé kladívko. Tvar modelu odpovídal válci, který byl na jednom konci otevřen a na druhém ukončen šikmo uloženým bubínkem.

Vedle vlivu náklonu bubínku byl také sledován vliv elasticity bubínku, hmotnosti kladívka a vnitřního tlumení bubínku na přenosovou charakteristiku vnějšího zvukovodu. Na závěr výpočtů byla provedena diskuse, zda vzhledem ke sklonu bubínku se při zvukovém vjemu neuplatňuje koincidenční jev.

Klíčová slova

Sluch, ucho, zevní zvukovod, bubínek, matematické modelování

ABSTRACT

The human eardrum is inclined at an angle of 50 ° to the axis of external auditory canal. The main objective of this thesis was to determine the impact of the inclination on sound transmission characteristics of external ear canal. It was observed influence of the various features of the eardrum and of the malleus weight on calculated transmission characteristics.

Simple finite element model (FEM model) was created in the ANSYS program. The acoustic subsystem of the outer ear tube, elastic eardrum and solid malleus were created. The external ear canal model was modeled as one sided open cylinder which was terminated diagonally bedded with eardrum.

In addition to the impact of the eardrum inclination, the influence of the eardrum elasticity and the weight of malleus on the sound transmission characteristics of external ear canal was also monitored. The eventual presence of the coincidence effect was also studied.

Key words

hearing, ear, external auditory canal, ear drum, mathematical modelling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

KRBÁLEK, J. *Vliv polohy ušního bubínku na přenos zvuku do vnitřního ucha*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 32 s. Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Karel Pellant, CSc.

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	ANATOMIE LIDSKÉHO SLUCHOVÉHO ORGÁNU	8
2.1	Zevní ucho.....	8
2.2	Střední ucho	9
2.3	Vnitřní ucho	10
3	TVORBA MODELU VNĚJŠÍHO ZVUKOVODU	12
3.1	Rozměry zvukovodu.....	12
3.2	Modelování akustického subsystému.....	12
3.3	Modelování bubínku	13
3.4	Modelování kladívka	14
4	VÝPOČTY NA MODELU VNĚJŠÍHO ZVUKOVODU	16
4.1	Modální a harmonická analýza	16
4.1.1	Modální analýza	16
4.1.2	Harmonická analýza.....	16
4.2	Náklon bubínku	16
4.2.1	Harmonická analýza kompletního modelu.....	16
4.2.2	Modální analýza bubínku	18
4.2.3	Modální analýza akustického subsystému	19
4.2.4	Modální analýza kompletního modelu	20
4.3	Elasticita bubínku.....	22
4.4	Setrvačné síly	24
4.5	Tlumení bubínku	25
4.6	Koincidenční jev	27
5	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	29
6	ZÁVĚR.....	31
7	POUŽITÁ LITERATURA	32

1 ÚVOD

Dosud není známo, jaký vliv má sklon lidského bubínku na schopnost člověka slyšet. V běžných případech se tento sklon pohybuje okolo 50° vzhledem k ose zvukovodu. Na otázku, zda je tento sklon optimální z hlediska přenosu akustické energie z vnějšího prostředí do vnitřního ucha, se snaží odpovědět tato bakalářská práce.

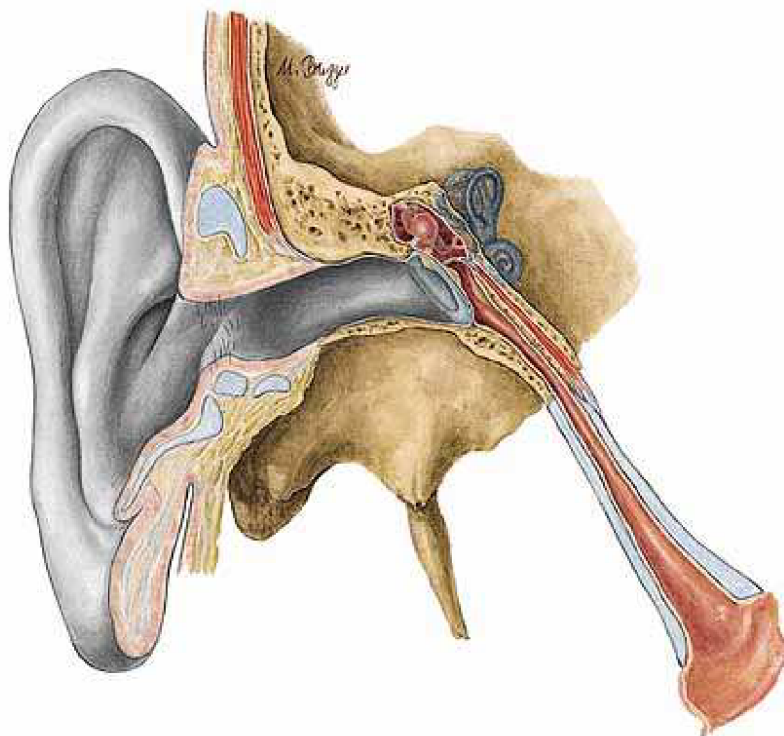
K řešení takto složitých modelů se používá metoda konečných prvků. Ve výpočtovém programu ANSYS byl vytvořen jednoduchý model. Ten původně zahrnoval pouze akustický subsystém a elastický bubínek, ale za účelem přesnějších výsledků bylo k bubínku „domodelováno“ kladívko, které bubínek vyztužuje. Postup tvorby modelu, okrajové podmínky a materiálové charakteristiky jednotlivých částí modelu jsou uvedeny v kapitole 3.

Jako hlavní cíl bylo sledování vlivu bubínku na přenosovou charakteristiku modelu zevního zvukovodu. Dále se sledovalo, jak přenosovou charakteristiku ovlivní elasticita bubínku, hmotnost kladívka a různý stupeň tlumení bubínku. V posledním výpočtu se nastavovaly různé parametry bubínku (tloušťka, modul pružnosti) tak, aby při zvolených frekvencích nastal na bubínku koincidenční jev. Postupu výpočtů se věnuje kapitola 4.

Na závěr práce bylo zjištěno, že k tvorbě bubínku byl použit nevhodný tvar prvku. V důsledku této chyby byly vlastní frekvence bubínku posunuty k vyšším frekvencím. Vzhledem k tomu, že tato práce měla za cíl sledovat, jak změna výše uvedených parametrů ovlivní přenosovou funkci modelu, resp. vlastní frekvence modelu nebo jeho subsystémů, není tato chyba příliš podstatná.

2 ANATOMIE LIDSKÉHO SLUCHOVÉHO ORGÁNU

Auris – ucho, je smyslový orgán obsahující dvě soustavy. První, sluchová, zajišťuje zachycení zvukových vln, jejich úpravu a převod. Druhá, rovnovážná, přijímá pohybové a gravitační podněty a díky nim udržuje rovnováhu. Ucho je složeno ze tří hlavních částí: zevní ucho, střední ucho a vnitřní ucho.



Obr. 2.1 Zobrazení lidského ucha

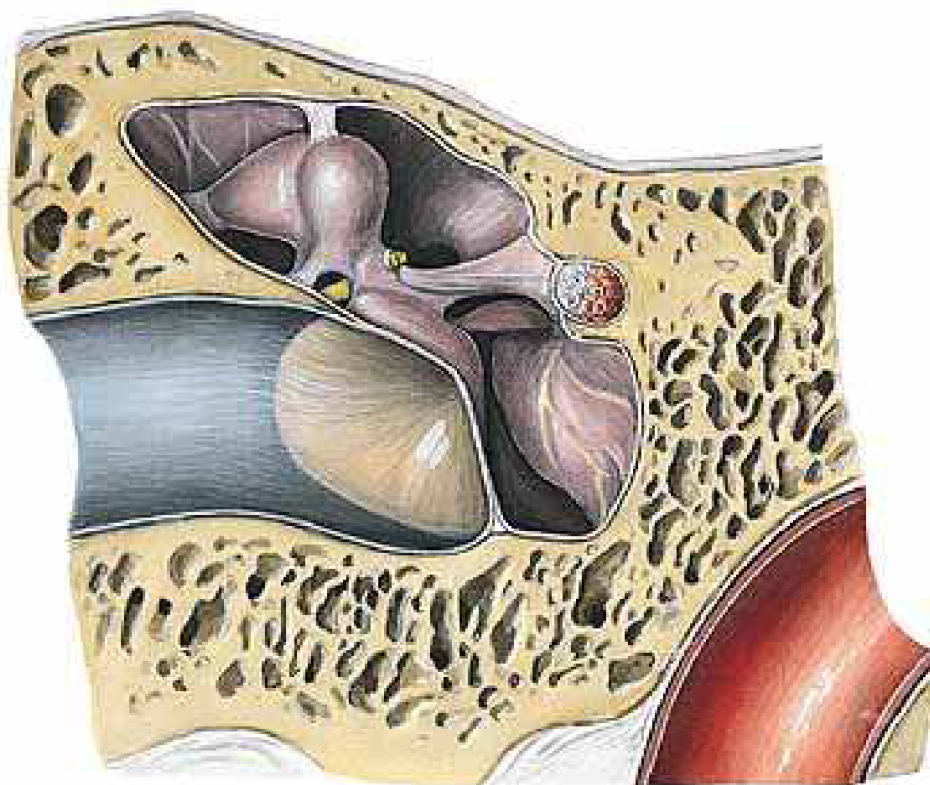
2.1 Zevní ucho

Zevní ucho se skládá z boltce a zevního zvukovodu. Boltce je plochý útvar, který je k hlavě připojený pod úhlem $20^\circ - 40^\circ$. Podkladem boltce je elastická chrupavka. Intenzita zvukového vlnění, které dopadá na bubínek závisí na frekvenci a úhlu dopadu vlnění na boltce. Proto také velikost a tvar boltce ovlivňuje přenos vlnění k bubínku. Boltce vytváří akustický stín pro zvuky přicházející zezadu, čímž umožňuje lokalizovat zdroje zvuku. Pro frekvence větší než 500 Hz má boltce směrovací funkci. Ta je nejlepší pro zvuk o frekvenci 5000 Hz. Zvuk o této frekvenci je nejlépe slyšitelný přichází-li z místa odkloněného od interaurální osy asi o 15° [2]. Zevní zvukovod je z první třetiny podložen chrupavkou a dále

kostí spánkovou. Jeho délka je u zdravých dospělých jedinců 20 – 35 mm. Je ukončen šikmo uloženým bubínkem. Odklon bubínku od roviny sagitální je asi 50° a od roviny transversální 40°– 50°. Bubínek je blána o velikosti 9x10 mm a tloušťce 0,1 mm.

2.2 Střední ucho

Střední ucho je od ucha zevního odděleno bubínkem. Skládá se ze středoušní dutiny, sluchových kůstek a sluchové trubice. Na bubínek navazuje středoušní dutina, nejprostornější z celého komplexu středoušních prostor. Dutina má tvar přesýpacích hodin. U stropu je její příčný rozměr 6 mm, ve zúžení 2 mm a ve spodině 4 mm. Zúžení je tvořeno bubínkem a protilehlým promontoriem, což je zaoblené vyklenutí způsobené prvním závitem kostěného hlemýždě. První ze tří sluchových kůstek je kladívko. Nad rukojetí, která je srostlá s bubínkem, a krčkem kladívka je hlavice kladívka. Na tu navazuje kovadlinka, druhá sluchová kůstka. Masivní část kovadlinky, tělo kovadlinky, má sedlovitou plochu, do níž dosedá hlavice kladívka. Přes dlouhé raménko je kovadlinka spojena s poslední středoušní kůstkou, třmínkem. Spojení je v oblasti hlavice třmínku. Další části třmínku jsou přední raménko, zadní raménko a baze třmínku, podlouhlá ploténka, na niž navazuje oválné okénko. Celý řetězec středoušních kůstek je k sobě poután pomocí vazivových chrupavek a ve středoušní dutině je jako celek ukotven vazy. Středoušními svaly jsou musculus tensor tympani, který se upíná na bubínek, a musculus stapedius, upínající se na třmínek. Svaly jsou schopny zeslabit přenos zvuku o nízké frekvenci a udržovat konstantní intenzitu zvuku, tzn. chránit sluchový aparát před hlasitým zvukem. Poslední částí středního ucha je sluchová trubice. Ta vychází zpod stropu středoušní dutiny, odtud se svažuje k nosohltanu, v němž asi po 10 mm ústí. Její funkcí je vyrovnávat tlak atmosférický a tlak ve středoušní dutině. Toto je velmi důležité pro správný přenos kmitů bubínku pomocí středoušních kůstek.



Obr. 2.2 Vnitřní ucho

2.3 Vnitřní ucho

Vnitřní ucho obsahuje ústrojí sluchové a ústrojí rovnovážné. Je uloženo ve skalní kosti. Ta je protkána systémem dutinek označovaných jako kostěný labyrint. Kostěný labyrint má tři základní části a to předsíň, tři polokruhové kanálky a kostěný hlemýžď. V předsíni jsou uloženy dva váčky, utriculus a sacculus. Na vnitřním povrchu těchto váčků je uložena vrstva smyslových buněk, na nichž se nacházejí otolity. Otolity působí ve směru gravitačního pole. Při pohybu hlavou dráždí smyslové buňky, které vysílají nervové vzruchy do centrálního nervového systému. Na předsíň jsou připojeny tři polokruhové kanálky, které jsou na sebe navzájem kolmé. Všechny tři kanálky z předsíňe vystupují a zase v ní končí. Dále je na předsíň napojen kostěný hlemýžď. Ten se skládá z kanálku, který stoupá přibližně ve 2,5 závitech. Závít postupně zmenšuje svůj poloměr. Osou hlemýžďe je kostěný modiolus, kolem kterého se ovíjí kostěná spirální lišta. Uvnitř kostěného labyrintu se nachází blanitý labyrint. První část blanitého labyrintu, labyrinthus vestibularis, obsahuje tři blanité polokruhové kanálky, utriculus a sacculus. Labyrinthus vestibularis se v kostěném labyrintu vznáší v perilymfě a jeho stálou polohu zajišťují nepravidelně rozprostřená vazivová vlákna.

Membrány lamina basilaris a membrana vestibularis rozdělují kanálek blanitého labyrintu na ductus cochlearis (blanitý hlemýžď), scala vestibuli (horní prostor) a scala tympani (dolní prostor). Blanitý hlemýžď má trojúhelníkový průřez a odděluje od sebe scala vestibuli a scala tympani. Scala vestibuli je napojena na oválné okénko a stoupá do kupuly hlemýžďe, kde je přes helicotrema propojena se scala tympani. Na jejím konci se nachází okrouhlé okénko. Scala vestibuli i scala tympani jsou naplněny perilymfou. Naopak blanitý hlemýžď je naplněn endolymfou. Vlastním sluchovým orgánem je Cortiho orgán, který je uložen na lamina basilaris. Jeho buňky tvoří trojúhelníkový útvar, tzv. Cortiho tunel.

3 TVORBA MODELU VNĚJŠÍHO ZVUKOVODU

V této kapitole je popsán postup tvorby modelu zevního zvukovodu. Model je tvořen akustickým prostorem, elastickým bubínkem a kladívkem. Celý model byl vytvořen ve výpočtovém programu ANSYS 10.0.

3.1 Rozměry zvukovodu

Cílem práce je vytvoření jednoduchého konečnoprvkového modelu vnějšího zvukovodu. Proto je tvarově složitý zvukovod modelován jako vlnovod, ve kterém se zvuk šíří podél jeho osy jako rovinné vlny. Takové zjednodušení lze uskutečnit pro frekvence menší než tzv. hraniční frekvence f_h . Ta je dána vztahem [6]

$$f_h = \frac{0,586 \cdot c}{D} \quad (1)$$

kde c je rychlost zvuku ve vzduchu a D je průměr vlnovodu. Odpovídá-li průměr vlnovodu průměru lidského vzduchovodu, tj. $D = 7,3$ mm, a předpokládáme-li rychlost zvuku $c = 340$ m/s, potom hodnota hraniční frekvence je $f_h = 27\,293$ Hz. Tato frekvence je vysoko nad 20 000 Hz, což je práh slyšení zdravého člověka. Proto lze zevní zvukovod modelovat jako vlnovod. Takový vlnovod bude mít tvar otevřeného válce, který je na jednom konci uzavřen šikmo uloženým bubínkem.

Důležitým parametrem z hlediska rezonančních frekvencí vlnovodu je délka jeho osy. Ta by měla odpovídat délce osy skutečného zvukovodu. V literatuře jsou popsány tři osy zevního zvukovodu.

Přímá osa přímo spojuje střed ústí zvukovodu se středem bubínku. Její délka se udává 20 – 34,8 mm.

Geometrická osa prochází všemi středy průřezů zvukovodu, které jsou na tuto osu kolmé. Její délka je o 2 – 3 mm delší než osa přímá.

Akustická osa je dána středy vlnoploch zvukových vln, šířících se zvukovodem. Pro frekvence menší než 2 kHz je tato osa delší o 3 – 5 mm než osa přímá.

3.2 Modelování akustického subsystému

Akustický subsystém byl modelován pomocí 3D akustických prvků FLUID30. Ten má v programu ANSYS dvě modifikace, a to pro elementy, které jsou v kontaktu se strukturou - *structure absent* a pro čistě akustické elementy - *structure present*. V modifikaci *structure*

present byly použity elementy nacházející se na fluid–strukturním rozhraní. To jsou elementy v kontaktu s bubínkem a elementy na obvodu válce (tedy ty, které by přišli do kontaktu se spánkovou kostí resp. chrupavkou). Elementy v této modifikaci mají v uzlech parametry posuvů a akustického tlaku (UX, UY, UZ a PRES). Dále byla na těchto elementech zajištěna absorpce vln na povrchu stěny zvukovodu pomocí parametru MU. Je-li $MU = 0$, pak je odraz zvuku úplný a je-li $MU = 1$, dochází k úplné absorpci vlny. Ostatní akustické elementy byly použity v modifikaci *structure absent*. Tyto mají v uzlech pouze parametr akustického tlaku. Charakteristiky akustického subsystému a použitá hodnota parametru absorpce na stěnách zevního zvukovodu jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Materiálové charakteristiky akustického subsystému

hustota vzduchu	[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,225
rychlost zvuku ve vzduchu	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	340
koeficient absorpce MU	[-]	0,05

Velikost akustických elementů byla zvolena 1 mm. Pro harmonickou analýzu je v systému Ansys doporučeno 15 elementů na vlnovou délku (pro modální analýzu to je 10 elementů na vlnovou délku). Délka elementu 1 mm tomuto kritériu vyhovuje do frekvence 22 667 Hz. Síť byla vytvořena z šestistěnů. Aby mohl být bubínek vytvořen jemnější sítí, byla na zešíkmeném konci zmenšena délka elementů na 0,25 mm a síť tvořily čtyřstěny.

Protože téměř celý zvukovod prochází spánkovou kostí, byly stěny zevního zvukovodu modelovány jako dokonale tuhé. Okrajové podmínky mohly být zadány přímo na akustické prvky, nemusely na ně navazovat strukturní elementy.

3.3 Modelování bubínku

Bubínek byl modelován jako pružná membrána na zešíkmeném konci zvukovodu. Objem bubínku se vytvořil vytažením zešíkmené plochy o 0,1 mm podél normály této plochy. Na takto vytvořeném objemu byla vytvořena síť ze strukturálních prvků SOLID45. Tento prvek má v uzlech parametry posuvů (UX, UY, UZ). Délka hrany elementů byla zvolena 0,25 mm. Původně byla délka elementů 0,5 mm, ale vykreslení výsledků této struktury bylo příliš hrubé. Materiálové charakteristiky bubínku jsou uvedeny v tab. 3.2 [4].

Aby mohlo docházet k vzájemnému ovlivňování akustických a strukturních elementů (akustického subsystému a bubínku), musela být na rozhraní těchto dvou struktur aktivována *fluid – strukturní interakce*. Dále byly předepsány nulové posuvy na obvodové ploše bubínku. Na obr. 3.2 je znázorněn detail bubínku.

Tab. 3.2 Materiálové charakteristiky bubínku

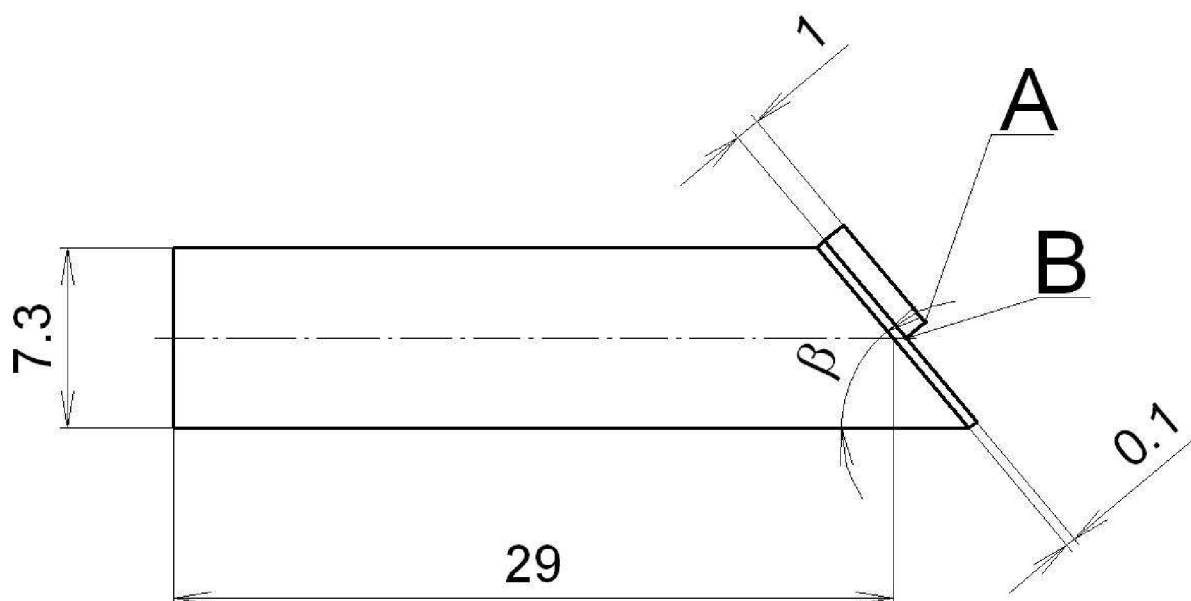
hustota	[kg·m ⁻³]	1200
modul pružnosti	[Pa]	70·10 ⁶
Poissonův poměr	[-]	0,4

3.4 Modelování kladívka

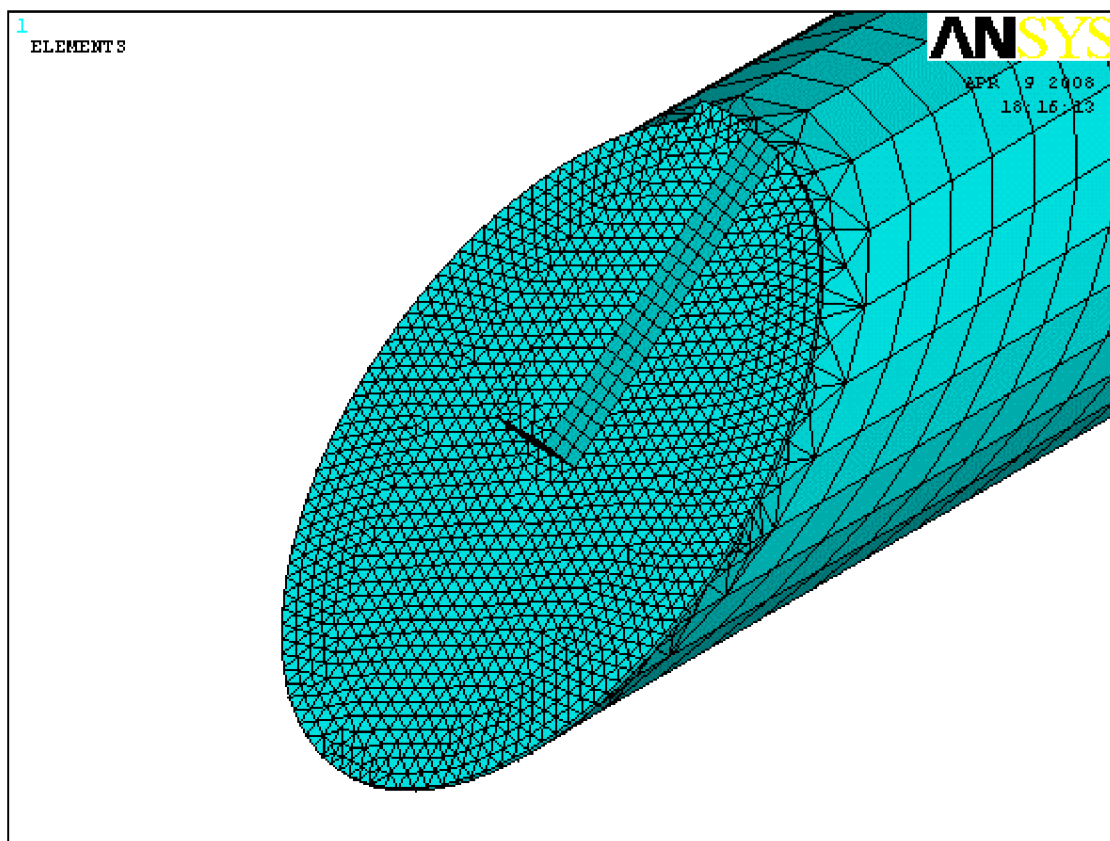
Objem kladívka byl vytvořen vytažením předem připravené plochy o 1 mm. Síť byla vytvořena prvky SOLID45 o délce hrany 0,25 mm. Tato síť obsahovala pětistěny. Na samotné kladívko nebyly předepsány okrajové podmínky. Modul pružnosti a Poissonův poměr kladívka odpovídají materiálovým charakteristikám kosti a jsou uvedeny v tab. 3.3 [6]. Hustota je proměnná z důvodů zachování hmotnosti kladívka 25 mg. Protože se během výpočtu mění sklon bubínku, mění se i délka kladívka a tedy i jeho hustota. Na obr. 3.2 je zobrazen detail kladívka spolu s bubínkem a na obr. 3.1 jsou rozměry celkového modelu zvukovodu.

Tab. 3.3 Materiálové charakteristiky kladívka

hustota	[kg·m ⁻³]	proměnná
modul pružnosti	[Pa]	6.5·10 ⁹
Poissonův poměr	[-]	0,25



Obr. 3.1 Rozměry modelu vnějšího zvukovodu



Obr. 3.2 Detail bubínku a kladívka

4 VÝPOČTY NA MODELU VNĚJŠÍHO ZVUKOVODU

Hlavním cílem výpočtů bylo zjistit, jak ovlivní náklon bubínku a jeho mechanické vlastnosti přenosovou charakteristiku celkového vnějšího zvukovodu. Postup při těchto výpočtech a diskuse studovaných jevů jsou uvedeny v této kapitole.

4.1 Modální a harmonická analýza

4.1.1 Modální analýza

U modální analýzy byly zachovány všechny okrajové podmínky tak, jak byly popsány v kapitole 3. Při vlastních frekvencích akustického subsystému a kompletního modelu byl na ústí zvukovodu navíc přidán akustický tlak o hodnotě $p = 0$ Pa. Řešení proběhlo v rozmezí 16 Hz – 20 KHz. Byl použit řešič DAMPED.

4.1.2 Harmonická analýza

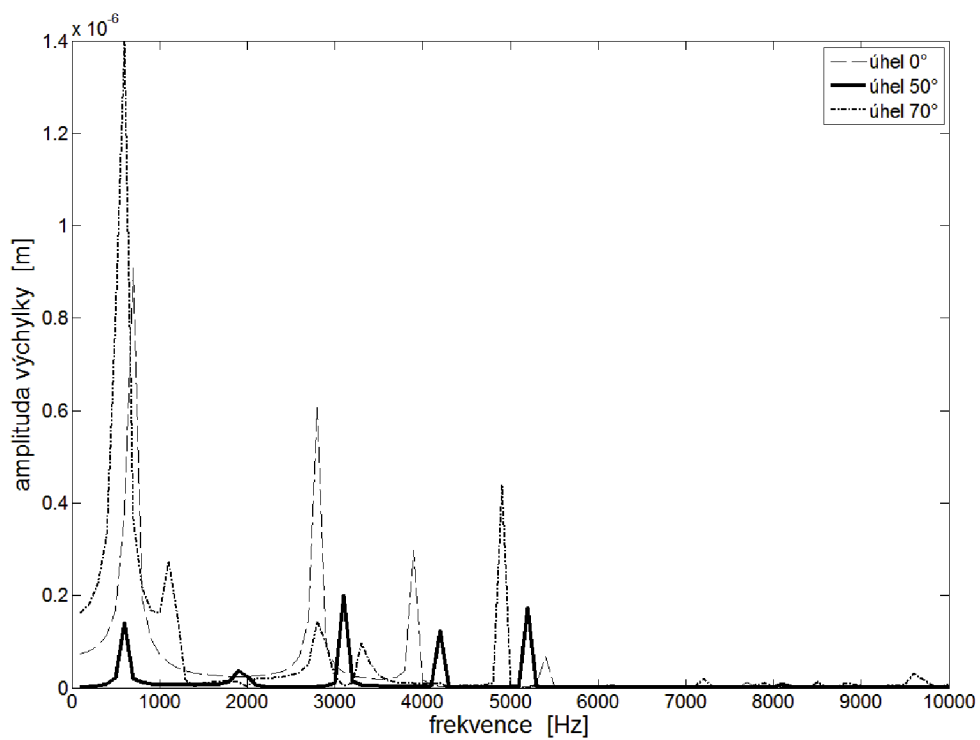
U harmonické analýzy byly rovněž zachovány okrajové podmínky, ale na ústí zvukovodu byl předepsán akustický tlak $p = 1$ Pa. Výpočet proběhl v rozmezí 0 Hz – 10 kHz, krok řešení byl 100 Hz. K výpočtu byl použit frontální řešič.

4.2 Náklon bubínku

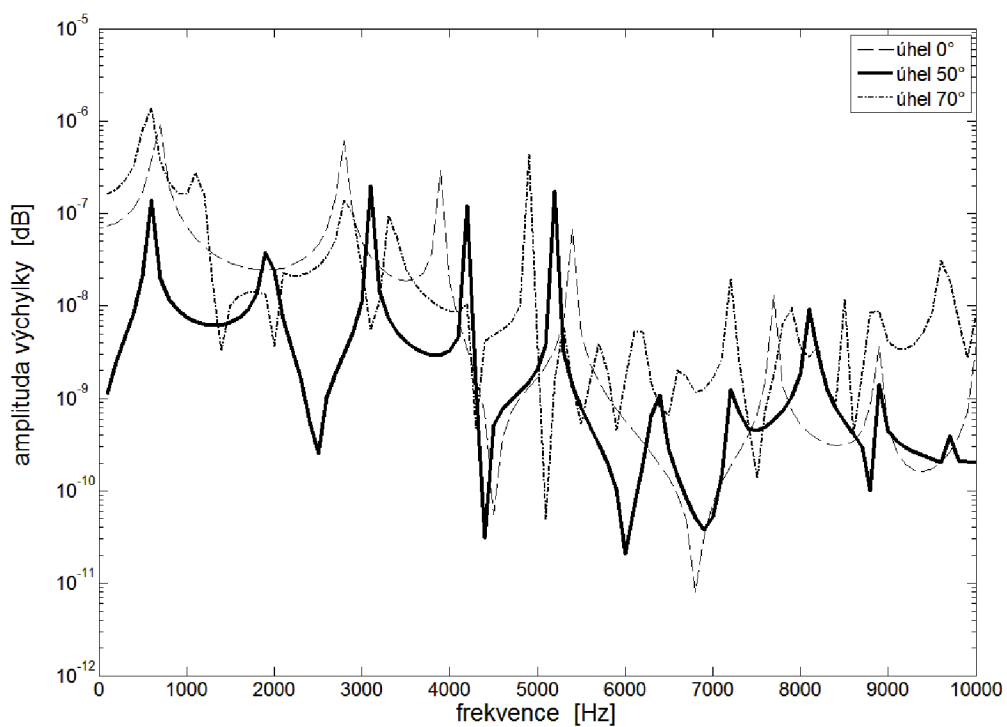
Vliv náklonu bubínku byl určován v rozmezí $0^\circ - 70^\circ$ (úhel je měřen od roviny sagitální). Náklon bubínku byl měněn po 10° , bylo tedy vytvořeno celkem osm modelů. Na každém z nich byla počítána modální analýza bubínku, modální analýza akustického subsystému a harmonická analýza kompletního modelu.

4.2.1 Harmonická analýza kompletního modelu

Harmonickou analýzou byla vypočtena odezva kompletního modelu na harmonické buzení akustickým tlakem o amplitudě 1 Pa. Na obr. 4.1 jsou uvedeny výsledky harmonické analýzy pro úhly sklonu 0° , 50° a 70° . Jako výstupní akustická veličina byla přitom sledována amplituda výchylky středu bubínku (viz obr. 3.1, bod A).



a)



b)

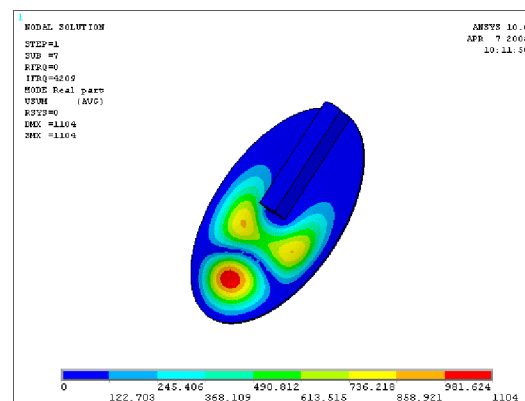
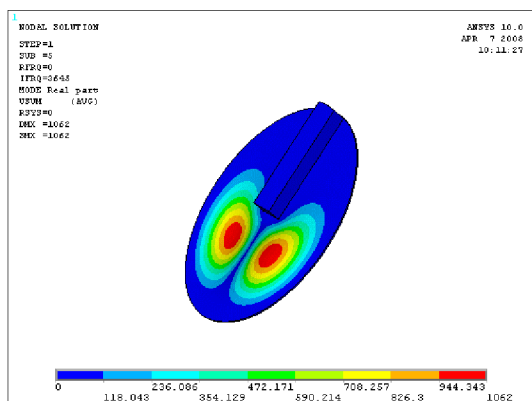
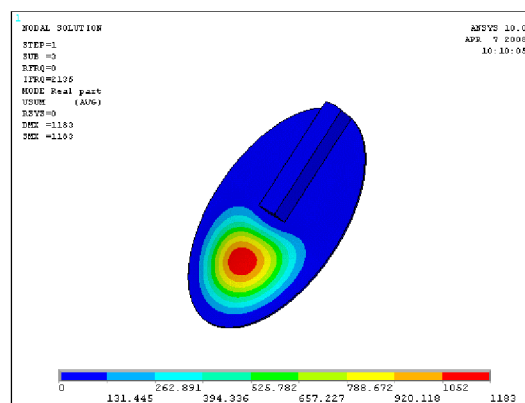
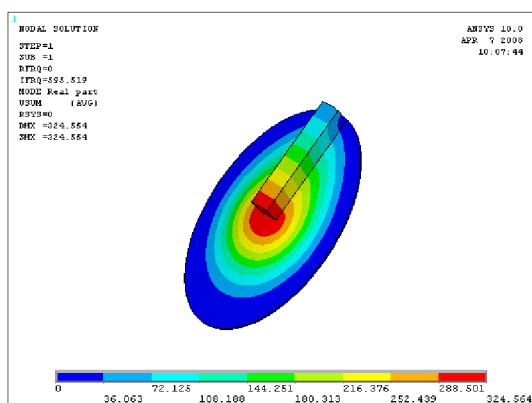
Obr. 4.1 Harmonická analýza pro úhel 0°; 50° a 70°; a) lineární stupnice
b) logaritmická stupnice

4.2.2 Modální analýza bubínku

Modální analýza bubínku byla počítána na modelu zahrnující i kladívko, obvod bubínku zůstal vetknutý. Výsledky modálních analýz bubínku s kladívkem při různém náklonu bubínku jsou uvedeny v tab. 4.1. První čtyři tvary kmitu bubínku pro úhel 50° jsou na obr. 4.1.

Tab. 4.1 Vlastní frekvence [Hz] bubínku s kladívkem pro různý náklon bubínku

		Úhel sklonu bubínku [°]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
Mód	1.	697	690	674	659	633	596	590	592
	2.	3770	3683	3443	3118	2666	2136	1686	1310
	3.	4590	4522	4430	4254	4008	3645	3132	2071
	4.	5420	5352	5305	5133	4899	4209	3299	2937
	5.	6467	6437	6186	5897	5555	5069	4615	3094
	6.	7752	7602	7323	6850	6099	5182	4680	3872
	7.	9083	8935	8580	8031	7243	6224	5374	4296
	8.	9154	9034	8811	8350	7353	6394	5389	4709
	9.	10091	9862	9177	8508	8131	7253	6000	4866
	10.	10694	10441	9987	9331	8432	7723	6480	5191



Obr. 4.1 První čtyři tvary kmitu bubínku pro úhel 50°

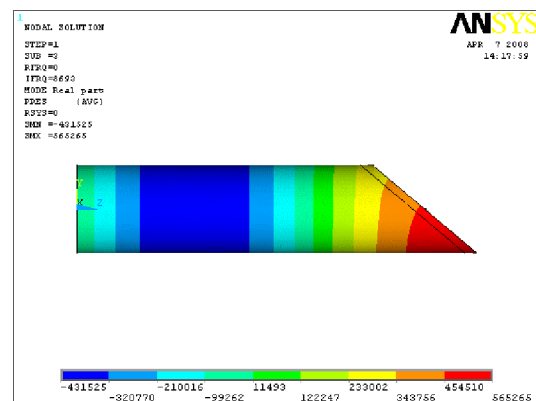
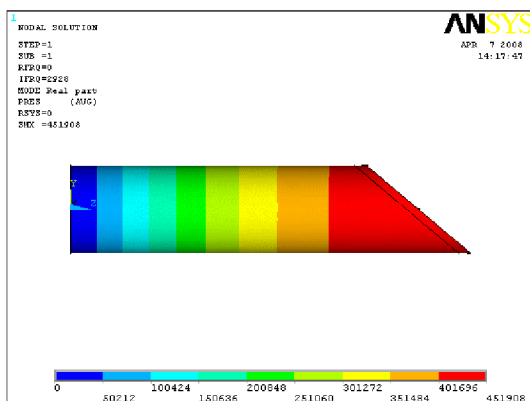
Vzhledem k tomu, že k modelování bubínku byly použity degenerované prvky (pětistěny), byly vlastní frekvence bubínku posunuty k vyšším frekvencím. To potvrdily kontrolní výpočty provedené s šestistěnovými elementy. Použití šestistěnuů pro tvorbu sítě bubínku však přináší problémy s navázáním sítě strukturních a fuidních elementů akustického subsystému. Tomuto problému se blíže věnuje [4]. Protože cílem práce bylo zjistit relativní změna náklonu popř. materiálových vlastností bubínku ovlivní, není tato chyba z hlediska řešeného problému zřejmě podstatná.

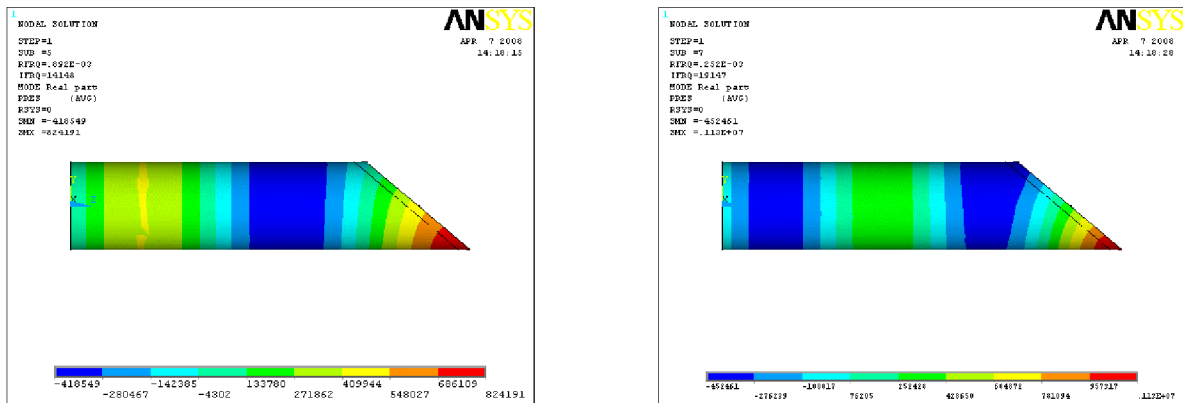
4.2.3 Modální analýza akustického subsystému

U modální analýzy akustického subsystému byly v místě, kde dochází k interakci bubínku s akustickým prostředím, ještě předepsány nulové posuvy. Zjištěné vlastní frekvence akustického subsystému pro různé náklony bubínku jsou uvedeny v tab. 4.2, tvary kmitu jsou na obr. 4.2.

Tab. 4.2 Vlastní frekvence [Hz] akustického subsystému pro různý náklon bubínku

		Úhel sklonu bubínku [°]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
Mód	1.	2930	2931	2930	2930	2929	2928	2922	2899
	2.	8800	8799	8793	8780	8755	8693	8522	7951
	3.	14694	14686	14655	14590	14453	14148	13477	12344
	4.	–	–	–	–	19847	18255	18255	17109





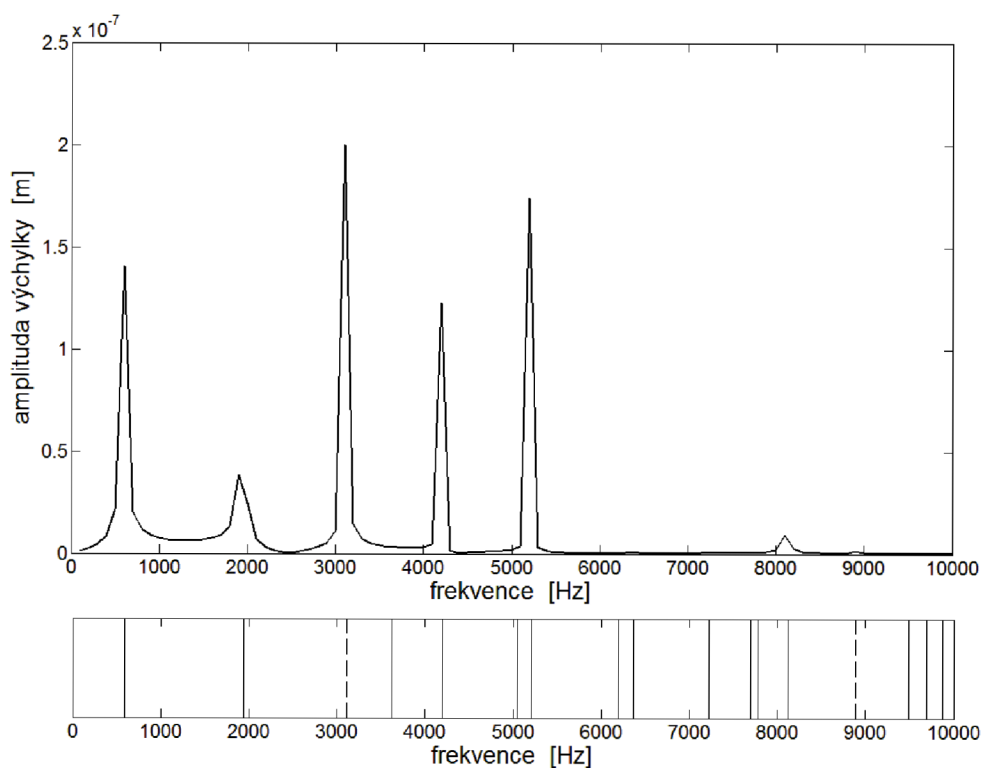
Obr. 4.2 Tvary kmitu akustického subsystému pro úhel 50°

4.2.4 Modální analýza kompletního modelu

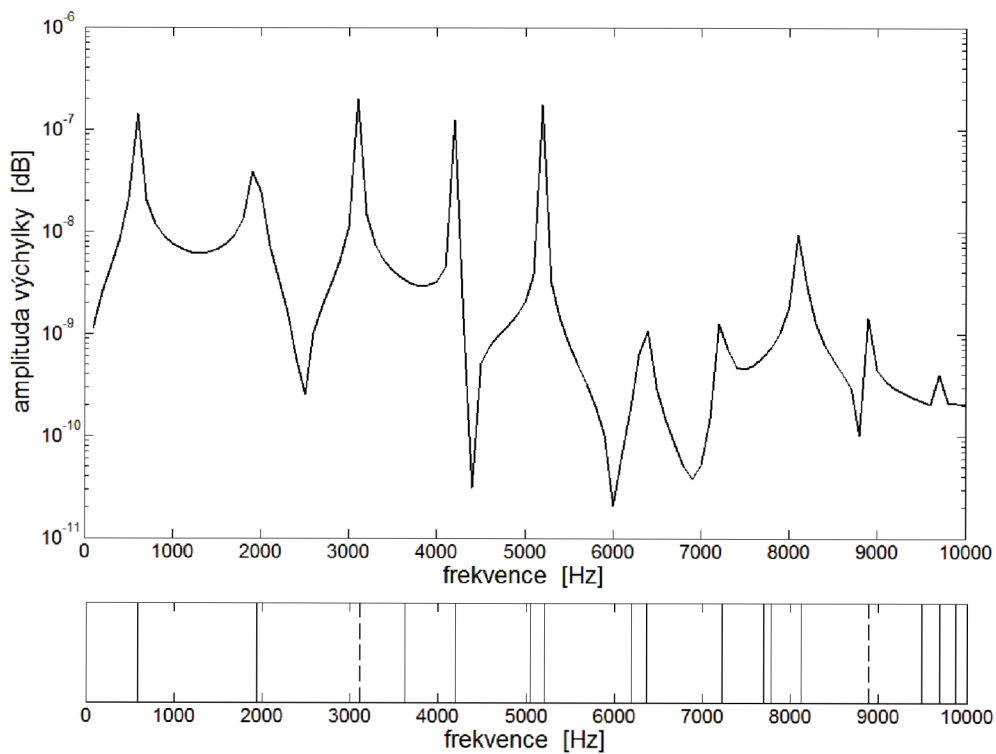
V reálných zvukovodech dochází k vzájemnému ovlivňování akustického prostoru dutiny zevního zvukovodu a struktury bubínku. Modální analýza kompletního modelu měla ukázat, jak se toto vzájemné ovlivňování projeví na vlastních frekvencích akustického subsystému a bubínku s kladívkem. Výsledky této analýzy jsou v tab. 4.3. Pomocí výsledků z modálních analýz jednotlivých subsystémů bylo možné vyšetřit, které vlastní frekvence kompletního modelu přísluší akustickému systému popř. bubínku. Výsledkem bylo, že akustickému subsystému náleží 3., 14., 25. a 35. mód celkového modelu, tedy frekvence 3106 Hz, 8881 Hz, 14291 Hz a 19741 Hz. Toto rozřídění je zobrazeno v rozmezí 0 Hz – 10 kHz pro sklon bubínku o 50° v spodním grafu na obr. 4.3, kde plná čára označuje vlastní frekvence náležící bubínku a čára přerušovaná vlastní frekvence náležící akustickému subsystému.

Tab. 4.3 Vlastní frekvence [Hz] kompletního modelu pro různý náklon bubínku

		Úhel sklonu bubínku [°]							
		0	10	20	30	40	50	60	70
Mód	1.	671	665	651	635	611	585	568	565
	2.	2781	2666	2719	2611	2360	1947	1525	1152
	3.	3891	2767	3629	3410	3214	3106	3066	2028
	4.	4541	3822	4388	4211	3970	3619	3103	2845
	5.	5392	4479	5284	5118	4892	4202	3270	2913
	6.	6422	5326	6137	5848	5505	5042	4574	3330
	7.	7689	6299	7267	6797	6055	5202	4715	3846
	8.	8883	7544	8531	7982	7196	6199	5331	4263
	9.	9049	8878	8797	8283	7298	6362	5342	4661
	10.	9120	8886	8859	8485	8109	7225	5961	4899



a)



b)

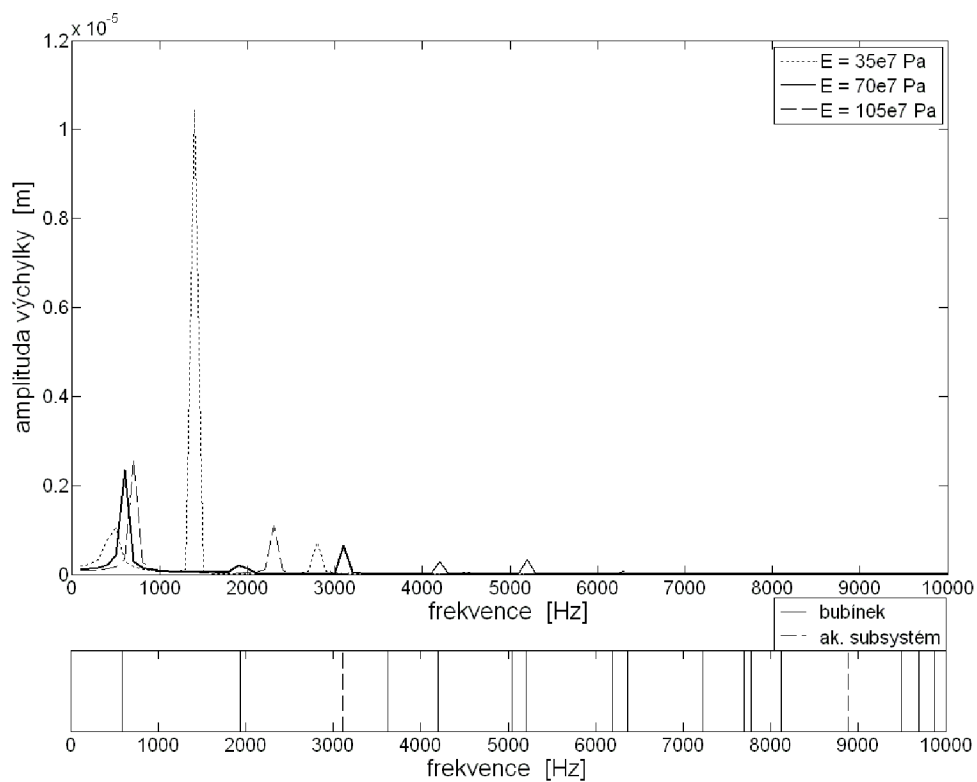
Obr. 4.3 Výsledky harmonické analýzy kompletního modelu; a) lineární stupnice
b) logaritmická stupnice

4.3 Elasticita bubínku

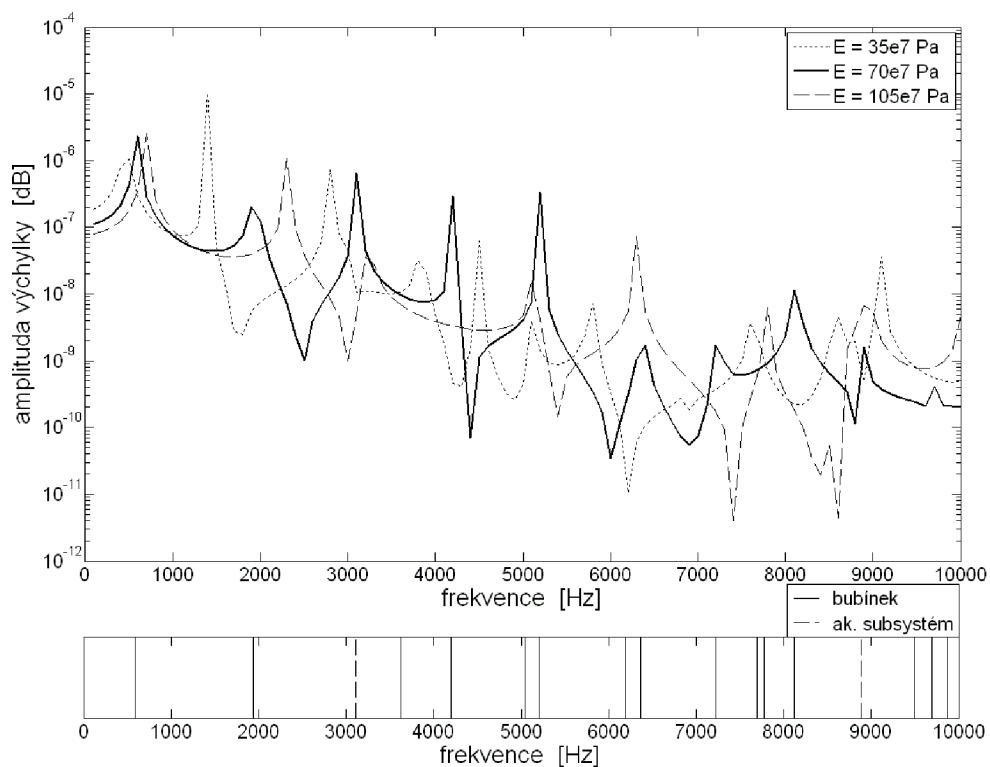
Harmonická a modální analýza byla spočtena pro tři hodnoty modulu pružnosti. Jako základní hodnota je uvažována hodnota $E = 70e7$ Pa, která odpovídá hodnotě modulu pružnosti bubínku uváděné v literatuře. Ostatní moduly pružnosti se od referenční hodnoty lišily o 50 %. Všechny výpočty byly počítány při sklonu bubínku o úhel 50° . Výsledky modální analýzy jsou uvedeny v tab. 4.4 a výsledky harmonické analýzy na obr. 4.4.

Tab. 4.4 Vlastní frekvence [Hz] kompletního modelu pro různou elasticitu bubínku

		Modul pružnosti bubínku E [Pa]		
		3,5e7	7e7	10,5e7
Mód	1.	459	595	688
	2.	1401	2136	2309
	3.	2560	3645	3237
	4.	2809	4209	4430
	5.	3076	5069	5130
	6.	3570	5182	6165
	7.	3848	6224	6307
	8.	4386	6394	7587
	9.	4502	7253	7789
	10.	5118	7723	8734



a)

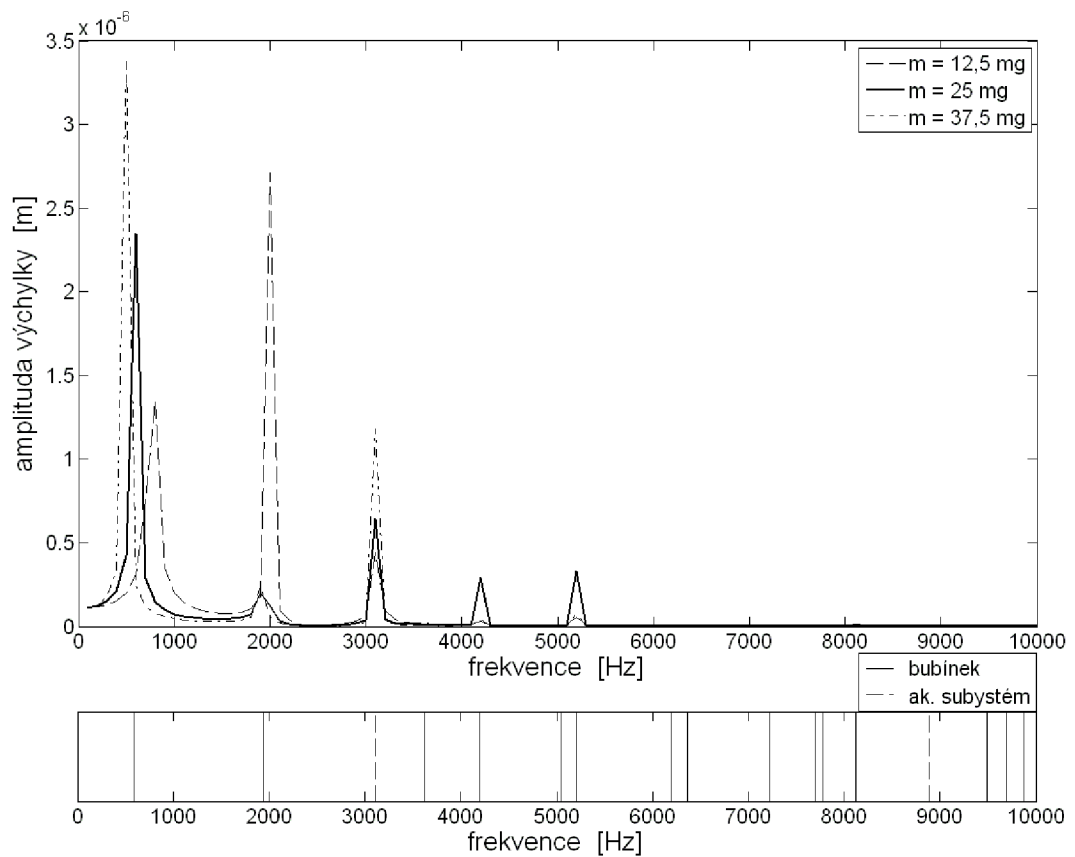


b)

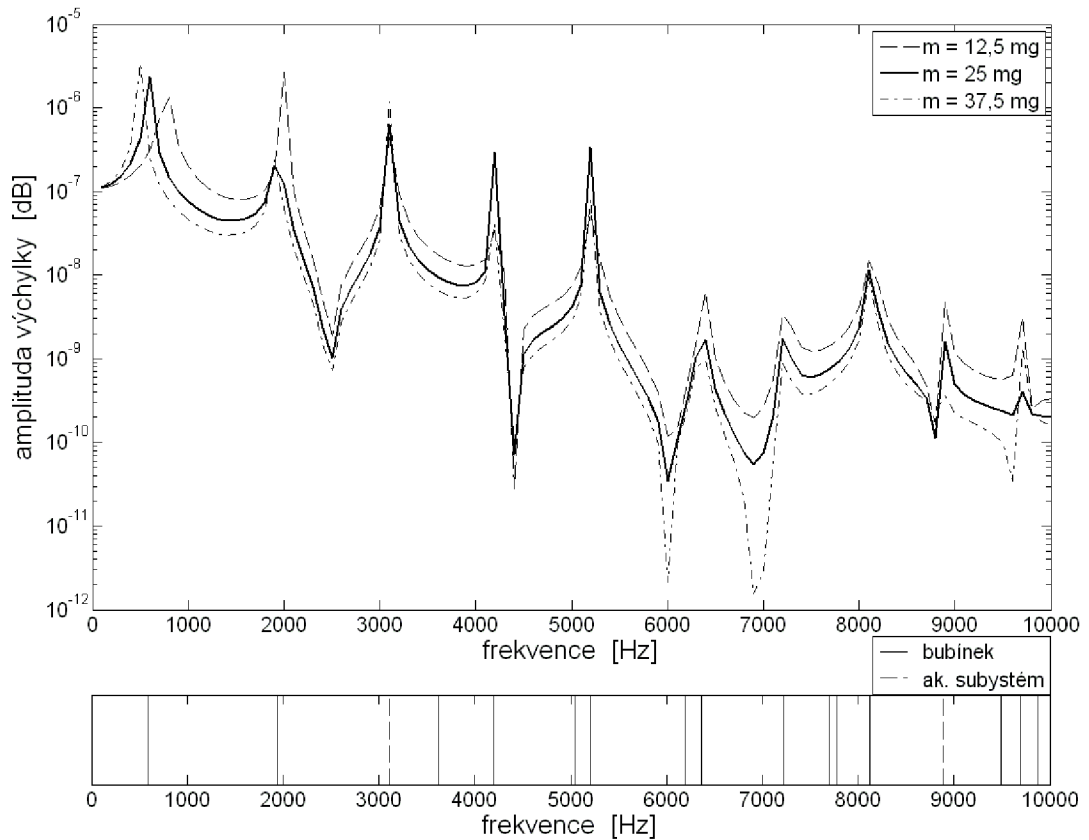
Obr. 4.4 Výsledky harmonické analýzy pro různou elasticitu bubínku; a) lineární stupnice
b) logar. stupnice

4.4 Setrvačné síly

Dalším úkolem bylo zjistit, jaký vliv má hmotnost kladívka na přenosovou funkci kompletního modelu. Hmotnost kladívek činily 12,5 mg, 25 mg (referenční hodnota) a 37,5 mg. Všechny výpočty byly počítány při sklonu bubínku o úhel 50°. Výsledky harmonické analýzy těchto modelů jsou na obr. 4.5.



Obr. 4.5 a-Výsledky harmonické analýzy pro různé hmotnosti kladívkav-lineární stupnice

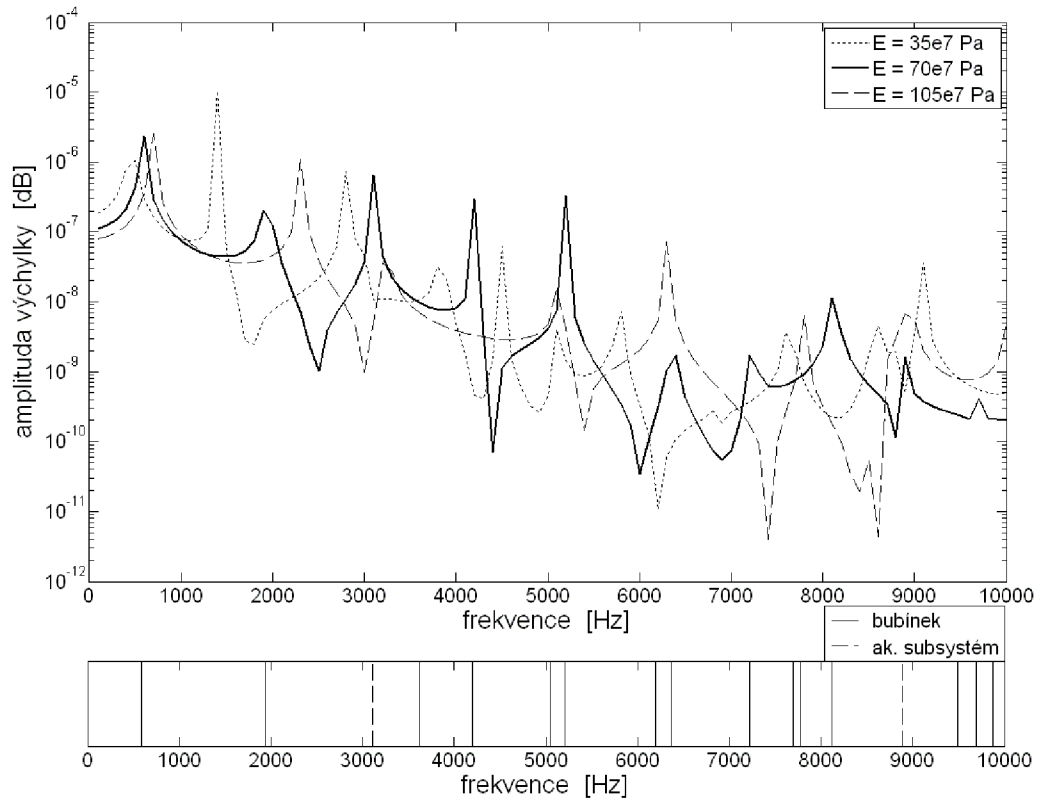


b)

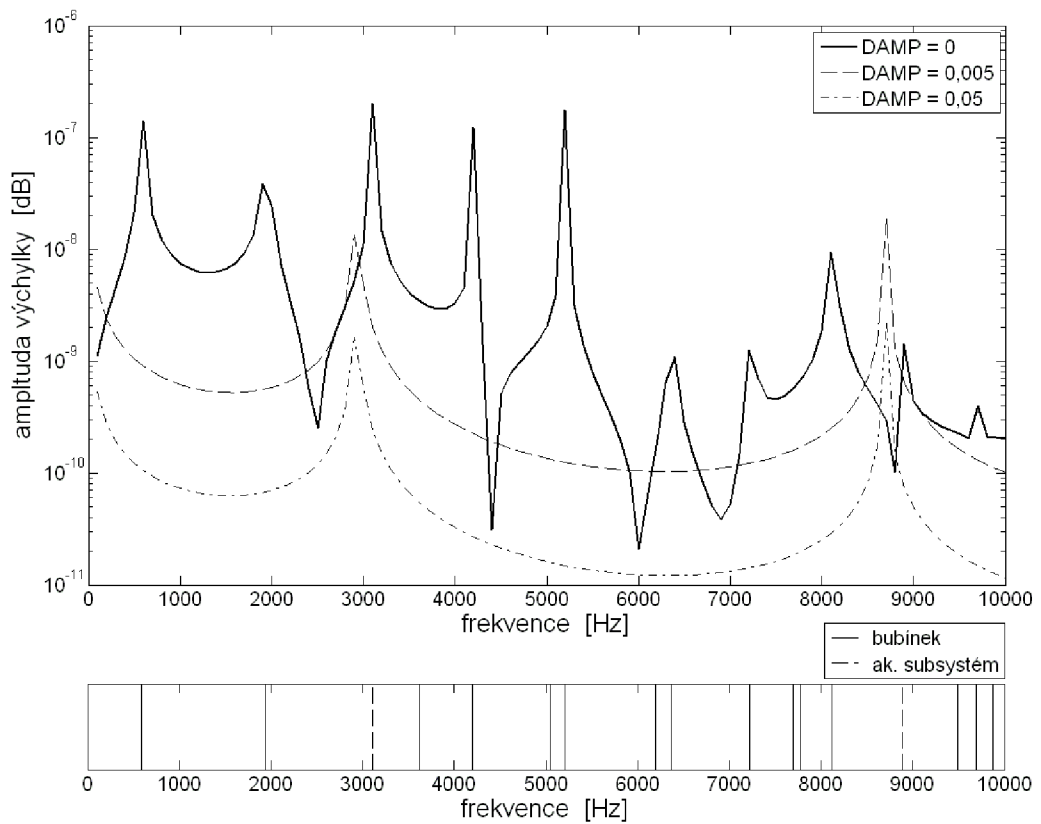
Obr. 4.5 b-Výsledky harmonické analýzy pro různé hmotnosti kladívkav v logaritmické stupnici

4.5 Tlumení bubínku

V předchozích výpočtech byl uvažován pouze útlum akustických vln absorpcí na povrchu akustického subsystému tj. byl zadáván parametr MU. Ve výpočtovém programu ANSYS lze zadat také tlumení struktury pomocí koeficientu materiálového tlumení DAMP. Výsledky harmonické analýzy pro různé hodnoty DAMP bubínku jsou na obr. 4.6.



a)



b)

Obr. 4.6 Výsledky harmonické analýzy pro různé tlumení bubínku; a) linární stupnice
b) logar. stupnice

4.6 Koincidenční jev

Koincidenční jev nastává při šikmém dopadu akustických vln na rovinnou desku a to jen při určitých (kritických) frekvencích. V případě koincidence je průmět hodnoty rychlosti v desce do směru šíření dopadající akustické vlny roven její rychlosti. Vzhledem k tomu, že rychlost v deskách (popř. v našem případě v blance bubínku) závisí na tloušťce a Youngově modulu, byly hodnoty těchto parametrů u bubínku voleny tak, aby koincidenční jev nastal při zvolené frekvenci a zvoleném úhlu dopadu.

Analytický výpočet parametrů pro bubínek tedy vycházel ze tří rovnic (2),

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}} \quad (2)$$

$$c_B = \sqrt{1,8 \cdot c_L \cdot f \cdot h} \quad (3)$$

$$c_B \cdot \sin \beta = c \quad (4)$$

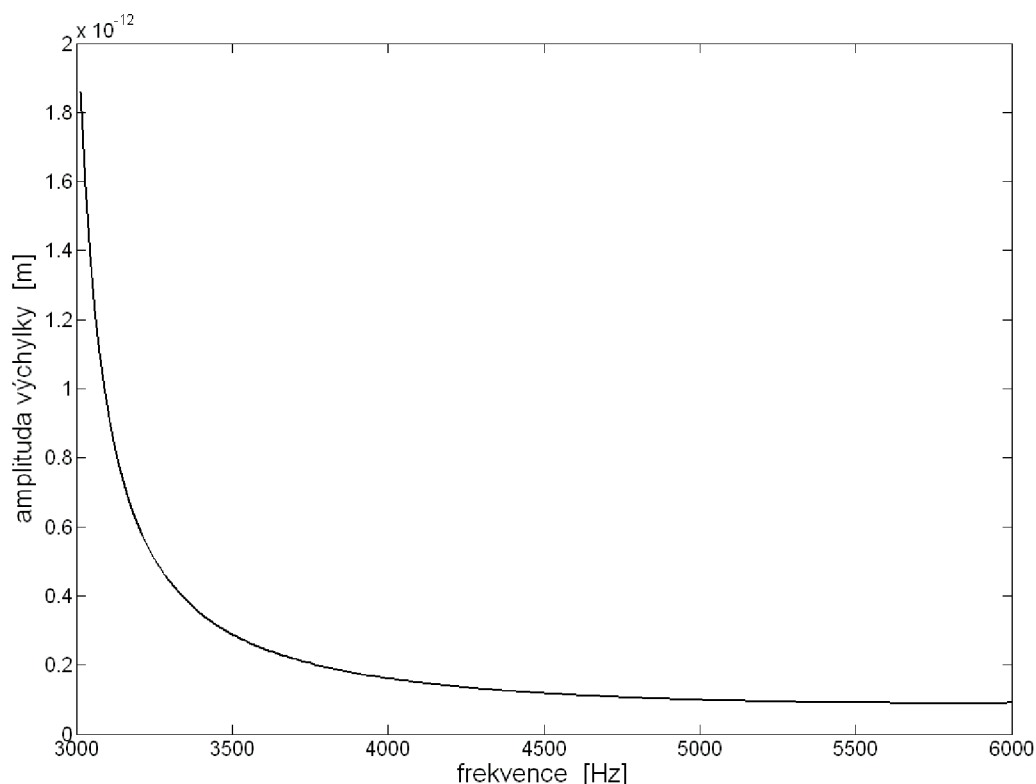
kde c_B je rychlost ohybových vln v desce, c_L je rychlost podélných vln v desce, c je rychlost zvuku, E je modul pružnosti desky, ρ je hustota desky, μ je Poissonův poměr desky, h je tloušťka desky, f je koincidenční frekvence a úhel β je zřejmý z obr. 3.1. Rovnice č. 4 představuje tzv. podmínku koincidence. Z těchto rovnic byl vyjádřen modul pružnosti E , resp. tloušťka desky.

$$E = \frac{\rho \cdot (1-\mu^2)}{(1,8 \cdot f \cdot h)^2} \cdot \left(\frac{c}{\sin \beta} \right)^4 \quad (5)$$

$$h = \frac{\left(\frac{c}{\sin \beta} \right)^2}{1,8 \cdot f \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}}} \quad (6)$$

Jako kritická (koincidenční) frekvence byla zvolena hodnota $f = 4500$ Hz. Velikosti ostatních veličin odpovídaly uvedeným hodnotám v kap. 3. Úhel β byl roven skutečnému náklonu bubínku, tedy 50° . Vypočítaný modul pružnosti desky, resp. tloušťka desky, byl použit jako vstupní hodnota do programu ANSYS.

Dopočítaný modul pružnosti měl hodnotu $E = 2,18e14$ Pa. Dopočítaná tloušťka bubínku byla $h = 0,21$ m. Tato hodnota se jeví příliš velká, proto byl počítán pouze model s upraveným modulem pružnosti E . Výpočet proběhl na modelu bez kladívka a při sklonu bubínku o úhel 50° . Na takto upraveném modelu byla počítána harmonická analýza. Výsledky výpočtu jsou zobrazeny na obr. 4.7. Jako výstupní akustická veličina byla sledována výchylka středu bubínku (viz. obr. 3.1, bod B)



Obr. 4.7 Harmonická analýza s upraveným modulem pružnosti E tak, aby se na bubínku projevil koincidenční jev pro hodnotu frekvence 4500 Hz

Jistým nedostatkem práce zřejmě bylo použití poměrně hrubého kroku (100 Hz) při harmonické analýze. Použití poměrně hrubého vzorkování ve frekvencích však bylo vynuceno časovými důvody (délka jedné analýzy trvala cca 2 hodiny).

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Náklon bubínku

Z modální analýzy samotného bubínku plyne, že zvětšováním sklonu bubínku klesají jeho vlastní frekvence. To je způsobeno zvětšením poloměru bubínku při jeho větším sklonu. Klesání vlastní frekvence při růstu poloměru bubínku potvrzuje také vztah kmitání kruhové membrány (bubínek lze považovat za kruhovou membránu) [5]

$$\Omega_0 = \frac{k}{R} \cdot \sqrt{\frac{N}{q}} \quad (7)$$

kde Ω_0 jsou vlastní frekvence, R je poloměr membrány, N je poměrný tah (předpjetí membrány), q je poměrná hmotnost membrány a konstanta k závisí na módu membrány.

U akustického subsystému se jeho první frekvence se sklonem bubínku téměř nemění. To je způsobeno stejnou délkou osy zvukovodu u všech modelů akustického subsystému. Vlastní frekvence začínají v rámci jednotlivých modelů klesat až s růstem módů. To je zřejmě způsobeno posunem maxima akustického tlaku směrem k dolní části bubínku (viz. obr. 4.2) a tím dochází k prodloužení akustické osy zvukovodu. Toto prodloužení roste rychleji u větších sklonů bubínku.

U harmonické analýzy byla vlivem příliš velkého kroku řešení obtížná identifikace přenosové charakteristiky u jednotlivých módů celkového modelu zevního zvukovodu. Hrubý krok byl volen z časových důvodů. Jeden výpočet při kroku 100 Hz trval cca. 2,5 hod., při kroku 50 Hz už to bylo cca. 8 hod. Vzhledem k počtu výpočtů byl raději volen větší krok výpočtu. Dalším důvodem by mohlo být netlumení bubínku, tím došlo k jeho rozozcilování, které by u normálního bubínku zřejmě nenastalo. Na obr. 4.1 je vidět, že při sklonu bubínku o 70° je náchylnost k oscilaci větší, než v případě 0° a 50°. Dále lze pozorovat, že do frekvence cca. 3 kHz zajišťují náklony bubínku o 70° a 0° lepší přenos zvuku (větší amplitudy výchylky), se zvyšující se frekvenci výchylky klesají. Při sklonu bubínku o 50° jsou amplitudy výchylky vyrovnanější, díky tomu by měl být zvuk slyšet v rozmezí zhruba 0 Hz - 5,5 kHz stejně hlasitě.

Elasticita bubínku

Z výsledku harmonické analýzy (viz. obr. 4.4) je zřejmé, jak zvýšená tuhost způsobila „zklidnění“ přenosové charakteristiky. Nejvíc to je patrné v oblasti 3 kHz – 5 kHz. Změna vlastních frekvencí v závislosti na tuhosti bubínku byla podle očekávání, tzn. se zvýšením tuhosti vzrostly vlastní frekvence.

Setrvačné síly

Vliv setrvačných sil je hlavně patrný na vyšších frekvencích. Kromě první vlastní frekvence bubínku jsou výchylky pro vyšší hmotnost kladívka menší. Vlastní frekvence se s změnou hmotnosti kromě první vlastní frekvence prakticky nemění. Zde je vliv hmotnosti kladívka v souladu s teorií tj. že růst hmotnosti snižuje hodnotu vlastní frekvence.

Tlumení bubínku

Výpočet harmonické analýzy pro různou hodnotu tlumení bubínku ukázal, že se již při nízkém tlumení bubínku (součinitel materiálového tlumení $DAMP=,005$) vlastní frekvence celkového modelu náležící bubínku na přenosové charakteristice zevního zvukovodu neprojeví. Projevily se pouze vlastní frekvence náležící akustickému zvukovodu. To je způsobeno tím, že tlak vzduchu představuje budící sílu působící na bubínek.

Koincidenční jev

Koincidenčního jevu při dopadu tlakových vln na šikmo uložený bubínek pozorován nebyl. Obr. 4.7 zřejmě zobrazuje nadrezonanční oblast u jedné z vlastních frekvencí kompletního modelu. Důvodem může být to, že rovnice (2), (3), (4) jsou odvozeny na základě teoretických znalostí a z nich jsou dopočítány modul pružnosti a tloušťka bubínku. Bylo by potřeba provést experiment, který by přímo udával závislost kritických frekvencí na geometrii a materiálových charakteristikách desky. Koincidenční jev je znám u rozlehlých desek (např. tabule skla), kde koincidence probíhá na velké dráze. Je tedy pravděpodobné, že u lidského bubínku je tato dráha příliš malá a proto není možné, aby se na přenosové charakteristice vnějšího zvukovodu výrazněji projevila.

6 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byl v systému Ansys vytvořen jednoduchý konečnoprvkový model, na kterém probíhal výpočet s cílem zjistit, jak ovlivňuje náklon bubínku a jeho materiálové charakteristiky přenos akustické energie do vnitřního ucha. Z provedených výpočtů lze vyvodit tyto závěry:

- Větší sklon bubínku vedl k snížení vlastních frekvencí bubínku. To je způsobeno zvětšením jeho poloměru. U akustického subsystému se náklon bubínku projevil až u vyšších módů. První vlastní frekvence zůstaly téměř nezměněny, ale u větších náklonů bubínku spolu s růstem módů klesaly vlastní frekvence akustického subsystému rychleji. To je zřejmě způsobeno posunem maxima akustického tlaku směrem k dolní části bubínku a tím k prodloužení akustické osy zvukovodu.
- Změna základního sklonu bubínku (50°) vedla k lepšímu přenosu akustické energie v oblasti do 3 kHz. Při sklonu bubínku při 50° byly amplitudy vyrovnanější do frekvence cca. 5,5 kHz, to by mělo v této oblasti zajišťovat rovnoměrnou hlasitost různě vysokého zvuku.
- Hmotnost kladívka se projevovала v celé části vyšetřované oblasti (kromě první vlastní frekvence). Tedy s růstem hmotnosti klesala amplituda výchylky. U vyšších frekvencí byl vliv hmotnosti kladívka výraznější.
- Tlumení bubínku popř. jeho zvýšená tuhost "zklidnily" průběh přenosové charakteristiky. V případě tlumení bubínku se již při nízkém tlumení vlastní frekvence bubínku na přenosové charakteristice zevního zvukovodu přestaly projevovat.
- Koincidenční jev na bubínku nebyl pozorován. Je možné, že díky malým rozměrům nemůže koincidence na bubínku vzniknout nebo se výrazněji projevit.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Čihák, R.: Anatomie člověka, 3. díl. Grada. Praha 1997
- [2] Pejchal, P.: Modelování šíření zvuku ve vnějším zvukovodu. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2003.
- [3] Mejzlík, J., Pokorný, K., Černý, L., Chrobok, K., Krempaská, S., Pellant, A., Pellant, K., Stárek, I.: Zevní zvukovod. Nakladatelství Tobiáš. Havlíčkův Brod 2007
- [4] Dušek, D.: Ovlivnění akustických vlastností zevního zvukovodu exostóсами. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2003
- [5] Slavík, J.: Počítačové metody mechaniky. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2001
- [6] Skudrzyk E.J.: Die Grundlagen der Akustik. Springer-Verlag. Wien 1954
- [7] Šremr, J.: Modelování přenosu zvuku zevním zvukovodem. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2001
- [8] Dušek, D.: Modelování mechaniky lidského sluchu pomocí MKP. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2006
- [9] <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/IT/IT.html>