

MODELLING OF THE HUMAN INNER EAR

P. Janovský*, V. Mišun*

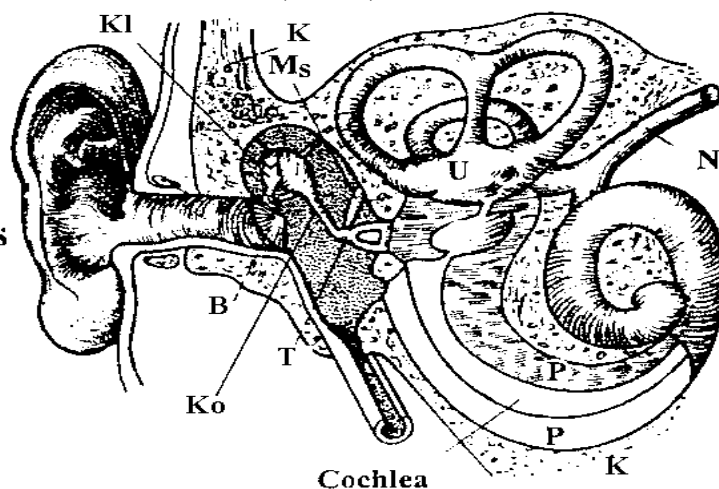
Summary: *The basic element of the frequency analysis of the human hearing system is the cochlea. This article presents finite-element models of the cochlea function with parameters, which are to provide for its functionality. These models were based on the G. von Békésy theory of running acoustic waves along the basilar membrane inside the cochlea.*

1. Úvod

Lidské ucho (obr. 1.) se skládá ze tří částí – z vnějšího, středního a vnitřního ucha. Zvuk ve formě vibrací vstupuje z vnějšího ucha do středního ucha a dále je přenášen přes tři kůstky (kladívko, kovadlinka, třmínek) do kapaliny vnitřního ucha. Základem vnitřního ucha je hadovitý útvar známý jako cochlea (obr. 2.). Je rozdělena do dvou komor: Scala vestibuli a scala tympani. Tyto dvě komory jsou vyplněny kapalinou – perilymfou. Hlavní částí cochley je tzv. basilární membrána.

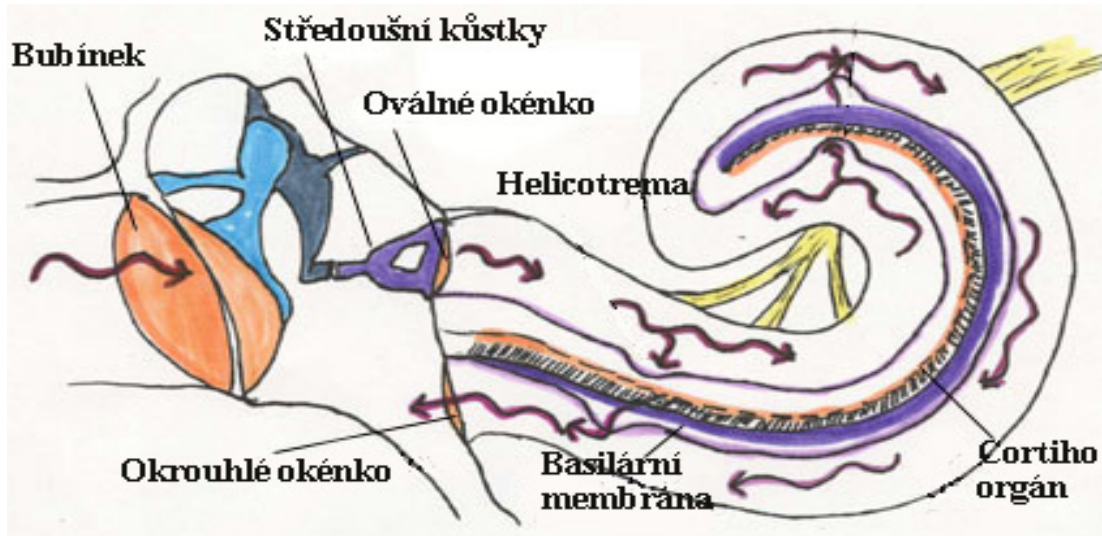
Zvukové vlny vstupují do perilymfy přes vibrace oválného okénka. Vzniká běžící rovinná akustická vlna, která vybudí určité tvary kmitu basilární membrány. Poloha maximální výchylky membrány závisí na frekvenci zvuku. Basilární membrána musí proto mít speciální spektrální a modální vlastnosti. Každý vlastní tvar kmitu membrány má pouze jedno místo maximální výchylky pro příslušnou vlastní frekvenci (obr. 3.).

B - bubínek
K - kost
Kl - kladívko
Ko - kovadlinka
Ms - m. stapedius
N - nerv
P - perilymfa
T - třmínek
U - utriculus

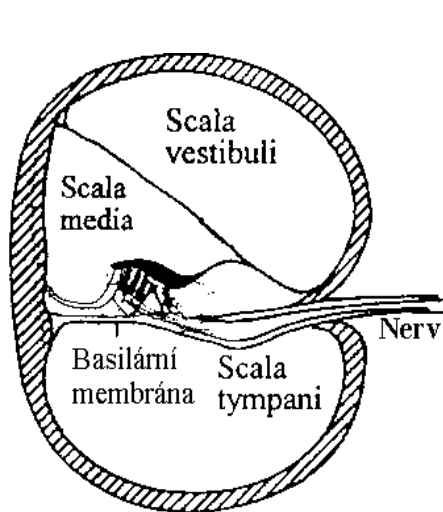


Obrázek 1. Lidské ucho

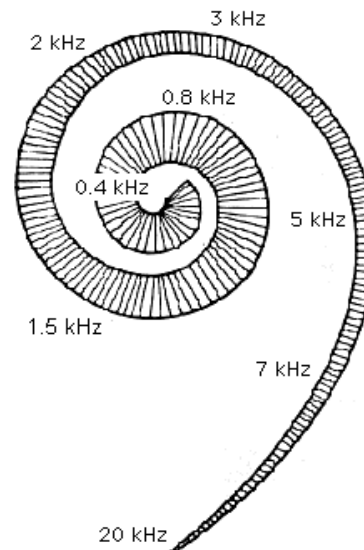
* Ing. Petr Janovský, Doc. Ing. Vojtěch Mišun, Csc.: Ústav mechaniky těles, VUT FSI Brno; Technická 2, 616 69 Brno; e-mail: peta_janovsky@email.cz, misun@umtn.fme.vutbr.cz



Obrázek 2. Vnitřní ucho



Obrázek 3. Řez cochleou

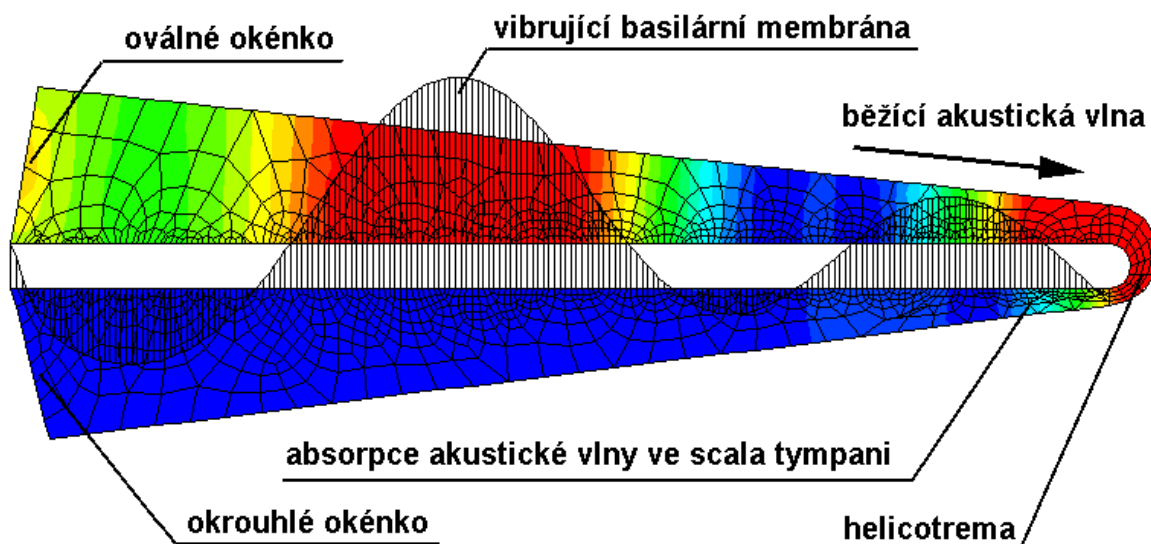
Obrázek 4. Basilární membrána.
Místa maximálních výchylek
v závislosti na frekvenci zvuku

Cochlea může tedy být takto chápána jako hydromechanický frekvenční analyzátor, umístěný ve vnitřním uchu. Jeho hlavním úkolem je provádět spektrální dekompozici akustického signálu v reálném čase.

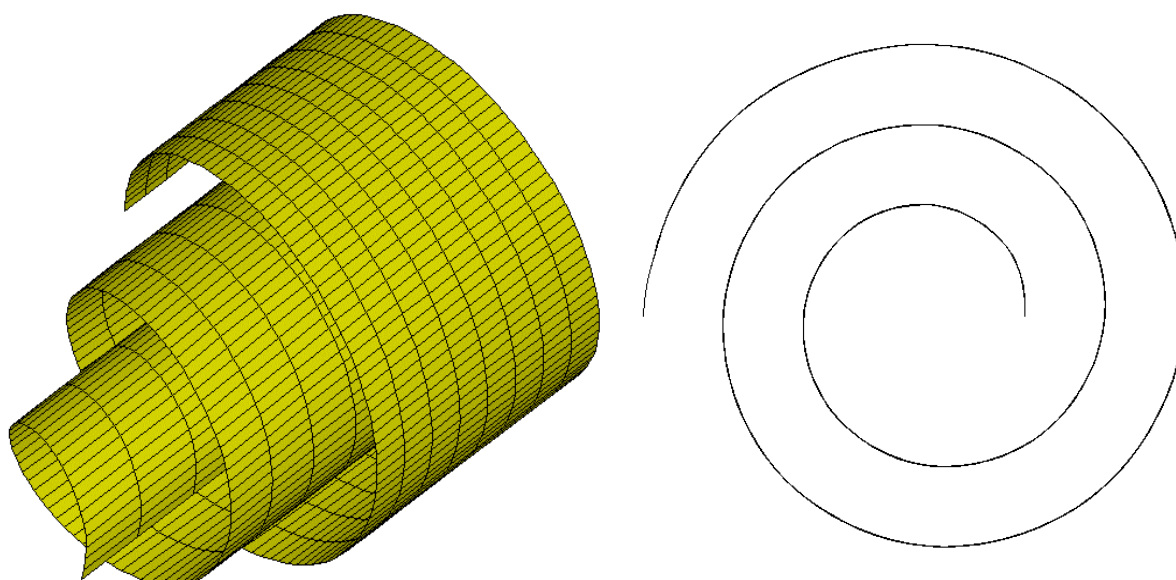
2. Konečnoprvkové modely cochley a basilární membrány

Konečnoprvkové modely cochley byly vytvořeny na základě její výše popsané funkce. Bylo použito programů ANSYS a SYSNOISE. Aby bylo dosaženo specifických spektrálních vlastností membrány, musí tato mít přesně definované geometrické a materiálové charakteristiky, které se mění po její délce. Se zřetelem na komplikovaný prostorový tvar cochley byly její vlastnosti zkoumány nejdříve na rovinném modelu (obr. 5.).

Oba dva subsystémy, tj. komory cochlely naplněné perilymfou (fluid) a basilární membrána (structure) byly modelovány pomocí metody konečných prvků a byla mezi nimi definována interakce. Pro analýzu funkce cochlely můžeme prezentovat dva modely. Prvním je rovinný model celé cochlely včetně basilární membrány (obr. 5.), dalším je prostorový model samotné basilární membrány (obr. 6.). Tento model je zatočen do dvou a půl závitu, stejně jako skutečná cochlea.



Obrázek 5. Rovinný model cochlely



Obrázek 6. Prostorový model basilární membrány.
Vlevo 3D pohled, vpravo pohled z boku

3. Spektrální a modální vlastnosti modelu basilární membrány

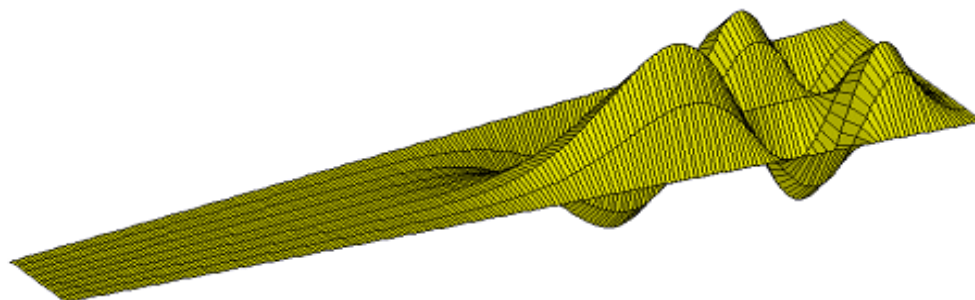
Vlastní frekvence modelu membrány (nový zatočený model) jsou uvedeny v tabulce 1. Existují dva druhy tvarů kmitu modelu – symetrické a nesymetrické. Symetrické tvary kmitu jsou souměrné podle podélné osy membrány a jsou jediným typem kmitů, který může být vybuděn běžící akustickou vlnou v cochleě. Nesymetrické tvary kmitu se mohou vybudit jen při nějakém patologickém defektu vnitřního ucha.

Ploché model membrány, který byl vytvořen dříve, měl mnoho nesymetrických tvarů kmitu (obr. 7.). Naproti tomu nový model (obr. 6.), zatočený do dvou a půl závitů, má tyto nežádoucí nesymetrické tvary kmitu až při velmi vysokých frekvencích (okolo 12000 Hz). Některé tvary kmitu nového modelu membrány jsou zobrazeny na obr. 8. - 10.

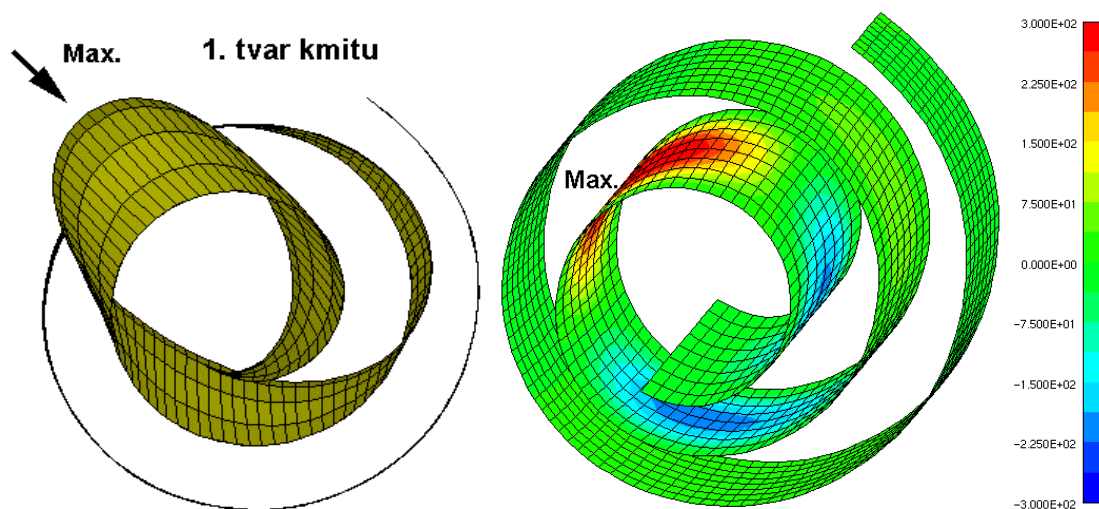
Tabulka 1. Vlastní frekvence prostorového modelu basilární membrány

i	1-s	2-s	3-s	4-s	5-s	6-s	7-s	8-s	9-s	10-s
f_{oi} [Hz]	1224	2285	3305	4328	5398	6438	7485	8512	9556	10594
i	11-s	12-ns	13-ns	14-s	15-ns	16-s	17-s	18-ns	19-ns	20-s
f_{oi} [Hz]	11623	11945	12247	12665	12953	13688	14745	15220	15527	15812

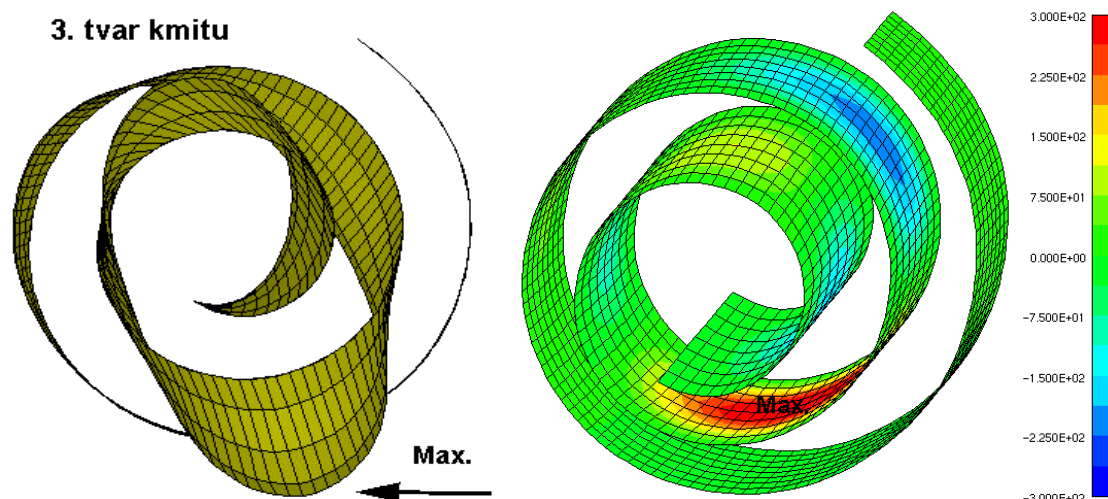
Tvar kmitu: s – symetrický, ns – nesymetrický



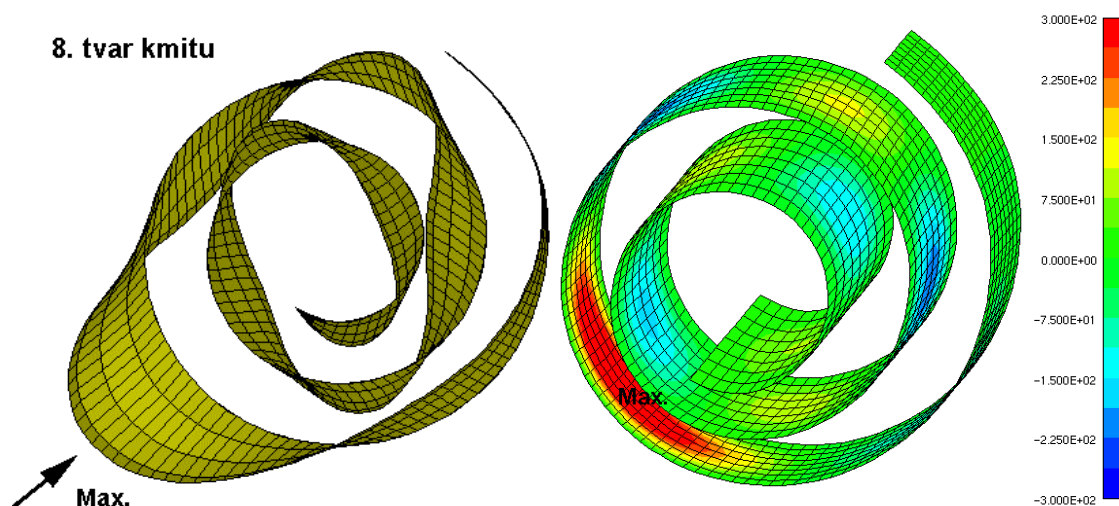
Obrázek 7. Původní ploché model basilární membrány, 13. (nesymetrický) tvar kmitu



Obrázek 8. 1. tvar kmitu modelu membrány. Vlevo pohled z boku, vpravo 3D pohled



Obrázek 9. 3. tvar kmitu modelu membrány. Vlevo pohled z boku, vpravo 3D pohled

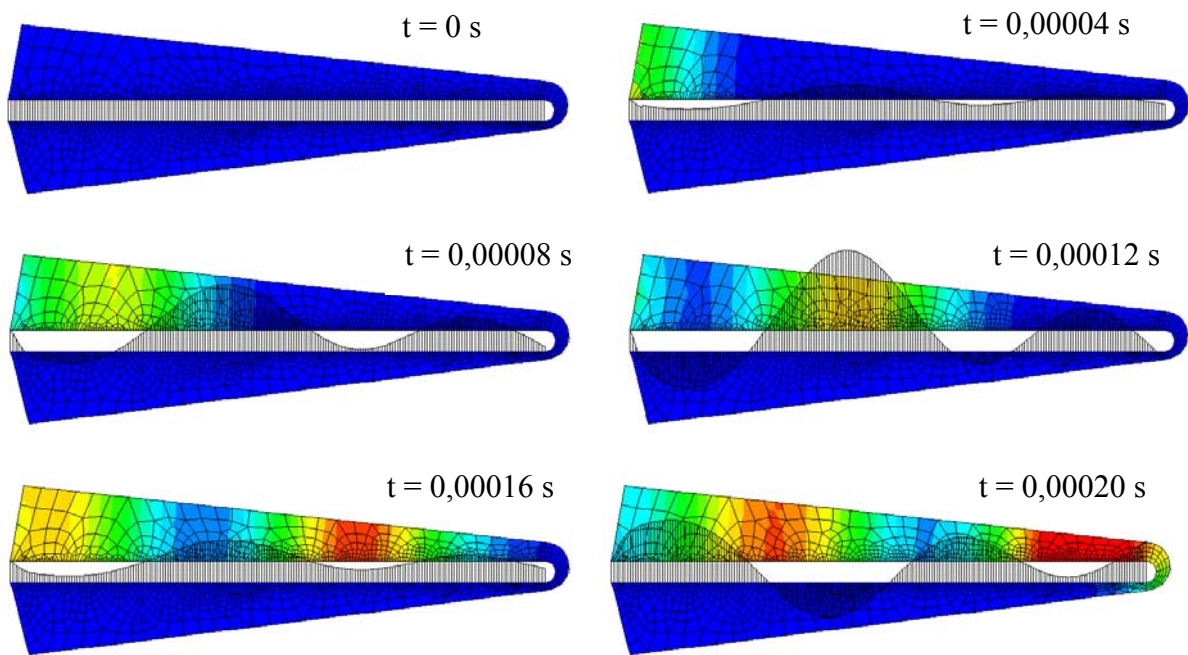


Obrázek 10. 8. tvar kmitu modelu membrány. Vlevo pohled z boku, vpravo 3D pohled

Tvary kmitu jsou na těchto obrázcích zobrazeny pro názornost s přehnaně velkou amplitudou, jaká ve skutečnosti nemůže nikdy nastat. Je však jasně vidět, že pro každý tvar kmitu existuje pouze jedno místo s maximální amplitudou vibrací (na obr. označeno max.). Zvuková vlna o určité frekvenci pak tedy způsobí kmitání membrány na tomto přesně definovaném místě.

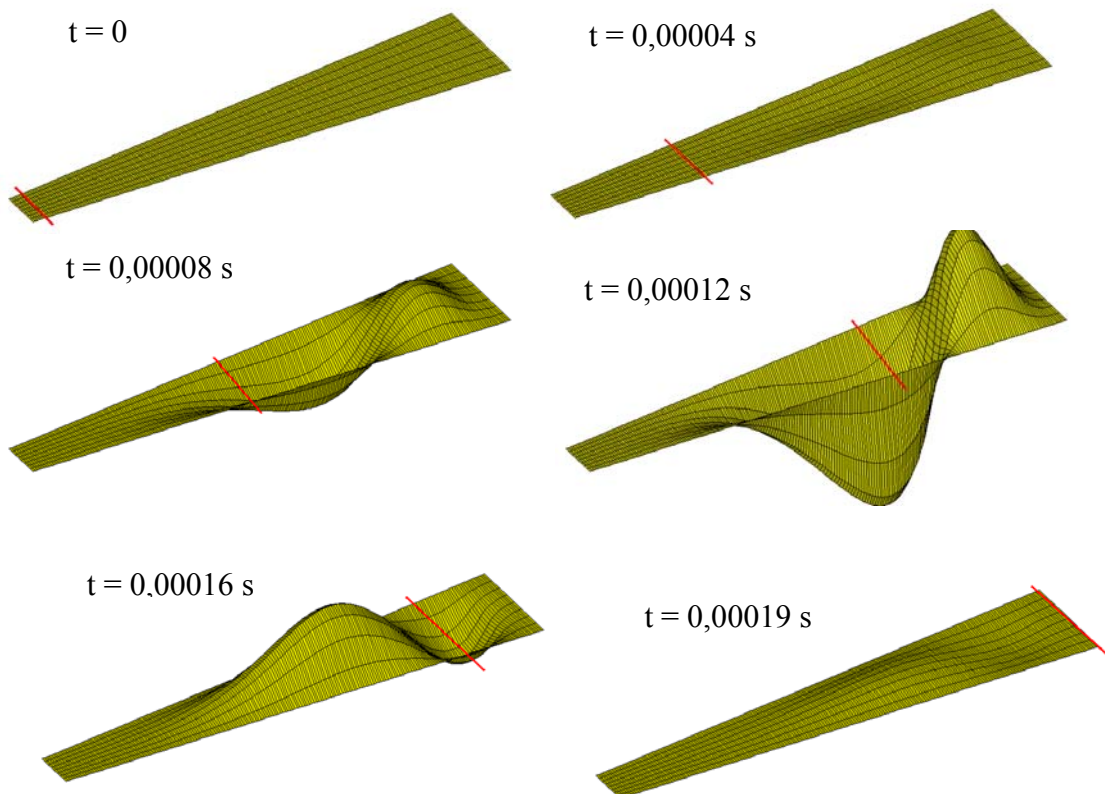
4. Běžící akustická vlna v cochleě

Plošný model cochleý může být s výhodou použit pro modelování běžící vlny v cochleě – zvuk, který přes středoušní kůstky rozkmitá oválné okénko cochleý způsobí běžící vlnu v perilymfě. Tato vlna pak při svém běhu postupně vybuzuje příslušný tvar kmitu basilární membrány. Tento děj je znázorněn na obr. 11.



Obrázek 11. Běžící akustická vlna – plošný model cochley

Běžící akustickou vlnu můžeme také modelovat na plochém modelu basilární membrány (obr. 12.). V budoucnu by mělo být možné zobrazit běžící vlnu i na zatočeném modelu.



Obrázek 12. Běžící akustická vlna – plochý model membrány

5. Závěr

Byly vytvořeny dva konečnoprvkové modely vnitřního ucha – plošný model cochley a prostorový model basilární membrány. U prostorového modelu byly prezentovány dvě varianty - starší s plochou membránou a novější se zatočenou membránou. Na těchto modelech lze simulovat běžící akustickou vlnu v perilymfě, tvary kmitu basilární membrány a vybuzení určitých tvarů kmitu membrány běžící vlnou. V budoucnu by tato práce měla směřovat k vytvoření prostorového modelu celé cochley.

6. Poděkování

Článek vznikl za podpory grantového projektu GA ČR č. 106/98/K019 a vědecko-výzkumného projektu č. J22/98:262100001.

7. Literatura

Von Békésy, G. (1960): Experiments in hearing, New York

Seikel, J. A. & spol. (2000): Anatomy and Physiology for Speech and Hearing, San Diego

Janovský, P., Mišun, V. (2002): Some cochlea defects and their influence on the hearing system, *Biological Effects Of EMFs*, pp. 495-503, Rhodos

Janovský, P., Mišun, V. (2002): Modelování lidského sluchu. *Aplikovaná mechanika*, pp. 177-182, Ostrava

Janovský, P., Mišun, V. (2002): Modelování některých vad vnitřního ucha. *Inženýrská mechanika 2002*, pp. 105-106, Svatka

Janovský, P., Mišun, V. (2002) Modelování postupně běžící akustické vlny ve vnitřním uchu člověka. *Výpočtová mechanika 2002*, Nečtiny