

Měříme rychlost zvuku v kovech, v plynech i v kapalinách

JOSEF HUBEŇÁK, JIŘÍ HUBEŇÁK junior

Přírodovědecká fakulta UHK, Gymnázium Boženy Němcové Hradec Králové

Abstrakt

S mobilem, metrem, kalafunou a svěrákem můžeme měřit rychlost zvuku pro ocel, mosaz, hliník i plast. Hodnoty se od tabelovaných liší o jednotky procent. V laboratoři lze uskutečnit rezonanční měření v několika decimetrech dlouhém kovovém vzorku, ve sloupci plynu i v kapalině.

Měření v kovu a plastu s aplikací Spectroid

Mobilní aplikace Spectroid je volně dostupná a její předností je okamžité určení dominantní frekvence v záznamu zvuku.



Obr. 1 Měření frekvence aplikací Spectroid

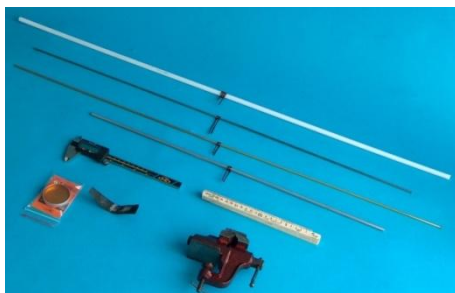
Snímek displeje mobilu byl pro potřeby tisku barevně invertován. Horní křivka (v originále červená) značí závislost hlasitosti na frekvenci pro celý signál, spodní (v originále žlutá) se týká jen dominantní frekvence. Zde čteme 1 617 Hz.

Poznámka

Aplikaci Spectroid použila pro měření ve své diplomové práci O. Smetanová (viz [5]). Přesnost aplikace v intervalu 500 Hz až 3 000 Hz je velmi dobrá, odchylky od skutečné frekvence jsou menší než 1 %. Pokud si na PC nebo notebook instalujeme emulátor Androidu BLUESTACKS 5, máme Spectroid na velkém displeji i na dataprojektoru.

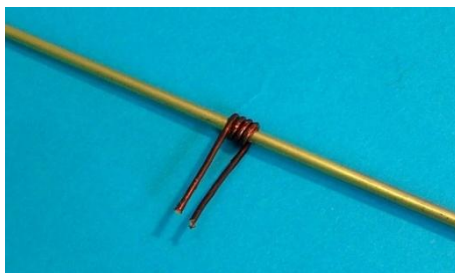
Vybaven mobilem a uvedenou aplikací může kdokoliv i v domácích podmínkách si měřit rychlost šíření zvuku v kovu. Další potřeby k experimentu a měření jsou na obr. 2.

Čtyři vzorky materiálu: plast s obchodní označením POM C, nerezová ocel, mosaz a hliník. Posuvné měřítko a skládací metr. Kalafuna na pájení a kousek kůže, posypaný kalafunou. Svěrák.



Obr. 2 Potřeby pro měření rychlosti šíření zvuku

Pro upnutí do svěráku je vzorek uprostřed ovinut několika závity měděného drátu; takové upnutí nebrání vzniku podélných kmitů a stojatého vlnění s uzlem uprostřed a kmitnami na koncích vzorku.



Obr. 3 Úprava upnutí středu vzorku

K rozezvučení vzorku použijeme kousek kůže posypané kalafunou. Vhodný přítlak a rychlost posuvu od středu ke konci tyče najdeme po několika pokusech a pak už stačí spustit a zastavit aplikaci *Spectroid*. Výhodou tohoto měření je jednoduché vybavení. Problém je se vzorky, resp. s materiálem délkou a průměrem vzorku. Vyhovující délky jsou 60 až 80 cm, průměr do 10 mm.

Tabulka 1. Měření rychlosti zvuku s aplikací *Spectroid*

materiál	délka l (m)	frekvence f (Hz)	rychlost šíření zvuku v (m · s ⁻¹)
ocel nerezová	0,877	2 883	5 056
mosaz	0,955	1 852	3 537
hliník	0,636	3 938	5 009
plast POM C	1,028	686	1 410

Získané hodnoty jsou velmi blízké hodnotám uvedeným v tabulkách pro střední školy [2, 3].

Měření rychlosti šíření zvuku v kovech ještě jednou

Rychlost šíření podélného vlnění a tedy i zvuku byla teoreticky řešena již Newtonem:

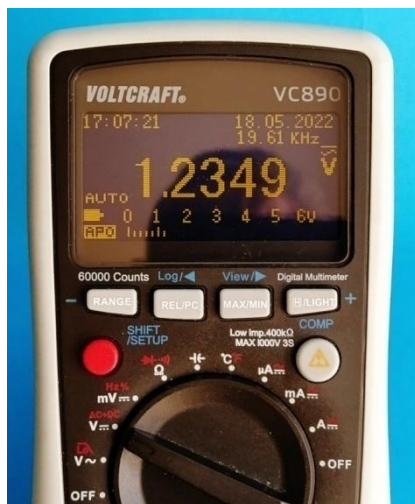
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



Obr. 4 Sestava měření v kovu

Přímé měření, kdy je potřeba zjistit dráhu a čas, bylo možné až v 19. století, kdy dlouhá kovová potrubí a světelný signál umožnily takové měření. Do školní laboratoře se s takovým měřením nevejdeme. Řešením mohou být dva piezoelektrické snímače. Z široké nabídky piezoelektrických snímačů byl vybrán typ USC18T. Má odolné duralové pouzdro a maximální přípustný budicí signál s amplitudou 60 V. Jeho rezonanční frekvence je 40 kHz a to je dostatečně daleko od frekvencí použitých pro měření. Jeden použijeme jako vysílač – budič kmitů a druhý jako snímač. Oba jsou gumovou páskou přitisknuty k čelům vzorku kovu. Pro měření byl připraven vzorek – hliníková válcová tyčka o průměru 12 mm a délce 13 cm.

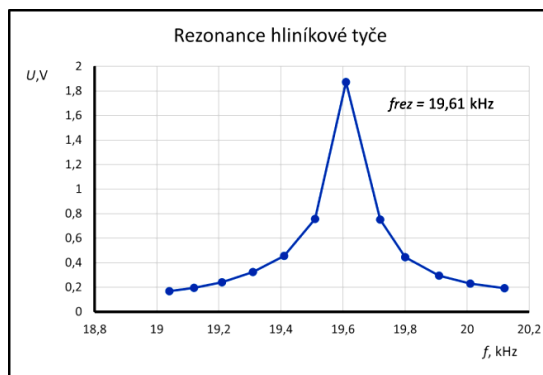
Zdrojem signálu je RC oscilátor BM 365 U a maximum signálu na snímači je měřeno digitálním multimetrem Voltcraft VC 890. Snímek displeje je dokumentem objektivně získaných dat.



Obr. 6 Snímek displeje při rezonanci frekvenci

Rezonance bylo dosaženo na frekvenci 19,61 kHz a maximum napětí je 1,2349 V. Pro měření bylo vždy na výstupu BM 365 konstantní napětí 10 V. Při opakovaných měřeních se rezonanční napětí měnilo o několik desetín voltu a příčinou, jak se ukázalo, bylo posunutí osy budiče nebo snímače vůči ose duralové tyčky.

Nalezení rezonanční frekvence je poměrně obtížné kvůli velmi úzké rezonanční křivce – viz graf.



Obr. 7 Rezonanční křivka

Tabulka 2. Měření rezonance v hliníkovém vzorku

f (kHz)	19,04	19,12	19,21	19,31	19,41	19,51
U (V)	0,167	0,1941	0,240	0,324	0,456	0,757
f (kHz)	19,61	19,72	19,80	19,91	20,01	20,12
U (V)	1,872	0,750	0,445	0,294	0,231	0,191

Z grafu je možné přibližně odečíst pološířku rezonanční křivky – asi 0,2 kHz; rezonance je velmi ostrá a hliníková tyčka kmitá podélně s malým tlumením.

Výpočet rychlosti šíření je velmi snadný:

Délka tyčky

$$l = \frac{\lambda}{2} = 13,0 \text{ cm.}$$

Rychlost zvuku

$$v = f_r \lambda = f_r 2l = 19,61 \cdot 10^3 \cdot 0,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 5,0986 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Zaokrouhleno:

$$v = 5,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výsledek odpovídá tabelovaným hodnotám.

Měření rychlosti šíření zvuku v kapalině

Pro rychlost šíření podélných kmitů v kapalinách platí vztah podobný Newtonovu vzorci pro pevné látky:

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

Jeho odvození najdeme např. v knize [4]. Pro kapaliny platí

$$v = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Zde K je tzv. modul objemové pružnosti kapaliny a jde o převrácenou hodnotu stlačitelnosti kapaliny:

$$K = \frac{1}{\chi}$$
$$\chi = \frac{-\Delta V}{V \Delta p}$$

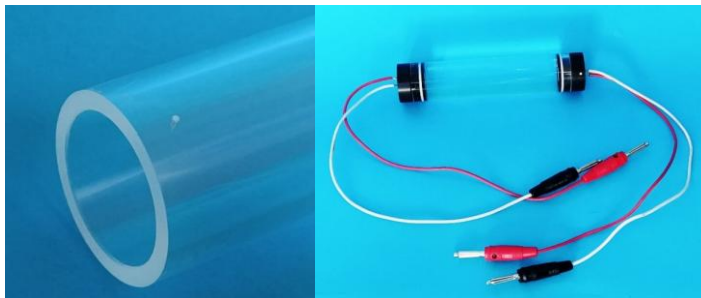
První měření ve vodě uskutečnili v roce 1827 *Charles Sturm* a *Jean-Daniel Colladon* na Ženevském jezeře. Vzdálenost, kterou urazil zvuk zvonu ponořeného do vody, byla 13 487 m a podobné měření je pro laboratoř neproveditelné. Se dvěma piezoelektrickými snímači a trubicí naplněnou vodou je možné využít rezonanční měření stejně jako v plynu nebo v kovu. Opět byl použit piezosenzor USC18T.



Obr. 8 Snímač USC 18T a zátka se snímačem

Pro měření bylo třeba uzavřít sloupec kapaliny do průhledné plastové trubice. Průhledné proto, aby bylo možné eliminovat přítomnost vzduchových bublin. Řešením je trubice z organického skla; vnější průměr 30 mm, tloušťka

stěny 3 mm. Snímače jsou zalepeny do zátek tak, aby kuželová část a kmitající čelo byly volné – epoxid byl nanesen jen na válcový povrch snímače. Dokonalé utěsnění zátky zaručuje O-kroužek. Pro odvod bublinek vzduchu je trubice na jednom konci opatřena odvodušňovacím kanálkem o průměru 0,6 mm. Ten je umístěn tak, aby při zasunutí zátky na doraz byl kanálek uzavřen O-kroužkem.



Obr. 9 Detail odvodušňovacího kanálku a sestava připravená k měření

Signál s napětím 10 V byl nedostatečný, proto byl použit navíc elektronkový zesilovač Tesla a napětí bylo zesíleno na 60 V.



Obr. 10 Elektronkový zesilovač Tesla

Rezonance byla i za těchto podmínek nevýrazná.

Výsledek měření:

Délka sloupce vody $l = 0,103$ m, $f_r = 7,5$ kHz, rychlost šíření zvuku $v = 1\,545$ m · s⁻¹

Teplota vody $t = 28$ °C.

Při použití delší trubice se sloupcem vody o délce $l = 0,238$ m bylo možné zjistit rezonanční frekvenci sluchem: $f_r = 3\,056$ Hz. Z tohoto měření vychází rychlost šíření $v = 1\,454$ m · s⁻¹. Teplota vody $t = 26$ °C.

Pro měření v etanolu byla použita trubice s délkou sloupce kapaliny 0,188 m. Rezonance byla na frekvenci 3 300 Hz. Výsledek: v etanolu se zvuk šíří rychlostí $v = 1\,241 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Teplota etanolu $t = 26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hodnocení rezonančního měření v kapalině

Při buzení piezoelektrického měniče signálem s napětím 60 V dostáváme na snímači signál s napětím přibližně 0,3 V a při rezonanci se napětí zvýší o 10 % až 20 %. I když výsledky odpovídají tabelovaným hodnotám, je toto měření problematické a pro školní laboratoř nevhodné.

Měření rychlosti zvuku v plynech

Pro měření v plynech byla připravena trubice na jedné straně uzavřená membránou z plastové fólie a na druhé zátkou s piezosenzorem, který byl použit jako budič. Aby po naplnění a uzavření zátkou nevznikal uvnitř přetlak, má trubice také vyvrtán kanálek.



Obr. 11 Sestava pro plyny, detail uzavření membránou

Délka sloupce plynu od zátky k membráně $l = 19,7 \text{ cm}$.

Rezonanci sloupce plynu hledáme poslechem těsně u membrány. Budič je napájen signálem s napětím 10 V. Při rezonanci je délka trubice rovna n -násobku poloviny vlnové délky a platí:

$$l = n \frac{\lambda_n}{2}$$

Pro vlnovou délku použijeme vztah:

$$\lambda_n = \frac{v}{f_n}$$

Pro výpočet rychlosti použijeme vzorec:

$$v = \frac{f_n}{n} \cdot 2l$$

Tabulka 3. Měření ve vzduchu, teplota 22 °C

pořadové číslo rezonance	rezonanční frekvence f_r (Hz)	rychlost šíření zvuku v (m · s ⁻¹)
1	854	336
2	1 658	326
3	2 642	347
4	3 496	344
5	4 359	345

Průměr $\bar{v} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, směrodatná odchylka průměru $s = 3,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Porovnejme rychlost zvuku ve vzduchu získanou měřením s výpočtem rychlosti pro danou teplotu.

Vypočtená rychlost pro teplotu 22 °C je $345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Trubicí lze snadno plnit plynem s hustotou menší nebo větší než hustota vzduchu. Pro další měření byl použit methan; zdrojem byl plynový vaříč.

Tabulka 4. Methan, teplota 22 °C

pořadové číslo rezonance n	rezonanční frekvence f_r (Hz)	rychlost šíření zvuku v (m · s ⁻¹)
1	1 027	405
2	2 141	422
3	3 158	415
4	4 195	413

Porovnejme rychlost zvuku v methanu získanou měřením s rychlosti vypočtenou pro normální atmosférický tlak.

Pro methan vypočteme rychlost šíření zvuku ze vzorce

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

Pro hodnoty $\kappa = 1,31$, $p = 1,013 \cdot 10^5$ Pa a $\rho = 0,72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ dostáváme $v = 430 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Průměr z měřených rychlostí $\bar{v} = 414 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a směrodatná odchylka průměru je $s = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Závěr

Rezonanční měření rychlosti šíření zvuku je osvědčenou úlohou z akustiky a setkáme se s ním v klasické literatuře, např. [1]. Digitální multimetr a vhodná aplikace v mobilu umožní modernizovat tuto úlohu a dát do rukou studentů současnou techniku.

Literatura

- [1] Strouhal, Č.: *Akustika*, Edice Sborník českých matematiků, Praha 1902.
- [2] Mikulčák, J. a kol.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*, Prometheus Praha 2003, ISBN 80-7196-264-3.
- [3] Mikulčák, J. a kol.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*, SPN Praha 1988.
- [4] Vybíral, B.: *Kmitání a vlnění*, Gaudeamus, Univerzita Hradec Králové 2014, ISBN 978-80-7435-379-6.
- [5] Smetanová, O.: *Jednoduchá fyzikální měření s tabletem nebo chytrým telefonem*. Diplomová práce, Olomouc Univerzita Palackého, katedra experimentální fyziky 2019.