

Člověk jako hudební nástroj

Pokud bychom lidský hlasový orgán posuzovali pouze podle velikosti, určitě by na hudebníky neudělal dojem. Jak je tedy možné, že zpěváci dokážou vytvořit tak pestrou paletu tónů? **Ingo R. Titze**

ZÁKLADNÍ POJMY

- n Ačkoliv je lidský hlasový orgán velmi malý, dokáže vytvořit zvuky a melodie tak různorodé a krásné, jako kterýkoliv hudební nástroj.
- n Všechny hudební nástroje mají zdroj zvuku, rezonátor, který zesiluje základní tón, a vysílač, který vysílá zvuk k posluchačům.
- n U člověka jsou zdrojem zvuku hlasové vazy v hrtanu, rezonátorem jsou zvuk zesilující dýchací cesty nad hrtanem a vysílačem jsou ústa.
- n Lidský hlas může vytvořit širokou paletu zvuků proto, že se řídí nelineárními efekty, při kterých malá vstupní hodnota způsobí překvapivě velký výstupní efekt.

—Redakce

V porovnání s tradičními hudebními nástroji by lidský hlasový orgán skutečně mnoho obdivu nesklidil. Velikostí by se hrtan (*larynx*) spolu s dýchacími cestami, v kterých je uložen, přiřadil k nejmenšímu hudebnímu nástroji – pikole. A přesto mohou zkušení zpěváci směle soutěžit s jednotlivými mechanickými nástroji, a dokonce i s celými orchestry. Nedávné výzkumy zaměřené na studium našeho hlasu a způsobu tvorby široké škály zvuků odhalily překvapivou složitost chování jednotlivých součástí hlasového orgánu i jejich interakcí.

Více než půl století vysvětlovali vědci schopnost hlasu vytvořit píseň pomocí takzvané lineární teorie akustiky řeči, kdy zdroj zvuku i zvukový rezonátor (neboli zesilovač) pracují nezávisle [*viz* „The Acoustic of the Singing Voice“, Johan Sundberg, *Scientific American*, březen 1977]. Výzkumníci však nyní zjistili, že při tvorbě lidského hlasu hrají překvapivě důležitou roli nelineární interakce, při nichž zdroj a zesilovač závisí jeden na druhém. Tyto objevy konečně umožňují přesně popsat, jakým způsobem slavní zpěváci vytvářejí úžasný zvuk svého hlasu.

Klíčové prvky pro tvorbu zvuků

Strukturální i funkční nedostatky jsou patrné ve všech částech lidského hlasového orgánu. Aby mohl hudební nástroj vytvářet hudbu, potřebuje tři základní součásti: zdroj zvuku, který rozechvívá vzduch a vytváří frekvenci, kterou vnímáme jako základní tón, plus vyšší harmonické frekvence, které vnímáme jako barvu zvuku; jeden nebo více rezonátorů, které zesilují základní frekvenci prostřednictvím posílením velikosti vibrací; a vysílač nebo výstupní otvor, který zvuk vyzařuje do volného okolního vzduchu a popřípadě až k uchu posluchače.

V případě trubky například hudebníkovy rty vibrují díky vzduchu vycházejícímu z plic, jenž jimi prochází do nálevkovitého nástavku. Rty tak vytvářejí základní frekvenci plus několik frekvencí vyšších, které nazýváme vyšší harmonické tóny. Kovová trubice celého nástroje slouží jako zesilovač a výstupní rozšiřující se otvor zvuk vysílá do okolí. Trumpetista mění základní frekvenci pomocí změny napětí rtů a dále stisknutím klapky, které mění efektivní délku trubice. Nebo si vezmeme housle: vibrující struny vytvářejí tóny, centrální vzduchová komora a povrch houslí je rezonátorem a otvory ve tva-



OBDIVUHODNĚ FLEXIBILNĚ vytváří lidský hlas zvuky v tak široké škále a složitosti, jako běžné hudební nástroje, ale s mnohem menším vybavením.

ru houslového klíče na horní desce houslí mají funkci vysílače.

Zpěvák se na druhou stranu spoléhá na chvění hlasivek, které v proudícím vzduchu vytvářejí základní zvuky. Hlasivky jsou dva malé proužky specializované tkáně, někdy nazývané „hlasové vazy“, které vystupují ze stěn hrtanu. Základní zvukové frekvence vytvářejí díky rychlým oscilacím způsobeným opakovanými vzájemnými dotyky. Glottis (prostor mezi hlasivkami) se periodicky otvírá a zavírá. Vchod do hrtanu, část dýchacích cest přímo nad hrtanem, má podobnou funkci jako náustek u trubky: předává zvuk do další části zesilovače známé pod pojmem hlasový aparát. Rty pak vypouštějí zvuk navenek, obdobně jako výstupní část trubky.

Výrobci hudebních nástrojů by při zkoumání hlasivek, které mají obvykle velikost nehtu na palci, neshledali jejich potenciál pro tvorbu koncertních zvuků zajímavým. Kromě toho, že jsou opravdu velmi malé, se ihned nabízí další závažná námitka: zdají se být příliš měkké s houbovitou konzistencí, než aby mohly vydržet vibrace schopné vytvořit tak širokou škálu tónů.

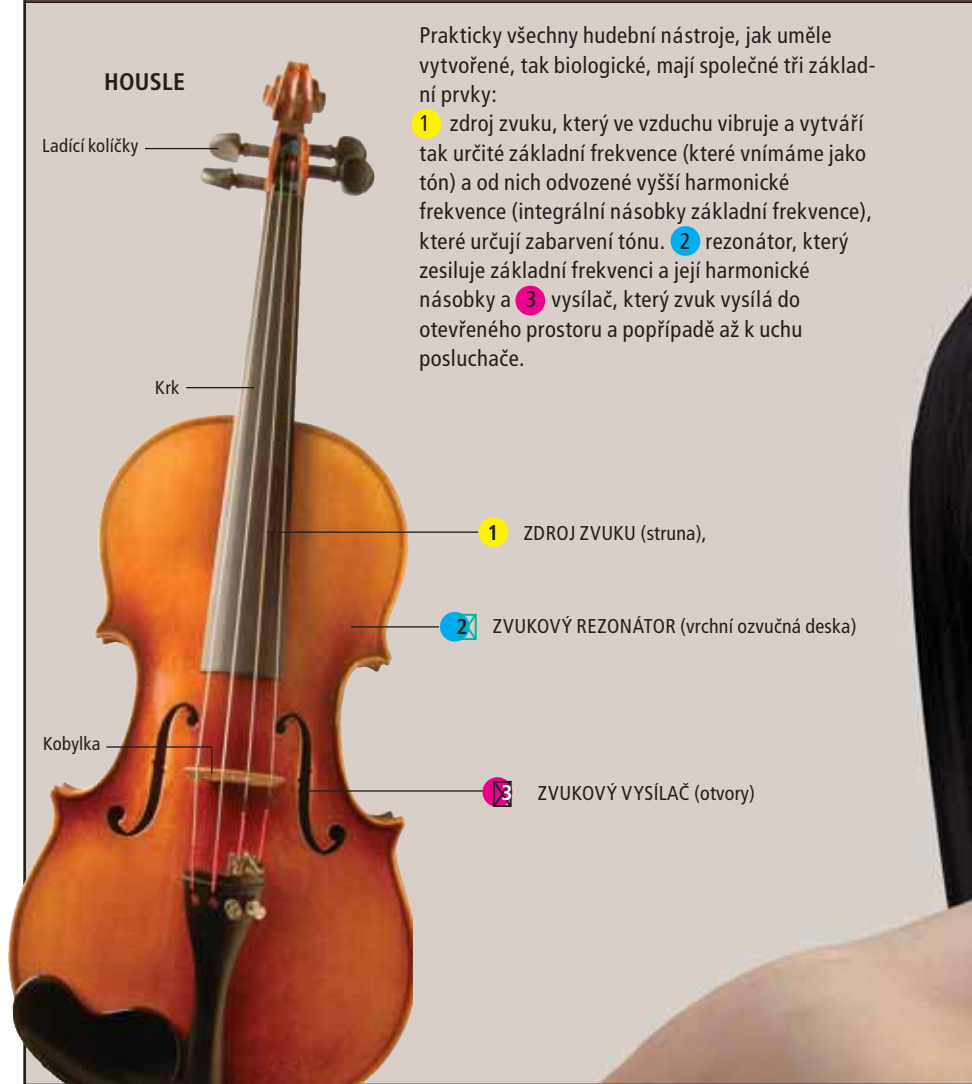
Tvůrce takového biologického nástroje by mohl přirozeně namítnout, že přestože jsou hlasivky malinké, dýchací cesty mohou zvuk jdoucí z hrtanu velmi výrazně zesílit. To by však výrobce hudebních nástrojů opět nepřesvědčilo: typické dýchací cesty dospělého člověka ční 15 až 20 cm nad hrtan a asi 12 až 15 cm pod něj, tedy ne víc, než je velikost nejmenší flétny. Ostatní části těla k zesílení zvuku přispívají velmi málo nebo dokonce vůbec ne. Dechové nástroje, které vytvářejí obdobné zvuky jako lidský hlas (pozoun, trubka, fagot), mají obvykle mnohem delší trubici; pokud bychom například rozvinuli všechny záhyby trubky do roviny, měřila by asi dva metry a pozoun dokonce tři metry.

Základní design zdroje

Abychom pochopili, jakým způsobem příroda hlasový orgán vytvořila, musíme nejdříve zdůraznit základní požadavky, které musí zdroj zvuku splňovat. Aby struna nebo jazýček dechového nástroje vydržely permanentní vibrace, musí být vyrobeny z vhodného elastického materiálu, který se po deformaci navrátí do původního stavu. Elasticita je hodnocena tuhostí (nebo naopak poddajností) a napětím: jazýček dechového nástroje má určitou tuhost ohybu, struna vibruje pod určitým napětím. Obecně

[ZÁKLADY]

JAK FUNGUJÍ HUDEBNÍ NÁSTROJE



Prakticky všechny hudební nástroje, jak uměle vytvořené, tak biologické, mají společné tři základní prvky:

1 zdroj zvuku, který ve vzduchu vibruje a vytváří tak určité základní frekvence (které vnímáme jako tón) a od nich odvozené vyšší harmonické frekvence (integrální násobky základní frekvence), které určují zabarvení tónu. 2 rezonátor, který zesiluje základní frekvenci a její harmonické násobky a 3 vysílač, který zvuk vysílá do otevřeného prostoru a popřípadě až k uchu posluchače.

LINEÁRNÍ VERSUS NELINEÁRNÍ

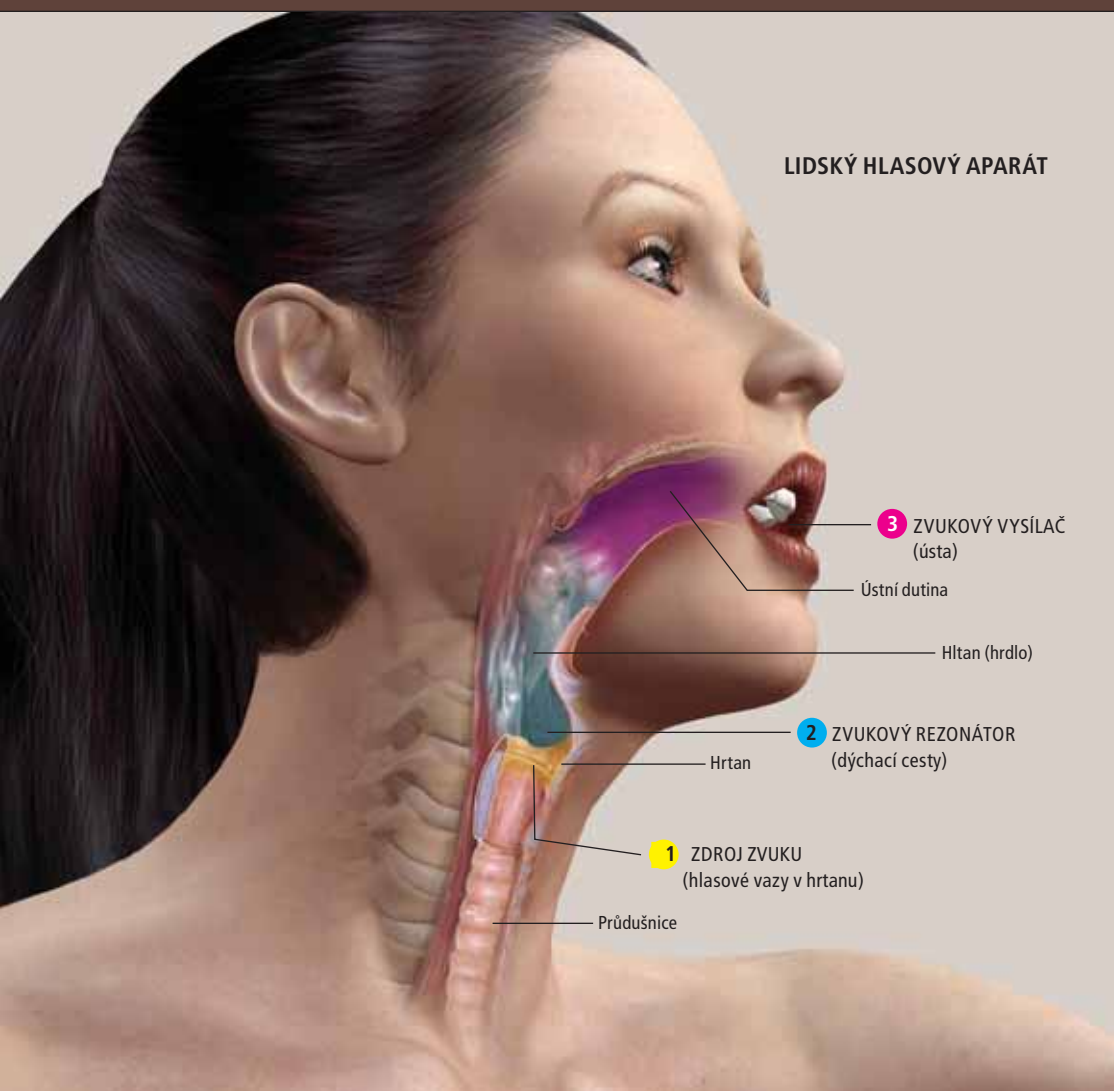
Akustici dříve vysvětlovali funkci lidského hlasového aparátu termíny lineárních efektů; takovými, kdy výstup je přímo úměrný hodnotám na vstupu (a může tedy být znázorněn například přímkou). Nedávno však vědci zjistili, že lidský hlasový orgán se chová nelineárně. V nelineárním zpětnovazebném systému mohou malé změny vést k disproportionálně velkým účinkům.

řečeno, tuhost nebo napětí zdroje zvuku určuje frekvenci vytvořených tónů podle exponenciální rovnice. Aby ocelová struna zdvojnásobila svoji frekvenci (zvýšila tón o jednu oktávu), musíme její napětí zvýšit čtyřikrát. Tento přísný požadavek prakticky omezuje škálu použitelných frekvencí získatelných ovlivněním tuhosti či napětí zdroje zvuku.

Hudebník naštěstí může frekvenci zvuku změnit také prodloužením či zkrácením vibrujícího prvku. U vibrující struny je například frekvence nepřímo úměrná délce vibrujícího segmentu. Díky stisknutí struny prstem může hudebník zvolit přesnou frekvenci. Pokud strunu zkrátíme na polovinu, frekvence se zdvojnásobí. Pro rozšíření spektra jednotlivých frekvencí hudební nástroje většinou používají více strun.



Ingo R. Titze je světovou jedničkou ve studiu lidského hlasu. O problematice publikoval již více než 500 článků. V současnosti je mimořádným profesorem na klinice Audiologie a patologie řeči na Iowaské univerzitě a vede též Národní centrum pro hlas a řeč (www.ncvs.org) v Denverském centru aplikovaného umění. Titze, který obhájil titul Ph.D. z fyziky na Univerzitě Birghama Younga v roce 1972, vyučuje zpěv a řeč v mnoha stylech, včetně opery, Broadwaye, popu apod.



VŘÍSKAJÍCÍ ROCKER Steven Tyler je oslavován pro svou schopnost hlasitě řvát. Vedoucí zpěvák skupiny Aerosmith vytváří tak extrémní zvuk použitím velkého množství nelineárních efektů při vokalizaci.

LIDSKÝ HLASOVÝ APARÁT

Strunné nástroje mají tedy pro změnu frekvence tři odlišné metody: změnu délky struny, změnu jejího napětí a použití další struny. Hráči na strunné nástroje obvykle nastavují napětí struny jejím navinutím na ladicí kolíček a struna má pak po celou dobu stálé napětí. Hudebníci prakticky nikdy nemohou manipulovat zároveň s napětím i délkou struny.

Malý zdroj zvuku, který to dokáže.

Při používání hlasového aparátu musí zpěváci na rozdíl od hudebníků měnit pro změnu frekvence zároveň napětí i délku hlasivek. Místo prstu, který efektivně délku struny zkracuje jejím stlačením proti pevné podložce, měníme délku hlasivky pomocí příčné pruhovaných hlasových svalů. Chceme-li však zvýšit frekvenci hlasivky, měli bychom její efektivní délku zkrá-

tit nebo prodloužit? Oba způsoby mají svá opodstatnění. Delší hlasivka bude vibrovat s nižší frekvencí, zatímco napjatější hlasivka bude vibrovat s frekvencí vyšší.

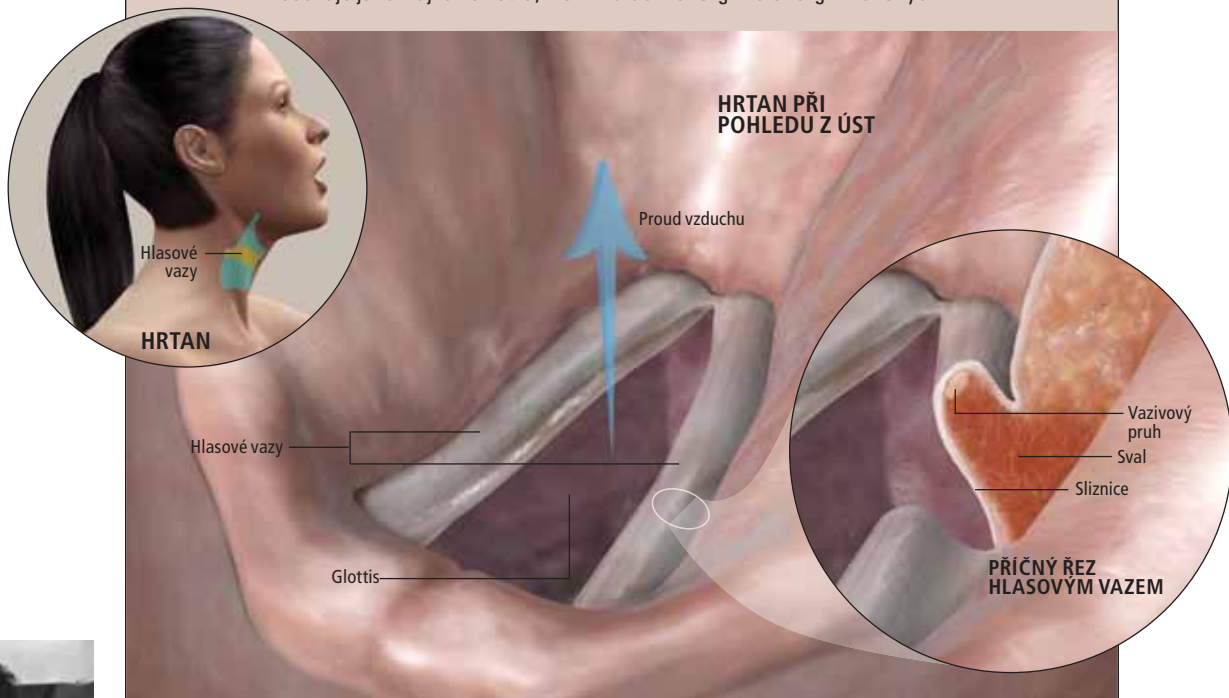
Fyzikální vzorec popisující frekvenci napjaté struny fixované na obou koncích říká, že pro maximální zvýšení frekvence je třeba zvýšit napětí (vlastně napínací sílu nebo napětí na jednotku průřezu) a zkrátit délku. To však vyžaduje nestandardní materiály, protože většina z nich může zvýšit napětí jen tehdy, když se zároveň prodlouží jejich délka. Typickým příkladem je guma; zatáhnete za ni a ona se napne. Délka a napětí tak soupeří v boji o zvýšení frekvence.

Tyto problémy příroda vyřešila tak, že hlasivky sestavila z tří druhů materiálů, které mají dohromady vlastnosti, jež u standardních hudebních nástrojů nenalzáme. Jedním materiálem je

[ZDROJ LIDSKÉHO HLASU]

JAK FUNGUJÍ NAŠE HLASIVKY

Na rozdíl od houslových strun má zdroj lidského hlasu – hlasové vazy (nebo hlasivky) v hrtanu – složitou strukturu skládající se ze tří částí a to nám umožňuje vytvořit zvuky o frekvencích několika oktáv. Uprostřed každé hlasivky je natažen struně podobný vazivový pruh (viz příčný řez). Pod tímto vazem jsou příčně pruhované svaly. Všechny tyto součásti kryje vysoce poddajná sliznice. Každý prvek má pro celý orgán specifický přínos. Vnitřní napětí vazivového pruhu se při natažení významně zvyšuje (natažení zajišťují vnitřní i vnější svaly připojené k chrupavkám ovládajícím hlasové vazy) a to zpěvákovi pomáhá vyzpívat ty nejvyšší frekvence. Vnitřní svaly pak zvyšují napětí hlasivek a to frekvenční rozsah ještě dále zvyšuje. Měkký poddajný povrch vnější sliznice, který ve vzduchu proudícím z plic osciluje jako vlajka ve větru, mění vibrační energii na energii zvukových vln.



HRTAN

Hlasové vazy

Glottis

HRTAN PŘI POHLEDU Z ÚST

Proud vzduchu

PŘÍČNÝ ŘEZ HLASOVÝM VAZEM

Vazivový pruh
Sval
Sliznice



HVĚZDA BROADWAYE Ethel Mernanová zpívala všechny své písně s precizní výslovností a dokonalou intonací, takže ji posluchači dobře slyšeli i bez mikrofonů. Ženský alt je zesilován v dýchacích cestách pomocí inertivní reaktance [viz rámeček na protější straně], která zesiluje druhou harmonickou frekvenci (dvojnásobek základní frekvence).

vazivo, které vypadá trochu jako struna, a je důvodem, proč se hlasivky nazývají hlasovými vazy. Vědci při biomechanických testech prokázali, že při malém natažení stoupá napětí v tomto vazivu nelineárně; pokud je hlasivka krátká, může být doslova splihlá, ale již při malém natažení je její napětí obdivuhodné. Natažení hlasového vazy z 1,0 cm na 1,6 cm může zvýšit jeho vnitřní napětí třicetkrát a to způsobí změnu frekvence více než 5 : 1 (vzpomeňte si na dříve zmíněnou exponenciální funkci). Skutečnost, že se délka hlasivky prodloužila o 60 % však sníží frekvenci vibrací a skutečná změna frekvence pak bude v poměru 3 : 1, asi jeden a půl oktávy, řečeno hudebními termíny. Většina z nás mluví a zpívá asi v tomto rozsahu, ale někteří zpěváci mají rozsah 4 až 5 oktáv, což je vědci doposud považováno za zcela mimořádné.

Složitě hlasivky

Příroda si našla další způsob, jak zvýšit hudební rozsah hlasového aparátu včetně možnosti

zvýšit jak napětí, tak zkrátit použitou tkáň – jmenovitě tkáň svalovou. Vnitřní zkrácení svalových vláken může zvýšit napětí hlasivek, i když je vlastní hlasový vaz také zkrácen. Asi 90 % objemu hlasových vazů tvoří svalová vlákna. Příroda prostě vyřešila problém s tvorbou tónů použitím několika strun položených paralelně vedle sebe do vrstev, přičemž některé vrstvy mají vlastnosti kontraktálního materiálu a jiné ne. Jak ale mohou hlasivky nepřetržitě vibrovat, když se na ně uvnitř hrtanu nedá hrát? Jediným zdrojem energie schopným hlasové vazy deformovat, a tudíž navodit vibrace – způsobem, kterým vlající vítr nutí vlajku vydávat pleskavé zvuky – je vzduch proudící z našich plic. Samotné svaly a vazy by však byly příliš tuhé a vzduch proudící kolem jejich povrchu by vibrace nevyvolal. Aby vznikly vzduchem generované vibrace, musí být hlasivky pokryty měkkým a poddajným materiálem, který na procházející vzduch odpoví tvorbou vln podobných vlnkám vytvořeným větrem na povrchu oceánu

BETTMANN/CORBIS (Mernan); ADAM QUESTEL (ilustrace)

[viz „The Human Voice“, Robert T. Sataloff, Scientific American, prosinec 1992].

Proto mají hlasové vazy ještě třetí vrstvu; slizniční membránu pokrývající vazivovou a svalovou tkáň hlasivky, která zprostředkovává funkci přeměny energie. Tato sliznice, která se skládá z tenké povrchové epitelální vrstvy a spodní tkáň podobné tekutině, je snadno deformovatelná a podporuje vznik takzvaných povrchových vln. Spolu se svými kolegy jsem matematicky prokázal, že tyto vzduchovým proudem generované vlny udržují vibrace hlasového aparátu. Tyto kroutivé pohyby způsobují, že tkáň hlasivky vypadá, jako by se odshora dolů skládala, proto se hlasivkám někdy říká slizniční výchlípky.

Hra na hlasové vazy

Jakým způsobem tedy tento třívrstevný materiál vytváří hudební frekvence v rozsahu několika oktáv? Jedině díky velikým zkušenostem a talentu. V pozadí vytváření hlasu vždycky číhají chaotické efekty, protože o dominantní postavení svádí boj mnoho různých přirozených frekvencí (volných vibrací). Toto soutěžení může

vyústit v neočekávané skoky v hlase a hrubosti produkovaného zvuku [viz „The Throat Singers of Tuva“, Levin Edgerton; Scientific American, září 1999].

Pro nižší frekvence a střední až silnou hlasitost zpěváci aktivují hlasové svaly a k tvorbě vibrací používají všechny tři vrstvy hlasivek. Hlasivky jsou krátké a výšku tónu určuje hlavně napětí hlasových svalů. V tomto případě jsou sliznice i vazivo relaxované (uvolněné) a slouží hlavně k šíření požadovaných povrchových vln, což udržuje vlastní vibrace. Při snižování hlasitosti těchto tónů svaly nevíbrují a jsou využity výhradně k regulaci délky hlasových vazů. Frekvenci určuje kombinace elasticity sliznice a vaziva. Pro tvorbu vyšších tónů zpěvák prodlužuje efektivní délku hlasivky; hlasové vazy se napínají a diktují výšku frekvence, zatímco sliznice zajišťuje povrchové vlnění.

Není těžké si představit, jak komplikovaný musí být řídicí systém a inervace svalů hrtanu, aby mohla být zajištěna jemná regulace změn napětí jednotlivých součástí celého systému pro vytváření přesných frekvencí a úrovně hlasitos-

VĚDĚLI JSTE TO?

Lidé mají tendenci přirovnávat celé tělo k hudebnímu nástroji, které by tak bylo objemem srovnatelné se dvěma basami. Ale většina částí lidského těla k tvorbě zvuku vůbec nepřispívá – ani hrudník, ani záda či břicho, ani zadek a vůbec ne končetiny. Veškeré zvuky jsou tvořeny v hrtanu a v dýchacích cestách.

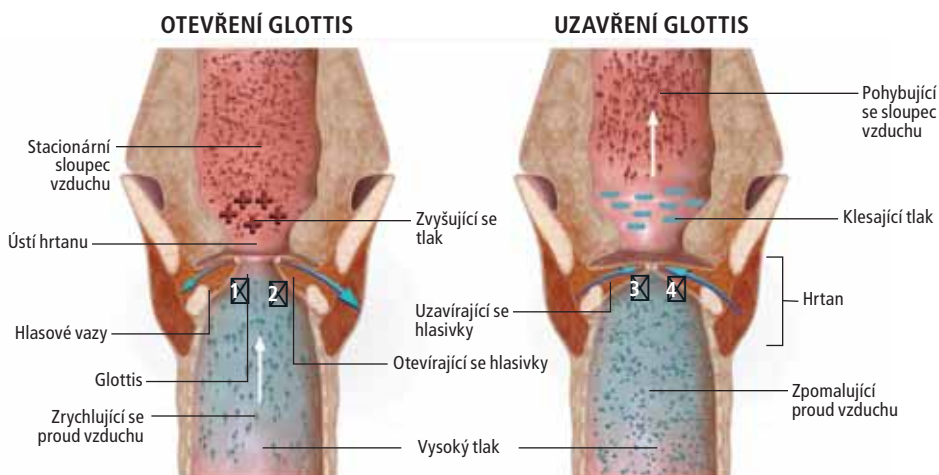
[LIDSKÝ ZVUKOVÝ ZESILOVAČ]

JAKÝM ZPŮSOBEM ZESILUJÍ DÝCHACÍ CESTY ZVUK

Zpěváci používají k rezonanci či k zesílení zvuků vytvořených hlasovými vazy proces nelineární zpětnovazební energie. Tento proces, nazývaný inertivní reaktance, se uplatňuje tehdy, když zpěváci vytvářejí v dýchacích cestách speciální podmínky pro posílení každého otevření a uzavření glottis. To posiluje vibrace vzduchového sloupce a vytváří silnější zvukové vlny.

Tento energetický impuls se uplatňuje, když je vzduchový sloupec v ústí hrtanu zpomalen s ohledem na pohyb hlasových vazů. Když se hlasové vazy na začátku oscilace začínají od sebe oddělovat (1), vzduch z plic proudí do mezery mezi hlasivkami

zvané glottis a zatlačí na nehybný sloupec vzduchu nad hrtanem. Tím se zvýší tlak vzduchu nad hlasovými vazy a ty se ještě více oddálí (2). Následně plíce urychlí pohyb vzduchové hmoty směrem nahoru. Jak se proud vzduchu pohybuje, elastické síly přiblíží hlasivky k sobě, uzavřou glottis a přeruší proud vzduchu z plic (3). Tyto jevy vytvoří nad glottis částečné vakuum a tím se hlasové vazy přimknou pevněji k sobě (4). A tak díky efektu dobře načasovaných postrčení dítěte na houpačce zesiluje inertivní reaktance sloupce vzduchu v hlasovém aparátu každý kmit hlasivek.

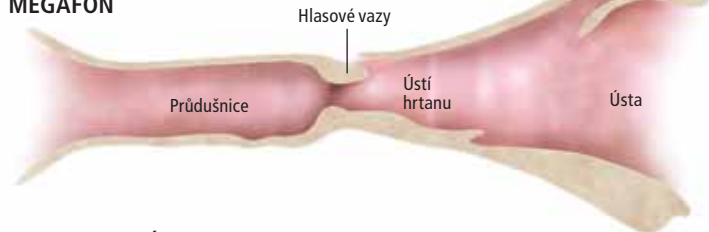


VELKÁ A MALÁ ÚSTA

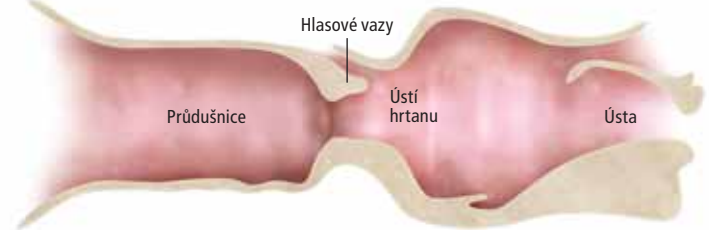
Jako trubkovitý zesilovač zaujímá lidský hlasový aparát určitý tvar, aby lépe vyhovoval vysílání určitých zvuků a rezonančních tónů. Zpěváci kvůli vyzpívání nejvyšších tónů často otvírají ústa co nejvíce mohou. Tato takzvaná konfigurace megafonu připomíná též trubku (*nahoře*), kdy hlasové vazy a ústí hrtanu mají funkci „rtů“ a náustku a ústa mají funkci rozšíření na konci trubky. Pro ostatní pěvecké styly je lepší tvar invertovaného megafonu – to znamená, že ústa jsou spíše v úzkém postavení.



MEGAFON



INVERTOVANÝ MEGAFON



ti. Svaly hrtanu mimo hlasivky přesně určují délku hlasových vazů. Během těchto složitých manipulací se může náhle změnit kvalita hlasu, což je známý fenomén nazývaný registrace. Ve velké většině případů je způsoben zvýšeným nebo sníženým využitím hlasových svalů pro řízení napětí prvků hlasového aparátu. Zpěváci využívají registraci umělecky k vytvoření dvou kvalitativně odlišných hlasů – jako například při jódlování. Pokud ovšem zpěvák změní registraci nevědomky či náhodně, působí to na diváka rušivě a takováto změna hlasu naznačuje neschopnost plně ovládat hlasový orgán.

Rezonující dýchací cesty

U většiny hudebních nástrojů určuje rezonátor jeho tvar a velikost, ale zpěváci si musí poradit s předem daným prostorem o objemu lahve piva. Přesto si lidský rezonátor vede překvapivě dobře.

U hudebních nástrojů způsobují jejich desky, boky, plechové zvony, rohy či trubky zesílení frekvencí produkovaných zdrojem zvuku. Například u houslí vedou struny přes takzvanou kobylku, která je přímo spojena s vrchní ozvučnou deskou pečlivě navrženou tak, aby souhlasně vibrovala s většinou přirozených frekvencí, které struny vytvářejí a tím je zesilovala. Masa vzduchu mezi vrchní a spodní ozvučnou deskou může oscilovat také na přirozených frekvencích strun. U mnoha plechových (žesťových) a dřevěných dechových nástrojů je hlavní trubka

i s klapkami navržena tak, aby podporovala většinu frekvencí svého zdroje zvuku, bez ohledu na právě vytvářený tón.

Protože fyzikální zákony říkají, že všechny stále (kontinuální) zvuky se skládají ze zdrojových frekvencí harmonicky prostorově uspořádaných – tedy z vyšších harmonických frekvencí odvozených od základní frekvence zdroje v integrovaných násobcích (2:1, 3:1, 4:1, ...) – rezonátor musí být často velmi objemný, aby takové prostorové násobky základní frekvence obsáhl. Díky tomuto fyzikálnímu zákonu je délka trubky 1,2 metru, délka pozouny je 3 až 9 metrů (podle druhu) a rozvinutý francouzský roh má délku 3,7 až 5,2 metru.

Na lidském rezonátoru příroda vyloženě skrbčila. Celková délka dýchacích cest nad hrtanem je u člověka maximálně 17 cm. Nejnižší zesílitelná frekvence je tudíž asi 500 Hz (cyklů za sekundu) – a při použití určitých samohlásek je to pouhá polovina (například u nebo i ve slovech „kúl“ nebo „díl“). Protože lidský hlasový aparát je zesilovačem, který je na jednom konci prakticky uzavřen, jeho rezonanční frekvence zahrnují pouze liché násobky (1, 3, 5, ...) nejnižší rezonanční frekvence. Proto tato krátká trubice může současně zesílit pouze liché násobky základní frekvence 500 Hz (500Hz, 1500Hz, 3500Hz, ...). A protože lidský hlasový orgán nemůže měnit svou velikost pomocí klapky či šoupátek (kromě pár centimetrů předsunutím rtů nebo snížením polohy hrtanu), coby rezoná-



Joan Sutherlandová instinktivně věděla, že při zpívání určitých tónů nelze některé samohlásky použít. Tato australská sopranistka v textu svých oper některé samohlásky měnila (dokonce i když to mělo za následek špatnou výslovnost) jen proto, aby dokonale vyhovovaly zpívaným tónům.

tor se zdá být beznadějně odsouzen k striktně omezené činnosti.

Zesílení v krátké trubici

Nedávné výzkumy naznačují, že i v této oblasti záchrana přináší nelineární efekty. Tentokrát to jsou nelineární vztahy mezi jednotlivými součástmi systému. Spíše než zesilování každé harmonické frekvence zvláště (jako je tomu například u varhanních píšťal, kde pro každou frekvenci slouží určitá délka jedné píšťaly), zesiluje náš hlasový orgán skupinu harmonických frekvencí dohromady pomocí procesu zpětno-vazebné energie. Hlasový trakt dokáže uchovat akustickou energii jedné části vibračního cyklu a předat ji zpět zdroji zvuku v jiný, výhodnější časový okamžik. Výsledkem je, že hlasový trakt „nakopne“ každý oscilační cyklus hlasových vazů a to zesílí amplitudu vibračních pohybů. V analogii k rozhoupávání dítěte na houpačce toto „nakopávání“ připomíná pečlivě načasované strkání do kolen potomka, aby se postupně zvětšily výkyvy houpačky.

Ideální načasování těchto hlasových postrčení přichází v okamžiku, kdy je pohyb vzduchového sloupce zpožděn s ohledem na pohyb hlasových vazů. Vědci říkají, že vzduchový sloupec má pak inertivní reaktanci (pomalou nebo stagnující reakci na aplikovaný tlak) Inertivní reaktance pomáhá udržet pomalu indukované oscilace hlasových vazů mnohonásobně zesíleným způsobem [viz rámeček na straně 43].

Když se na začátku vibračního cyklu hlasové vazy oddalují, začne mezi nimi proudit vzduch z plic a působí tlakem na stacionární sloupec vzduchu hned nad vstupem do hrtanu. Tlak vzduchu v glottis a nad ní se zvyšuje a sloupec vzduchu se pohne směrem nahoru, což umožní další vzduchové mase z plic vyplnit prostor pod ním. To ještě více zvýší zesílení tlakových vln. V okamžiku, kdy se díky elastickým silám hlasové vazy přimknou k sobě a glottis se uzavře, proud vzduchu z plic se zastaví. Díky inerci se však vzduchový sloupec nadále pohybuje směrem nahoru nad glottis vytváří částečné vakuum, díky čemuž se hlasové vazy přimknou ještě více k sobě. A tak díky efektu dobře načasovaných postrčení dítěte na houpačce zesiluje inertivní reaktance sloupce vzduchu v hlasovém aparátu každý kmit hlasivek.

Přesto se hlasový orgán nechová automaticky tímto inertivním způsobem při tvoření všech druhů tónů. Úkolem zpěváka je nastavit tvar hlasového orgánu (pečlivým výběrem zpívaných samohlásek) tak, aby byla inertivní reaktance



ITALSKÝ TENOR Luciano Pavarotti, známý pro svůj brilantní, nádherný hlas, vytvářel mohutné zesílení svého hlasu pomocí přesného nastavení nelineární inertivní reaktance ve svém hrdle.

CHCETE-LI VĚDĚT VÍCE:

The Physics of Small-Amplitude Oscillation of the Vocal Folds.

I. R. Titze v *Journal of the Acoustical Society of America*, díl 83, č. 4, strany 1536–1552; 1988.

Acoustic Systems in Biology.

Neville H. Fletcher. Oxford University Press, 1992.

Vocal Tract Area Functions from Magnetic Resonance Imaging.

B. Story, I. Titze and E. Hoffman in *Journal of the Acoustical Society of America*, díl 100, č. 1, strany 537–554; 1996.

Principles of Voice Production.

Reprint. I. R. Titze. National Center for Voice and Speech, 2000. www.ncvs.org

The Physics of Musical Instruments.

Second edition (corrected fifth printing). N. H. Fletcher and T. D. Rossing. Springer, 2005.

využita pro co největší množství tónů – a to je rozhodně nesnadná úloha.

Ústa jako megafon

Různé druhy zpěvu závisejí na různých druzích tvaru hlasových orgánů, podporujících různé druhy inertivní reaktance. Při vytváření široké samohlásky e mají ústa tvar megafonu. Malý otvor mezi hlasivkami je sdružen s velkým otvorem v ústech [viz rámeček na protější straně]. Zpěváci mohou najít inertivní reaktanci ve frekvencích 800 Hz až 900 Hz a ženy ještě o 20 % výše. Přinejmenším u dvou harmonických frekvencí lze použít inertivní reaktanci při tvorbě vysokých tónů a několikrát více u tónů nižších. Tento fakt znamená, že jednou ze strategií zesílení tónů může pro zpěváka být široké otevření úst, jako při halekání. Pokud je hlasový trakt zakončen tímto tvarem, má přibližně tvar amputované trubky, ovšem bez střední části a všech klapek, ale s výstupním rozšířením.

Alternativním přístupem k zesílení vibrací hlasivek pomocí inertivní reaktance je zaujetí tvaru takzvaného obráceného megafonu. Při něm je vchod do hrtanu – tedy „náustek“ – úzký, hltan (část hrdla nacházející se hned za dutinou ústní a vzadu pod nosními dutinami) je rozšířen co nejvíce a ústa jsou poměrně úzká. Toto nastavení je vhodné pro vytváření samohlásky u. Technika obráceného megafonu je nejvhodnější pro zpěvačky z oboru vážné hudby, které chtějí zpívat uprostřed svého hlasového rozsahu a pro zpěváky vážné hudby, kteří se pohybují v horní části svého rozsahu. Výuka klasického zpěvu zahrnuje hledání dalších oblastí rozsahu zpěvákovy rejstříku, ve kterých hlasový orgán poskytuje pro zesílení základních frekvencí inertivní reaktanci u většiny samohlásek. Výcvik zahrnuje též trénink takzvaného vibráta, při kterém se kombinují úzká ústa se širokým hrtanem. Učitelé zpěvu používají termíny jako „překrytí hlasu“ nebo „překlopení hlasu“ pro popis procesu výběru správné samohlásky k jednotlivým tónům tak, aby co nejvíce zdrojových frekvencí uplatnilo inertivní reaktanci.

Jednotlivé styly zpěvu jsou založeny na tom, co může lidský hlasový orgán poskytnout coby kvalitní hudební nástroj. Vědci, kteří studují jednotlivé prvky lidského hlasového aparátu a jeho překvapivé funkční vlastnosti, shromáždili množství důkazů o metodách, díky kterým umělečtí pěvci vytvářejí své nádherné písně. Jak vědci, tak zpěváci budou nadále ze své úzké spolupráce profitovat. n