



ANALYSIS OF BONE CONDUCTED ACOUSTIC ENERGY BY THE HUMAN CRANIA

K. Přikryl*

Summary: Bone conduction analysis of acoustic energy by the human crania was solved. A dry skull with damping was used to investigate the vibratory pattern of bone conducted sound. Three orthogonal vibration responses of the cochleae were calculated by means of Finite Element Method in the frequency range 200 - 5 500 Hz. The exciter was attached to the temporal and parietal bones, one at the time. It was shown that for the ipsilateral side the direction of excitation coincides with that of maximum response. An overall higher response level was achieved, for the direction of excitation, at the ipsilateral cochlea when transducer was attached to the excitation point closest to the cochlea.

1. ÚVOD

Kostní vedení akustické energie má význam ve třech oblastech. Jsou to: audiometrie, podpora sluchu, fonace. Přes mnoho výzkumů v této oblasti není doposud znám přesný mechanismus poslechu kostním vedením. Je obtížné popsat tento jev vzhledem k tomu, že lidská lebka obsahuje měkké tkáně, vrstvené kosti a mozek, což způsobuje, že nelze dosáhnout analytického řešení problému. Není také možné z etických důvodů uskutečnit přímé měření pohybů basilární membrány žijícího člověka na cochleu. Přímá měření lze provádět buď na neživém člověku, nebo na vysušené lebce Stenfelt et al. (2000). Vibrace působící na lebku jsou vedeny přes kosti lebeční, dokud nedosáhnou cochleu, kde jsou transformovány na vlnový pohyb basilární membrány. Tento pohyb je interpretován cortiho orgánem jako zvuk. Odezva se zdá být stejná pro oba způsoby vedení vzdušného i konduktivního. Působení vibrací je vedeno do cochley ve třech modech a to: příjem zvukové energie vyzařované do externího ušního kanálu, setrvačná odezva středoušních kůstek a pohyb kapaliny vnitřního ucha, pružné deformace vnitroušních prostor. Vždy se však jedná o vibrační pohyb a přenos akustické energie. Naši snahou je tyto jevy modelovat, analyzovat a využít v audiologii a foniatrii. Vhodnou metodou je matematické modelování a simulace. Za tímto účelem byl vytvořen konečnoprvkový model lidské lebky z CT řezů (Přikryl a Krška 2000) a provedena harmonická analýza v rozsahu 200 – 5 500 Hz.

2. ANALÝZA VÝPOČTOVÉHO MODELU

Pro získání odezvy na harmonické buzení byla použita metoda modální superposice, které předchází modální analýza. Materiálové konstanty výpočtového modelu jsou: hustota $\rho = 1412 \text{ kgm}^{-3}$, modul pružnosti $E = 4.46 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, Poissonova konstanta $\mu = 0.22$. Při harmonické analýze bylo také uvažováno tlumení velikosti 1.5 % modálního tlumení podle experimentální modální analýzy (Přikryl a Malenovský 1998). Lebka byla uvažována volně v prostoru vzhledem k tomu, že na přenos vlnění nemá uložení vliv. Vzhledem k tomu, že hustota modů s vyššími frekvencemi narůstá a vzhledem k záměru použít metodu modální superposice byla provedena analýza v uvedeném rozsahu i když lidská řeč pokrývá širší rozsah. Výhodou použité metody je to, že vzhledem k rozsáhlému modelu, který má 68 434

* Doc.Ing.Karel Přikryl, VUT Brno, FSI, ÚMT, Technická 2, 616 69 Brno, e-mail prikryl@umtn.fme.vutbr.cz

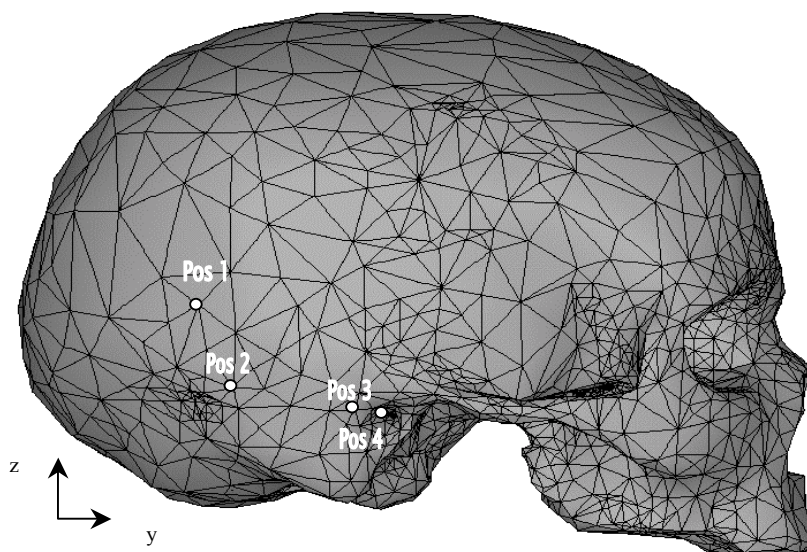
prostorových elementů a 16 580 uzlů je možno provádět numerická řešení v rozumně krátké době. Dále je uvedena tabulka s prvními šestnácti vypočítanými vlastními frekvencemi.

Tab. 1. Vlastní frekvence prázdné lebky

Tvar	f_i [Hz]	Tvar	f_i [Hz]	Tvar	f_i [Hz]	Tvar	f_i [Hz]
1	1278	5	2326	9	2914	13	3319
2	1793	6	2536	10	3101	14	3379
3	1966	7	2548	11	3131	15	3603
4	2027	8	2895	12	3281	16	3672

Výpočet přenosů vlnění lebkou je proveden tak, aby bylo možno zodpovědět následující otázky:

- Jak se mění odezvy ve směrech souřadnicových os excitované lebky s frekvencí a polohou budícího bodu
- Jaký je rozdíl ve výchylkách mezi pravoúhlými směry v bodech odezev (místech cochleý)
- Jaké je zeslabení mezi ipsilaterální a contralaterální cochleou
- Jaký je zisk ve výchylkách v závislosti na implantaci budiče blíže ke cochleý, tj. v blízkosti polokruhového kanálu.



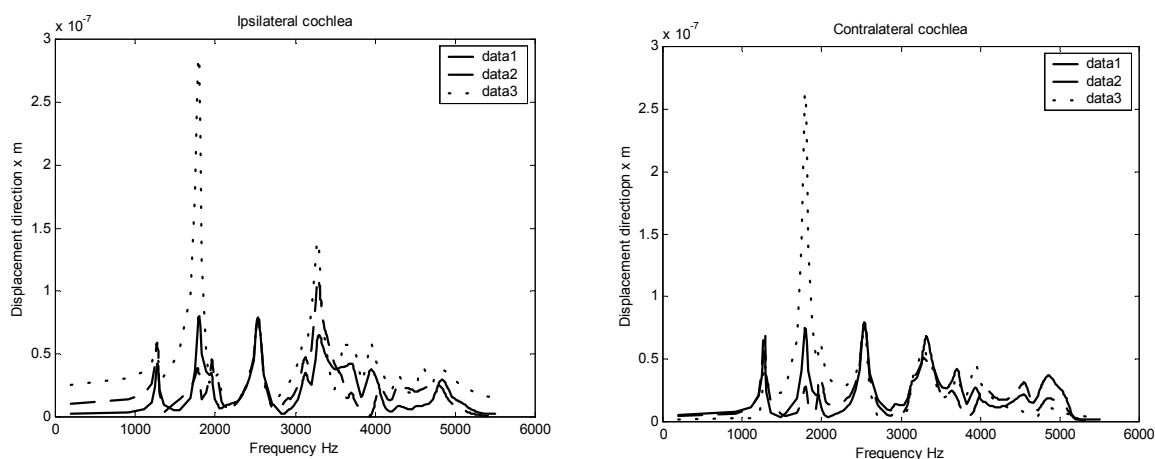
Obr. 1. Výpočtový model prázdné lebky s vyznačenými body excitace

Kompensační pomůcky (BAHA) (Tjellström at al., 1995) se upevňují asi 55 mm za ušní otvor (do temenní kosti), což je přibližně na modelu v bodě Pos.1 podle obr. 1. V audiometrii se např. ladička přikládá na mastoid na spánkové kosti, což na modelu je přibližně Pos.2. přibližně ve vzdálenosti 35 mm za ušním otvorem. Další body excitace Pos.3 a Pos.4 slouží ke zjišťování vlivu blízkosti excitovaného místa k ipsilaterální cochleý na přenos akustické energie. Budící síla amplitudy

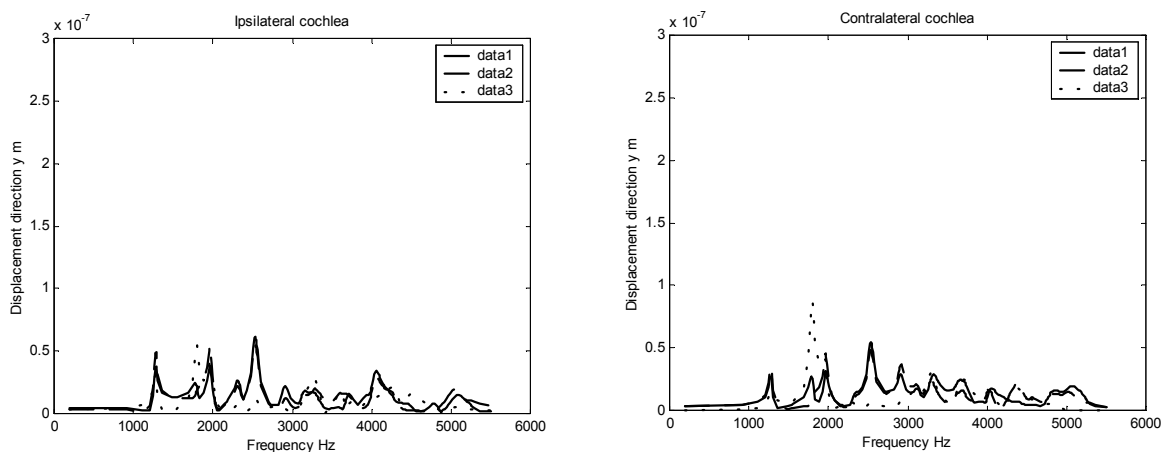
1 N byla postupně přikládána ve směru normy laterální (pohled z prava), což je osa x, která na obr.1 není vyznačena (pravotočivá soustava).

A. Odezvy ve směrech souřadnicových os v závislosti na poloze budícího bodu

Výsledky výpočtů odezev výchylek ve směru x v závislosti na poloze buzení jsou zobrazeny na obr. 2. Je vidět, že maximální odezva ve směru x je v případě, kdy buzení je blízko ipsilaterální cochlely, tečkovaný průběh odpovídá poloze buzení Pos.3. Toto lze pozorovat v celém rozsahu zkoumaných frekvencí. Největší zesílení je v oblasti druhé vlastní frekvence 1793 Hz. První vlastní frekvence 1278 Hz je méně výrazná. V oblasti mezi 3000 a 4000 Hz je shluk výraznějších odezev, což podle tab. 1 odpovídá větší hustotě módů v této oblasti (Přikryl a Kršek 2000). Na contralaterální straně tato koincidence s budící silou není v celém rozsahu zkoumaných frekvencí.



Obr. 2. Vypočítané výchylky v ipsilaterální a contralaterální cochleách ve směru osy x v závislosti na bodě excitace. Data 1 = Pos.1 (BAHA), data 2= Pos.2 (audio), data 3=Pos.3 blízko ipsilaterální cochlely.

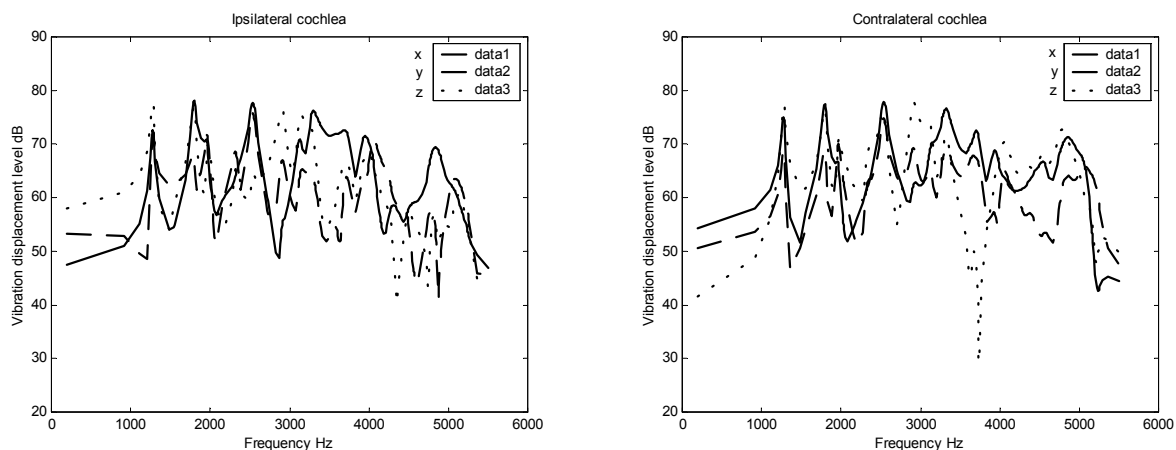


Obr. 3. Vypočítané výchylky v ipsilaterální a contralaterální cochleách ve směru osy y v závislosti na bodě excitace. Data 1 = Pos.1 (BAHA), data 2= Pos.2 (audio), data 3=Pos.3 blízko ipsilaterální cochlely

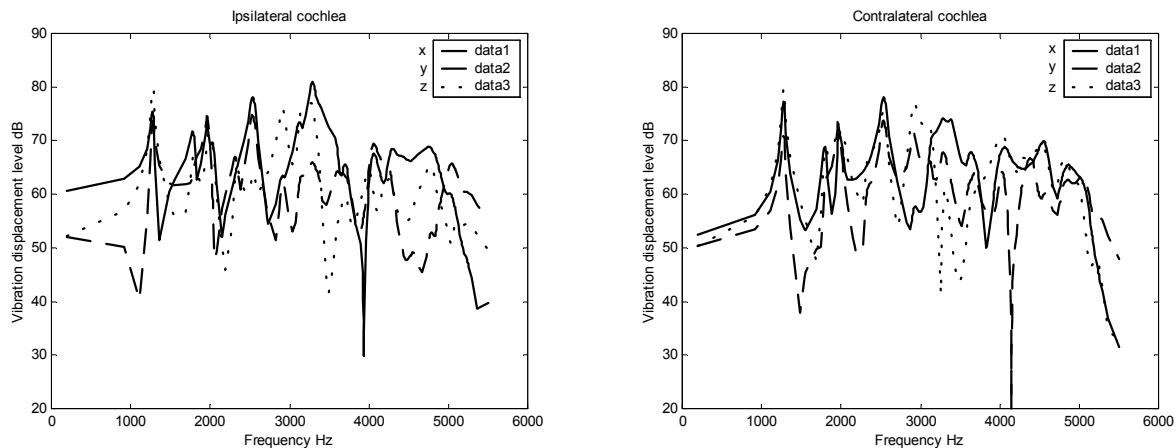
Porovnáním obr. 2 a obr. 3 je vidět, že mohutnost odezvy ve směru x nebo y závisí na koincidenci budící síly se směrem odezvy. Odezva ve směru y je kolmá na směr budící síly.

B. Rozdíl ve výchylkách v cochleách mezi definovanými pravoúhlými směry

Dále jsou porovnány rozdíly ve výchylkách v pravoúhlých směrech v závislosti na místě buzení. Výsledky jsou vyjádřeny v hladinách výchylek, re: $d_0 = 10^{-11}$ m. Budící síla opět působí ve směru osy x.



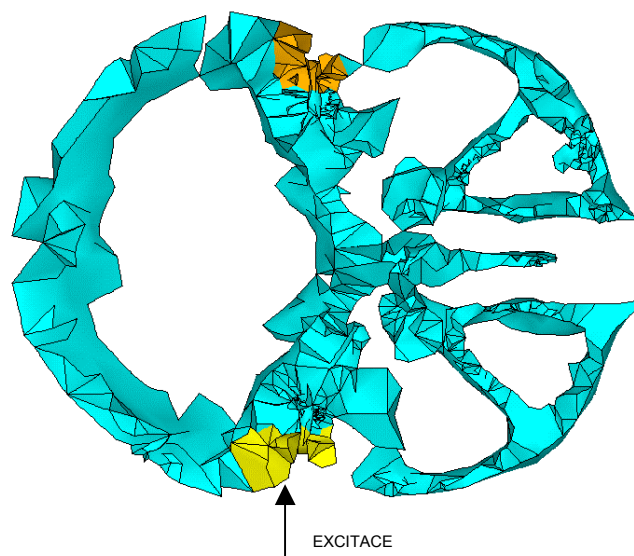
Obr. 4. Vypočítané hladiny výchylek v ipsilaterální a contralaterální cochleách v pravoúhlých směrech v důsledku buzení v poloze Pos.1 (BAHA)



Obr. 5. Vypočítané hladiny výchylek v ipsilaterální a contralaterální cochleách v pravoúhlých směrech v důsledku buzení v poloze Pos.2 (audio).

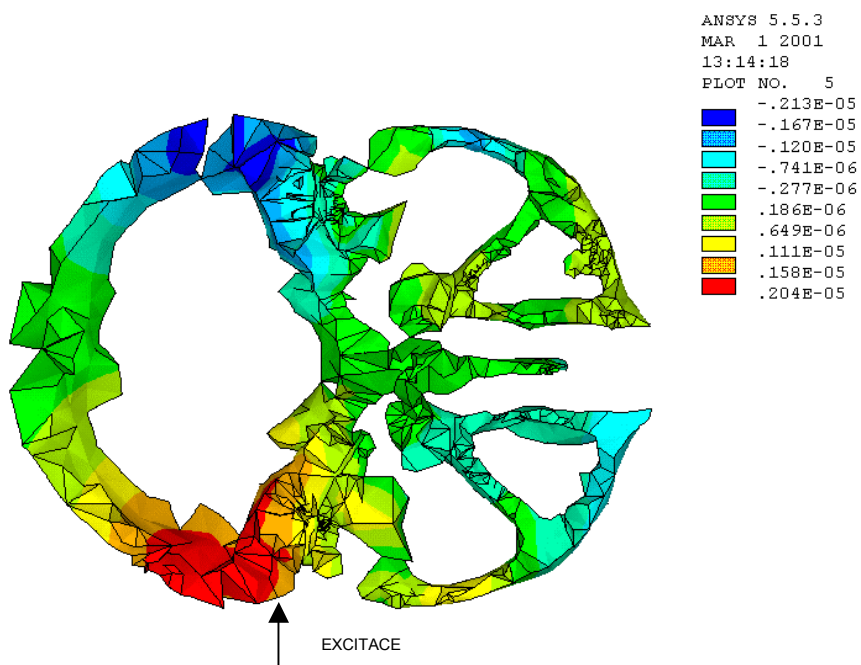
Z výsledků na obr. 4. a obr. 5. je zřejmé, že největší odezvy na ipsilaterální straně jsou ve směru koincidentním se směrem přiložené síly. Jsou to plné čáry data 1 na obou obrázcích. Týká se to odezvy v celém rozsahu sledovaných frekvencí s výjimkou první vlastní frekvence 1278 Hz. U contralaterální cochley tento jev jednoznačně neplatí. V oblasti vyšších frekvencí je hladina nižší než hladina ve směru svislém, tedy ve směru osy z. Jsou to tečkované čáry data 3 na obou obrázcích. Týká se to oblasti 3000 Hz – 5500 Hz.

C. Jaké je zeslabení mezi ipsilaterální a contralaterální cochleou



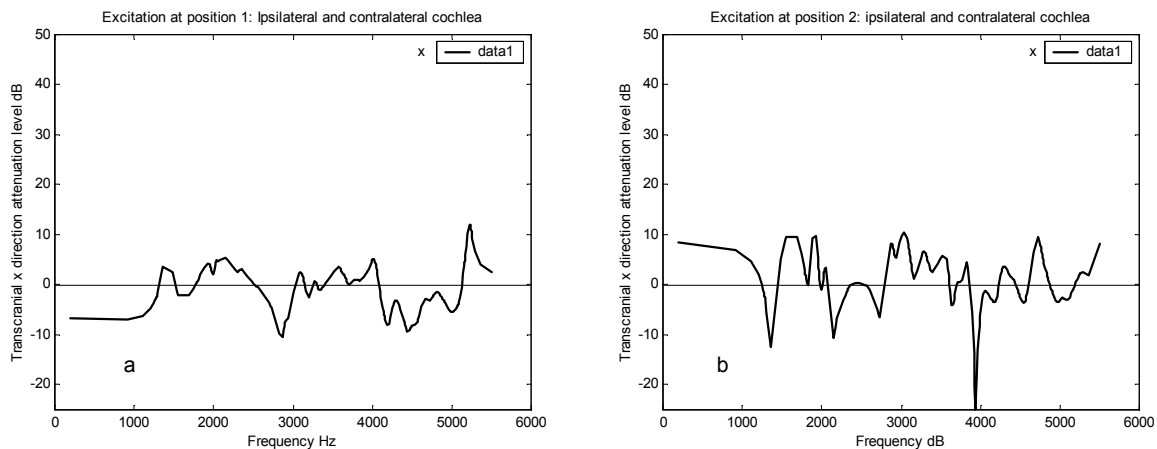
Obr. 6. Řez lebkou v místech ipsilaterální a contralaterální cochley s místy excitací

Na obr. 6. je řez lebkou v místech ušních otvorů a na obr.7 průběh výchylek ve směru excitace (osa x).

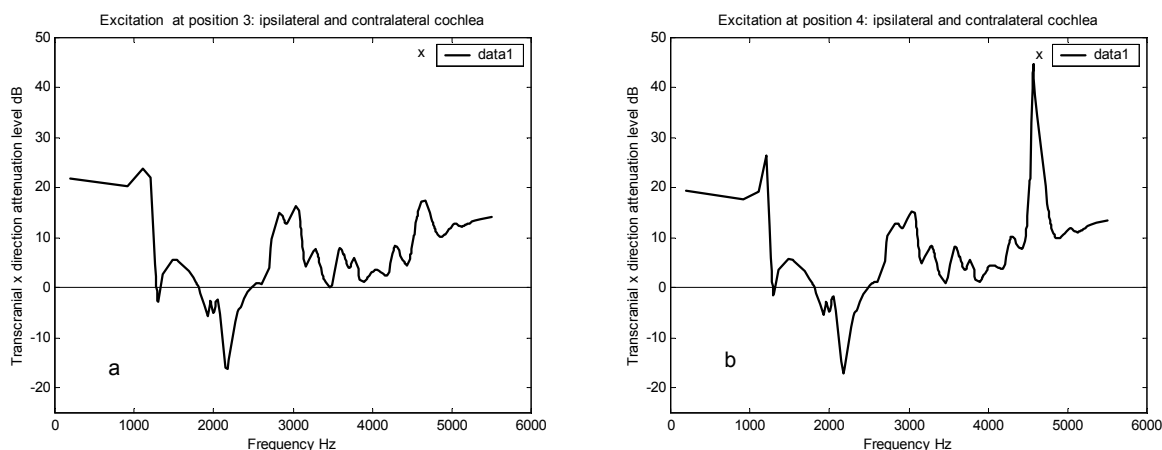


Obr. 7. Deformace řezu lebkou v místech ušních otvorů v okolí první vlastní frekvence a zeslabení odezev od ipsilaterální cochley ke contralaterální cochlee

Pokles hladin výchylek ve směru osy x, na contralaterální straně lebky v důsledku kostního vedení je zobrazen na následujících obrázcích.



Obr. 8. Pokles hladin výchylek na contralaterální straně, buzení v Pos.1, (BAHA), obr. a, buzení v Pos.2, (audio), obr.b

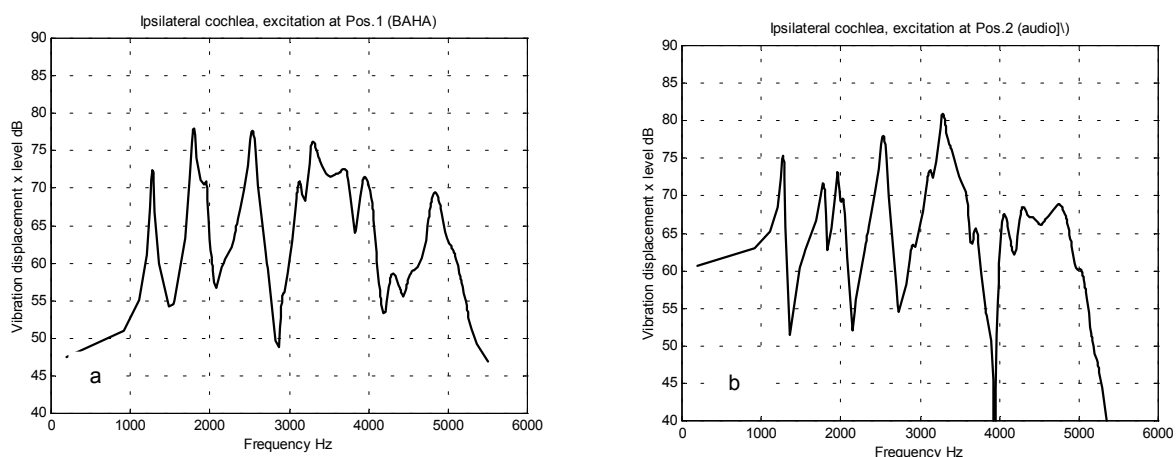


Obr. 9. Pokles hladin výchylek na contralaterální straně, buzení v Pos.3, obr. a, buzení v Pos.4, v blízkosti polokruhového kanálku obr.b

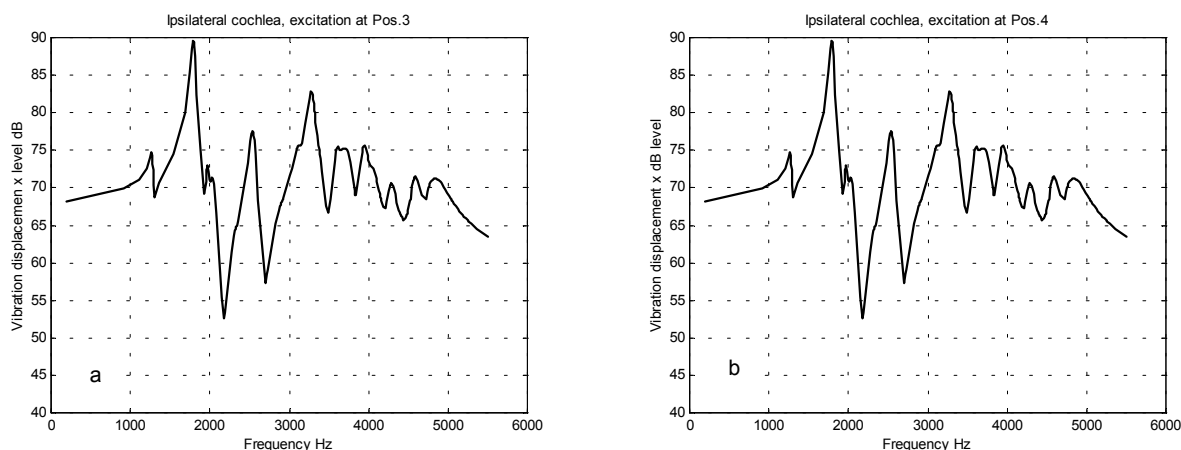
Pokles hladin ve výchylkách byl určen jako rozdíl hladin na ipsilaterální straně a contralaterální straně v místě cochley. Z obrázků je zřejmé, že největší pokles hladin nastane působí-li excitace v nejmenší možné blízkosti ipsilaterální cochley (Pos.4), viz obr. 9b v celém sledovaném frekvenčním rozsahu. Největší rozdíl činí až 45 dB. Je-li budič umístěn v místě kompenzačních pomůcek, tj. v místě Pos.1, viz obr. 8a, pohybuje se pokles hladin v pásmu do deseti dB. V okolí 2000-2500 jso výrazné antiresonance.

Vyšší odezvosvé hladiny se dosáhnou, když je budič umístěn co nejblíže ke cochlee. Výsledky těchto výpočtů jsou na následujících obrázcích. Lebka byla buzena v místech Pos.1- Pos.4 a byla

sledována odezva v ipsilaterální cochleě ve směru osy x, tedy ve směru buzení podle obr. 6. Výsledky jsou vyznačeny v hladinách vibrací výchylek.



Obr. 10. Hladiny vibrací ve směru působení síly v místě ipsilaterální cochley. Obr. a místo excitace Pos.1 (BAHA), Obr. b místo excitace Pos.2 (audio)



Obr. 11. Hladiny vibrací ve směru působení síly v místě ipsilaterální cochley. Obr.a místo excitace Pos.3 ,Obr.b místo excitace Pos.4.

Z obr.10 a obr.11 je zřejmé, umístí-li se budič blíže ke cochleě vzroste mohutnost vibrační odezvy. Porovnáme-li obr.10 a místo Pos.1 (BAHA) s místem Pos.3 blízko cochley vidíme, že hladina je v okolí druhé vlastní frekvence až 90 dB oproti 78 dB v místě Pos.1. Posunutí do bezprostřední blízkosti cochley z Pos.3 do Pos.4 je podle modelu bezvýznamné. Viz obr. 11a, obr.11 b. Dále lze říci, že s vyšší frekvencí narůstá významnost místa buzení blíže ke cochleě. V rozmezí 4000 Hz – 5500 Hz podle obr.10 a je odezva do 70 dB a v blízkosti cochley v rozmezí 70 – 75 dB. Nárůst je 5 dB.

3. ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že byl vytvořen velice podrobný výpočtový model, který umožní simulaci odezev prázdné lebky na všechny možné způsoby buzení včetně harmonické a přechodové analýzy (Přikryl a Krška 2000).

- Výsledky předložené harmonické analýzy se shodují s výsledky měření na prázdné suché lebce podle Stenfelt at al. 2000.
- Bylo ukázáno, že pro ipsilaterální stranu je maximální odezva koincidentní se směrem excitace.
- Na contralaterální straně u cochley nebyl nalezen takový dominantní směr v plném rozsahu zkoumaných frekvencí.
- Všeobecně vyšší odezvosvé hladiny bylo dosaženo když budič byl umístěn velmi blízko ke cochlee.
- Bylo nalezeno zeslabení odezev na cestě od buzení cochley na ipsilaterální straně ke cochlee na contralaterální straně. Zeslabení přenosu je tím větší, čím je budící místo blíže k buzení cochlee.
- Volné uložení lebky při analýze neprokázalo zjevné tendence pohybu lebky jako celku tak jak tomu je u přechodové analýzy (Přikryl a Kršek 2000).

REFERENCES

1. Přikryl K., Kršek P.: Dynamická analýza výpočtového modelu lidské lebky, Proc. INTERACTION AND FEEDBACKS'2000, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, November 28-29, 2000, pp.211-218
2. Přikryl K., Malenovský E.: Modální analýza lidské lebky jako nezbytný předpoklad pro zkoumání šíření se vlnění kostním vedením, Proc. INTERACTION AND FEEDBACKS'1998, Institute of Thermomechanics AS CR, Prague, November 24-25, 1998, pp.93-98
3. Stenfelt S., Håkansson B.: Vibration characteristics of bone conducted sound in vitro, J. Acoust. Soc. Am.107 (1), January 2000, pp.422-431
4. Tjellström A., Håkansson B.: The bone-anchored hearing aid. Design principles, indications, and long-term clinical results, Otolaryngologic Clinics of Nort America 28, 53-72.

Acknowledgement: This work has been supported by scientific and research schemes of the VUT Brno CEZ J22/98:262100001 and by the project of GA ČR No. 106/98/K019.