

# XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2022

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

### Modelowanie MES wpływu kierunku stymulacji ucha wewnętrznego poprzez przewodnictwo kostne dla implantu umieszczonego w kapsule błędniaka

Paweł Borkowski

Zakład Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska  
email: pawel.borkowski@pw.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Przedmiotem pracy było modelowanie zjawiska przewodnictwa kostnego dla przypadku wewnątrzczaszkowego implantu, umieszczonego blisko kapsuły błędniaka, którego zadaniem jest wzbudzenie drgań kości prowadzące do pobudzenia podatnych struktur ślimaka, odpowiedzialnych za przekazywanie bodźców słuchowych do mózgu. Za pomocą symulacji numerycznej MES modelu ludzkiej kości skroniowej z precyzyjnie odwzorowanym uchem wewnętrznym analizowano drgania wymuszone struktury tkanek z płynem, dla wybranych kierunków siły harmoniczej. W symulacjach zastosowano uproszczony, pasywny model ślimaka. Kość korową i błonę okna okrągłego modelowano materiałami lepkosprężystymi, o modułach zachowawczym i stratności zadawanych w funkcji częstotliwości. Pozostałe tkanki posiadały właściwości sprężyste i izotropowe, płyn perylimfatyczny modelowano z uwzględnieniem lepkości i małej ściśliwości. Analizę harmoniczną modelu przeprowadzono dla 17 częstotliwości z zakresu słyszenia od 0,2 do 10 kHz. Amplitudy drgań błędniaka kostnego oraz błony podstawnej ślimaka, mające istotne znaczenie ze względu na efektywność stymulacji przy przewodnictwie kostnym, zależały od kierunku siły wymuszającej, głównie przy niskich i średnich częstotliwościach.

**SŁOWA KLUCZOWE:** przewodnictwo kostne, implant, kapsuła ślimaka, drgania wymuszone, MES

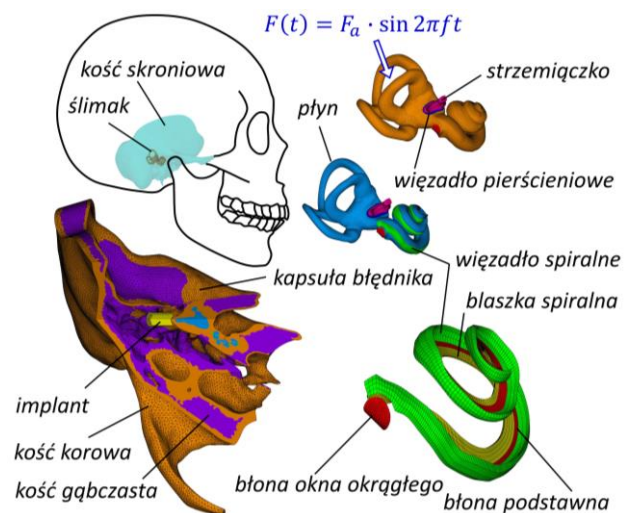
#### 1. Wstęp

Implanty przewodnictwa kostnego typu BAHĄ mocowane do powierzchni czaszki, stosuje się od wielu lat w praktyce klinicznej, ale badane są również inne miejsca stymulacji, takie jak kapsuła błędniaka [1]. Im bliżej ślimaka położony jest implant, tym mniej energii potrzeba do zasilania układu, zmniejsza się też amplituda siły, potrzebna do wzbudzenia odpowiedniego poziomu drgań w kości [2]. Zjawisko przewodnictwa kostnego można badać klinicznie, za pomocą eksperymentów na zwłokach [3, 4] oraz modelowania, w tym z wykorzystaniem metody elementów skończonych [5, 6].

Istotnym ograniczeniem badań eksperymentalnych na zwłokach jest brak możliwości określenia intensywności pobudzenia błony podstawnej wewnątrz ślimaka (rys. 1), pomimo zastosowania nawet najbardziej nowoczesnych technik obrazowania (takich jak np. optyczna koherentna tomografia). Zmierzone mogą być natomiast drgania kości w miejscu przedsionka ślimaka oraz przemieszczenia błony okna okrągłego (rys. 1). Stąd, istotne jest znalezienie relacji pomiędzy intensywnością wzbudzenia struktur, które mogą być zbadane w eksperymencie, z amplitudami drgań podatnych struktur znajdujących się wewnątrz ślimaka, które w rzeczywistości odpowiadają za przekazywanie bodźców słuchowych do mózgu.

W przypadku implantów przewodnictwa kostnego mocowanych do powierzchni czaszki, kierunek stymulacji jest prostopadły do powierzchni kości w miejscu wszczęcia. Dla implantu umieszczonego wewnątrz czaszki w kapsule błędniaka, kierunek stymulacji może być różny. Analiza MES pozwala na wyznaczenie drgań

struktur tkanek znajdujących się na zewnątrz i wewnątrz ślimaka, przy zadanym kierunku siły wymuszającej.



Rys. 1. Model MES kości skroniowej z implantem przewodnictwa kostnego umieszczonym na powierzchni kapsuły błędniaka. Podstawowy kierunek siły harmoniczej, generowanej przez implant, zaznaczono strzałką

#### 2. Model MES kości skroniowej z uchem wewnętrznym

Przedmiotem analizy był trójwymiarowy model kości skroniowej, utworzony w programie ANSYSv17 (ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, United States) na podstawie skanowania mikro CT, z uwzględnionym podziałem na kość zbitą i gąbczastą oraz wiernie

odwzorowanymi strukturami ucha wewnętrznego (rys. 1), opublikowany wcześniej w [6]. Obszar kości skroniowej z uchem wewnętrznym opisywało ponad 12 tys. powierzchni i 2 tys. objętości, 560 tys. węzłów i prawie 2 mln elementów skończonych. Dla struktury rozwiązywano równanie dynamiki z zadaną harmoniczną funkcją obciążenia, a dla płynu równanie falowe. Na granicy płynu i struktury określono warunki sprzężenia. Kość skroniową utwierdzono w miejscach połączenia z pozostałymi kośćmi czaszki, z wyjątkiem chrząstkozrostu skalisto-potylicznego. Rozpatrywano przypadek otosklerozy strzemiączka, dla którego wiązki pierścieniowe modelowano jako skostniałe (rys. 1). Implant przewodnictwa kostnego miał kształt walca o średnicy 3 mm i wysokości 5 mm oraz był modelowany jako masa punktowa (0,16 g), połączona z węzłami leżącymi na styku powierzchni kapsuły błędnika z podstawą walca. Amplituda siły harmonicznego przykładanej do masy imitującej implant wynosiła  $F_a = 0.1$  N. Analizę harmoniczną przeprowadzono dla 17 częstotliwości z zakresu słyszenia (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.63, 0.8, 1.0, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.15, 4.0, 5.0, 6.3, 8 i 10 kHz).

### 3. Wyniki

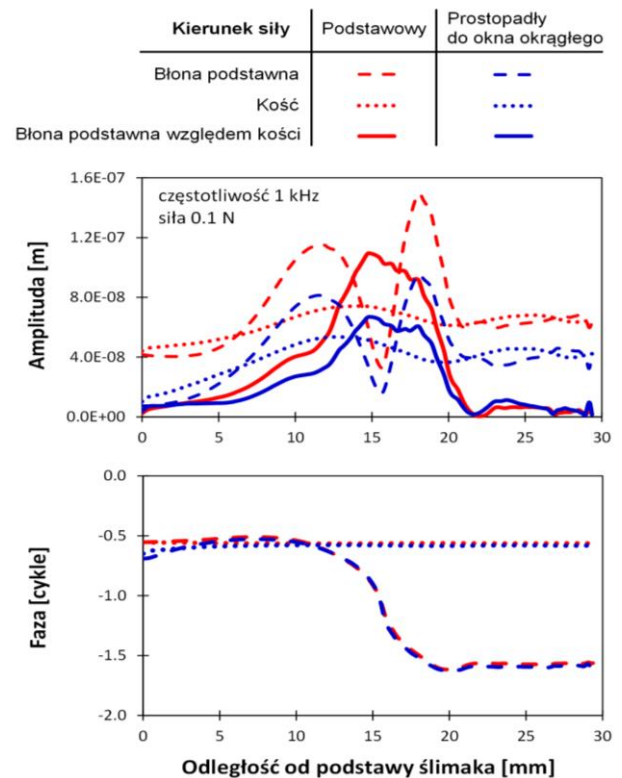
Amplitudę przemieszczenia objętościowego na błonie okna okrągłego (objętość płynu zawartego pomiędzy błoną odkształconą, a nieodkształconą), wyznaczono względem kości odejmując uśredniony ruch przedsionka ślimaka od przemieszczeń węzłów leżących na powierzchni błony, jak opisano w [6]. Względną amplitudę przemieszczeń błony podstawnej w kierunku osi wrzecionka wyznaczono w 316 przekrojach, rozmieszczonych wzdłuż ślimaka jako różnicę pomiędzy bezwzględnymi drganiami dwóch punktów w każdym przekroju, z których jeden znajdował się w centrum błony podstawnej, a drugi leżał u podstawy blaszki spiralnej. Wielkości te przetwarzano jako liczby zespolone.

Porównanie wyników uzyskanych wewnątrz ślimaka pokazano na rys. 2 dla częstotliwości 1 kHz oraz dwóch kierunków siły wymuszającej. Kierunek podstawowy pokazano strzałką na rys. 1, natomiast kierunek stymulacji prostopadły do powierzchni błony okna okrągłego dotyczył przypadku, w którym drgania kości przedsionka ślimaka są największe. Położenie maksimum drgań bezwzględnych w błonie podstawnej dla obu kierunków stymulacji było przesunięte w kierunku wierzchołka ślimaka, natomiast położenie maksimum amplitudy względnej z grubsza zgadzało się z funkcją Greenwooda [7] (17,6 mm/1 kHz). Przebiegi faz były podobne, dla obu kierunków wystąpiła fala wędrująca na błonie podstawnej (spadek fazy na krzywych z rys. 2 – linie przerywane). Pomimo większych drgań przedsionka, występujących dla kierunku siły prostopadłego do powierzchni błony okna okrągłego, drgania nasady blaszki spiralnej oraz błony podstawnej były mniejsze od uzyskanych dla kierunku podstawowego.

### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje numeryczne wykazały, że intensywność wzbudzenia struktur, które mogą być zbadane eksperymentalnie, nie jest wprost proporcjonalna do amplitud drgań uzyskiwanych wewnątrz ślimaka, co pozwoliło na sformułowanie następujących wniosków:

- (1) W przypadku implantu umieszczonego w kapsule błędnika, efektywność pobudzenia ślimaka zależała od kierunku stymulacji głównie przy niskich oraz średnich częstotliwościach.
- (2) Rozkłady amplitud przemieszczeń względnych w błonie podstawnej były podobne do uzyskanych dla wymuszenia drogą przewodnictwa powietrznego.



Rys. 2. Drgania błony podstawnej i nasady blaszki spiralnej wzdłuż ślimaka dla częstotliwości 1 kHz i dwóch kierunków siły wymuszającej

### Literatura

- [1] Wojciechowski T., Lachowska M., Niemczyk K., *Detailed Analysis of the Space between the Semicircular Canals for the Purpose of Direct Bone Conduction Stimulation of the Inner Ear*, *Audiology & Neurotology* Vol. 26, pp. 35-44, 2021.
- [2] Håkansson B.E., Eeg-Olofsson M., Reinfeldt S., Stenfelt S., Granström G., *Percutaneous versus transcutaneous bone conduction implant system: a feasibility study on a cadaver head*, *Otology & Neurotology*, Vol. 29, pp. 1132-1139, 2008.
- [3] Kwacz M., Niemczyk K., Wysocki J., Lachowska M., Borkowski P., Małkowska M., Sokołowski S., *Round Window Membrane Motion Induced by Bone Conduction Stimulation at Different Excitation Sites: Methodology of Measurement and Data Analysis in Cadaver Study*, *Ear and Hearing* Vol. 40, No. 25, pp. 1437-1444, 2019.
- [4] Dobrev I., Stenfelt S., Rösli C., Bolt L., Pfiffner F., Gerig R., Huber A., Sim J. H., *Influence of stimulation position on the sensitivity for bone conduction hearing aids without skin penetration*, *International Journal of Audiology*, Vol. 55, No. 8, pp. 439-46, 2016.
- [5] Chang Y., Kim N., Stenfelt S., *Simulation of the power transmission of bone-conducted sound in a finite-element model of the human head*, *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, Vol. 17, pp. 1741-1755, 2018.
- [6] Borkowski P., Marek P., Niemczyk K., Lachowska M., Kwacz M., Wysocki J., *Bone conduction stimulation of the otic capsule: a finite element model of the temporal bone*, *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 21, No. 3, pp. 75-86, 2019.
- [7] Greenwood D.D., *A cochlear frequency-position function for several species-29 years later*, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 87, pp. 2592-2605, 1990.