

JAROMÍR HORÁČEK  
JAN ŠVEC

# Modelování lidského hlasu

*Využití v klinické praxi i při zpěvu*

Lidský hlas je tvořen akustickým signálem vydávaným kmitajícími hlasivkami. Tento signál je při průchodu rezonančními dutinami frekvenčně modifikován (obr. 2). Na kvalitě tvorby hlasu se tedy podílejí jak hlasivky samotné, tak rezonanční dutiny dýchacích cest (zejména část mezi hlasivkami a ústním otvorem, takzvaný vokální trakt). Výška, pravidelnost a intenzita hlasu jsou dány především kmity hlasivek rozechvívaných vzduchem přicházejícím z plic. Velikostí a tvarem hlasového traktu jsou pak ovlivněny rezonanční frekvence různých hlásek, jež dotvářejí výslednou barvu hlasu. Proto jsou užitečné jak modely hlasivek a prostoru nad hlasivkami, tak modely komplexní, zahrnující i akustické prostory pod hlasivkami.

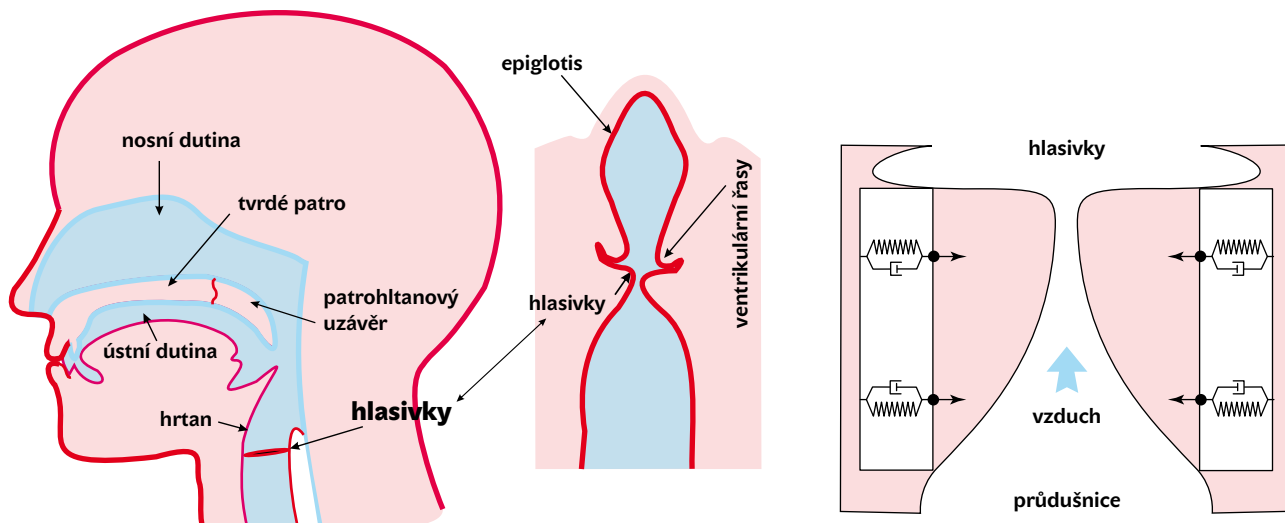
Model kmitů hlasivek buzených proudem vzduchu z plic (obr. 2 vpravo) umožňuje simulovat na počítači vibrace hlasivek včetně

rázů. K tomu je třeba zadat vstupní parametry systému: tlak vzduchu v plicích, geometrii a velikost hlasivek, vzdálenost hlasivek ve statické poloze před vydáním hlasu, přibližnou frekvenci základního tónu a materiálové vlastnosti hlasivkové tkáně. Výstupem jsou numerické simulace řady veličin a parametrů důležitých pro studium hlasu i pro foniatrickou a laryngologickou praxi, například akustického tlaku nad hlasivkami, napjatosti v hlasivkách při jejich dotyku v době rázu, maximální amplitudy kmitů, časového průběhu velikosti plochy mezihlasivkové štěrbiny, koeficientů otevření a uzavírání hlasivek a dalších klinicky měřitelných charakteristik vibrací hlasivek.

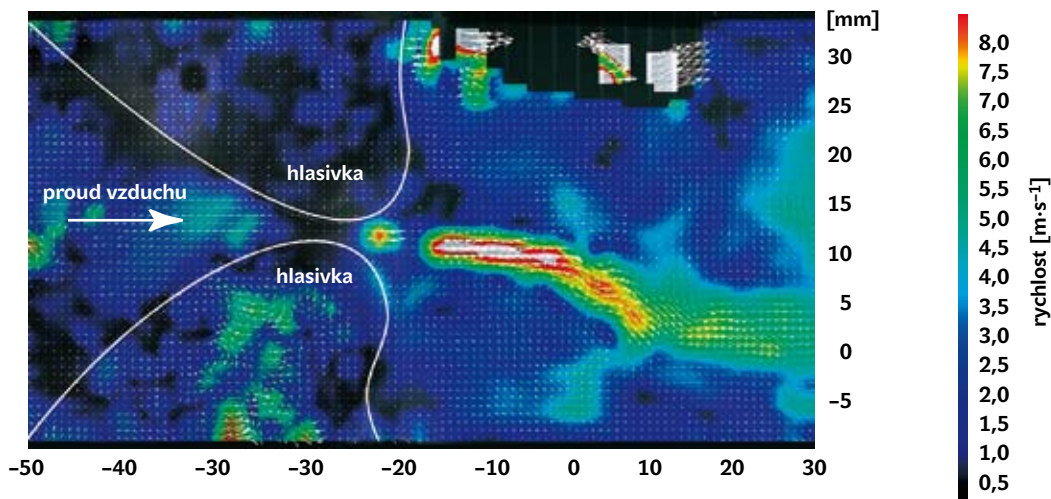
Důležitou informací je i detailní struktura proměnlivého proudového pole v oblasti hlasivek. Pole rychlostí proudění vzduchu kolem matematického modelu kmitajících hlasivek

Zcela nahoře: 1. Pole rychlostí proudění vzduchu kolem matematického modelu kmitajících hlasivek. Proudění směřuje zleva doprava, barevná stupnice udává velikost rychlosti v metrech za sekundu.

Dole: 2. Vlevo schéma nadhlasivkových prostor člověka, uprostřed detail hrtanu s hlasivkami a vpravo schéma kmitajícího modelu lidských hlasivek s pružinami a tlumiči.



3. Pole rychlostí proudění vzduchu kolem samobuzeně kmitajícího fyzikálního modelu hlasivek. Vektory udávají směr proudění, barevná stupnice velikost rychlosti v metrech za sekundu.



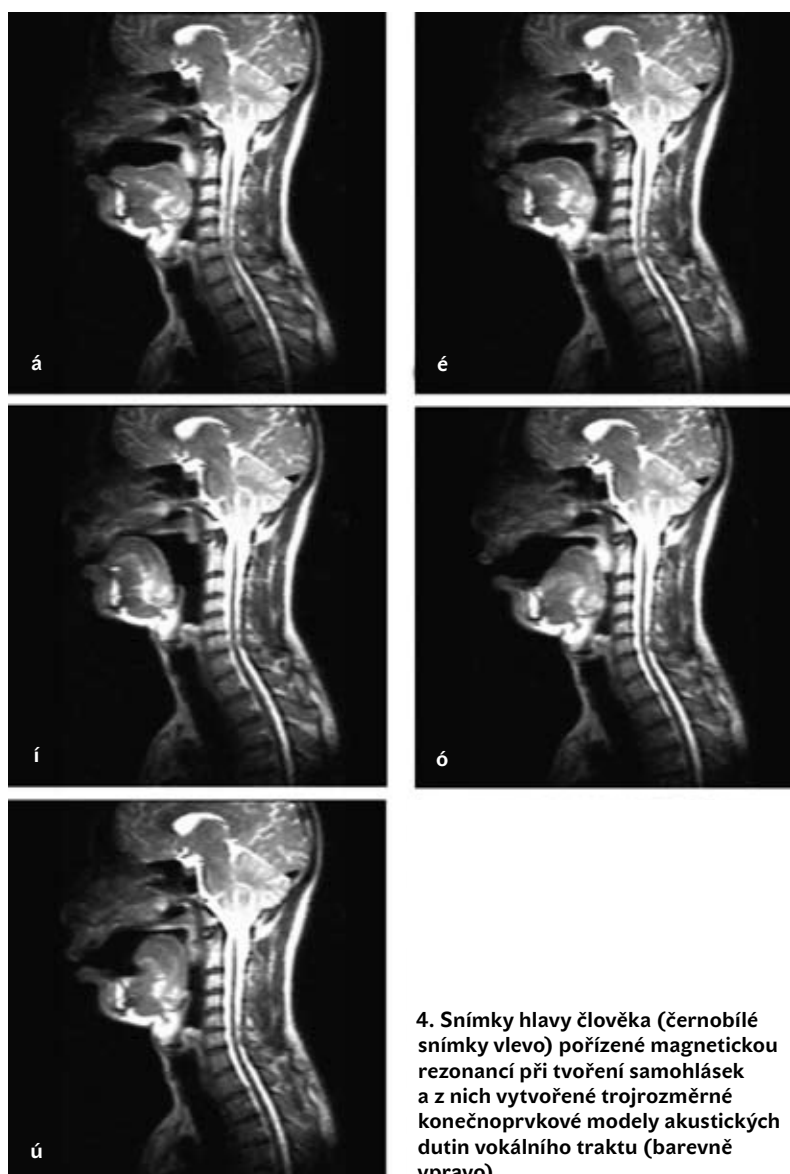
(obr. 1) lze numericky simulovat a vypočítat metodou konečných prvků.<sup>1</sup> Podobným způsobem lze experimentálně zjistit pole rychlostí proudění vzduchu kolem samobuzeně kmitajícího fyzikálního modelu hlasivek (obr. 3).<sup>2</sup>

Po několik let se zabýváme matematicko-fyzikálním modelováním hlasu člověka jak z hlediska poznávání základních

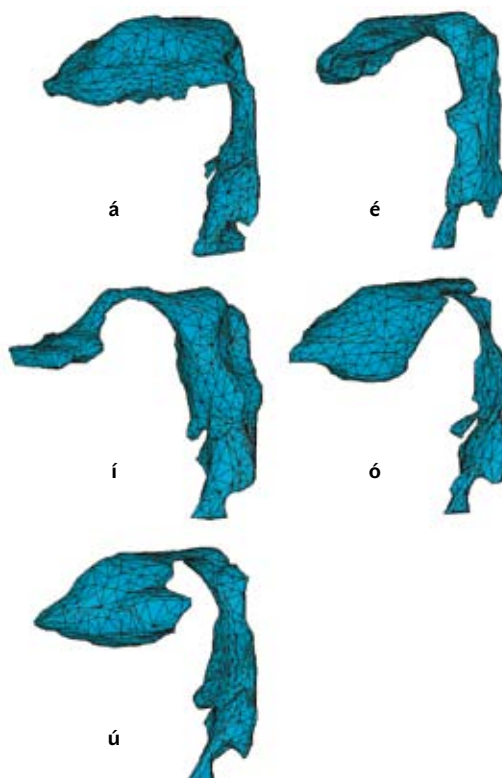
fyzikálních principů tvorby lidského hlasu, tak z hlediska možných klinických aplikací. Součástí výzkumu je vývoj hlasivkových protéz pro pacienty, kterým musel být kvůli zhoubnému nádoru odebrán hrtan, či modelování vlivu poškození (rozštěpu patra, vynětí mandlí, popřípadě patologických změn v oblasti hlasivek či nosního traktu) na hlasový projev.

Dosud se vhodný náhradní zdroj akustického signálu, vyvolávaného u zdravých lidí hlasivkami, nepodařilo navrhnout a zkonstruovat tak, aby produkoval dostatečně silný akustický signál s požadovanou základní frekvencí a vyššími harmonickými složkami vibrací, ale zároveň aby se vešel do rozměrů maximálně zhruba 5×5 mm a byl schopen dlouhodobě odolávat agresivnímu prostředí na rozhraní dýchacích a trávicích cest.

Navrhli jsme experiment pro laboratorní měření akustických a dynamických vlastností modelů hlasivkových protéz. Jazyčková protéza je rozkmitávána proudem stlačeného



4. Snímky hlavy člověka (černobílé snímky vlevo) pořízené magnetickou rezonancí při tvoření samohlásek a z nich vytvořené trojrozměrné konečnoprvkové modely akustických dutin vokálního traktu (barevně vpravo).



vzduchu, který přichází z modelu průdušnice. Měření je časově proměnný tlak v modelu průdušnice, průtočné množství vzduchu a také vyzařovaný akustický signál i jeho spektrum s různou mírou základní frekvence a vyšších harmonických složek, které ovlivňují barvu hlasu. Vibrace jazyčku jsou zobrazovány stroboskopicky,<sup>3</sup> nepravidelné, popř. chaotické kmity jsou snímány vysokorychlostní nebo videokymografickou<sup>4</sup> kamerou.

Aplikace základního výzkumu biomechaniky hlasu směřují i do oblasti diagnostiky hlasových poruch u hlasových profesionálů (herců, zpěváků, reportérů, učitelů) a rehabilitace hlasu. Trojrozměrné modely nadhlavivkových akustických prostor při tvoření českých samohlásek (obr. 4) byly získány na základě snímků pořízených magnetickou rezonancí. Nyní již se využívají při modelování tvorby zvuku zdravých i patologických hlasů, například u pacientů s rozštěpem patra či po vyjmutí mandlí.

Numerické simulace tvoření českých samohlásek lze získat také pomocí trojrozměrných modelů vokálního traktu (obr. 5). Zdrojovými signály jsou časové průběhy tlakových a rychlostních změn proudového pole v místě kmitajících hlasivek. Simulované výstupní akustické signály u lidských úst jsou zaznamenávány v časové oblasti do zvukových souborů, a kvalitu takto simulovaného hlasu lze pak hodnotit i poslechem.

Protože data simulované konečnoprvkovými metodami<sup>1</sup> lze zatím i s pomocí výkonné výpočetní techniky získat až za poměrně dlouhou dobu, hodí se v některých situacích modely daleko jednodušší, které pracují mnohem rychleji (obr. 6). Pro rozlišení jednotlivých samohlásek jsou nejdůležitější polohy prvních dvou (nejnižších) akustických rezonančních frekvencí – formantů.<sup>5</sup> Tímto způsobem jsou modelovány některé známé pěvecké techniky (při změně výšky tónu mění školný zpěvák tvar vokálního traktu), u kterých však není dostatečně podrobně

1) Metoda konečných prvků (MKP) – jedna ze základních numerických metod pro přibližné řešení okrajových úloh (zejména pro parciální diferenciální rovnice) na počítači. Řešená oblast se rozděluje na části, čímž vznikne síť konečných prvků. Tvar konečných prvků odpovídá tvaru a rozměru řešené oblasti či konstrukce.

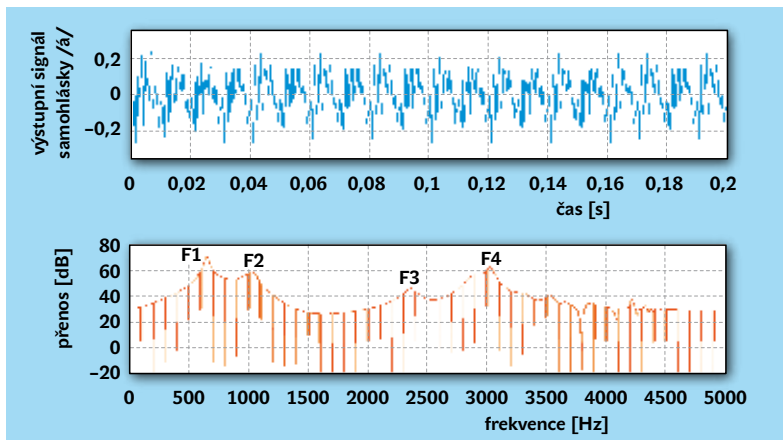
2) Měří se metodou PIV (Particle Image Velocimetry), což lze volně interpretovat jako měření rychlosti odrazu částice. Při průchodu laserového paprsku totiž částice, které byly záměrně rozptýleny ve vzduchu, odrážejí část světla.

3) Stroboskopie – podstatou metody jsou krátké pravidelné záblesky s rychlou frekvencí, které umožňují pozorovat pohyb hlasivkových vazů.

4) Videokymografie – ve vysokofrekvenčním modu je kamerou zaznamenáván obraz kmitání hlasivek frekvencí asi 8000 snímků za vteřinu. Tyto snímky klade kamera za sebe a vytváří z nich nový, vysokofrekvenční obraz, který znázorňuje způsob kmitání vybrané části hlasivek. Tak je možno vyšetřit jakékoli místo hlasivek. Nález lze zaznamenat jako videozáznam a archivovat ho.

5) Zjednodušeně lze říci, že nejnižší frekvence udávají výšku hlasu, ty vyšší udávají barvu.

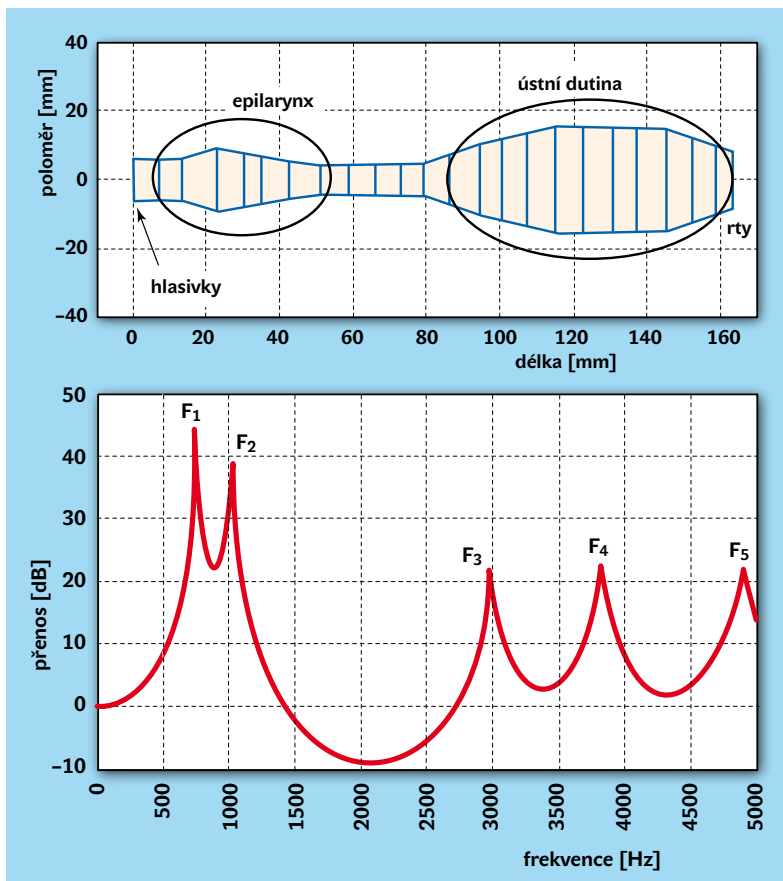
6) Na výzkumu a modelování hlasu člověka se v ČR podílí řada institucí – technických (Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i., a katedra mechaniky Fakulty strojní ČVUT v Praze a VUT v Brně), přírodovědných (oddělení biofyziky katedry experimentální fyziky na PFF UP v Olomouci) i lékařských respektive foniatrických (např. Medical Healthcom, s. r. o., v Praze, AudioFon centr v Brně, Foniatrická klinika 1. lékařské fakulty UK v Praze). Spolupráce probíhá i s pracovišti v zahraničí (např. s univerzitami v Tampere a Helsinkách ve Finsku, v Groningenu v Nizozemsku a s ENSTA v Paříži), a to jak v rámci grantových projektů grantových agentur GA ČR (např. projektu GA101/08/1155) a GA AV ČR, tak evropských programů EUREKA NewVoice a COST 2103 Advanced Voice Function Assessment.



5. Numerické simulace fonace české samohlásky /á/ získané pomocí trojrozměrného konečnoprvkového modelu vokálního traktu člověka. Graf znázorňuje přenosovou funkci vokálního traktu člověka se zřetelně patrnými akustickými vlastními frekvencemi – formanty F1-F4.

znám ani jejich fyzikální původ, ani fyziologické možnosti jejich dosažení.<sup>6</sup>

6. Zjednodušená geometrie hlasového traktu člověka pro tvoření samohlásky /á/ a vypočtená přenosová charakteristika s vyznačenými akustickými rezonančními frekvencemi – formanty F<sub>1</sub> až F<sub>5</sub>.



Ing. Jaromír Horáček, DrSc., (\*1946) vystudoval Fakultu jaderného a fyzikálního inženýrství ČVUT. V Ústavu termomechaniky AV ČR, v. v. i., je vedoucím oddělení dynamiky a vibrací a zástupcem ředitele pro vědu. Zabývá se kmitáním poddajných těles v interakci s tekutinami a mimo jiné i vibroakustickými vlastnostmi vokálního traktu.

RNDr. Jan Švec, Ph.D., (\*1966) vystudoval Přírodovědeckou fakultu UP v Olomouci. Na této fakultě se na katedře experimentální fyziky zabývá biomechanikou lidského hlasu. Působil též na Lékařské fakultě v nizozemském Groningenu a v Národním centru pro hlas a řeč v Denveru v USA. Je autorem metody videokymografie pro vizualizaci hlasivkových vibrací.

