

Dorota MARSZALIK, Międzywydziałowa Szkoła Inżynierii Biomedycznej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Marek IWANIEC, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

KINEMATYKA SŁYSZENIA – UCHO ŚRODKOWE

Streszczenie. Artykuł ten jest poświęcony analizie kinematycznej błony bębenkowej oraz mechanizmu kosteczek słuchowych, który jest odpowiedzialny za przenoszenie drgań z ucha zewnętrznego do ucha wewnętrznego. Błone bębenkową przedstawiono jako układ ciągły, a do analizy jej drgań wykorzystano metodę elementów skończonych. Układ kosteczek słuchowych przedstawiono jako dyskretny model trójczłonowego mechanizmu płaskiego. Wyznaczono prędkości oraz przyspieszenia istotnych punktów mechanizmu. Zbadano wpływ długości kosteczek słuchowych na działanie mechanizmu.

1. WSTĘP

Percepcja dźwięku jest skomplikowanym procesem, którego kolejne etapy zachodzą w różnych częściach narządu słuchu. Pochodzące z otoczenia fale akustyczne są wychwytywane przez ucho zewnętrzne, a następnie przy użyciu umieszczonego w uchu środkowym mechanizmu kosteczek słuchowych oraz wypełnionego płynem ucha wewnętrznego zamieniane na wędrujące, za pośrednictwem neuronów, do mózgu impulsy elektryczne. Mechanizm kosteczek słuchowych stanowi przekładnię mechaniczną zamieniającą drgania powietrza na ruch cieczy wypełniającej ucho środkowe.

Do opisu zjawisk zachodzących w narządzie słuchu tworzy się jego modele. Ucho środkowe jest często przedstawiane jako model wykonany metodą elementów skończonych (MES). W artykule tym opisano model hybrydowy ucha środkowego. Błona bębenkowa została przedstawiona jako model ciągły wykonany metodą elementów skończonych, natomiast układ kosteczek słuchowych jako dyskretny model trójczłonowego mechanizmu płaskiego. Przeprowadzono analizę kinematyczną mechanizmu oraz zbadano, jak jego parametry geometryczne wpływają na przenoszenie drgań przez ucho środkowe.

2. BUDOWA I DZIAŁANIE NARZĄDU SŁUCHU

Narząd słuchu składa się z ucha zewnętrznego, środkowego oraz wewnętrznego. Częściami ucha zewnętrznego są małżowina uszna oraz przewód słuchowy. Zadaniem małżowiny jest odbieranie fal akustycznych z otoczenia i kierowanie ich do przewodu słuchowego, który jest zakończony błonką. Błona bębenkowa jest cienką przegrodą oddzielającą ucho zewnętrzne od ucha środkowego. Ma kształt nieregularnej elipsy, której grubość zwiększa się ku obwodowi [1 – 2].

Znajdujące się w przewodzie słuchowym powietrze przewodzi fale akustyczne, które pobudzają do drgań błonę bębenkową, a ta dzięki połączeniu z rękojeścią młoteczka wprawia w ruch układ złożony trzech, znajdujących się w jamie bębenkowej, kosteczek słuchowych: młoteczka, kowadełka oraz strzemiączka. Drgania błony bębenkowej są w ten sposób zamieniane na drgania podstawy strzemiączka, które powodują ruch przychłonki wypełniającej przedsionek. Ruch ten sprawia, że zostają pobudzone, znajdujące się w uchu wewnętrznym, komórki zmysłowe włoskowate. Dalej następuje zamiana sygnału na sygnał elektryczny, który za pośrednictwem neuronów jest przekazywany do mózgu [3]

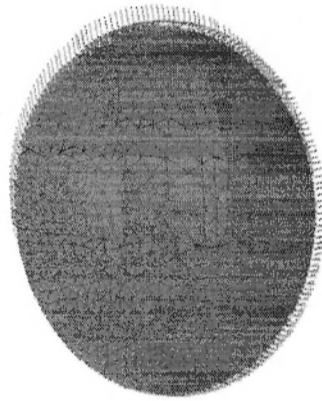
3. MODEL BŁONY BĘBENOWEJ

Błona bębenkowa najczęściej jest przedstawiana jako stożek [4 – 6]. W artykule tym opisano model błony przedstawionej jako wycinek sfery ograniczony okręgiem o średnicy 10 mm (średnica błony [1]). Jej obszar podzielono na połączoną z młoteczkiem część wiotką oraz część napiętą. Grubości, gęstości oraz moduły Younga tych obszarów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry modelu błony bębenkowej [4, 5, 7]

Parametry	Część napięta błony	Część wiotka błony
Grubość [mm]	0,15	0,09
Gęstość [kg/m ³]	$1,2 \times 10^3$	$1,2 \times 10^3$
Moduł Younga [N/m ²]	$2,0 \times 10^7$	$1,0 \times 10^7$

Model błony bębenkowej przedstawiono na rysunku 1. Część wiotką zaznaczono kolorem czerwonym, natomiast część napiętą kolorem granatowym.



Rys. 1. Model MES błony bębenkowej

Błona bębenkowa jest połączona z młoteczkiem, a więc masa układ kosteczek słuchowych wpływa na jej drgania. W modelu masę tę uwzględniono jako masę zredukowaną obliczoną ze wzoru 1.

(1)

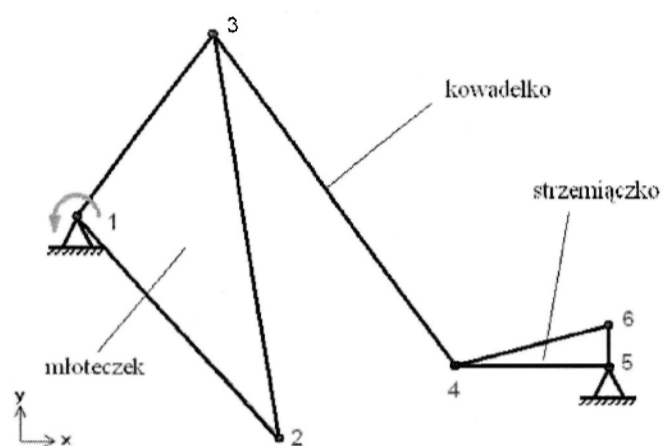
Gdzie:

m_z, v_z – masa zredukowana oraz prędkość punktu, w którym przyłożono masę zredukowaną,
 m_1, m_2, m_3 – masy młoteczka, kowadełka i strzemiączka,
 v_1, v_2, v_3 – prędkości liniowe punktów będących środkami mas młoteczka, kowadełka i strzemiączka.

Wyznaczono pierwsze 40 postaci drgań dla modelu uwzględniającego masę kosteczek słuchowych oraz dla modelu nie uwzględniającego ich masy. Umieszczenie zredukowanej masy kosteczek słuchowych spowodowało, że otrzymane częstotliwości drgań były mniejsze od tych jakie otrzymano w przypadku samej błony.

4. MODEL KOSTECZEK SŁUCHOWYCH

Model kosteczek słuchowych (rys. 2) zbudowano w oparciu o parametry geometryczne (długości, kąty itp.) zaczerpnięte z literatury [1, 4, 8]. Na rysunku zaznaczono punkty stacjonarne mechanizmu (1 – miejsce połączenia błony bębenkowej z kością przewodu słuchowego, 5 – oś obrotu podstawy strzemiączka) oraz punkty dla których obliczano przyspieszenia i prędkości (2 – dolny koniec rękojeści młoteczka, która jest połączona z błoną bębenkową, 3 – staw młoteczkowo-kowadełkowy, 4 – staw kowadełkowo-strzemiączkowy, 6 – górny brzeg podstawy strzemiączka) [5].

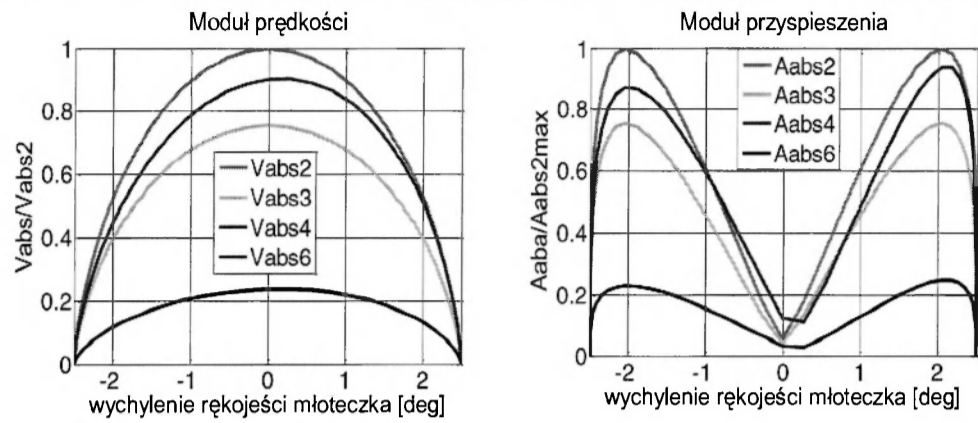


Rys. 3. Schemat mechanizmu kosteczek słuchowych

4.1. Analiza kinematyczna układu

Przeprowadzając analizę kinematyczną układu przyjęto następujące założenia: człon napędzający (młoteczek) obraca się wokół punktu 1 o 5 deg (wychylenie z położenia równowagi o $-2,5$ oraz $2,5 \text{ deg}$), wartość kąta obrotu młoteczka zmienia się sinusoidalnie (pół okresu sinusoidy), mechanizm wykonuje drgania harmoniczne.

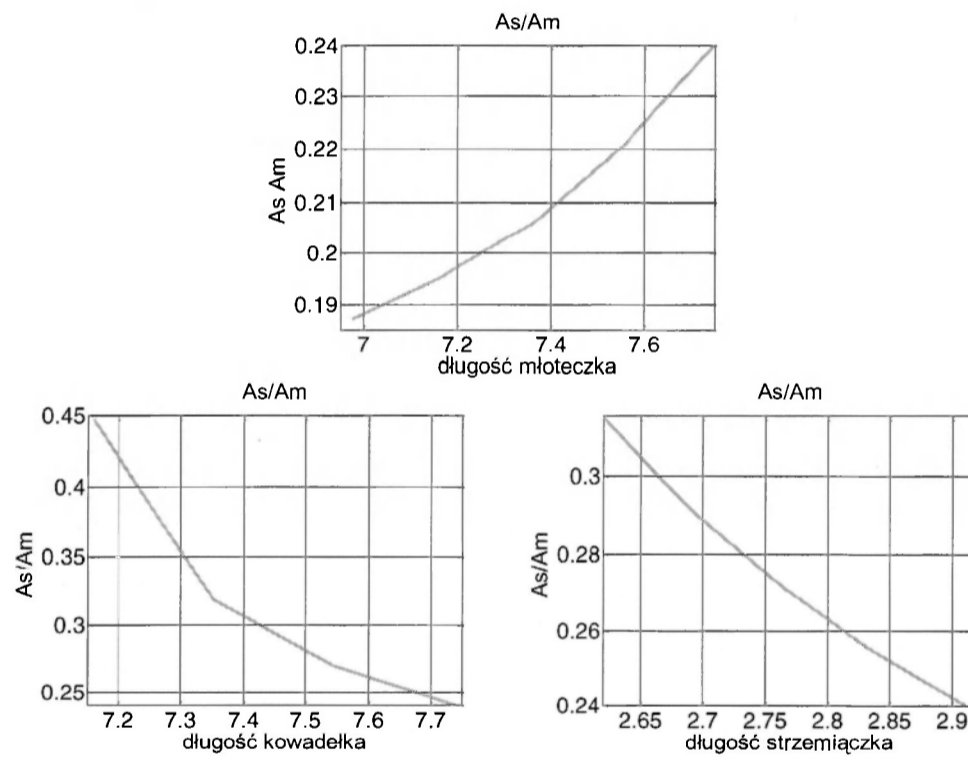
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki analizy kinematycznej układu. Są to znormalizowane do największej wartości (odpowiednio maksymalnej prędkości oraz przyspieszenia krańca rękojeści młoteczka) wykresy zależności prędkości oraz przyspieszeń punktów 2, 3, 4 oraz 6 od kąta obrotu młoteczka względem punktu 1. Wykresy dla punktów będących częścią młoteczka (punkty 2 oraz 3) są symetryczne względem osi oznaczającej położenie równowagi (brak wychylenia błony i rękojeści młoteczka). Dla wychylenia równego 0 punkty te mają maksymalne wartości prędkości oraz minimalne przyspieszenia. Dla punktów 4 oraz 6 maksimum prędkości oraz lokalne minimum przyspieszenia jest przesunięte w stronę dodatniego wychylenia. Maksymalne przyspieszenia wszystkie punkty uzyskują przy wychyleniu $\pm 2 \text{ deg}$. Dla maksymalnych wychyleń prędkości oraz przyspieszenia analizowanych punktów mają wartość 0, co wynika ze zmiany kierunku ruchu.



Rys. 4. Wykresy prędkości oraz przyspieszeń punktów 2, 3, 4 oraz 6

4.2. Wpływ wymiarów kosteczek słuchowych na funkcjonowanie mechanizmu

Zadaniem mechanizmu kosteczek słuchowych jest zamiana drgań błony bębenkowej na drgania podstawy strzemiączka. Wpływ na funkcjonowanie mechanizmu mają jego parametry geometryczne.



Rys. 5. Zależność stosunku amplitudy drgań podstawy strzemiączka do amplitudy drgań błony bębenkowej od długości kosteczek słuchowych

Na rysunku 5 przedstawiono jak skrócenie długości kosteczek słuchowych wpływa na stosunek amplitudy drgań strzemiączka (pkt. 6) do amplitudy drgań młoteczka i błony bębenkowej (pkt. 2).

Długości kosteczek zmniejszono o 10 % (młoteczek, strzemiączko) oraz o 7,5% (kowadełko – dla przyjętych parametrów geometrycznych mechanizmu zmniejszenie długości kowadełka o 10 % nie było możliwe). Jako wymiary wyjściowe przyjęto: długość młoteczka: $L_m = 7,75$ mm, długość kowadełka $L_k = 7,74$ mm oraz długość strzemiączka $L_s = 2,91$ mm. Pozostałe parametry mechanizmu nie zostały zmienione. Założono, że zmiana wymiarów kosteczek słuchowych nie ma wpływu na kąt pod jakim jest nachylony człon napędzający oraz na współrzędne punktów stacjonarnych (pkt. 1 i 5).

Zmniejszenie długości młoteczka spowodowało zmniejszenie stosunku A_s/A_m , natomiast zmniejszenie długości kowadełka i strzemiączka przyniosło odwrotny efekt.

5. PODSUMOWANIE

Wykonywanie modeli ucha środkowego pozwala lepiej zrozumieć zachodzące w nim zjawiska. Z bardziej złożonych modeli, na ogół, można otrzymać dokładniejsze wyniki, ale kosztem większego nakładu pracy. Ważne jest, aby stworzony model był dostosowany do celów, do jakich będzie wykorzystywany i nie zawierał zbędnych elementów.

Błona bębenkowa została zamodelowana jako układ ciągły, ponieważ istotne są jej odkształcenia w trzech wymiarach.

Ruch kosteczek słuchowych jest w przybliżeniu ruchem płaskim, dlatego przedstawiono je jako mechanizm płaski. Zaproponowany dyskretny model kosteczek słuchowych umożliwia szybkie przewidywanie skutków zmian wymiarów kosteczek – ich wpływ na funkcjonowanie mechanizmu, czyli przenoszenie dźwięków z ucha zewnętrznego do ucha wewnętrznego.

Zrozumienie kinematyki ucha środkowego umożliwia tworzenie jego implantów, o własnościach mechanicznych zbliżonych do właściwości naturalnych kosteczek słuchowych.

LITERATURA

- [1] Bochenek A., Reicherp M.: Anatomia człowieka. Tom 5. Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1989.
- [2] Sylwanowicz W., Michajlik A., Ramotowski W.: Anatomia i fizjologia człowieka.: Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1980.
- [3] Traczyk W.: Fizjologia człowieka w zarysie. Warszawa: Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich, 1989.
- [4] Zhao F., Koike T., Wang J., Sieng H., Meredith R.: Finite element analysis of the middle ear transfer functions and related pathologies. *Medical Engineering & Physics*, 2009 31: 907 – 916.
- [5] Sun Q., Gan R., Chang K.-H., Dormer K., Computer-integrated finite element modeling of human middle ear. *Biomechan Model Mechanobiol* 1 (2002) 109 – 122 _ Springer-Verlag, 2002.
- [6] Gan R., Reeves B.: Wang X., Modeling of Sound Transmission from Ear Canal to Cochlea. *Annals of Biomedical Engineering*. Vol. 35. 2007: s. 2180–2195.
- [7] Liu Y., Li S., Sun X., Numerical analysis of ossicular chain lesion of human ea., *Acta Mech Sin*: (2009) 25:241–247.
- [8] Masali M., Cremasco M.: Hoc alterum auditus organi ossiculum est: Ear Ossicles in Physical Anthropology. *Human Evolution* (2006) 21:1–17.

KINEMATIC OF HEARING – MIDDLE EAR

Summary: This article describes kinematic analysis of tympanic membrane and the ossicles mechanism, which is responsible for transferring vibrations from outer ear to inner ear. The tympanic membrane was presented as a continuous system and analyzed by means of FE method. The ossicles were described by discrete three elements planar model. Velocities and accelerations of key points of the mechanism were calculated. Furthermore, the influence of ossicles length on functioning of the mechanism was tested.