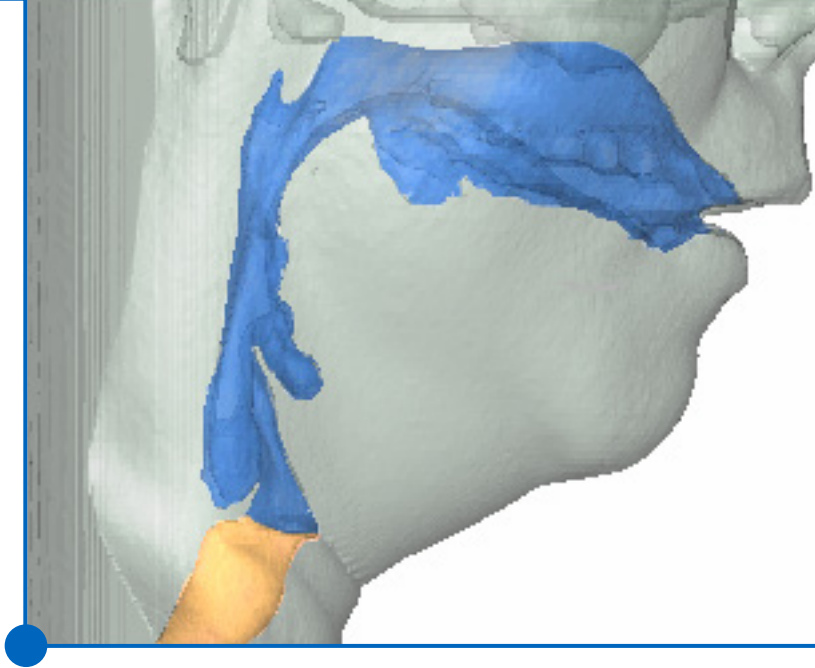


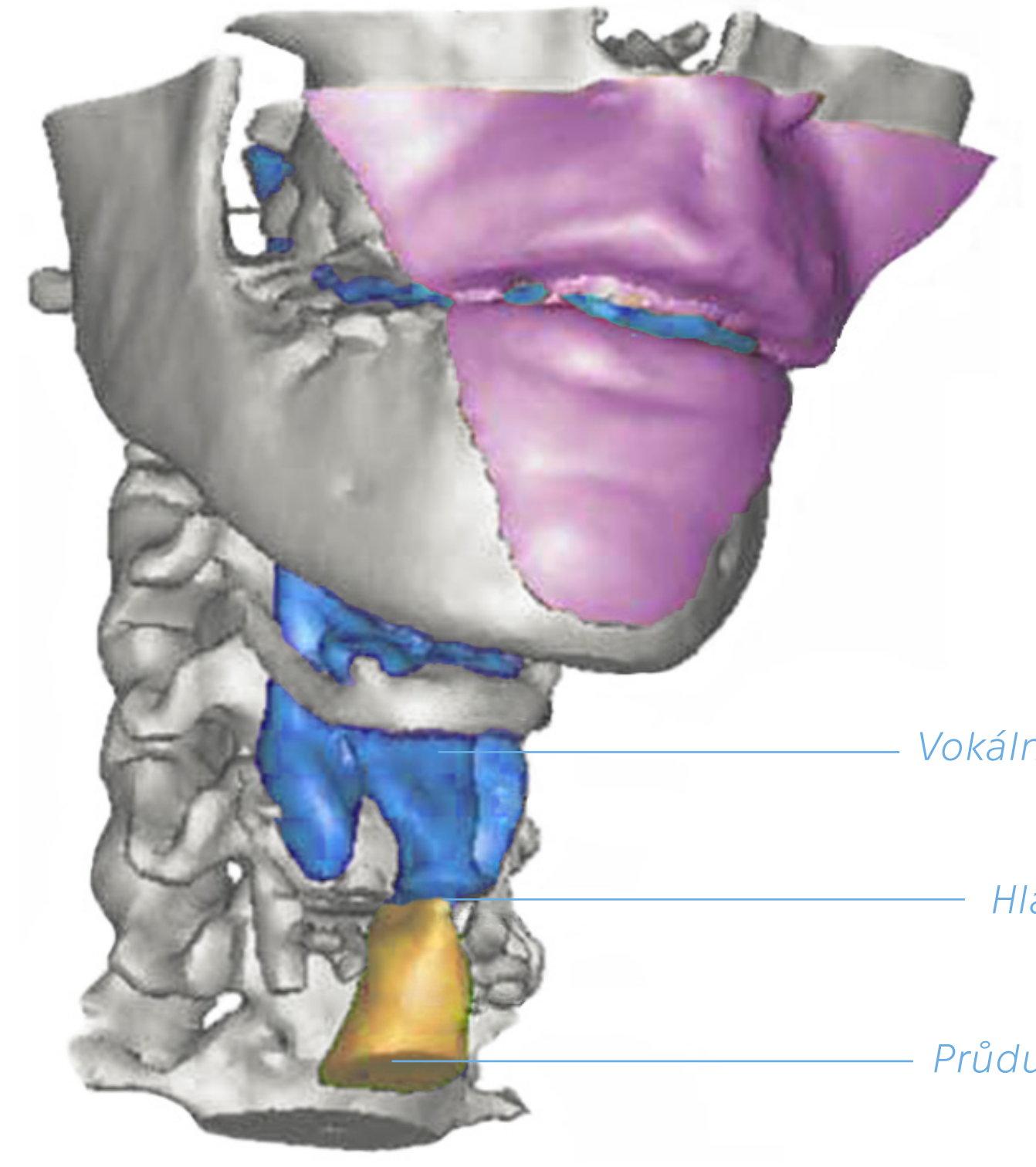
Motivace

Disertační práce se zabývá problematikou akustiky vokálních traktů. Hlavním cílem práce je redukce výpočetní náročnosti akustických analýz vokálního traktu při použití MKP. Snížení výpočetní náročnosti je dosaženo vytvořením nového elementu.



Zobrazení vokálního traktu uvnitř hlavy

Zobrazení vokálního traktu uvnitř hlavy včetně části tváře a okolních kostí



Geometrie vzduchové kavity vokálního traktu

Metoda konečných prvků pro akustiku

Tlakové pole je dáno pouze uzlovými hodnotami, které jsou tvarovými funkcemi distribuovanými do celého objemu elementu.

V MKP se používá slabá formulace a Galerkinova metoda. Řešená vlnová rovnice je vynásobena testovací funkcí a integrována přes vyšetřovaný objem. Akustický tlak i testovací funkce jsou vyjádřeny uzlovými hodnotami.

Po aplikaci Greenovi identity a zavedením akustické impedance se získá výsledná formulace problému pomocí matic hmotnosti, tlumení a tuhosti.

$$p'(t, x, y, z) = N_e(x, y, z)P_e(t)$$

$$\int_{V_e} \left(\delta p' \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} \right) dV = \int_{V_e} (\delta p' \Delta p') dV$$

$$\delta P_e^T \left(\int_{V_e} \left(-\omega^2 \frac{1}{c_0^2} N_e^T N_e + (\nabla N_e)^T \nabla N_e \right) dV + i\omega \int_{\partial V_e} \left(N_e^T \rho_0 \frac{1}{Z_s} N_e \right) dS \right) P_e = 0$$

$$M_e = \int_{V_e} \left(\frac{1}{c_0^2} N_e^T N_e \right) dV$$

$$B_e = \int_{\partial V_e} \left(N_e^T \rho_0 \frac{1}{Z_s} N_e \right) dS$$

$$K_e = \int_{V_e} \left((\nabla N_e)^T \nabla N_e \right) dV$$

$$\delta P_e^T (-\omega^2 M_e + i\omega B_e + K_e) P_e = 0$$

Navržený element

Tlaková pole ve vokálním traktu jsou obecného charakteru. Pro lidský hlas jsou nejvýznamnější frekvence 100 Hz až 6 kHz. V tomto frekvenčním pásmu je většina tvarů kmitu ve vokálním traktu podélného charakteru. Příčných tvarů kmitu je v tomto rozsahu méně a jsou hůře vybuditelné hlasivkami, jejich podíl na vzniklém hlasu je výrazně nižší než u podélných tvarů.

Navržený element je postaven na myšlence rozložení uzlů MKP modelu pouze po povrchu vokálního traktu a ve středu jeho průřezu. Tím se zachová informace jeho tvaru a celkový počet stupňů volnosti bude nižší. Analytickou eliminací jsou odebrány nežádoucí uzlové body.

Element je založený na nelineárním 2D trojúhelníkovém elementu.

$$N_i(L_1, L_2, L_3) = \eta_{\alpha_i}(L_1) \eta_{\beta_i}(L_2) \eta_{\gamma_i}(L_3)$$

$$\eta_{\alpha_i}(L_1) = \prod_{i=1}^{\alpha_i} \left(\frac{nL_1 - i + 1}{i} \right) \text{ pro } \alpha_i \geq 1$$

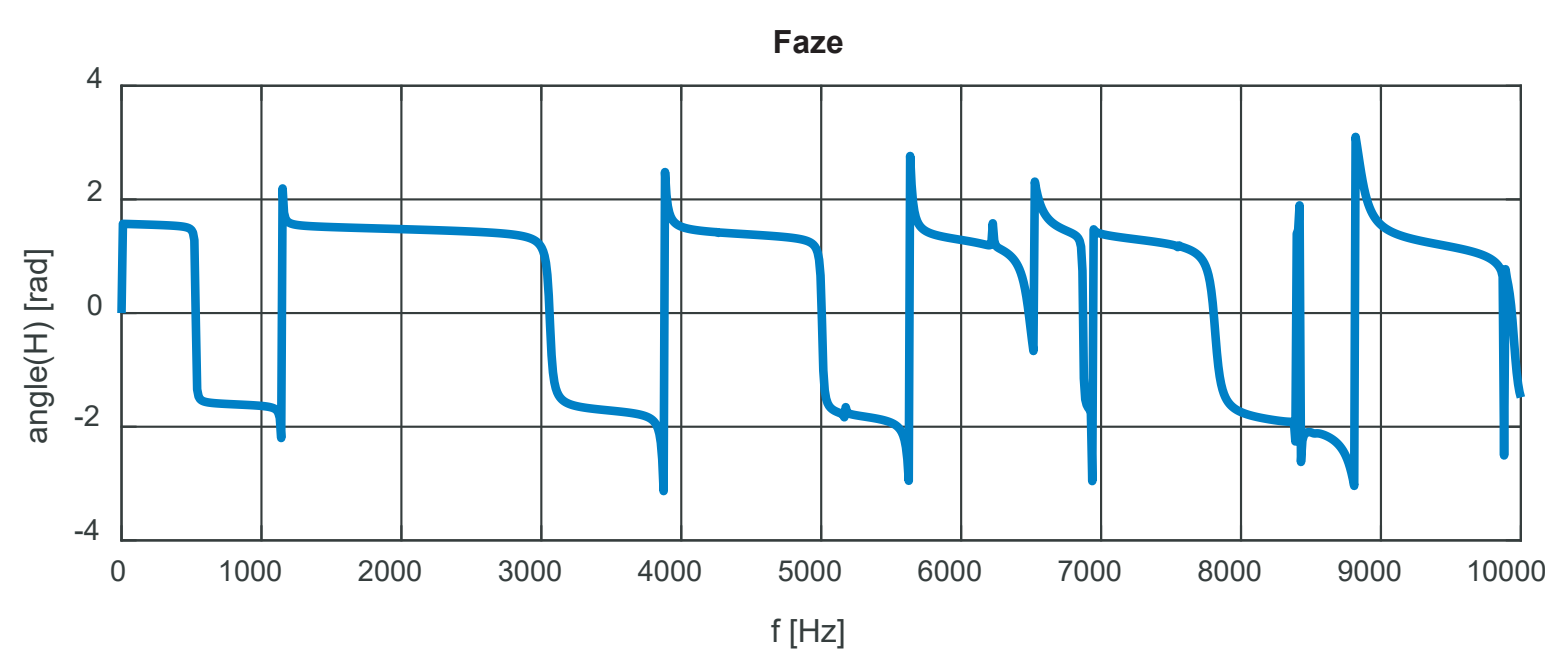
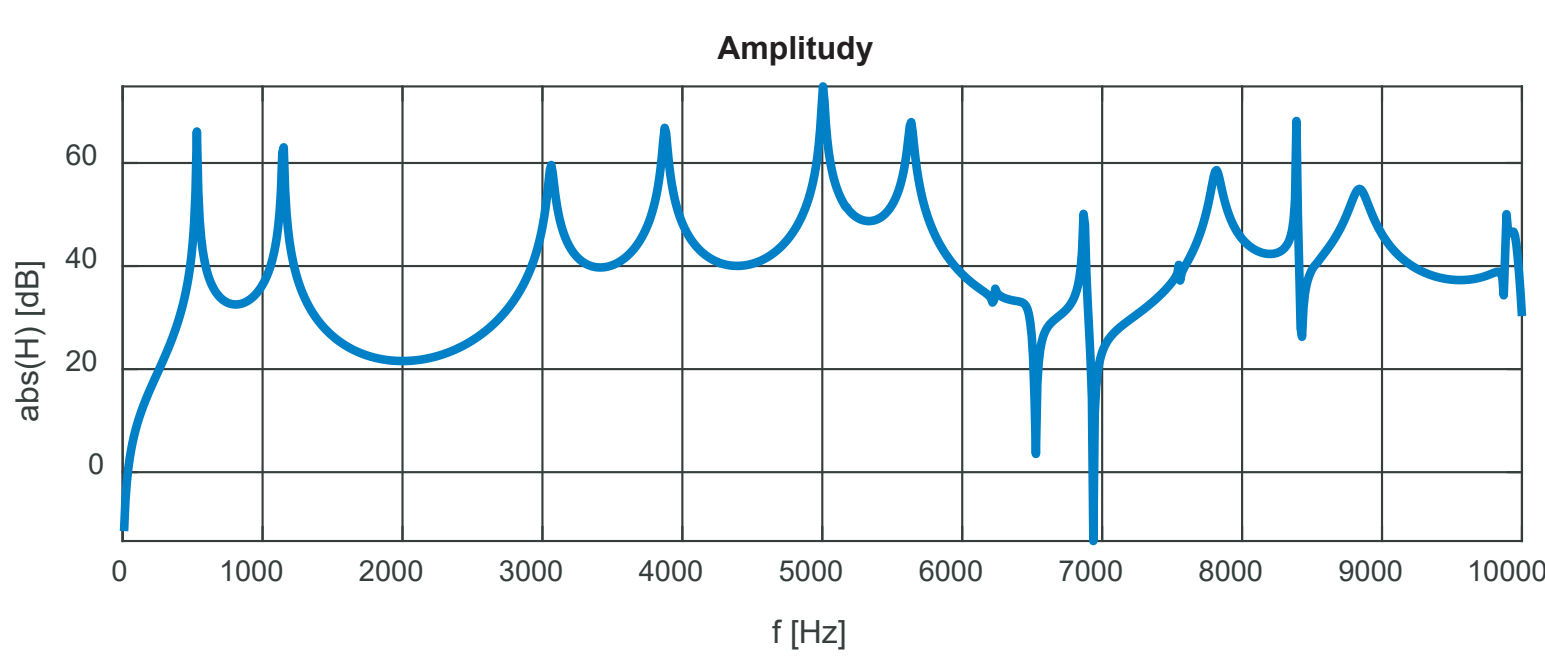
$$\eta_{\alpha_i}(L_1) = 1 \text{ pro } \alpha_i = 0$$

Pomocí analytické eliminace jsou odebrány nežádoucí uzlové body. Plošné souřadnice se nahradí přirozenými souřadnicemi.

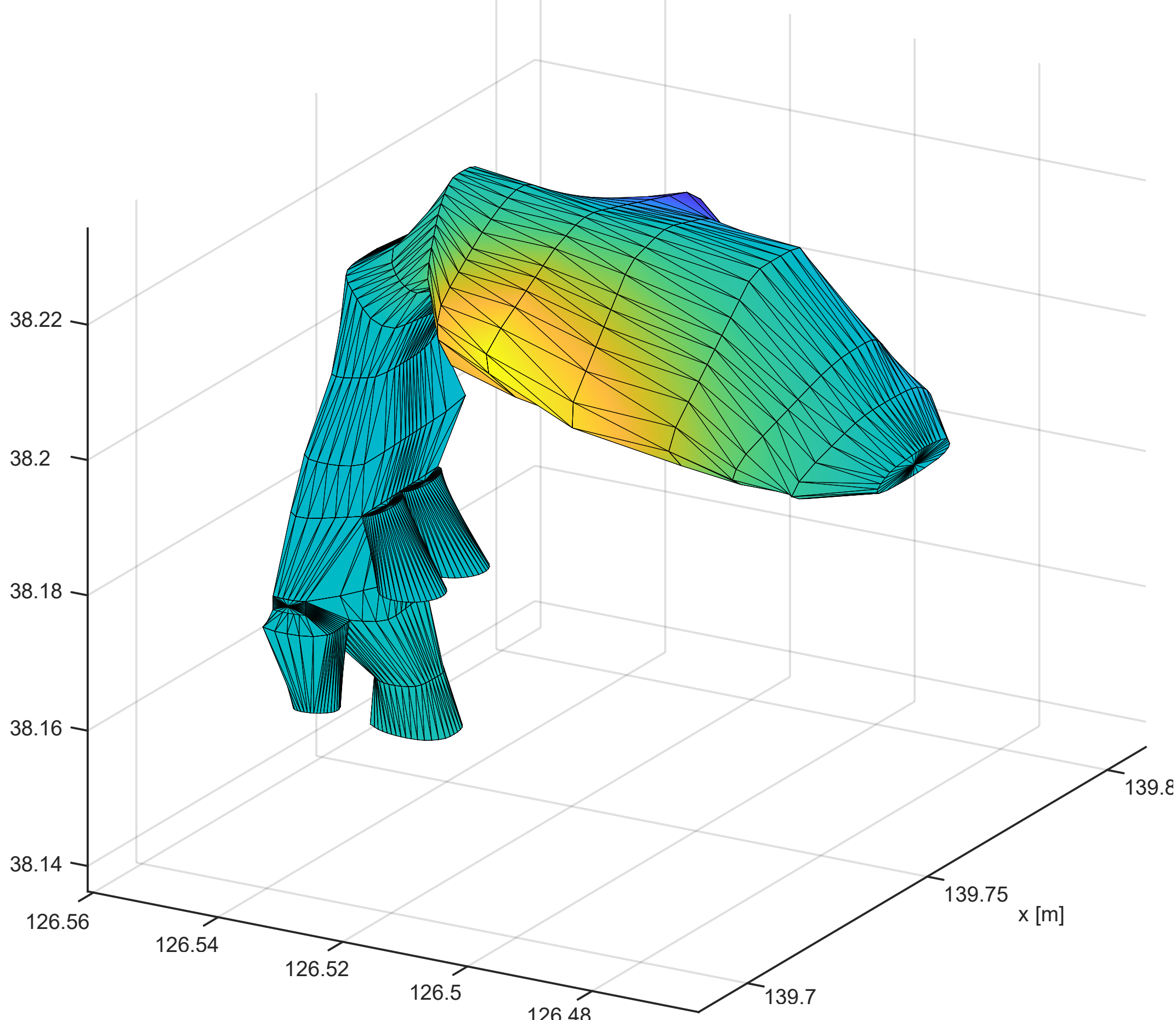
Vlastnosti MKP modelu

Model byl testován výpočtem modální analýzy a výpočtem přenosu mezi hlasivkami a ústy ve frekvenční oblasti významné pro lidský hlas.

Přenos mezi hlasivkami a ústy



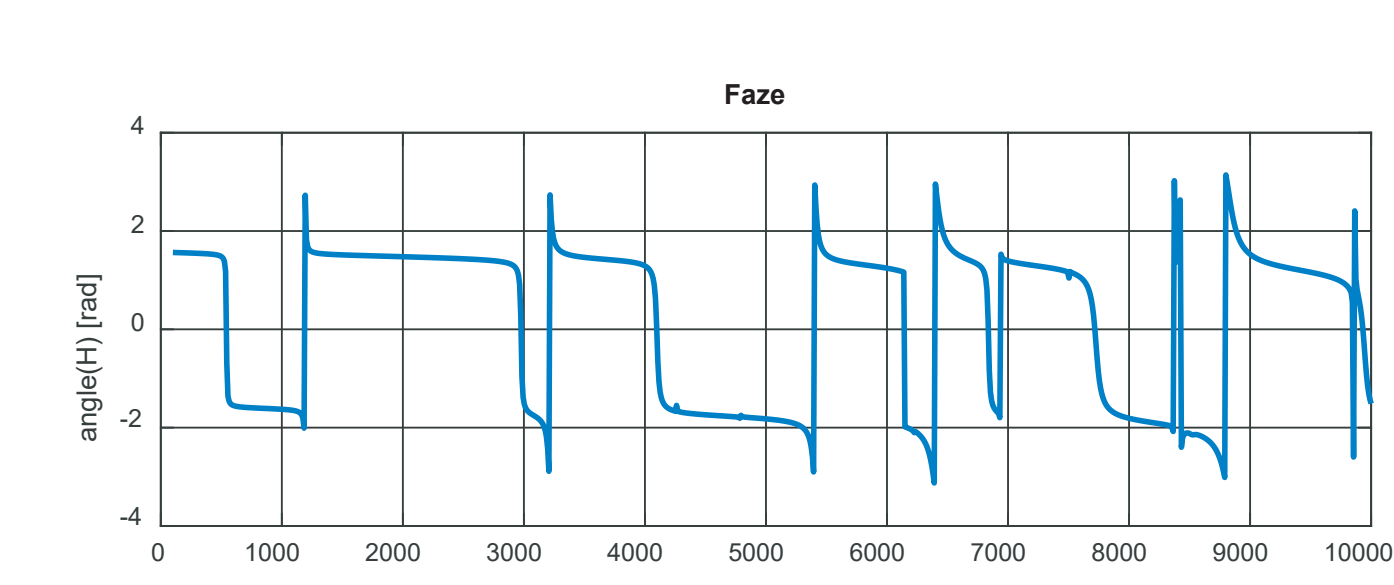
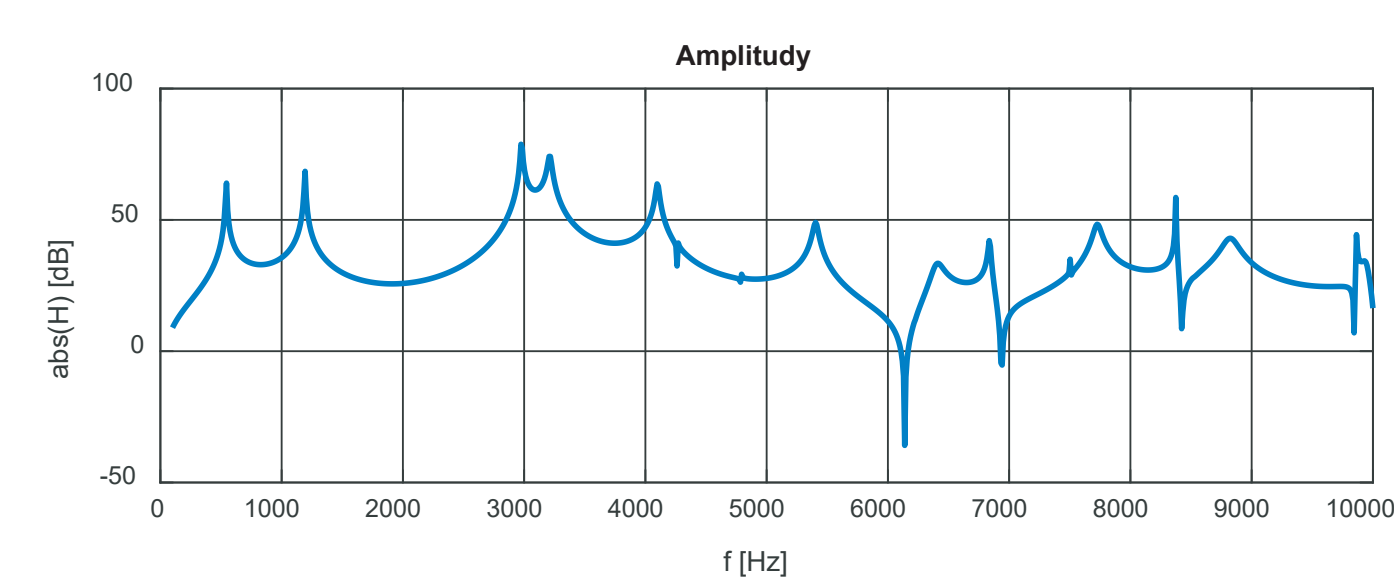
1. příčný tvar kmitu



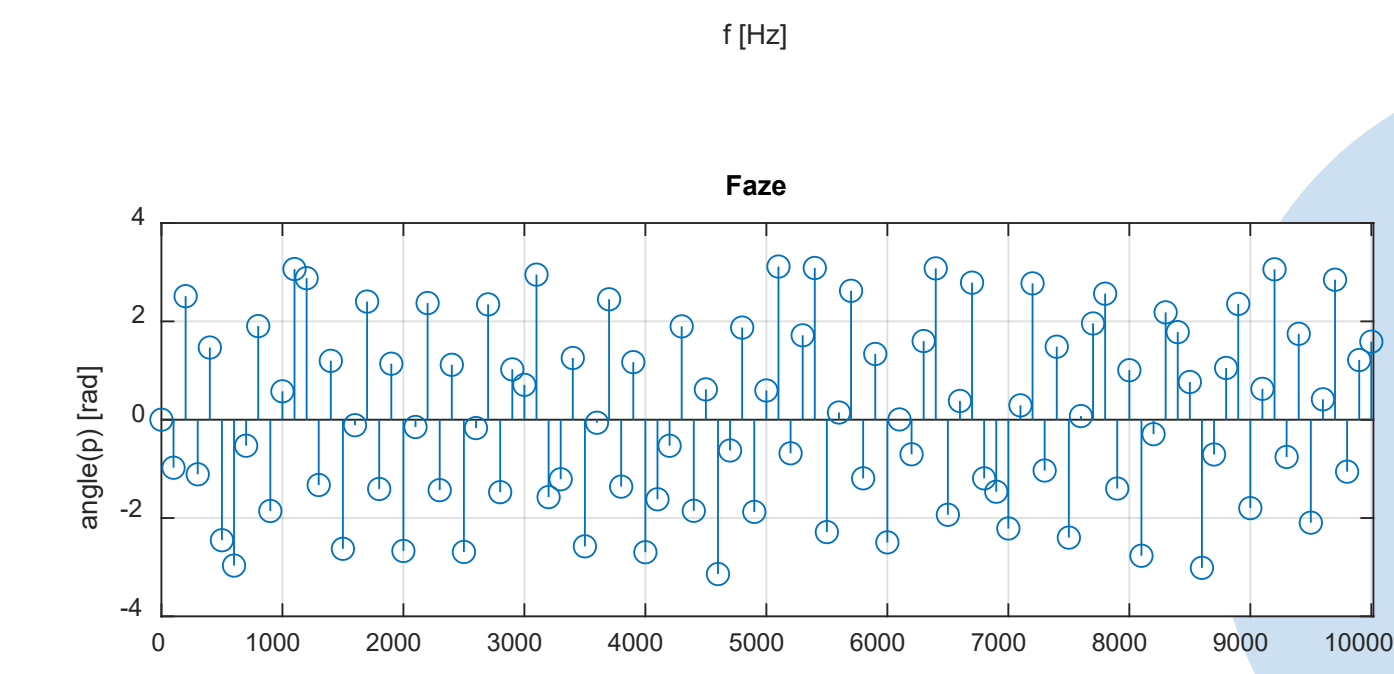
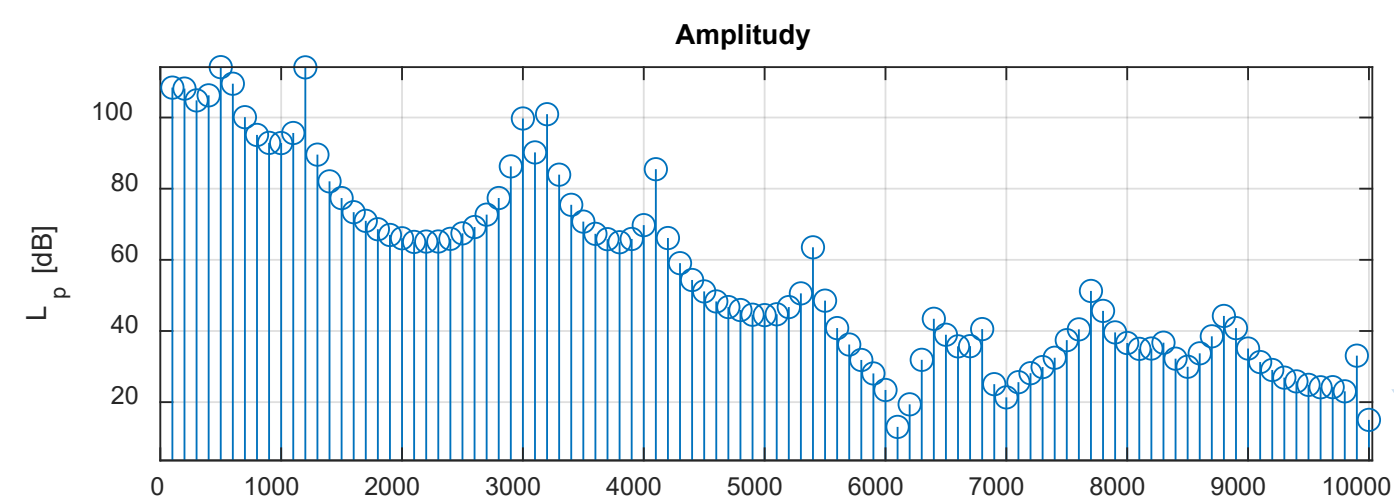
Modelování pěveckého formantu

Model byl použit pro testování podmínek vzniku pěveckého formantu. Geometrické úpravy sblížily 3. a 4. formant. To zvýšilo zesílení v okolí 3 kHz o 20-30 dB.

Frekvenční přenos pěveckého formantu



Spektrum hlasu

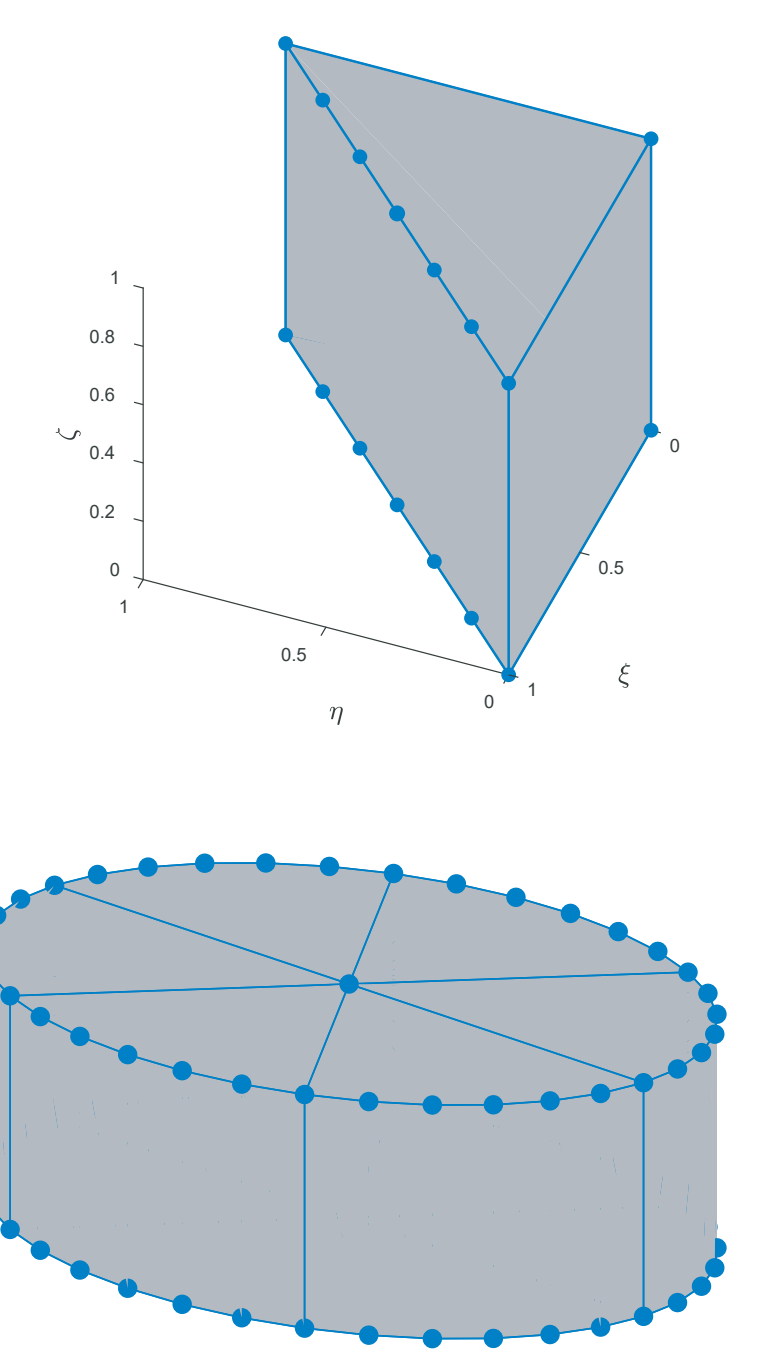


Odvozený 2D element se lineární tvarovou funkcí převodu do prostoru.

$$N_i(\eta, \xi, \zeta) = (1 - \zeta) N_i(\eta, \xi)$$

$$N_{i+8}(\eta, \xi, \zeta) = \zeta N_i(\eta, \xi)$$

Složení šesti těchto elementů se diskretizuje část vokálního traktu ohraničená dvěma řezy. Takto se diskretizuje celý vokální trakt.



Závěr

V práci byl odvozen a použit nový nelineární izoparametrický element vhodný pro efektivní MKP analýzy akustiky vokálních traktů. Tento element umožňuje diskretizovat složitou geometrii vokálního traktu s minimem stupňů volnosti. Vytvořený MKP model obsahuje 132 elementů a 949 stupňů volnosti. To je řádově méně než běžné modely z konvenčních elementů. Díky tomu je model výpočtově efektivní a vhodný na optimalizační úlohy. Výsledky analýz jsou ve frekvenčních oblastech lidského hlasu v souladu s běžnými MKP modely.