

# Numerické modelování interakce proudění a pružného tělesa v lidském vokálním traktu

Bc. Petra Tisovská <petra.tisovska@tul.cz>, doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

## ABSTRAKT

Interakce proudění vzduchu a pružného tělesa v lidském vokálním traktu je komplexní a složitý problém. V této práci je proudění popsáno nestlačitelnými Navier-Stokesovými rovnicemi. Diskretizace je provedena metodou konečných objemů v programu OpenFOAM. Model hlasivek je matematicky popsán diferenciálními rovnicemi a jejich řešení je implementováno v programu Matlab Simulink, který zde slouží pro ověření schopnosti řešiče pimpleDyMfoam pracovat s tělesem se dvěma stupni volnosti. Numerické simulace jsou provedeny pro 2D a 3D. Ve 2D jsou zkoumány možnosti deformace sítě, analýza vlivu počtu elementů sítě na výsledný pohyb tělesa a je nalezena hranice stability systému – kritická rychlost proudění, kdy těleso kmitá s neklesající amplitudou. Ve 3D je simulován případ se stejnými počátečními podmínkami jako pro dva rozměry. Tyto případy jsou zde porovnány.

## ÚVOD

### ZADÁNÍ ÚKOLU

- Seznámení se s problematikou proudění v lidské dýchací soustavě
- Nastudování základů teorie interakce proudění s pružnými tělesy
- Řešení dynamiky mechanických soustav se soustředěnými parametry
- Popis numerických metod pro řešení nestlačitelného proudění vazkých tekutin
- Seznámení se s pokročilejšími koncepty práce s knihovnou OpenFOAM
- Realizování numerických simulací ve 2D a 3D.

### MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ

V lidském vokálním traktu dochází k interakci:

- Proudění vzduchu hrtanem
- Pružných tkání hlasivek
- Zvukových vln

Kvůli špatnému rozlišení a rizikům spojeným s nadměrným ozářením lékařských metod (např. MRI, RTG) zatím nebylo možné pořídit časový záznam pohybů vnitřní struktury deformovatelných vnitřních tkání. Výzkum tohoto důležitého hlasového ústrojí se tedy mimo jiné ubírá směrem matematických modelů a numerických schémat, jejichž výstupy je možné ověřit pomocí pozorovatelných výsledků. Srovnáním různých přístupů k tomuto problému se zabývá Fariborz Alipour a kolektiv autorů ve svém článku [1].

### REŠERŠE

Pohyb pružné tkáně hlasivek lze nahradit zjednodušenými mechanickými modely se soustředěnými parametry:

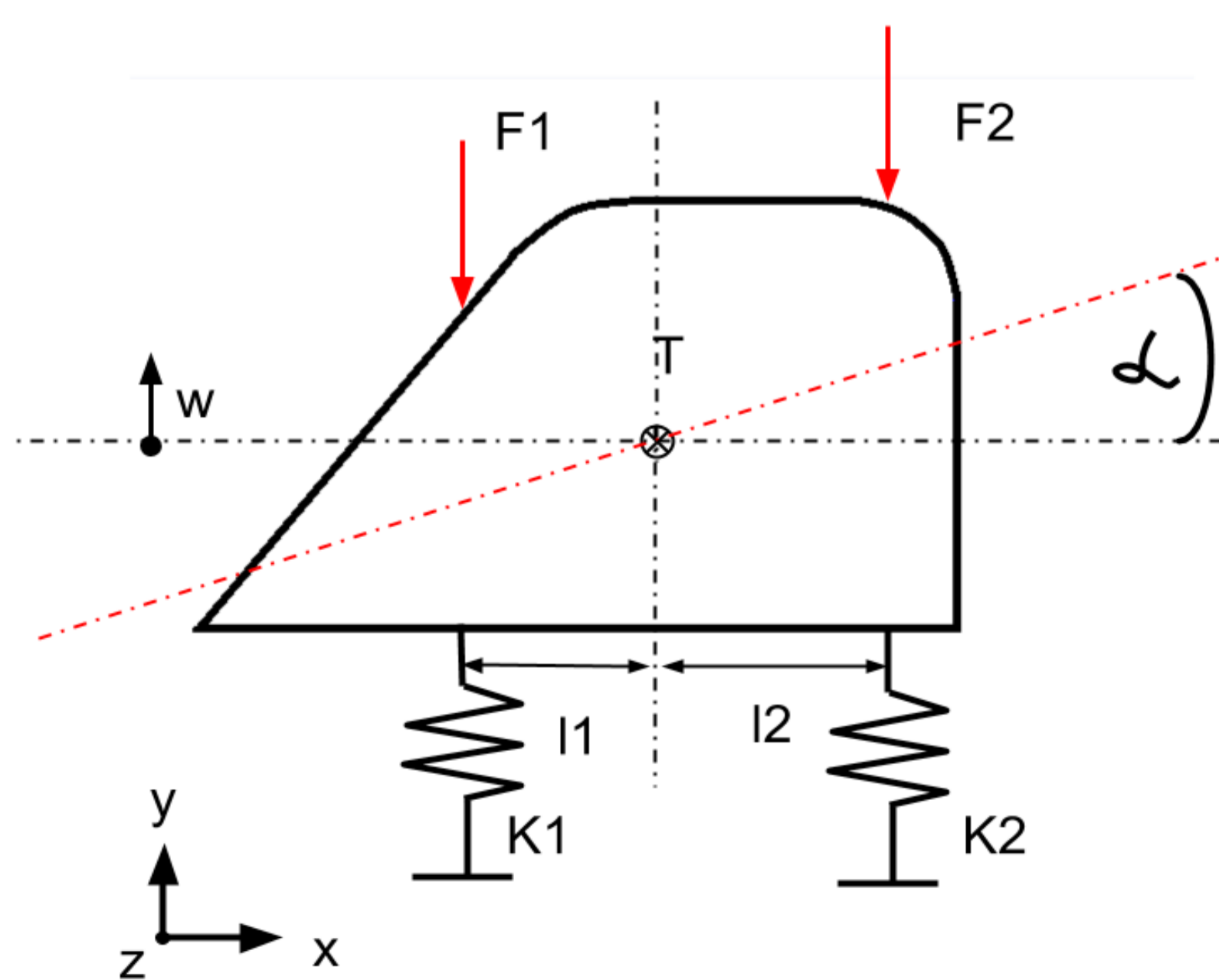
- Jednohmotový (prezentovaný v článku Flanagan, Landgraf [4])
- Dvuhmotový (představen například autorem Stevens [2])
- Tříhmotový systém (Story a Titze [3])

Druhý způsob modelování je založen na parciálních diferenciálních rovnicích (PDE). Jedná se o řešení vzájemně provázaných parciálních diferenciálních rovnic pro proudění, strukturální mechaniku hlasivek a akustických dějů. První PDE model byl představen v článku [4].

Velkým problémem při modelování samobuzených oscilací při fonaci je kontakt hlasivek. U standardních metod pro diskretizaci oblasti (MKP a MKO) může dojít k tomu, že v oblasti po pohybu hlasivek vzniknou elementy s nulovým rozměrem. V budoucnu budou ověřené matematické modely použity pro plánování operací, diagnostikování a rehabilitace přizpůsobené na míru konkrétnímu problému a pacientovi.

### METODIKA

Hlasivky jsou pružná struktura kmitající vlivem proudícího vzduchu, svaly provádějí počáteční nastavení tkání a geometrie štěrbiny. Odvození pohybových rovnic proběhlo pomocí Lagrangerových rovnic II. druhu pro zjednodušený model hlasivky zobrazený na Obrázku 1.



Obrázek 1: Geometrie tělesa představující hlasivku

Konstanty útlumu a tuhosti jsou odvozeny z vlastních frekvencí změřených ex vivo na skutečných lidských hrtanech.

V práci je diskutována cell-centered formulace metody konečných objemů, která je implementována v programu OpenFOAM. Více o této metodě lze nalézt v knize Ferziger [5].

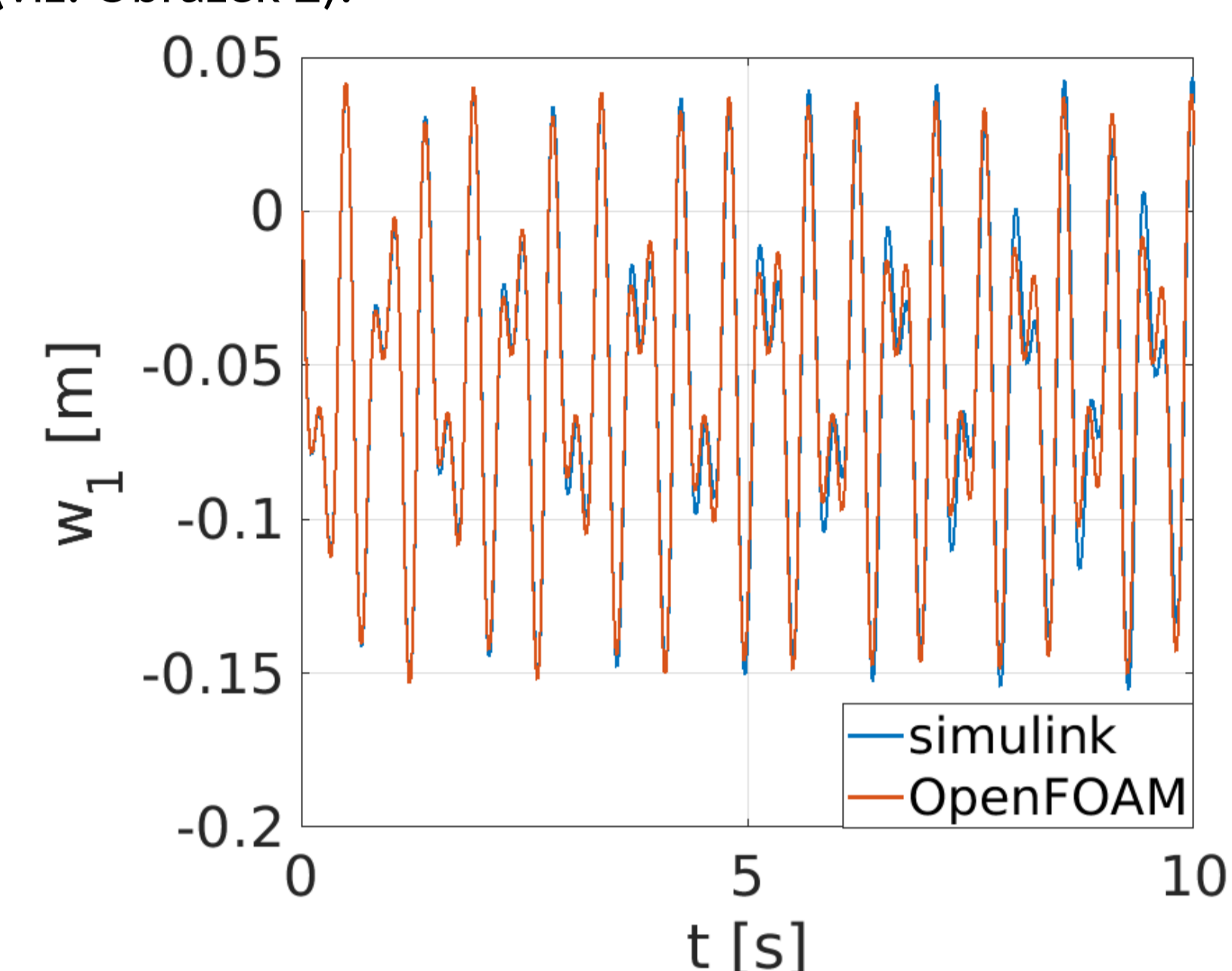
## VÝSLEDKY

### OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI ŘEŠIČE PIMPLEDYMFOAM

Simulace prokázaly shodu řešičů (viz. Obrázek 2):

- OpenFOAM
- Matlab Simulink

Obrázek 2: Vývoj výchylky  $w_1$  upevnění pružiny K1 pro těleso se dvěma stupni volnosti

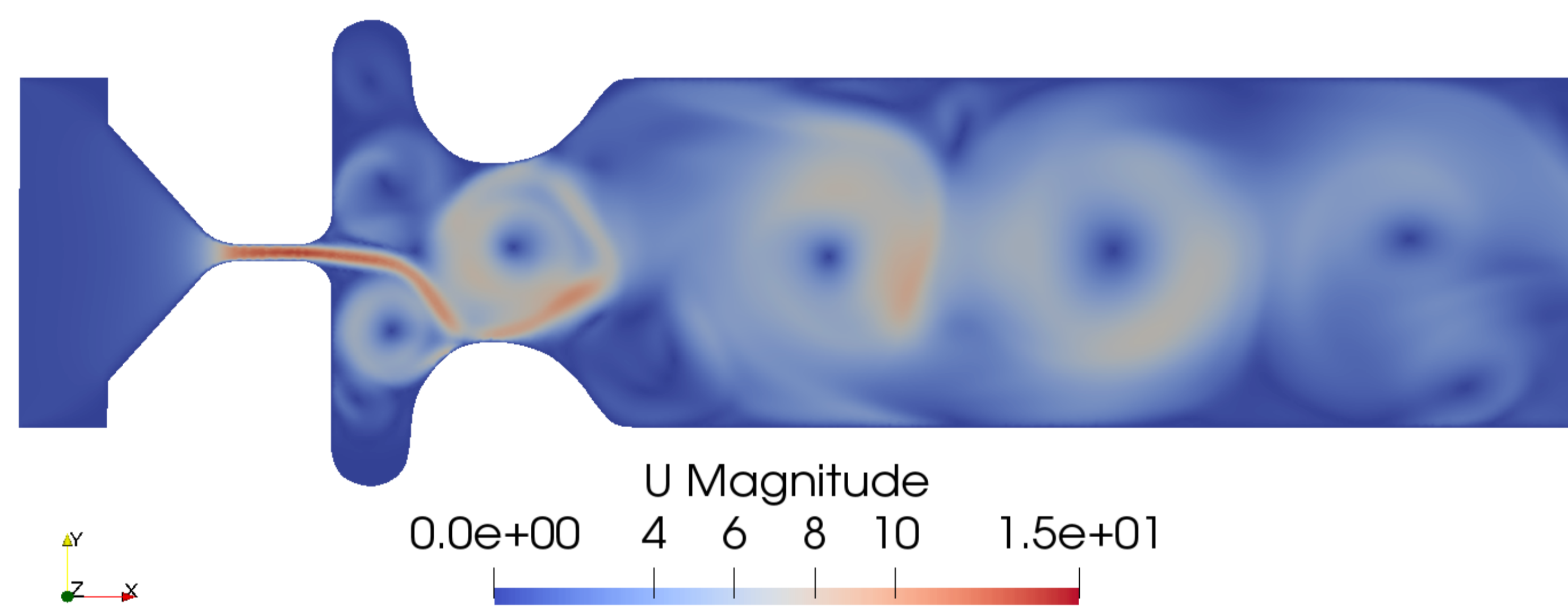


### NUMERICKÉ SIMULACE OBTÉKÁNÍ MODELU KMITAJÍCÍHO TĚLESA

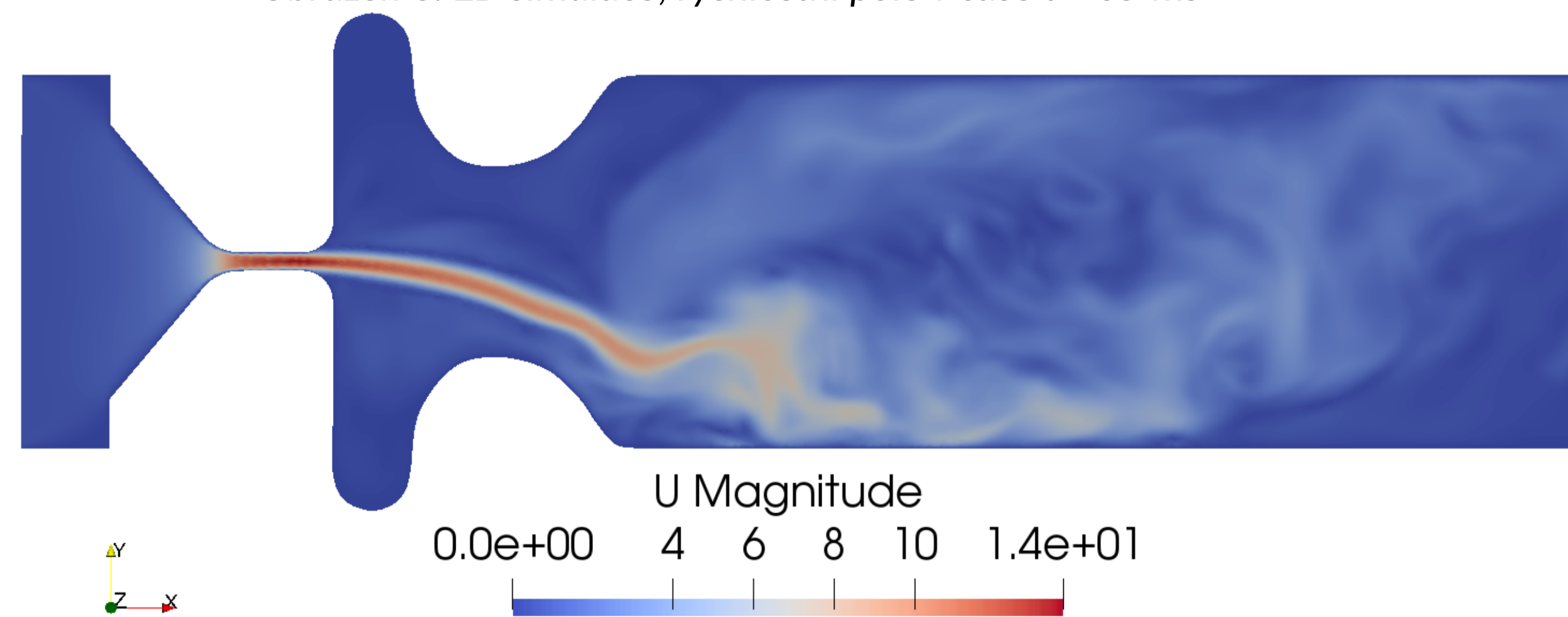
Numerické simulace proběhly za účelem:

- Analýzy vlivu počtu elementů sítě na výpočet kmitů (2D simulace)
- Nalezení hranice aeroelastické nestability (rychlost na vstupu  $u_x = 1,4$  m/s)
- Studie vlivu počtu jader paralelního výpočtu na jeho rychlost (Amdahlův zákon)
- Srovnání výsledků 2D a 3D (proudová pole Obrázek 3 a 4)

Na obrázku 4 proudového pole ve 3D je stejně jako ve 2D vidět zrychlování proudu v zúžené části kanálu. Na horním zaoblení hlasivky dochází k jeho odtrhávání. Na rozdíl od 2D simulace zde nevznikají velké víry, které se posouvají k výstupu z oblasti.



Obrázek 3: 2D simulace, rychlostní pole v čase  $t = 65$  ms



Obrázek 4: 3D simulace, rychlostní pole v čase  $t = 65$  ms

### DISKUZE

V této diplomové práci byl vyvinut zcela nový numerický model pro interakci proudění a tuhého tělesa se dvěma stupni volnosti pružně uloženého ve stěně kanálu, představujícím jednoduchý model lidské hlasivky. Velkou výzvou do budoucna je řešení dynamické změny sítě pro malé až nulové rozměry hlasivkové štěrbiny.

### REFERENCE

- [1] F. Alipour a kolektiv, "Mathematical models and numerical schemes for the simulation of human phonation," vol. 6, pp. 323–343, 09 2011.
- [2] K. N. Stevens, "Physics of laryngeal behavior and larynx modes," vol. 34, pp. 264–279, 1977.
- [3] B. Story and I. Titze, "Voice simulation with a body-cover model of the vocal folds," vol. 97, pp. 1249–60, 03 1995.
- [4] F. Alipour, D. Berry, and I. Titze, "A finite-element model of vocal-fold vibration," vol. 108, pp. 3003–12, 12 2000.
- [5] J. Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer Berlin Heidelberg, 2012.