

Akustika klasicky a s počítačem

JOSEF HUBEŇÁK

Přírodovědecká fakulta UHK, Hradec Králové

Abstrakt

V přípravě učitelů fyziky je vhodné připomínat historický vývoj poznání v jednotlivých oborech. Pokud to je možné, mají budoucí učitelé dostat do rukou i historické pomůcky a přístroje. Pro akustiku najdeme ve sbírkách ladičky, sirény, píšťaly, zvony, monochordy atd. S nimi lze demonstrovat řadu jevů z fyzikální akustiky a následně některá měření a demonstrace provést s použitím počítače. Tak získají učitelé spolehlivý historický základ i schopnost experimentovat na současné úrovni didaktické techniky.

Pohled do minulosti

První poznatky z akustiky získal *Pythagoras za Samu* (570 až 495 př. n. l.). Zkoumáním píšťal a strun našel souvislost hudebního intervalu oktávy a kvinty s jejich délkou. Struny napínal pomocí závaží a zkoumal výšku tónu v závislosti na jejím napětí.

Další řecký učenec *Aristoxenos z Talentu* (asi 354–300 př. n. l.), zvaný *Músikos* je považován za zakladatele hudební vědy. Stanovil jako první 12 půltónů oktávy v přirozeném ladění. *Euklides* (365 až 300 p. n. l.) vysvětlil konsonanci a disonanci dvou tónů. Jsou-li v řadě násobků frekvencí dvou tónů totožné položky, dochází k souznění. Dokonalým příkladem je oktáva:

Základní tón např.

220 Hz, násobky 440, 660, 880, 1 100, 1 320, 1 540, 1 760 atd.

Oktáva

440 Hz, násobky 880, 1 320, 1 760...

Také *Galileo Galilei* (15. 2. 1564 – 8. 1. 1642) přispěl k poznání v akustice. V „Rozpravách“ z roku 1638 stanovil, že fyzikálně lze vnímání výšky tónů vyjádřit počtem kmitů, stanovil poměr počtu kmitů jako měřítko relativní výšky dvou tónů. Dokázal, že počet kmitů struny závisí na její délce, napětí a tloušťce. Zjistil a vysvětlil buzení kmitů rezonancí, pozoroval a vysvětlil vlastnosti stojatého vlnění.

Výška tónů byla spojena s kmitočtem teprve v díle francouzského kněze, filozofa a matematika *Marina Mersenna* (8. 9. 1588 – 1. 9. 1648). Relativní a absolutní výška tónů byly prvními úspěšně měřenými fyzikálními charakteristikami zvuku. Byly položeny základy hudební akustiky a teorie ladění, zkoumány relativní výšky známých hudebních intervalů a rozlišeny vlastnosti stupnic.

Otázkou šíření zvuku se zabýval magdeburský starosta *Otto von Guericke* (1602–1686) a prokázal, že zvuk se nešíří vakuem. Teorii pro výpočet rychlosti šíření vytvořil *Isaac Newton*. V *Principiích* (v rukopise předloženo Royal Society dne 28. dubna 1686, viz [1]) je uvedena rychlost šíření pulzu pružným prostředím ve vzorci

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

kde E je modul pružnosti v tahu a ρ hustota materiálu. S použitím Boyleova-Mariottova zákona pro izotermický děj pak vznikne obdobný vztah pro šíření v plynech:

$$v = \sqrt{\frac{p}{\rho}},$$

kde místo modulu pružnosti nastupuje tlak. Newtonův vzorec dává hodnotu $280 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a koncem 17. a začátkem 18. století byla provedena řada měření rychlosti zvuku: *Robert Boyle* – $366 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, *Cassini*, *Huygens*, *Pikard*, *Roemer* – $356 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, *Flamstead* a *Halley* $348 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, *Derham* $348 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Z rozhodnutí Pařížské akademie věd byla v roce 1738 vykonána rozsáhlá měření a závěr byl: při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$ se zvuk ve vzduchu šíří rychlostí $332,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Neshodu teorie a měření vyřešil až *Laplace*. Ten přednesl 23. 12. 1816 v Pařížské akademii věd své závěry: šíření zvuku v plynech je dějem adiabatickým a rychlost lze vypočítat v souladu s měřeními podle vzorce

$$v = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

Metoda měření byla relativně jednoduchá – šlo o výstřel z děla a měření časového intervalu mezi zábleskem a zvukem výstřelu. Měření rychlosti šíření zvuku v kapalinách byla úspěšná až v první polovině 19. století a v pevných látkách ve druhé polovině téhož století. Úspěchy teorie a mnoha experimentů vedly k zájmu o akustiku, ta se dostává i do prvních učebnic. Z českých to byla učebnice Karla Šádka, vydaná v roce 1825. Díky dr. Gerhardu Höferovi a jeho studentům vzniklo na Západočeské univerzitě faksimile [2] a je zajímavé zjistit,

co se o zvuku učilo na tzv. hlavních školách. V roce 1852 vychází učebnice *Počátkové silozpytu čili fyziky*, jejímž autorem je Dr. F. J. Smetana[3]. Kniha byla určena pro nižší gymnázia a reálky. Kapitola pátá *O zvuku* má již patnáct stran a obsahuje články *Původ zvuku*, *Tvoření vln zvucných*, *Odras zvuku*, *Křížení zvuku*, *Znění*, *Vlny znějící*, *Rychlost jejich*, *Pořadí tónů*, *Mezery tónů*, *Znění vzduchu*, *Znění strun*, *Zvuk desk*, *Ozvuk*, *Sluch*.

Česká vysokoškolská učebnice akustiky vychází teprve v roce 1902. Autorem je dvorní rada Dr. Čeněk Strouhal, profesor experimentální fyziky na české universitě K. F. Vydáno v Praze nákladem jednoty českých matematiků.

Fyzikové a učitelé fyziky před 100 a 200 lety používali jednoduché i relativně složité přístroje pro měření v akustice. Ve své době byla jistě moderní pomůckou elektromagneticky buzená ladička.

Dnes s počítačem

Přímé měření rychlosti zvuku lze provést klasicky stopkami a měřením intervalu mezi zábleskem exploze petardy a zvukem, který urazí dráhu několika set metrů. S počítačem lze měřit dobu šíření mezi dvěma mikrofony. S použitím některého z měřicích systémů řízených počítačem lze dosáhnout dobrých výsledků již při délce základny do dvou metrů.



Obr. 1 Měření se dvěma mikrofony (Audacity)

Zvukový impuls postupuje zleva doprava a na monitoru je zobrazen signál prvního a druhého mikrofону. Z monitoru odečteme Δt a rychlost šíření

$$v = \frac{L}{\Delta t}$$

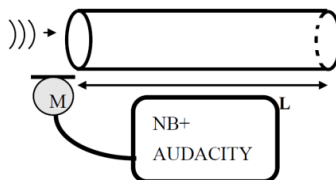
Problémem je správné odečtení časového intervalu. Při měření v místnosti přichází na druhý mikrofon přímý signál spolu s odrazy a nalezení korespondu-

jících bodů na záznamu může být obtížné. Přesto lze dosáhnout spolehlivých výsledků. Měření při teplotě 22 °C je uvedeno v tabulce:

Tabulka 1

Měření č.	$\frac{t_1}{\text{ms}}$	$\frac{t_2}{\text{ms}}$	$\frac{L}{\text{m}}$	$\frac{\Delta t = t_2 - t_1}{\text{ms}}$	$\frac{v}{\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$
1	0,8750	4,9699	1,421	4,0949	347,0
2	0,3850	4,4799	1,420	4,0949	346,8
3	1,1550	5,2499	1,421	4,0949	347,0
4	0,8750	4,9699	1,421	4,0949	347,0
5	0,5949	4,5499	1,372	3,9550	346,9
					$v = 346,94$

S jedním mikrofonem a volně dostupným programem AUDACITY je měření snadnější.



Obr. 2 Měření jedním mikrofonem

Zvukový impulz je zaznamenán na vstupu do trubice 2 m dlouhé a na konci uzavřené. S malým útlumem se vrací po odrazu a je znovu zaznamenán. V originálním záznamu vidíme jen jeden impulz; software ale umožní roztáhnout časovou osu až na čitelné milisekundy. Pak jsou zřetelné záznamy vstupního a odraženého impulzu a odečíst s přesností na desetiny milisekundy časový interval Δt .

Tabulka 2

Měření č.	$\frac{\Delta t}{\text{s}}$	$\frac{v}{\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$
1	0,0115	347,8
2	0,0116	344,8
3	0,0125	320,0
4	0,0108	370,4
5	0,0123	325,2

Průměr z těchto měření dává výsledek $v = 341 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Měření bylo provedeno při teplotě vzduchu $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro tuto teplotu lze vypočítat rychlost

$$v = (331,82 + 0,61t) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 345,24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Odchyłka je přibližně 1 %, což ukazuje na dobrou použitelnost této metody.

Zvukové karty PC a notebooků mají obvykle vstup pro jeden mikrofon. Existují ovšem interní karty pro PC a také externí karty USB se dvěma mikrofonními vstupy. Pak lze v programu AUDACITY pořídit záznam zvukového impulsu sejmutý dvěma mikrofony. Z časového posunu a vzdálenosti mikrofonů počítat rychlost šíření zvuku.

Program AUDACITY umožní také měřit s přesností na 1 Hz frekvenci zvuku. Zdrojem může být sklenka na víno, naplněná vodou do poloviny. Navlhčeným prstem ji rozezvučíme, zvuk zaznamenáme do souboru a necháme spočítat FFT. Kurzor umístíme na vrchol nejvyššího píku a máme k dispozici frekvenci základního tónu. Nyní lze řešit otázku: snížíme hladinu vody – tón se zvýší nebo sníží? V programu lze vytvořit tón s požadovanou frekvencí a přehrávat jej ve smyčce. Počítač se tak stává zdrojem harmonického tónu a ten lze využít mnoha způsoby.

Z mnoha aplikací – generátorů zvuku je pro výuku vhodný Two Channels Frequency Generator. Je k dispozici na portálu Stahuj.cz a také na stránkách www.cognaxon.com.

Poskytuje dva kanály s nezávislým nastavením frekvence po 1 Hz, nastavením hlasitosti v dB a nastavením fázového posuvu. Navíc kreslí harmonické křivky obou signálů. Frekvence a hlasitost lze měnit takřka spojitě.

Pro měření frekvence ladičky je vhodné angažovat studenty a sledovat rázy. Rozeznáme ladičku (s výhodou použijeme ladičku buzenou elektromagneticky) a postupně doladíme notebook na tutéž frekvenci.

Pro měření frekvence ladičky je vhodné angažovat studenty a sledovat rázy. Rozeznáme ladičku (s výhodou použijeme ladičku buzenou elektromagneticky) a postupně doladíme notebook na tutéž frekvenci.

Výsledky:

buzená ladička – frekvence 135 Hz,

ladička pro komorní a – frekvence 431 Hz,

piano Petrof, tón a^1 – frekvence 440 Hz.

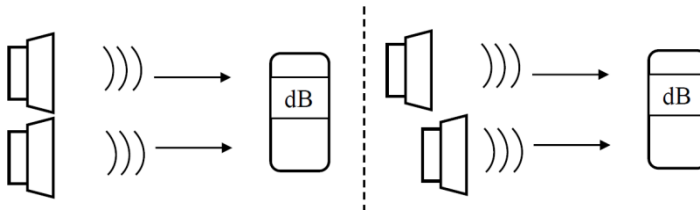
Program lze použít pro ukázky hudebních intervalů. Vyjděme od tónu a^1 s frekvencí 440 Hz. Potom další celý tón (sekunda) má frekvenci

	$440 \times 9/8 = 495 \text{ Hz,}$
tercie	$440 \times 5/4 = 550 \text{ Hz,}$
kvarta	$440 \times 4/3 = 587 \text{ Hz,}$
kvinta	$440 \times 3/2 = 660 \text{ Hz,}$
sexta	$440 \times 5/3 = 733 \text{ Hz.}$

Vhodná aplikace a zvuková karta dovoluje použít PC jako digitální osciloskop. Na webové stránce www.zeitnitz.eu je k dispozici program Scope-146.exe, který mimo jiné souběžně s průběhem signálu počítá frekvenční analýzu a vyhodnotí dominantní frekvenci.

K notebooku připojená dvojice reproduktorů dovolí ukázat také interferenční jevy. Na kmitočtu 862 Hz má zvukové vlnění při teplotě vzduchu $22 \text{ }^\circ\text{C}$ vlnovou délku přibližně 40 cm a oba zdroje jsou koherentní. Tak můžeme i sluchem sledovat v přímém směru interferenci. V místnosti dochází k odrazu a najdeme řadu míst se zesílením a zeslabením zvuku. Kromě hodnocení sluchem lze i měřit hladinu hlasitosti zvuku. Pokud si do mobilu instalujeme vhodný decibelmetr, lze zaznamenat číselné hodnoty hladiny hlasitosti a vytvořit „mapu“ zvukového pole.

Lze prokázat, že zvukové vlnění s toutéž frekvencí a amplitudou ze dvou zdrojů se mohou zesílit nebo zrušit v závislosti na fázovém posuvu. Fázový posuv lze nastavit v programu Two Channels Frequency Generator. Druhou možností je posun jednoho reproduktoru.



Obr. 3 Interference

Pro tyto experimenty je třeba vyloučit nebo alespoň omezit odrazy od stěn učebny. Stačí namířit reproduktory směrem k otevřeným oknům.

Dva reproduktory postavené čelně proti sobě vytvoří stojaté vlnění a decibelmetrem lze prokázat polohu tlakových maxim a minim mezi reproduktory. Vhodná vlnová délka je 20 cm; to odpovídá frekvenci 1 724 Hz.

Shrnutí

Ukažme studentům historické přístroje pro akustiku. Mají své kouzlo v nápaditosti našich předchůdců i v kvalitě řemeslného zpracování.

S malou investicí – dva levné mikrofony a dvoustupová zvuková karta – můžeme:

1. Měřit rychlost šíření zvuku ve vzduchu přímou metodou
2. Měřit frekvenci tónů
3. Demonstrovat interferenci vlnění
4. Demonstrovat stojaté vlnění, měřit vzdálenost uzlů a nepřímo určit rychlost šíření zvuku
5. Měřit závislost hladiny hlasitosti zvuku na vzdálenosti
6. Frekvenční analýzou prokázat souvislost barvy tónu a obsahu vyšších harmonických složek
7. Demonstrovat rezonanci

Literatura

1. Strouhal, Čeněk: *Akustika*. Nákladem Jednoty českých matematiků, v Praze 1902.
2. Šádek, Karel: *Přírodozrum neb fyzika*, Faksimile vydala ZČU Plzeň 2007.
3. Smetana, F. J.: *Počátkové silozpytu čili fysiky*. V Praze nákladem knihkupectví J. G. Calve 1852.