

Rychlost zvuku stokrát jinak

LEOŠ DVOŘÁK
MFF UK Praha

Cílem příspěvku je upozornit, jak se některé vcelku známé principy měření rychlosti zvuku dají realizovat jednoduchými prostředky, bez drahých pomůcek a přístrojového vybavení – tedy případně i doma či mimo školu.

Úvod

Název příspěvku je samozřejmě nadsázkou: stovka metod se do příspěvku nevejde, i kdybychom jich tolik našli. I necelá desítka metod bude až až – a je na vás, čtenářích tohoto článku, které z nich si pro využití ve své výuce vyberete.

Principy zde uvedených měření samozřejmě nejsou nové. Spíše jde o to, jak při nich výhodně využít věci běžně dostupné. V článku se snažím odkazovat na zdroje, které mi byly inspirací; těm, na něž jsem zapomněl, se omlouvám a děkuji.

Úvodem ještě stojí za to poznamenat, že v následujících pokusech nepůjde o nijak závratně přesná měření. Většinou se spokojíme s přesností několik procent, někdy i horší. „Stokrát jinak“ nám tedy rychlost zvuku může vyjít v opakovaných měřeních – v tomto smyslu název příspěvku nijak nepřehání... :-)

Přímé metody: $v = \Delta x / \Delta t$

Výhodou metod, v nichž rychlost zvuku počítáme přímo z času, za něž zvuk urazí určitou dráhu, je nepochybně jejich názornost. Na výběr máme několik možností.

Třískání dřevy na louce

Asi nejnázornější způsob měření rychlosti zvuku vyžaduje delší ulici nebo louku. Jeden člověk „třískne“ nad hlavou dvěma prkénky (dle svědectví učitelů jdou použít i tvrdší pantofle), druhý v určité vzdálenosti spustí stopky, když uvidí, jak se dřeva srazí a zastaví je, když uslyší zvuk „třísknutí“. Vzdálenost musí být větší než asi 150 metrů; čím více, tím lépe. Na vzdálenost přes 300 metrů už je ale zase zvuk většinou špatně slyšet. (Pokus vyžaduje den, kdy příliš nefouká, a samozřejmě klidné okolí.)

Je jasné, že naměřenou dobu ovlivňuje reakční doba pozorovatele. Naštěstí se však reakční doby na začátku a na konci měření navzájem do velké míry kompenzují. Přesto však různí pozorovatelé obvykle naměří poněkud odlišný čas – a nepřesnost určení rychlosti zvuku prostým vydělením vzdálenosti časem dává chybu 10% i více. (Při měření v červnu 2007 na vzdálenost 280 m vyšly třem různým pozorovatelům rychlosti 290 m/s, 330 m/s a 305 m/s.)

Přesnější výsledky získáme, jestliže výše uvedeným postupem změříme doby, za něž zvuk urazí různé vzdálenosti, např. 150, 200, 250 a 300 m a tyto časy pak vyneseme

do grafu. Graf můžeme konstruovat buď „ručně“ na milimetrovém papíře, nebo v Excelu, který nám navíc umožní vyneseními body proložit přímkou. Sklon přímky pak určuje rychlost zvuku.

Poznámky k provedení a zpracování měření:

- Přesnější varianta metody využívá toho, že reakční doby pozorovatele jsou více-méně stálé. Proto je třeba, aby měření v různých vzdálenostech prováděl tentýž pozorovatel.
- Protože vzdálenosti jsou přesnější než měřené časy, je třeba za nezávisle proměnnou v grafu zvolit délku a za závisle proměnnou čas. (Běžná metoda nejmenších čtverců užitá pro prokládání přímky předpokládá přesné „x-ové“ hodnoty a nepřesné „y-ové“ hodnoty.) Směrnice proložené přímkou je pak rovna převrácené hodnotě rychlosti zvuku. (Sestrojíme-li graf tak, že na vodorovné ose bude čas a na svislé vzdálenost, bude to asi pro žáky a studenty názornější, ale získáme trochu jiný – a teorie říká, že méně přesný – výsledek.)
- Při prokládání přímky v grafu ji *nenechte* procházet počátkem. Právě to, o kolik proložená přímka mine počátek, vlastně vypovídá o rozdílu reakčních dob pozorovatele.

Jaké pomůcky pro měření potřebujeme? Klasicky bychom řekli stopy a pásmo, ale v moderní době se omejdeme i bez nich. Žáci a studenti většinou čas měří pomocí mobilů. Ty se velice hodí i pro domluvu „tříškače“ a pozorovatele. Pro měření vzdálenosti lze využít GPS (máme-li ji) nebo si předem změřit vzdálenosti mezi vhodnými orientačními body na mapách republiky na webu. Takto by šlo z měření rychlosti zvuku udělat i malý (a docela hravý) projekt třeba na školní výlet.

Popsaný způsob měření rychlosti zvuku jsme již před lety použili na Letním MF táboře [1], na možnost využít pantoflí místo dřev a klidné večerní ulice místo louky přišli učitelé na regionálním semináři Heuréky na Gymnáziu Špitálská na podzim 2006. Za námět využít k měření vzdáleností mapy na webu vděčím I. Koudelkové.

Odras zvuku od tabule, od podlahy nebo od zdi

Při šíření zvuku na kratší vzdálenosti využijeme pro nahrávání počítač se zvukovou kartou a volně dostupný software typu *Audacity* [2] nebo *Soundcard Scope* [3].

Princip měření je jednoduchý. Mikrofon podržíme nebo upevníme v určité vzdálenosti od tabule či od stěny (vyhoví vzdálenost asi 1 metr) a za ním (tedy o něco dál od tabule, než je mikrofon) krátce tleskneme, ťukneme o sebe dvěma lžičkami apod. Zvuk přitom nahráváme. Mikrofon zaznamená jak přímý, tak odražený zvuk. V záznamu je (při troše štěstí) rozlišíme, změříme čas mezi nimi a ze vzdálenosti, kterou zvuk urazil k tabuli a zpět k mikrofonu, vypočteme jeho rychlost.

Poznámky k provedení:

- Zvuk musí být opravdu krátký a ostrý. Je potřeba vyzkoušet si krátké tlesknutí (spíše jen prsty, ne celými dlaněmi, to by zvuk trval příliš dlouho) nebo cinknutí třeba lžičkami (ty přitom držíme v prstech, aby se jejich zvuk rychle utlumil).

- Pozor na odrazy od stolu, podlahy a dalších ploch! Je dobře, když je plocha, od níž bereme odraz, k mikrofonu blíže, než všechny ostatní plochy v okolí. Nevhodné odrazy také můžeme zkusit utlumit – například stůl zakrýt svetrem.
- Ťukat či tleskat je třeba „v ose“, tedy v kolmici na tabuli, která prochází mikrofonem. Jinak bychom museli složitěji určovat dráhu přímého a odraženého zvuku.
- Pokus je třeba si předem vyzkoušet na daném konkrétním místě. Volba vzdálenosti mikrofonu od tabule či jiné odrazné plochy je vždy kompromisem. Na jednu stranu je vhodné, aby vzdálenost byla co nejdelší, jinak hrozí, že se přímý a odražený zvuk slíjí a v záznamu je nerozlišíme. (Při vzdálenost tam a zpět 2 m jde o čas nižší než 7 ms.) Při větší vzdálenosti však zase vadí odrazy od dalších ploch.
- Použijeme-li k měření času program *Soundcard Scope*, nastavíme „trigger“ na hodnotu „Normal“ nebo „Single“ a žlutý křížek na obrazovce posuneme doleva a trochu nahoru. Program pak čeká na příchod zvuku a poté nahraje a zobrazí jednorázový signál sejmутý mikrofonem.

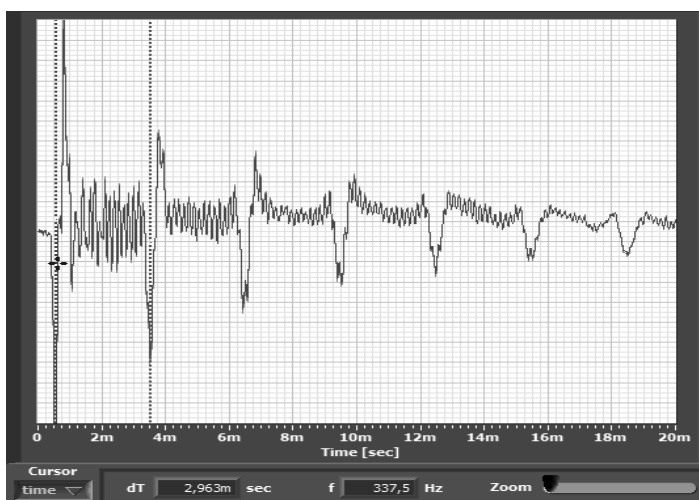
V principu jde o starý známý pokus, který nám nyní usnadňuje volně dostupné programové vybavení počítače. V minulosti jsme jej vyzkoušeli pro poněkud větší vzdálenosti (viz [1]), lze jej ale realizovat v běžné učebně.

Odraz zvuku v rouři nebo hadici

Následující měření vychází z pokusu, který v minulosti na Veletrhu prezentoval V. Pazdera [4]. Původní experiment vyžadoval spojení několika silnějších plastických rour o celkové délce 3 metry. Můžeme však vystačit jen s jednou trubkou od vysavače či s kusem plastové hadice.

Do trubice či hadice vsuneme mikrofon a u jednoho konce vydáme krátký ostrý zvuk. Zvuk se v rouři šíří na druhý konec, tam se odrazí, šíří se zpět, zase se odrazí, ... Na záznamu zvuku zachyceného mikrofonem lze pak lehce změřit čas šíření zvuku tam a zpět.

Na první pohled to může být překvapující, ale zvuk se na koncích roury odráží, i když jsou otevřené. Je to dáno tím, že se zde mění tzv. akustická impedance. Můžeme to brát jako odraz vlnění na volném konci. (Tedy alespoň pokud jde o výchylky kmitajícího vzduchu. Vzhledem k hodnotám akustického tlaku jde naopak o odraz na pevném konci – vně roury musí být tlak roven atmosférickému.)



Obr. 1 Záznam zvuku šířícího se tam a zpět v duté kovové trubici délky 49,5 cm; měřeno a zobrazeno programem Soundcard Scope

Poznámky k provedení a výpočtu rychlosti:

- Zvuk musí být opravdu krátký. Je-li rourou dvoumetrová hadice, stačí u jejího konce krátce lusknout prsty. Máme-li jen kratší trubici (stačí půlmetrová), osvědčilo se klepnout do tuhy v tužce (například kladívkem či kovovými nůžkami).
- Měřit čas je vhodné na výrazném bodě záznamu zvuku (ve špičce apod.). Pro přesnější měření je často vhodné změřit dobu mezi více odrazy.
- Délka, kterou zvuk urazí, je o něco delší než dvojnásobek délky roury. (Tlak se plně vyrovná s atmosférickým až kousek za koncem trubice.) Je třeba počítat s korekcí na šířku roury. Jak uvádí např. [5] na s. 66, je třeba k délce trubice připočítat na každý otevřený konec hodnotu $0,6 R$, kde R je poloměr trubice. Pro oba otevřené konce tedy připočteme $0,6$ průměru trubice.

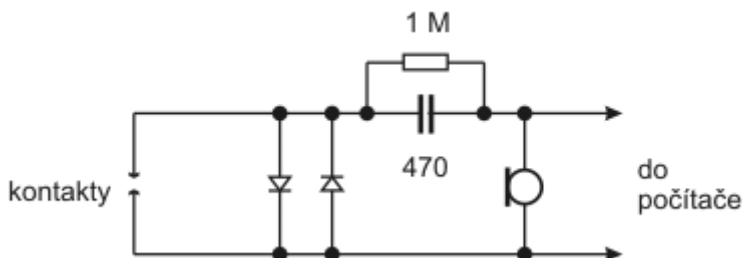
V konkrétním případě zmíněném výše na obr. 1 byla korigovaná délka 51,5 cm, rychlost zvuku vyšla necelých 348 m/s. Dané měření proběhlo při teplotě asi 25 °C, čemuž odpovídá teoretická hodnota rychlosti zvuku 346 m/s. V tomto případě je tedy chyba jen asi půl procenta. Pokud bychom nepřipočetli korekci na otevřené konce, byla by asi 3,5 %. Ovšem pozor, měření časového intervalu kurzorem na obrazovce není nekonečně přesné. (Zkuste, jak přesně určíte v záznamu polohu nějakého význačného bodu ve zvukovém signálu a co udělá se zobrazenou hodnotou posun kurzorem třeba o jediný pixel.) Dle možnosti je proto vhodné příslušný úsek na obrazovce roztáhnout co nejvíce – a přesnost těchto měření raději příliš nepřeceňovat.

Ťuknutí kovových předmětů se zkratováním kontaktu

Připojme ke vstupu zvukové karty paralelně mikrofon a přívodní dráty ke dvěma kovovým předmětům (třeba nůžkám nebo lžičkám), jimiž o sebe ťukneme. Zkratování vstupu se projeví v nahrávaném signálu, o něco později se nahraje zvuk ťuknutí, který zachytil mikrofon. Z časového zpoždění obou signálů a vzdálenosti zdroje zvuku a mikrofonu lehce určíme rychlost zvuku.

Pro praktické využití musíme tento nápad trochu vylepšit: mikrofon nechceme mít zkratovaný příliš dlouho (proto kontakt oddělíme kondenzátorem), navíc je dobře přidat do zapojení antiparalelně diody, které ochrání vstup počítače proti případným napěťovým špičkám (z elektrostatických výbojů apod.) Výsledek ukazuje schéma.

Zapojení funguje, protože ve zvukové kartě je na mikrofoni vstup přivedeno napětí pro napájení mikrofonu. Při zkratování kontaktů se proto přes kondenzátor dostane na vstup krátký napěťový impuls. (Poznamenejme, že hodnotu kapacity kondenzátoru možná bude vhodné upravit v závislosti na zvukové kartě počítače – tak, aby při sepnutí kontaktu počítač zaznamenal krátký „jehlový“ puls.)



Obr. 2 Připojení kontaktů paralelně k mikrofonu pro zaznamenání okamžiku, kdy do sebe ťuknou

Výhodou metody je skutečnost, že jí můžeme měřit i na délkách jen několika desítek centimetrů. 34 cm totiž zvuk urazí za 1 milisekundu – a za tuto dobu vzorkuje zvuková karta signál 44-krát. To znamená, že dobu 1 ms v záznamu změříme s přesností asi 2 %. Ovšem pozor: Při krátkých vzdálenostech se hůře měří skutečná vzdálenost zdroje od mikrofonu. Cvakneme-li o sebe dvojími nůžkami, těžko přesně na milimetr říci, jaká je vzdálenost zdroje zvuku od mikrofonu.

Podobnou metodu prezentovali bratislavští kolegové před několika léty na konferenci Šoltésove dny, ovšem s využitím měřicího systému IP Coach a s využitím dvou jeho vstupů. Zde popsaná varianta vystačí s běžným počítačem se zvukovou kartou a součástkami v hodnotě doslova několika korun.

Měření se dvěma mikrofony

Velmi jednoduché a názorné je měření rychlosti zvuku využívající dvou mikrofonů. Opět jde o známou a v principu jasnou metodu. Protože však běžné zvukové karty nedávají vždy možnost připojit dva mikrofony, připojení mikrofonů do linkového vstupu zvukové karty by vyžadovalo trochu delší popis a navíc řada notebooků má jen monofonní (jednokanálový) vstup, odkážeme zde jen na stručný popis v [1].

Nepřímé metody: $v = f \cdot \lambda$

U nepřímých metod vycházíme ze vztahu mezi rychlostí zvuku, jeho vlnovou délkou a frekvencí.

Rezonance v trubici ponořované do vody – tentokrát bez ladičky

V našem přehledu bychom neměli pominout známý pokus využívající rezonance zvuku ladičky ve vzduchovém sloupci nad hladinou vody v trubici, kterou ponořujeme do vody a tím „ladíme“ její rezonanci – viz např. [6].

S běžnou ladičkou vydávající tón 440 Hz ale potřebujeme dost dlouhou trubici. Místo ladičky lze samozřejmě užít reproduktor napájený ze signálního generátoru – ten ale vždy nemusí být k dispozici a je otázkou, jak přesně určíme jeho frekvenci.

I zde nám může pomoci moderní technika. Dokonce to tentokrát při vlastním pokusu nebude ani počítač. Tón vhodné frekvence (např. 1000 či 2000 Hz) si můžeme vytvořit na počítači, např. programem *Audacity*, uložit jej jako soubor typu wav nebo mp3 a nahrát do MP3-přehrávače. I nejlevnější malá sluchátka pak mohou sloužit jako zdroj zvuku. (Jak můžeme ověřit nahráním zvuku přes mikrofon do počítače, frekvence „sedí na hertz“.) Tento zdroj zvuku dokáže nahradit ladičku. Pro vyšší frekvence stačí kratší trubice a navíc můžeme měření provádět pro různé frekvence.

Poznámky k provedení:

- Místo trubice ponořované do vody můžeme užít silnější hadici částečně naplněnou vodou.
- Tón je vhodné vygenerovat dost dlouhý, aby bylo dost času na nalezení rezonance. (Ve formátu wav zabere 1 minuta méně než 1 MB paměti.)

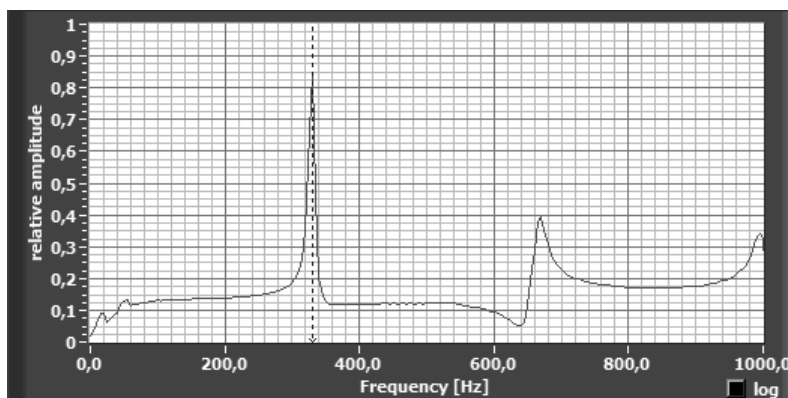
- Je vhodné vytvořit tón jen v jednom kanále (např. v levém), takže pak „píská“ jen jedno sluchátko a zvuk druhého nás neruší.

Při konkrétních měřeních (v horkých červencových dnech) s trubicí o průměru 2,8 cm a frekvencích od 1 do 3 kHz vycházely hodnoty rychlosti zvuku okolo 348 m/s.

Rezonance vzduchu v otevřené trubici

Trubicí nebo hadicí můžeme pro měření rychlosti zvuku využít i tak, že změříme, na kterých frekvencích v ní sloupec vzduchu rezonuje. Možností, jak měřit, je víc. Zde popíšeme jen měření rezonance, jak jej umožňuje program *Soundcard Scope*.

Program *Soundcard Scope* ve verzi 1.22 (z roku 2007) umožňuje generovat postupně se zvyšující tón a současně zobrazovat spektrum signálu, který snímá mikrofon, a navíc si v grafu „pamatovat“ jeho maxima. Když ke sluchátkovému výstupu zesilovače připojíme malá sluchátka, jedno vložíme na kraj trubice a do trubice zastrčíme i mikrofon, můžeme tak během několika desítek sekund pohodlně změřit a zobrazit rezonanční křivku. Příklad změřené křivky ukazuje obr. 3

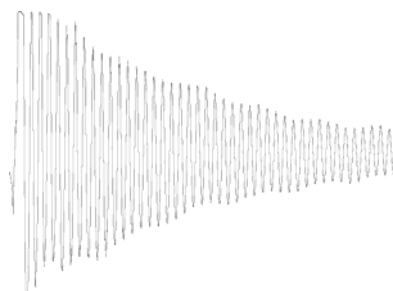


Obr. 3 Rezonanční křivka sloupce vzduchu v otevřené trubici (změřeno a zobrazeno pomocí programu *Soundcard Scope*)

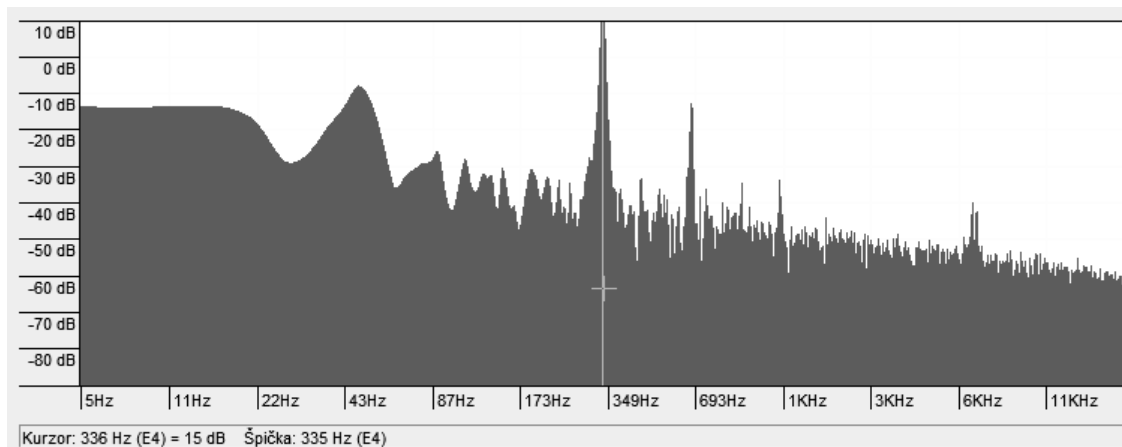
Šlo opět o trubicí použitou již v dříve popsaném měření (délka 49,5 cm, průměr 3,2 cm). Změřená nejnižší rezonanční frekvence byla 333 Hz. (Na grafu vidíme i rezonanci na dvojnásobku základní frekvence.) Pro výpočet rychlosti zvuku musíme použít délku korigovanou na otevřené konce (viz výše), tedy 51,5 cm. V otevřené trubici je vlnová délka nejnižší frekvence rovna dvojnásobku délky, tedy 1,03 m. Vynásobením dává $1,03 \text{ m} \cdot 333 \text{ s}^{-1} = 343 \text{ m/s}$. Přesnost měření rezonanční frekvence v daném programu ovšem není nejvyšší, v daném případě ji můžeme odhadnout asi na 2-3 Hz.

Vlastní kmity vzduchu v otevřené trubce

Frekvenci kmitů vzduchu v trubici můžeme zjistit i jednodušeji – prostě tak, že na konec trubice klepneme prsty. I pouhým uchem slyšíme, že zvuk má určitou výšku. Nahrání programem *Audacity* ukáže krásné tlumené kmity (viz obr. 4). Tentýž program umí zobrazit i jejich frekvenční spektrum a najít jeho maximum, viz obr. 5.



Obr. 4 Vlastní kmity vzduchu v trubici



Obr. 5 Spektrum kmitů vzduchu v otevřené trubici

Pro výpočet opět musíme použít korigovanou délku trubice. Z ní vychází vlnová délka 1,03 m a po vynásobení frekvencí kmitů zjištěnou ze spektra, tedy 335 Hz pak rychlost zvuku 345 m/s. Dané měření bylo provedeno při teplotě 25 °C, takže naměřená rychlost velmi dobře odpovídá teoretické.

Závěr

Zdaleka jsme nevyčerpali všechny jednoduché a netradiční metody jak určit rychlost zvuku. Měření pomocí rezonance vzduchového sloupce v trubici uzavřené na jedné straně, měření pomocí výšky tónu „didjerydoo“, pomocí ťukání na dno válcové sklenice (opět hezký námět ze Šoltésových dnů), z výšek tónů vroubkované hadice, využitím interference zvuku ze sluchátek MP3 přehrávače... to vše se nám již do tohoto článku nevejde. O měření rychlosti zvuku v jiných prostředích než ve vzduchu ani nemluvě. Snad někdy v nějakém příštím příspěvku „Rychlost zvuku stokrát jinak II“.

Literatura

- [1] Dvořák L.: *Pár věcí z tábora 4 – tentokrát o zvuku*. In: Sborník z konf. Veletrh nápadů učitelů fyziky 6, Ed.: O. Lepil, Vydavatelství UP Olomouc, 2001, s.32-38.
- [2] Audacity. Dostupné online na <http://audacity.sourceforge.net/>.
- [3] Zeitnitz C.: *Soundcard Scope*. Dostupné online na http://www.zeitnitz.de/Christian/Scope/Scope_en.html.
(Pozn.: Nejde o freeware, ale program je pro výukové použití dostupný zdarma.)
- [4] Pazdera V.: *Měření fyzikálních veličin s grafickým kalkulátorem TI-92 a datovým analyzátozem CBL*. In: Sborník z konference Veletrh nápadů učitelů fyziky IX, svazek druhý. Ed.: J.Svobodová, P.Sládek, PedF MU Brno 2004, s. 81-85
- [5] Rossing T.D., Wheeler P., Moore R.: *The Science of Sound*. (3rd edition) Addison Wesley, San Francisco 2002
- [6] Svoboda E. a kol.: *Pokusy z fyziky na střední škole 2*. Prometheus, Praha 1997.