

**MODELING OF THE INFLUENCE OF MIDDLE EAR PROSTHESIS  
ON HEARING****K. Pellant<sup>1</sup>, D. Dušek<sup>2</sup>, J. Mejzlík<sup>3</sup>**

**Summary:** *The analysis of the mechanics of the normal middle ear and of the middle ear with ossicular prosthesis is performed. The creation of the finite element model of the middle ear is described. The model of the normal ear includes tympanic membrane, ossicle chain and joint to oval window. The model of prosthesis simulates T-like type of the commercial product. The response of the stapes footplate on pressure excitations of tympanic membrane for different manners of prosthesis joints i.e. the rigid joint, the onesided knucklejoint and the bilateral knucklejoint were evaluated.*

**1. Úvod**

Dnešní úroveň výpočetní techniky a programového vybavení umožňuje s dostatečnou přesností analyzovat a početně simulovat přenos zvuku ze zevního prostředí až do místa smyslového vnímání zvuku tj. cochley a to jak tzv. vzdušným vedením (přes zevní zvukovod, bubínek a středoušní kůstky) tak i kostním vedením (kostěnými strukturami lebky). Matematické modelování je přitom svým způsobem nezastupitelné, protože umožňuje objektivním způsobem odhadnout výsledky chirurgických zákroků v oblasti zevního a středního ucha včetně implementace umělých náhrad středoušních kůstek resp. bubínku.

Z hlediska frekvenčních vlastností mechanické soustavy závislosti percepce zvuku jsou jedním ze základních faktorů mechanické vibrace bazilární membrány. Při studiu jejích excitací jsou sledovány dvě hlavní cesty vedení mechanické energie- vzdušné vedení (zvukové signály přicházejí přes dutinu zevního zvukovodu a vyvolávají excitace v cochley pohybem třmínku v oválném okénku) a kostní vedení (akustické vlny šířící se vzduchem excitují kmity struktury lidské lebky a tím i stěny cochley). Vzdušné vedení je přitom realizováno v důsledku dvou mechanismů a to jednak vibracemi bubínku a připojeného

---

<sup>1</sup> Doc. RNDr Karel Pellant, CSc , ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno,  
e-mail: [pellant@umtn.fme.vutbr.cz](mailto:pellant@umtn.fme.vutbr.cz), tel.:+420 5 4114 2856

<sup>2</sup> Ing. Daniel Dušek, ÚMTMB FSI VUT Brno, Technická 2, 616 69 Brno,  
e-mail: [dusekdaniel@centrum.cz](mailto:dusekdaniel@centrum.cz), tel.:+420 5 4114 2804

<sup>3</sup>MUDr. Jan Mejzlík, PhD., ORL oddělení Pardubice, Nemocnice Pardubice, Kyjevská 44,  
532 03 Pardubice, e-mail:[mejzlik@nem.pce.cz](mailto:mejzlik@nem.pce.cz), tel. +420 5 466 011 111

řetězce středoušních kůstek (osikulární vazba) a jednak stimulací oválného a okrouhlého okénka tlakovou vlnou prošlou zevním zvukovodem, bubínkem a středoušní dutinou (akustická vazba). Akustická vazba je zpravidla zanedbatelná z hlediska percepce zvuku ve zdravém uchu, v případě některých onemocnění ucha resp. při perforaci bubínku však může hrát významnou roli. Např. v případě přerušení spoje mezi kovádkou a třmínkem je pozorovaný rozdíl mezi očekávanou a zjištěnou hodnotou kostního a vzdušného slyšení objasňován právě vlivem akustické vazby.

Tato práce se zabývá použitím osikulárních protéz na vzdušné vedení s tím, že je uvažována jen strukturální vazba mezi bubínkem a patou třmínku tj. není uvažován vliv interakcí s akustickým subsystémem středoušní dutiny. Cílem práce je posouzení změn v přenosu signálů mezi bubínkem a patou třmínku z hlediska vlivu:

- 1) Vyztužení bubínku a zvýšení jeho hmotnostního zatížení při implementaci středoušní protézy
- 2) Počtu stupňů volnosti aplikované protézy tj. z hlediska efektu při použití kloubních spojení na koncích protézy
- 3) Rozdílu setrvačných silových účinků normálního osikulárního řetězce zdravého ucha a setrvačných silových účinků kovové protézy

Jako veličina charakterizující přenos zvuku do oblasti vnitřního ucha byla přitom sledována odezva rychlosti výchylek kmitů podstavy třmínku na harmonické buzení bubínku vnějším tlakem.

## 2. Model struktur středního ucha

Vytvoření konečnoprvkových modelů jednotlivých částí ucha, simulujících po mechanické stránce s dostatečnou přesností ucho reálné, je jednou z nejobtížnějších částí matematického modelování přenosu zvuku. Vzhledem k tomu, že pro měření CT je bubínek a středoušní kůstky pod rozlišovací schopností, model bubínku, středoušních kůstek a jejich uchycení k oválnému okénku a ke středoušní dutině ligamenty a svalovými úpony byl vytvořen na základě fotografií a známých fyzikálně-mechanických charakteristik (Hüttenbrink 1997).

Z hlediska percepce zvuku je bubínek jedna z nejdůležitějších částí ucha umožňující transformaci elastické energie tlakových vln na pohyby řetězce středoušních kůstek a následně na mechanické kmity bazilární membrány. Jeho tuhost a tvar značně ovlivňují přenosovou charakteristiku ucha jako mechanické soustavy. Tloušťka bubínku je (0,1-0,2) mm. Materiál je ortotropní s materiálovými charakteristikami blízkými měkké pryži. Bubínek se skládá ze dvou částí, tužší je pars tensa a měkkí pars flaccida. Z hlediska tvaru bubínek byl modelován jako struktura, která má v klidovém stavu nálevkovitý tvar, u ligamentů nebylo uvažováno statické předpětí.

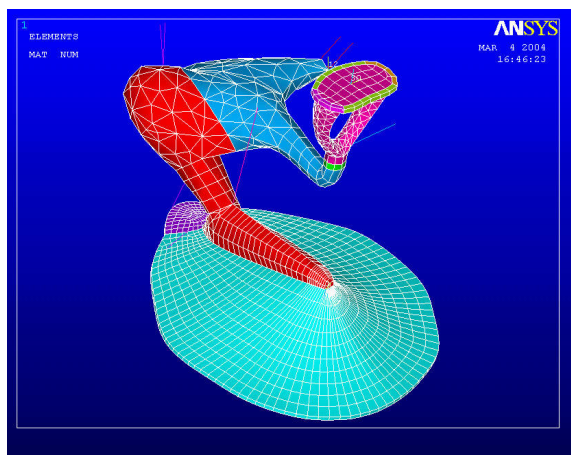
Řetězec středoušních kůstek zahrnuje tři kůstky. První středoušní kůstka je kladívko (malleus) se skládá ze tří částí – rukojeť která je přirostlá k bubínku pokračuje krčkem a přechází do hlavičky. Hlavička je spojena tuhým, nepravidelně sedlovitým kloubem s kovádkou. Přibližná hmotnost kladívka je 25 mg. Kovádka (incus) svým tvarem připomíná třenový zub se dvěma značně divergujícími kořeny. Na přední straně má sedlovitou styčnou plošku kloubu, kterým je spojena s kladívkem. Dozadu se plynule zužuje ve výběžek crus breve. Crus breve probíhá horizontálně středoušní dutinou. Druhý tenký výběžek, crus longum, míří téměř rovnoběžně s rukojetí kladívka a nepatrně vpřed. Na konci se ohýbá mediálně a je spojen jemným kloubem se třmínkem. Právě dysfunkce tohoto kloubního spojení bývá častým případem přerušení osikulární vazby mezi bubínkem a

třmínkem. Přibližná hmotnost kovadlinky je 25 mg. Třmínek (stapes) má tvar jezdeckého třmenu a jeho hlavička je spojena s kovadlinkou. Od hlavičky vybíhají dvě krátká, horizontálně položená raménka. Obě raménka končí na tenké ploténce ledvinovitého tvaru (patě třmínku). Pata třmínku zapadá do oválného okénka (fenestra vestibuli), které je vstupem do vnitřního ucha. Přibližná hmotnost třmínku je 7-10 mg. Přibližná velikost oválného okénka je  $3.2 \text{ mm}^2$ . Kladívko s kovadlinkou bylo spojeno tuhým, sedlovým kloubem. Spojení kovadlinky s třmínkem bylo realizováno strukturálními elementy s malou tuhostí. Uchycení středoušních kůstek ke středoušní dutině bylo realizováno pomocí prvků LINK8, testovací výpočty ukázaly že jejich vliv na přenosové vlastnosti systému ústek není významný (při odstranění změny v rychlostech třmínku byly do 5%). Pata třmínku byla obklopena tenkou membránou vytvořenou po jejím obvodě a uchycena ke kosti cochley v místě oválného okénka. Protéza byla modelována jako kovová tyč o průměru  $d=0,2\text{mm}$  s tenkou kruhovou podložkou (průměr  $D=2,6\text{mm}$ , tloušťka  $t=0,1\text{mm}$ ) uchycenou pevně k bubínku. Vytvořený model bubínku, středoušních kůstek a protézy je na obr. 1 a obr. 2.

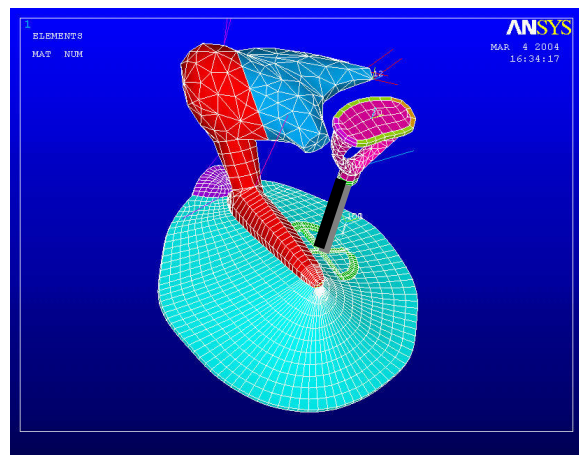
Vliv implementace kovové protézy na přenos vibrací bubínku do oválného okénka byl sledován při přerušeném mechanickém kontaktu mezi kovadlinkou a třmínkem (část kovadlinky byla odstraněna). Protéza byla modelována ve tvaru přímé kovové tyče spojující bubínek a hlavičku třmínku, hmotnostní charakteristika tyče odpovídala komerčně vyráběnému přípravku ([Heinz Kurz GmbH](#), Medizintechnik in Dußlingen, BRD). Přitom byly uvažovány tři varianty počtu stupňů volnosti  $n$  protézy: 1) Varianta **A**- na konci tyče byl ve spoji s hlavičkou třmínku umístěn kloub ( $n_A=3^0\text{V}$ )

2) Varianta **B**- oba konce spojeny pevně s bubínkem resp.s hlavičkou třmínku ( $n_B=0^0\text{V}$ , tento případ odpovídá současně vyráběné protéze)

3) Varianta **C**- na obou koncích tyče byly klouby ( $n_C=6^0\text{V}$ ).



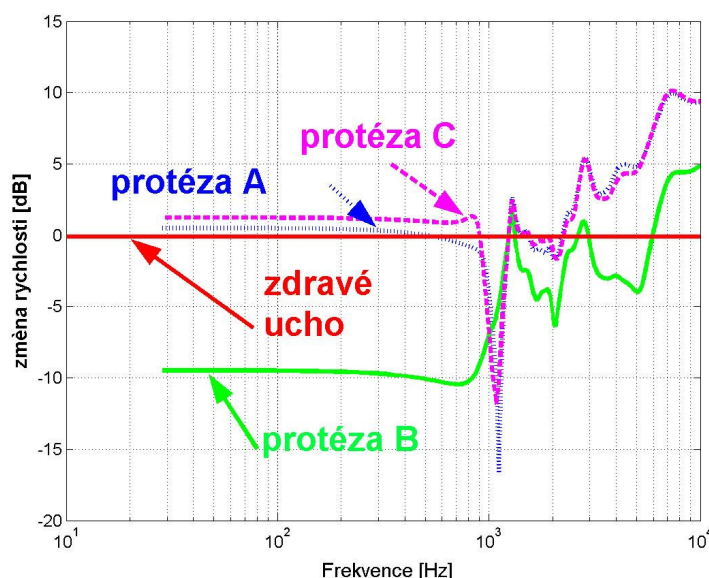
Obr. 1 Model bubínku a spojeného řetězce středoušních kůstek



Obr.2 Model bubínku s protézou a přerušeným řetězcem středoušních kůstek

### 3. Výsledky harmonické analýzy

Na uvedené modely byla pomocí systému Ansys aplikována harmonická analýza pro frekvence buzení v pásmu od 250Hz do 10kHz. Buzení bylo zadáváno prostřednictvím okrajové podmínky pro akustický tlak na ploše bubínku, amplituda tlaku byla  $A_p = 1\text{Pa}$ . Pro toto buzení byly pak vyhodnocována závislost rychlosti pohybu paty těmínku na frekvenci (obr. 3). Z tohoto obrázku je zřejmé, že při aplikaci osikulárních protéz by mohlo být dosahováno hodnot přenosu zvuku blízkým k hodnotám normálního zdravého ucha.



Obr. 3 Relativní změna rychlosti pohybu paty těmínku pro jednotlivé modely středoušní protézy

### 4. Závěr

Harmonická analýza provedená na konečnoprvkových modelech simulujících implantace středoušní protézy ukázala na oprávněnost tohoto zákroku používané v současné chirurgii. Zároveň je ukázáno, že zvýšení pohyblivosti použité protézy by mohlo vést k výraznému zlepšení přenosu vibrací bubínku do vnitřního ucha a to zejména pro frekvence nižší než 1kHz.

### 5. Poděkování

Práce vznikla za podpory výzkumného záměru Ministerstva školství a tělovýchovy CEZ: MSM 262100001 „Výpočtové a fyzikální modelování problémů inženýrské termofluidní mechaniky, mechaniky těles a fázových přeměn“.

### 6. Literatura

Hüttenbrink K. B.: Finite element modeling of the Human Eardrum and application. Proceedings of the International Workshop on Middle EarMechanics in Research and Otosurgery. Uni Media GmbH, Verlag für universelle Medienproductionen. Leipzig und Dresden 1997