

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Fyzikální měření s programem Audacity

Bakalářská práce

Autor:	Leontýna Břízová
Studijní program:	B1701 – Fyzika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání Matematika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce:	RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Zadání bakalářské práce

Autor:	Leontýna Břízová
Studijní program:	B 1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání Matematika se zaměřením na vzdělávání
Název práce:	Fyzikální měření s programem Audacity
Název práce v AJ:	Physical measurements with Audacity
Cíl a metody práce:	Cílem této bakalářské práce je popsat různá měření pomocí volně použitelného programu Audacity, který je určen především pro nahrávání a úpravu zvuku, ale dají se s jeho pomocí provádět i měření.
Garantující pracoviště:	Katedra fyziky Přírodovědecké fakulty UHK
Vedoucí práce:	RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.
Konzultant:	
Oponent:	Mgr. Filip Studnička, Ph.D.
Datum zadání práce:	15. ledna 2015
Datum odevzdání práce:	

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedla všechny prameny, ze kterých jsem vycházela.

V Hradci Králové dne

Leontýna Břízová

Poděkování:

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu práce RNDr. Janu Šlégrovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady při tvorbě bakalářské práce.

Anotace

BŘÍZOVÁ, L. *Fyzikální měření s programem Audacity*. Hradec Králové, 2015. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

Fyzikální podstata zvuku je obsahem středoškolské fyziky a je možné ji zkoumat prostřednictvím volně použitelného programu Audacity. Tento program je určený především pro nahrávání a úpravu zvuku, ale dá se velmi dobře využít pro různá fyzikální měření. Cílem této bakalářské práce je změřit pomocí tohoto programu např. rychlost zvuku nebo Dopplerův jev. Každé měření bude podrobně popsáno a doplněno o teoretickou část.

Annotation

BŘÍZOVÁ, L. *Physical measurements with Audacity*. Hradec Králové, 2015. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Thesis Supervisor RNDr. Jan Šlégr, Ph.D.

The physical nature of sound is the topic of secondary school physics and it can be investigated by freeware Audacity. This program is designed primarily for recording and editing sound, but it can be very well used for various physical measurements. The goal of the thesis is to measure the speed of sound or Doppler effect. Each measurement will be described in detail and complemented by theoretical part.

Obsah

Úvod.....	8
1 Akustika.....	9
1.1 Zvuk.....	9
1.1.1 Vlastnosti zvuku.....	10
1.2 Ultrazvuk.....	12
1.3 Infrazvuk.....	15
1.4 Fyzikální akustika.....	15
1.4.1 Akustický tlak.....	15
1.4.2 Hlasitost a intenzita zvuku.....	16
1.4.3 Rychlost zvuku.....	20
1.4.4 Dopplerův jev.....	22
1.4.5 Nucené kmitání a rezonance.....	24
1.5 Fyziologická akustika.....	29
1.5.1 Sluchový orgán.....	29
2 Použité programy.....	31
2.1 Program Audacity.....	31
2.2 Program Spectrum Laboratory.....	32
3 Praktická část.....	34
3.1 Závislost rychlosti zvuku na teplotě.....	34
3.2 Měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí.....	37
3.3 Měření rychlosti zvuku ve vodním sloupci.....	38
3.4 Dopplerův jev.....	40
3.5 Elektromotorický monochord.....	42
3.6 Rezonance sklenice na víno.....	47
Závěr.....	50
Použitá literatura.....	51
Příloha A – Fotografie.....	I

Úvod

Tématem této bakalářské práce je akustika a různá měření v ní s použitím volně stažitelného programu Audacity.

Toto téma jsem si zvolila, protože se zabývá velmi zajímavou částí fyziky, která patří spolu s mechanikou a optikou k jejím nejstarším součástem. Pokusy, které jsou do této práce zařazeny, jsou velice názorné a dají se využít v mé budoucí učitelské praxi, a to jak na základní, tak i střední škole, což byl také jeden z důležitých aspektů mé volby tématu.

V teoretické části je cílem práce zaměřit se na objasnění pojmu akustiky a na její jednotlivé nejdůležitější součásti, nejdříve na rozčlenění akustiky a důkladné popsání těchto částí. Dále jsou podrobně rozebrány jednotlivé pojmy, které se akustiky týkají a které budou využívány v části praktické. Důkladně se zaměříme na zvuk a jeho různé vlastnosti.

Ve druhé kapitole jsou popsány programy, které jsou v práci využity, jejich jednotlivé funkce a důležité vlastnosti.

V praktické části jsou důkladně popsána jednotlivá měření zaměřená na akustiku a získané výsledky jsou pak zpracovány. Důležitou částí bude také pokus, při kterém se pokusíme rozbít vinnou sklenici pomocí rezonance. Tento pokus dosud není v česky psané literatuře důkladně zpracován.

1 Akustika

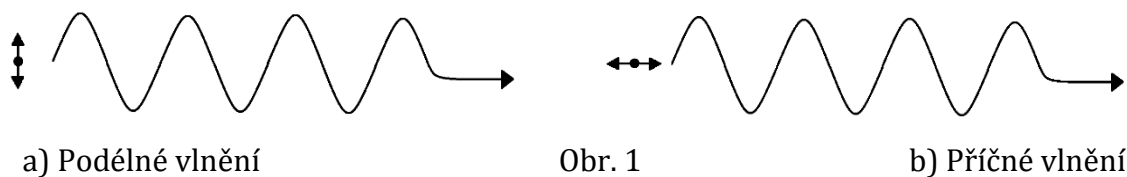
Akustika je nauka o zvuku, její název vznikl z řeckého slova ακουω (akuó), což znamená slyším. Jedná se o fyzikální obor, který se zabývá zvukem, jeho vznikem, šířením a působením na sluchové orgány člověka a také jeho působením na jiná tělesa.

Tento obor lze rozčlenit na:

- (a) **Akustiku fyzikální**, která se zabývá fyzikálními vlastnostmi a zákony zvukového vlnění a jeho zdroji.
- (b) **Akustiku fyziologickou**, která se zabývá vnímáním zvuku sluchovými orgány člověka a zvukovými procesy v hlasových orgánech.
- (c) **Akustika hudební** se zabývá zvuky a souzvuky vzhledem k potřebám hudby a zvukovými vlastnostmi hudebních nástrojů.
- (d) **Akustika prostorová** (též stavební) řeší otázky šíření zvuku v prostoru, zejména z hlediska vhodných užitných vlastností budov (např. zvukové izolace budov, akustičnost sálů aj.). (Vybíral, 2014, str. 207), (Podobský, 1999, str. 64)

1.1 Zvuk

Zvukové vlny neboli **zvuk** je elastické, mechanické, postupné vlnění, které vnímáme fyziologicky sluchem. Za zvuk považujeme vlnění, jehož frekvence leží v intervalu přibližně od 16 Hz do 16 kHz, přičemž zejména horní hranice závisí na věku. Pro dorozumívání a sluchové vnímání u člověka je však nejdůležitější frekvenční pásmo v rozmezí přibližně 500 Hz až 5 kHz. Lidský sluch má totiž v tomto rozmezí svoji rezonanci. Pod a nad touto frekvencí klesá schopnost slyšení a přibližně pod frekvencí 16 Hz a nad frekvencí asi 16 kHz mizí. Mechanické vlnění s frekvencí menší než 16 Hz nazýváme infrazvuk a vlnění o frekvenci větší než 16 kHz ultrazvuk. Tyto frekvence sice nemůže vnímat lidský sluchový orgán, ovšem pro některé živočichy mohou být slyšitelné, například ultrazvuk mohou vnímat psi, ti ho vnímají až do frekvence 100 kHz, dále netopýři, kteří odrazu ultrazvuku využívají k orientaci v prostoru, nebo delfíni. Všichni tyto živočichové mají úplně jinou mez slyšitelnosti než člověk. Také infrazvuk, který se může šířit například při zemetřesení v povrchových vrstvách Země nebo po mořské hladině, vnímají napří-



klad medúzy nebo ryby. Omezený rozsah frekvencí mechanického vlnění, které člověk vnímá, má však i jisté výhody. Člověk je tak chráněn před mnoha přirozenými i umělými zdroji hluku, které na nás v životním prostředí neustále působí. Umožňuje nám to například klidný spánek, protože nevnímáme šum vzbuzovaný vlastním krevním oběhem.

Zvukové vlny se mohou šířit jakýmkoliv látkovým prostředím, jak plynným, tak i kapalným nebo pevným. Jsou představovány přenosem kmitavého pohybu částic prostředí, nemohou se tedy šířit ve vakuu. Z tohoto hlediska je možné vlnění rozdělit na vlnění podélné, kdy částice prostředí kmitají v ose šířící se vlny (obr. 1a) a na vlnění příčné, kdy částice kmitají kolmo ke směru šíření (obr. 1b).

V plynech se šíří pouze vlnění podélné. V kapalinách na povrchu pozorujeme příčné vlnění, uvnitř pak šíření jen vlnění podélného. Pevnými tělesy se mohou šířit jak vlny příčné tak i podélné. Specifickou záležitostí u pevných těles je tzv. vlnění ohybové, které sestává jak z vlnění příčného, tak i podélného. (Vybíral, 2014, str. 207-208), (Podobský, 1999, str. 64), (Lepil, 1994, 2012, str. 78, 90), (Pospíšil, 1987, str. 177)

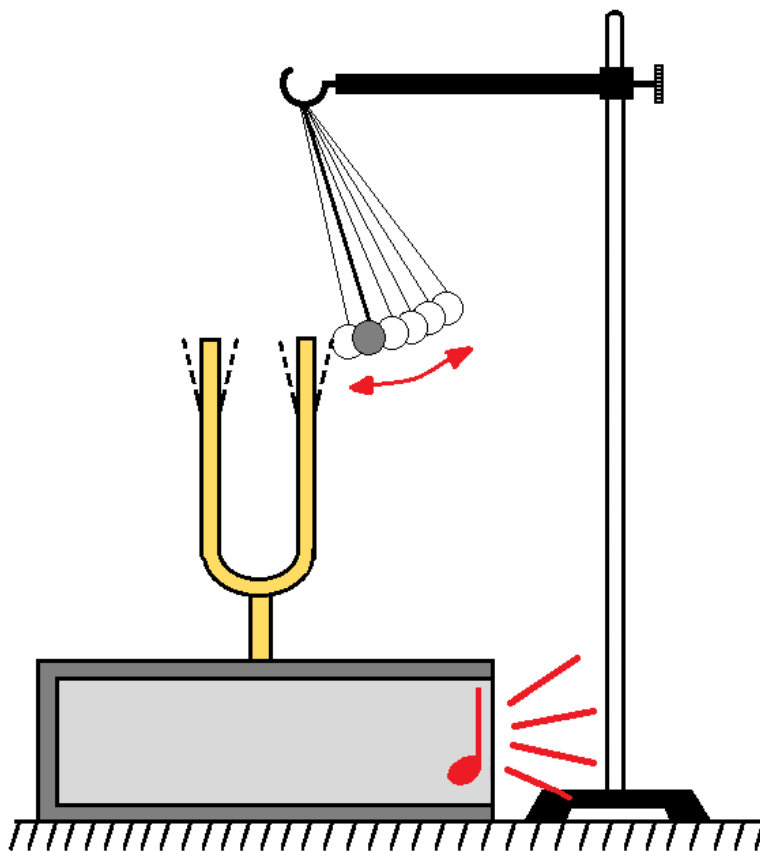
1.1.1 Vlastnosti zvuku

Zvuk můžeme rozdělit na **neperiodický** (nepravidelný) neboli nehudební, to je například hluk, praskot, bušení, skřípání nebo šum, který vzniká nahodilými neperiodickými změnami tlaku v prostředí, kterým se zvuk šíří, a **periodický** (pravidelný) tyto zvuky jsou tzv. hudební, příkladem je zvuk houslí, ladičky, sirény nebo zvuky různých samohlásek v lidském hlasu.

Jednoduchým periodickým pohybem mechanického zdroje (např. struny, ladičky) vzniká tón; je to zvuk, u něhož převládá jednoduchý periodický pohyb. Má-li zvuk harmonický průběh, je to jednoduchý tón, periodické zvuky složitějšího průběhu označujeme jako složené tóny. Tón je charakterizován absolutní výškou, která se měří pomocí frekvence převládajícího periodického pohybu, měří se

v hertzích a jeho násobcích, tedy kilohertzích. Čistý harmonický tón se v hudbě nevyužívá. Základní tón bývá doprovázen tóny různé amplitudy, jejichž frekvence jsou celistvými násobky kmitočtu základního tónu, tzv. vyššími harmonickými tóny. Ty určují barvu tónu. Jejich zastoupením je vytvářen charakteristický tón různých hudebních nástrojů. Počáteční fáze jednotlivých složek výsledného tónu jeho barvu neovlivňují.

Zdrojem zvuku je chvění pružných těles (mechanických soustav), která kmitají v rozmezí slyšitelných frekvencí. Toto chvění se přenáší do okolního prostředí a vzbuzuje v něm zvukové vlnění. Jedná se například o kmitající strunu, tyč, jazýček píšťaly, plynový nebo vzduchový sloupec například v píšťale, rezonanční desku, nuceně kmitající membránu reproduktoru, nebo i dvojitý membránový jazýček lidského hlasového orgánu. O tom, jak se chvění přenáší do okolí, se můžeme přesvědčit jednoduchým pokusem s ladičkou. Chvění ladičky vyvoláme úderem do jednoho z ocelových ramen. Ramena kmitají příčně, o čemž se přesvědčíme, když k ladičce přiložíme lehkou kuličku zavěšenou na vlákně (obr. 2). Ladička je obvykle připevněna k tzv. rezonanční skřínce, na kterou se chvění přenáší nožkou ladičky



Obr. 2 Demonstrace zdroje zvuku

kmitající podélně. Rezonancí se pak zvuk ladičky zesílí. Pro ladičku je charakteristické, že kmitá harmonicky s určitou frekvencí. (Lepil, 1994, 2012, str. 78-79), (Vybíral, 2014, str. 207-208), (Pospíšil, 1987, str. 177-178)

1.2 Ultrazvuk

Ultrazvuk je elastické mechanické postupné vlnění, jehož frekvence f leží nad horní mezí slyšení lidského sluchového orgánu, tedy přibližně mezi hodnotami 16 kHz až 300 MHz. Mechanické vlnění o vyšších frekvencích se nazývá **hyperzvuk** a souvisí s procesy uvnitř molekul látek.

Velká frekvence a tedy velká intenzita ultrazvukových vln vede také k mnoha jejich účinkům, které zvukové vlnění nevykazuje v dostatečné míře. Jedná se například o zvláštní účinky mechanické, tepelné, chemické, nebo biologické.

S **mechanickými účinky** souvisí:

(a) **Kavitace** je jev, při kterém vlivem značných změn tlakových sil v kapalině v jejich určitých místech vznikají (při velkém vzrůstu rychlostí jejich částic) tak velké podtlaky, že se překoná soudržnost částic. Tak dochází v kapalině ke vznikům dutin, které však v důsledku působení mezimolekulárních sil prudce zmizí a uvolňují tak velkou mechanickou energii. Doba, za kterou proběhne jejich zánik, je řádově 10^{-6} sekund. Aby došlo k tomuto jevu, musí mít intenzita vysílaného ultrazvukového vlnění jistou prahovou hodnotu, která závisí na druhu kapaliny, na její viskozitě, a také na hydrostatickém tlaku. Tato hodnota obvykle bývá kolem 10^3 až $10^4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Nepříznivý vliv tohoto jevu je možné pozorovat například při práci lodních šroubů, při pohybu lopatek vodních turbín atd. Rychlým pohybem těchto částí dochází k rozkmitání celého systému na ultrazvukových frekvencích, čímž se narušuje pevnost látek, které s kapalinou přicházejí do styku.

Kavitační účinky se dají ovšem i využít, a to například v ultrazvukových čistítkách jemných strojních součástek, při vrtání otvorů v tvrdých materiálech ultrazvukovými vrtačkami, při dispergování pevných látek do kapalin atd. Těmito účinky lze také odstranit zbytky laku nebo nečistot ze součástí ponořených do příslušného rozpouštědla ozařovaného ultrazvukem, nebo i omezovat tvorbu kotelního kamene. Díky kavitačním účinkům je také možné pájení hliníku, což za normálních podmínek možné není, protože na hliníku a jeho slou-

čeninách okamžitě působením vzduchu vzniká vrstvička oxidu, která brání spojení konstrukčních částí pájením nebo svařováním. Kavitací se tato vrstvička rozruší a kovy se tak spojí.

- (b) **Koagulace**, tedy shlukování a spojování menších částecek ve větší, je jev, ke kterému dochází tehdy, když ultrazvukové vlnění působí na částecčky pevné nebo kapalné látky rozptýlené v plynech. Tohoto jevu se využívá například k odstraňování prachu nebo mlhy ze vzduchu.
- (c) Vlivem ultrazvukového vlnění dochází v kapalinách k **disperzi**, je to rozptylování větších částecek v menší, tedy opačný jev k předchozímu. V intenzivním elektrickém poli vznikají v kapalinách velké přetlaky střídané s podtlaky, takže dochází k roztrhání kapaliny. Toho se využívá k vytváření emulzí, například oleje ve vodě, rtuti ve vodě apod. Jde-li o suspenze nebo koloidní roztoky, dochází vlivem ultrazvuku k vzájemným nárazům pevných částic, tím se částecčky pevné látky rozbíjejí a suspenze se zjemňuje. Tohoto jevu se využívá v potravinářském průmyslu, například ke zjemňování čokolády nebo k intenzivní extrakci aromatických látek. Podobné účinky na zjemňování struktury má intenzivní ultrazvukové pole také v roztavené slitině kovů.
- (d) Ultrazvuku se také využívá k **odplyňování kapalin**, kdy se intenzivním kmitavým pohybem částic vlivem ultrazvuku částice plynu uvolňují.
- (e) Ultrazvukové vlny, které působí na kovy, způsobují jejich **porušování**, jestliže je porušován jejich povrch, jedná se o korozi kovů.

Tepelné účinky ultrazvuku jsou důsledkem jeho absorpce, tedy disipace. Využívá se jich u kapalin s nízkou teplotou varu k jejich zplyňování nebo destilaci. Je-li intenzita ultrazvukových vln velká, může být lokální ohřátí tak velké, že má ničivé účinky na živou tkáň. V lékařství je mírných tepelných účinků ultrazvuku využíváno k hloubkovému prohřívání některých částí těla, tento jev se nazývá ultrazvuková diatermie.

Chemické účinky ultrazvuku mohou vyvolávat chemické reakce, které za normálních okolností nenastávají. Může také docházet k rozkladu vysoce polymerizovaných látek (např. cukru, škrobu, nebo arabské gummy). Dále tyto účinky způsobují

spuštění labilních chemických reakcí, kdy například přehřáté roztoky vybuchují, nebo způsobují zčernání fotografické vrstvy atd.

Biologické účinky ultrazvuku se projevují například vyvoláním víření obsahu buněk, bakterií a krvinek, popřípadě vyvoláním jeho exploze. Účinkem ultrazvuku červené krvinky podléhají hemolýze, tedy uvolňování hemoglobinu. U menších živočichů ultrazvuk způsobuje dráždění, křeče, nebo ochromení některých částí, v krajním případě může způsobit také smrt. Ultrazvukové vlnění působí i na člověka. Projevuje se například zahříváním ozařované části těla, bolestivostí a při delším působení mohou vzniknout v místě ozařování puchýře.

1.2.1 Použití ultrazvuku v praxi

Při ultrazvukových měřeních je na předmět směřován úzký svazek ultrazvukových paprsků. Protože je vlnová délka ultrazvuku menší než vlnová délka zvukového vlnění, je šíření ultrazvuku méně ovlivněno ohybem. Výrazný je tedy odraz ultrazvuku od překážek a méně je pohlcován v kapalinách i pevných látkách, naopak v plynech dochází k jeho značné absorpci.

Této vlastnosti se využívá například u ultrazvukových lokátorů, kde je odražený ultrazvukový puls od překážky znovu přijat a podle jeho zpoždění proti vyslanému pulsů se určuje jeho vzdálenost od překážky. Ultrazvukovým lokátorem je možné zjišťovat hloubku mořského dna, jeho tvar, vzdálenost jiných lodí, ponorek, ledoborců, nebo i výskyt hejna ryb. Další metodou využívající ultrazvuku je ultrazvuková defektoskopie. Tato metoda zjišťuje vady a struktury materiálů. Pokud se vyskytne v materiálu prozařovaném ultrazvukem dutina nebo nehomogenita, nastává na ní úplný odraz ultrazvukového vlnění. To lze zjistit buď tak, že při průchodu ultrazvuku materiálem je vada v místech, kde detektor prakticky nedává signál, nebo tak, že odražený signál vykazuje větší intenzitu. Podle zpoždění odraženého signálu je možné zjistit hloubku nebo polohu vady. Možné je jeho využití také k realizaci telefonního nebo telegrafního spojení například ve velkých mořských hloubkách mezi ponorkami, nebo ke sterilizaci tekutin a lékařských prostředků. V lékařství se odrazu ultrazvuku využívá například při lékařské diagnostice, kde se v mnoha případech ultrazvukem nahrazuje zdraví škodlivé rentgenové záření. Při diagnostice zvláštní sonda přiložená k lidskému tělu vysílá ultrazvukový signál o vysoké frekvenci (řádově MHz). Signál se odráží od vnitřních orgánů zpět

k sondě, kde se zvláštními detektory přeměňují na elektrický signál. Po zpracování počítačem je signál zobrazen na monitoru přístroje, vzniká tak velmi detailní obraz vnitřních orgánů. (Pospíšil, 1987, str. 190, 192-194), (Lepil, 1994, 2012, str. 89-90)

1.3 Infrazvuk

Jedná se o mechanické vlnění o frekvenci menší než 16 Hz. Velmi dobře se šíří například ve vodě. Lze tak například zjistit tzv. „hlas moře“, který několik hodin předem duněním předpovídá příchod vlnobítí. Toto varování vnímají někteří mořští živočichové, například ryby nebo medúzy.

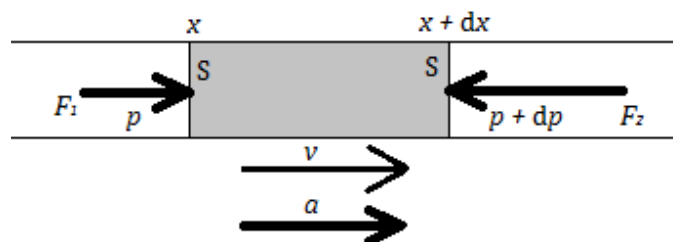
Infrazvuk lidský sluchový orgán sice nevnímá, ale při frekvenci blízké frekvenci srdečního tepu, je infrazvuk pro lidský organismus škodlivý a může způsobit i smrt. (Lepil, 1994, str. 90)

1.4 Fyzikální akustika

Fyzikální akustika využívá k popisu zvuku zákony mechanického vlnění. Veličiny, které zavádí, mohou být objektivně měřitelné přístroji. Tyto přístroje jsou nezávislé na vnímání zvuku lidským sluchovým orgánem. Patří k nim: akustická výchylka, akustická rychlost, akustický tlak, akustická impedance, akustický výkon, akustická intenzita a hustota akustické energie. (Vybíral, 2014, str. 209)

1.4.1 Akustický tlak

V plynném prostředí o hustotě ρ a statickém tlaku p_0 se šíření zvuku projevuje tlakovými změnami popsány veličinou **akustický tlak** p_a . Při odvozování budeme vycházet z Newtonova pohybového zákona, aplikovaného na hmotný element tekutého prostředí, kterým se ve směru osy x šíří rovinná zvuková vlna. Proto budeme za hmotný element volit váleček s podstavou v rovině vlny o plošném obsahu S , výšce dx a hmotnosti $dm = \rho S dx$ (obr. 3).



Obr. 3 Akustický tlak

Element se pohybuje rychlostí $v = v_m \cos \xi$, kde

$$\xi = \omega \left(t - \frac{x}{v_z} \right).$$

Okamžité zrychlení elementu je

$$a = \frac{\partial v_a}{\partial t} = \frac{\partial v_a}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\omega v_m \sin \xi.$$

Na hmotný element působí síly F_1 , F_2 a podle pohybového zákona platí, že $F_1 + F_2 = dm \cdot a$. Všechny vektory mají směr osy x , a proto můžeme psát skalární vztah

$$F_2 - F_1 = S(p + dp) - S p = S dp = -dm \cdot a = \rho S dx \cdot \omega v_m \sin \xi.$$

Z toho

$$dp = \rho \omega v_m \sin \xi \cdot dx.$$

Závislost okamžitého tlaku na souřadnici x pro daný okamžik t určíme integrací.

Diferencováním vztahu $\xi = \omega \left(t - \frac{x}{v_z} \right)$ dostaneme

$$d\xi = -\frac{\omega}{v_z} dx \Rightarrow dx = -\frac{v_z}{\omega} d\xi.$$

Pak

$$p = - \int \rho v_z v_m \sin \xi \cdot d\xi = \rho v_z v_m \cos \xi + p_0 = p_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v_z} \right) \right] + p_0 = p_a + p_0,$$

kde integrační konstanta p_0 je střední hodnota atmosférického tlaku,

$$p_a = p_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v_z} \right) \right]$$

je akustický tlak pro rovinnou vlnu a

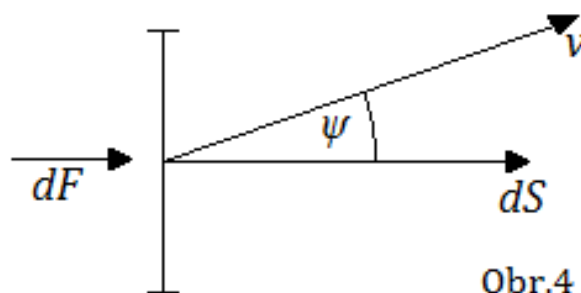
$$p_m = \rho v_z \omega u_m = \rho v_z v_m$$

bude **amplituda akustického tlaku**. Akustický tlak je ve fázi s akustickou rychlostí. Jeho jednotkou je pascal ($\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$). (Vybíral, 2014, str. 210-211)

1.4.2 Hlasitost a intenzita zvuku

Zvuková vlna představuje periodické stlačování a rozpínání pružného prostředí, ať už vzduchu, vody nebo například kovu. To znamená, že třeba ve vzduchu dochází k periodickým změnám atmosférického tlaku, které uchem vnímáme jako zvuk o určité hlasitosti.

Hlasitost zvuku závisí na citlivosti sluchu a je značně subjektivní. Pro objektivní hodnocení zvuků, se proto zavádí tzv. **intenzita zvuku** I . Ta je definována jako zvukový výkon, procházející jednotkovou plochou, kolmo



postavenou ke směru šíření. Nyní budeme uvažovat podélnou vlnu, kde rychlost kmitání částic se děje ve směru šíření zvukové vlny.

Jestliže normála plošky dS svírá se směrem šíření úhel ψ (obr. 4), pak je okamžitý výkon dP procházející ploškou dS roven

$$dP = v dF = v p dS \cos \psi,$$

kde v je rychlost kmitání částic prostředí, p akustický tlak a dF síla, kterou působí tlak p na plošku dS .

Celkový výkon procházející libovolnou plochou S je tedy

$$P = \iint_S p v \cos \psi dS.$$

Jestliže budou tlak i rychlost v v každém místě plochy konstantní a jestliže bude plocha kolmá ke směru šíření, bude okamžitý výkon roven

$$P = p v S$$

a intenzita zvuku bude

$$I = \frac{P}{S} = p v.$$

V akustice se dá, stejně jako v elektřině, ukázat, že bude-li $p = p_0 \sin \omega t$ a $v = v_0 \sin(\omega t + \phi)$, kde p_0 a v_0 jsou amplitudy obou veličin a ϕ fázový posuv mezi nimi, můžeme střední výkon během jedné periody vypočítat podle

$$P = \frac{S}{T} \int_0^T p v dt = S \frac{p_0 v_0}{2} \cos \phi,$$

kde T je doba kmitu.

Zavedeme-li dále, stejně jako v elektřině, efektivní hodnoty veličin p a v , výrazy

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}, \quad v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}},$$

pak bude

$$P = S p_{ef} v_{ef} \cos \phi$$

a

$$I = p_{ef} v_{ef} \cos \phi.$$

Jednotkou akustické intenzity je $W \cdot m^{-2}$.

Lidský sluchový orgán vnímá zvukové intenzity ve velmi širokém rozsahu. Poměr mezi intenzitou nejhlasiťejšího a nejniťšího tónu činí asi 10^{13} . Pro sílu zvukového vjemu platí tzv. Weberův-Fechnerův psychofyzikální zákon, podle kterého je síla sluchového vjemu úměrná logaritmu intenzity dopadajícího zvuku. Neboli, při nárůstu intenzity zvuku geometrickou řadou, narůstá síla vjemu řadou aritmetickou. Síla sluchového vjemu závisí i na výšce tónu.

Podle Weberova-Fechnerova zákona je absolutní přírůstek hladiny akustické intenzity dL_a úměrný relativnímu přírůstku akustické intenzity téže frekvence, tedy

$$dL_a \sim \frac{dI_a}{I_a}.$$

Integrací tohoto výrazu získáme logaritmus numerické hodnoty akustické intenzity, přičemž s ohledem na volbu jednotky hladiny akustické intenzity decibel (dB) volíme logaritmus dekadický, tedy

$$L_a = K \log\{I_a\} + C,$$

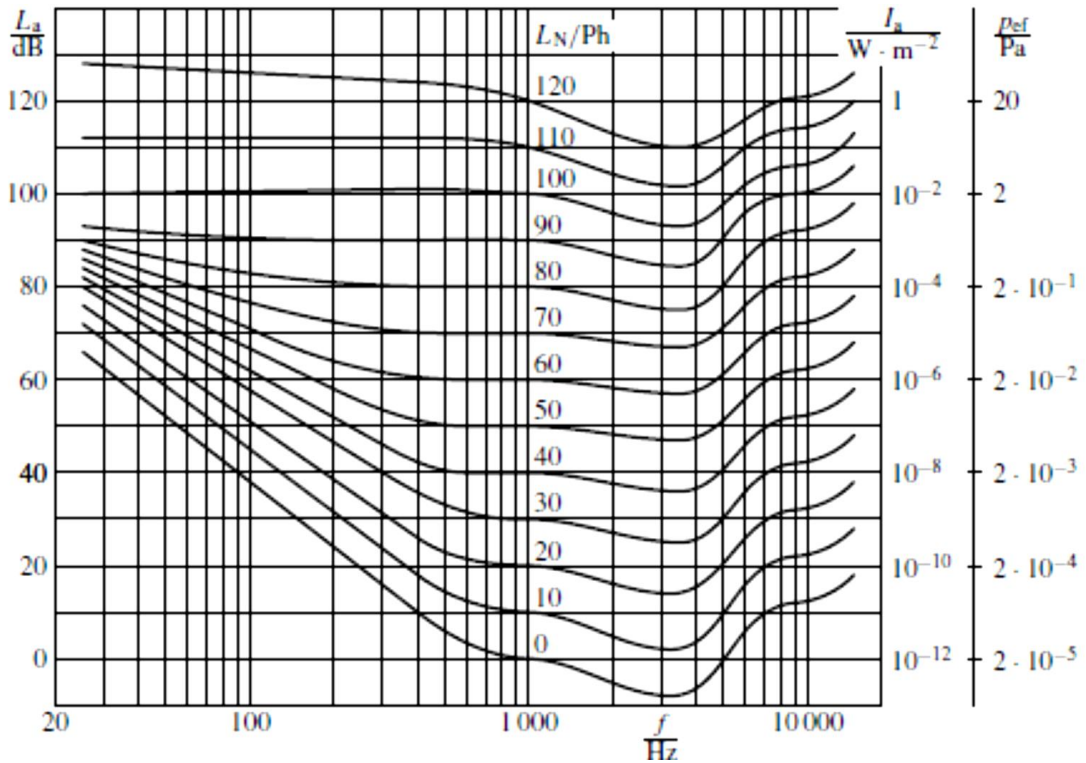
kde K , C jsou konstanty. Multiplikační konstantu K volíme s ohledem na volbu jednotky decibel $K = 10$. Volba integrační konstanty C je vázaná požadavkem, aby hladina akustické intenzity byla nulová právě pro **práh slyšení**, což je krajní hodnota intenzity lidského slyšení, která je pro referenční tón o frekvenci 1 000 Hz statisticky určena na hodnotu $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ a je rovna hodnotě 0 dB. Musí tedy být $C = -10 \log\{I_0\}$. Pak bude L_a rovno tvaru

$$L_a = 10 \log \frac{I_a}{I_0}.$$

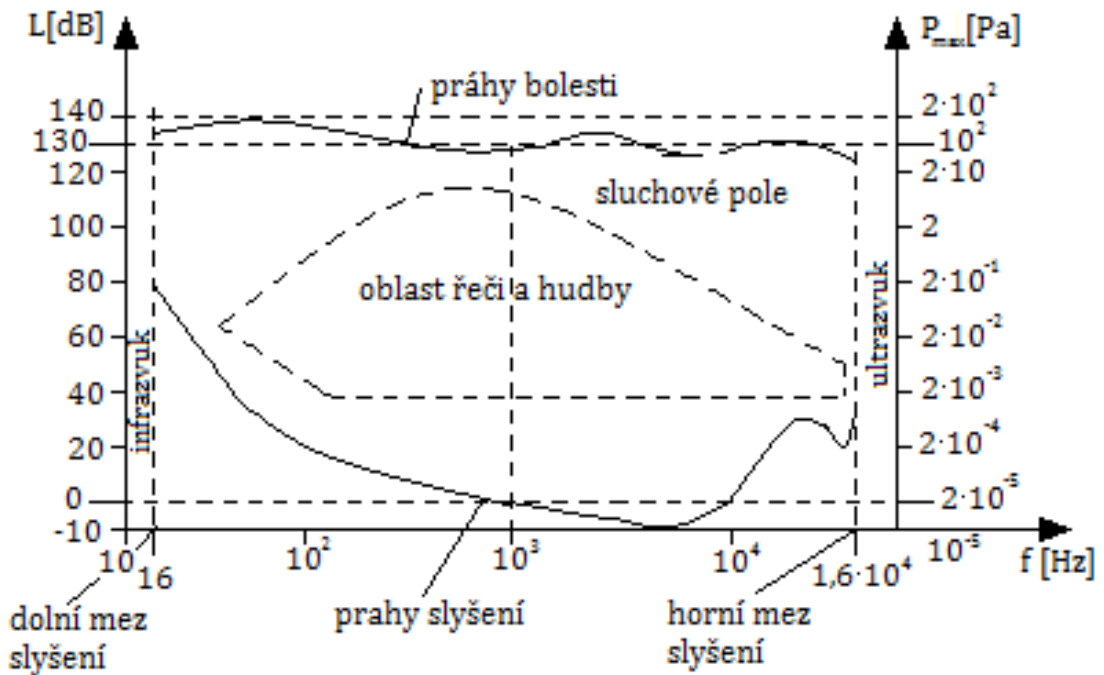
Této veličině říkáme hladina hlasitosti a její jednotkou je jeden fon (ozn. Ph). Ten platí pro referenční tón o frekvenci 1 000 Hz a pro prahovou intenzitu $I_0 = 10^{-12} W \cdot m^{-2}$ při referenčním tónu. Budeme-li vycházet z takto určené stupnice hladiny hlasitosti, můžeme vytvořit stupnici hlasitosti i pro jiné frekvence. To bylo v minulosti provedeno tak, že pro každou hladinu hlasitosti byla měněna intenzita zvuku tak, aby jeho hlasitostní vjem byl stejný jako u referenčního tónu. Tímto měřením získáme grafické vyjádření vztahů mezi hladinou intenzity zvuku a hladinou hlasitosti pro různé frekvence. Tedy tzv. **křivky stejné hladiny hlasitosti** neboli **Barkhausenovy křivky** (obr. 5).

Sluchové pole a oblast řeči a hudby (obr. 6) jsou značně subjektivní. To znamená, že prahy slyšení I_0 a tlak p_0 závisí také značně na frekvenci tónu. Na této frek-

venci také závisí prahy bolesti, což jsou nejvyšší hodnoty akustické intenzity a tlaku, při kterých nepůsobí vnímaný harmonický tón ještě pocit bolesti v lidském sluchovém orgánu. Pro referenční tón 1000 Hz je hodnota prahu bolesti $I_b = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. (Vybíral, 2014, str. 214-216), (Podobský, 1999, str. 92-95), (Lepil, 1994, str. 87,88), (Pospíšil, 1987, str. 181)



Obr. 5 Křivky stejné hladiny hlasitosti (Vybíral, 2014, str. 218)



Obr. 6 Sluchové pole, oblast řeči a hudby

1.4.3 Rychlost zvuku

První měření rychlosti zvuku provedl páter Marin Mersenne roku 1656, když pozoroval výstřely dělových koulí a naměřil hodnotu $428 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rychlost zvuku ve vodě změřili roku 1827 na ženevském jezeře Jean-Daniel Colladon a Jacques Charles François Sturm (obr. 8). Do vody byl pověšen zvon, do kterého uhodila palička, ta současně doutnákem zapálila na pánvici střelný prach. Z druhé lodi byl pozorován záblesk. Lodě byly vzdáleny 13 487 m, zvuk vykonal tuto dráhu za 9,4 s, což odpovídá rychlosti $1\,435 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, což je na tak jednoduché prostředky moc pěkný výsledek, rychlost zvuku ve vodě se totiž pohybuje kolem hodnoty $1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

V roce 1866 popsal August Kundt měření rychlosti zvuku pomocí skleněné trubice (obr. 7). Uvnitř je nasypán plavuňový prášek, na jedné straně je trubice uzavřena destičkou B, připevněnou ke skleněné tyči, na druhé straně je uzavřena posuvným pístem A. Tyč je uprostřed upevněna, třeme-li vnější konec látkou, namočenou v okyselené vodě, rozkmitá se a s ní i destička v trubici. Zvuk proběhne trubicí a odrazí se od pístu, který posouváme tak, aby vznikly stojaté vlny. Protože známe frekvenci f a délku vlny λ , můžeme změřit v trubici podle rozložení plavuňového prášku tak, že změříme vzdálenost dvou vedle sebe následujících kmiten, či uzlů, získáme hodnotu $\frac{\lambda}{2}$, kterou zdvojnásobíme a zjistíme tak hodnotu λ . Rychlost zvuku pak vypočítáme podle vzorce $v_z = f \cdot \lambda$.



Obr. 7 Kundtova trubice

V dnešní době dělíme metody měření rychlosti zvuku na přímé a nepřímé.

Přímé metody měření jsou založeny na definičním vztahu pro rovnoměrnou rychlost, tedy rychlost zvuku v_z je určena jako poměr dráhy s a příslušného času t ,

$$\text{tj. } v_z = \frac{s}{t}$$

$3\,200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v oceli $5\,000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a ve skle je pak rychlost zvuku rovna přibližně $5\,200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. (Faukner, 1939, str. 155), (Pospíšil, 1987, str. 187,188), (Lepil, 1994, str. 82, 83)

1.4.4 Dopplerův jev

Dopplerův jev, nebo též Dopplerův princip, byl objeven roku 1842 v Praze rakouským matematikem a fyzikem Christianem Andreasem Dopplerem (žil v letech 1803-1853). Tento jev platí pro postupná vlnění a jeho klasickou verzi lze podle Pospíšila (1987) vyslovit takto:

„Jestliže se oscilátor, který je zdrojem postupného vlnění, a pozorovatel pohybují relativně k sobě nebo od sebe, jeví se pozorovateli, že při vzájemném přibližování je frekvence vnímaného vlnění vyšší a při vzájemném vzdalování nižší, než frekvence vlnění přijímaného pozorovatelem za jinak stejných okolností tehdy, když oscilátor a pozorovatel jsou v relativním klidu.“

Pokud Dopplerův jev nastává při normálních rychlostech, tedy při rychlostech mnohem menších, než je rychlost elektromagnetického postupného vlnění ve vakuu c , nazývá se klasickým Dopplerovým jevem. V opačném případě se jedná o relativistický Dopplerův jev, který je diskutován v teorii relativity.

Nyní budeme pro jednoduchost uvažovat, že prostředí, ve kterém se vlnění šíří, tedy např. vzduch, je v klidu. Klidovou frekvenci zdroje označíme f_0 . (Pospíšil, 1987, str. 165), (Vybíral, 2014, str. 189)

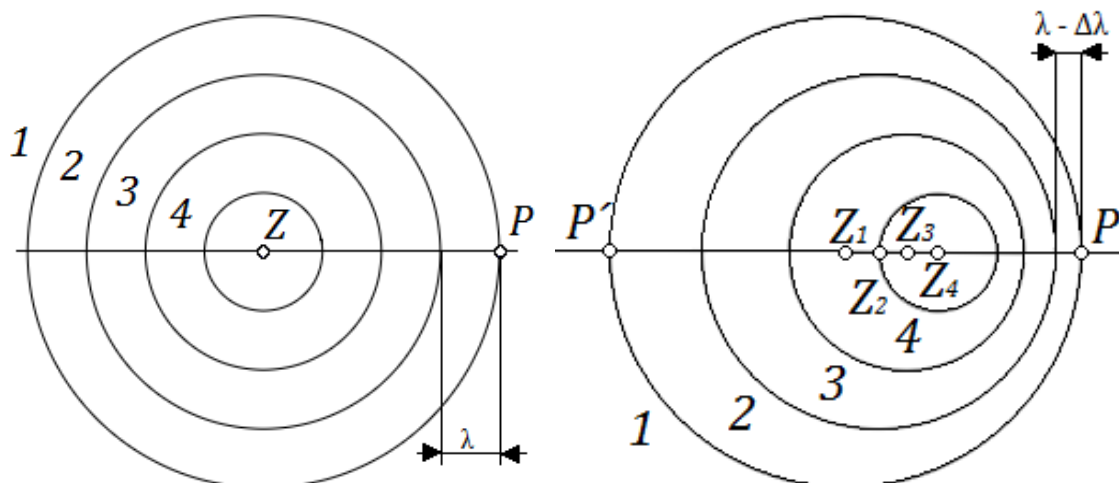
(a) Zdroj vlnění se pohybuje vzhledem k zemi, pozorovatel je v klidu

Uvažujme výchozí situaci, že zdroj i pozorovatel jsou v klidu vzhledem k prostředí, ve kterém se vlnění šíří rychlostí v_z . Pro tuto situaci jsou na obr. 9a) znázorněny za sebou následující po čtyřech periodách T jdoucí čelní vlnoplochy. Pozorovatel P přijímá vlnění o klidové frekvenci $f_0 = \frac{1}{T} = \frac{v_z}{\lambda}$.

Jestliže se zdroj začne pohybovat rychlostí v_1 vzhledem k pozorovateli (obr. 9b), dojde v tomto směru ke zhušťování vlnoploch. Zdroj vyšle vlnoplochu 1 z polohy Z_1 , ale za dobu T se přemístí do polohy Z_2 vzdálené od Z_1 o v_1T , atd. Vzdálenosti mezi dvěma sousedními čelními vlnoplochami se tedy zmenší o $\Delta\lambda = v_1T$, neboli vlnová délka v tomto směru bude $\lambda - \Delta\lambda$. Pozorovatel P tedy bude registrovat frekvenci

$$f_1 = \frac{v_z}{\lambda - \Delta\lambda} = \frac{v_z}{\lambda - v_1 T} = \frac{v_z}{\frac{v_z - v_1}{f_0}} = f_0 \frac{v_z}{v_z - v_1} > f_0.$$

Vlnění přijímané pozorovatelem bude mít tedy vyšší frekvenci než je klidová frekvence zdroje. Bude-li se zdroj naopak od pozorovatele vzdalovat (pozorovatel P' na obr. 9b) bude se vzdálenost mezi čelními plochami zvětšovat a přijímané frekvence zmenšovat, což vyplývá z předchozího vztahu při změně znaménka u v_1 . Změna frekvence podle předchozího vztahu je objektivní, protože ji registrují všichni pozorovatelé na daném místě.



a) Zdroj i pozorovatel jsou v klidu Obr. 9 b) Zdroj se pohybuje rychlostí v

(b) Zdroj vlnění je v klidu vzhledem k zemi, pozorovatel se pohybuje

Když byl zdroj i pozorovatel v klidu (obr. 9a), prošlo místem P pozorovatele za 1 sekundu f_0 vln, protože $f_0 = \frac{1}{T} = \frac{v_z}{\lambda}$. Jestliže se bude pozorovatel pohybovat doprava, tedy kladnou rychlostí v_2 , bude čelním vlnoplochám unikat a místo f_0 vln jich přijme o $\frac{v_2}{\lambda}$ méně. Frekvence přijímaná pozorovatelem bude tedy

$$f_2 = f_0 - \frac{v_2}{\lambda} = f_0 \frac{v_z - v_2}{v_z} < f_0,$$

dojde tedy ke zmenšení přijímané frekvence. Jestliže se bude naopak pozorovatel pohybovat ke zdroji, přijme za 1 sekundu o $\frac{v_2}{\lambda}$ vln více a dojde ke zvýšení přijímané frekvence oproti klidové frekvenci zdroje. To vyplývá z předchozího vztahu při změně znaménka rychlosti v_2 . Změnu frekvence, podle předchozího vzorce, registruje pouze pohybující se pozorovatel.

(c) Zdroj vlnění i pozorovatel se pohybuje vzhledem k zemi

Jestliže se zdroj i pozorovatel budou pohybovat stejným směrem, musíme pro případ popsaný vzorcem z bodu (b) vzít v úvahu zhuštění čelních vlnoploch popsané vztahem z bodu (a). Frekvence přijímaná pozorovatelem bude tedy

$$f_{12} = f_1 \frac{v_z - v_2}{v_z} = f_0 \frac{v_z - v_2}{v_z - v_1}.$$

(d) Zdroj vlnění, pozorovatel i prostředí se pohybuje vzhledem k zemi

Jestliže se stejným směrem jako zdroj a pozorovatel bude pohybovat i prostředí, v němž se mechanické (zvukové) vlnění šíří, zvětší se o jeho rychlost u i rychlost šíření v tomto směru. Výsledný vztah tedy dostaneme, zaměníme-li ve vzorci z bodu (c) rychlost v_z za rychlost $v_z + u$. Pak

$$f = f_0 \frac{v_z + u - v_2}{v_z + u - v_1},$$

kde všechny rychlosti jsou kladné ve směru od zdroje k pozorovateli. V dalším zobecnění by byla zahrnuta situace, kdy rychlosti v_1 a v_2 nebudou ležet na téže přímce. Potom se uplatní jen složka příslušné rychlosti do spojnice zdroj- pozorovatel. (Vybíral, 2014, str. 189-191)

1.4.5 Nucené kmitání a rezonance

Stálosti amplitudy kmitání je možné dosáhnout pouze tehdy, je-li kmitajícímu tělesu dodávána energie. Potom mluvíme o netlumených kmitech. V opačném případě, tedy pokud se amplituda s rostoucím časem snižuje, až úplně zanikne, jedná se o tlumené kmitání. V praxi je každý kmitavý pohyb, kterému není dodávána energie, tlumený, je to způsobeno tlumící silou F_t , která působí vždy proti směru pohybu a jedná se například o vnitřní tření v materiálu nebo odpor prostředí.

Periodické síle, která musí působit na pružné těleso, aby začalo kmitat, říkáme **budící síla**. A protože tato síla nutí těleso do kmitavého pohybu, mluvíme o **nuceném kmitání**.

Nechť na pružný systém o hmotnosti m a tuhosti k , tlumený silou $F_t = -h \frac{dy}{dt}$, kde h je konstanta úměrnosti, působí proměnná síla $F = F_0 \sin \Omega t$. Pohybová rovnice takového systému bude

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky - h \frac{dy}{dt} + F_0 \sin \Omega t.$$

Podělením veličinou m a zavedením veličin δ a ω_0 obdržíme pohybovou rovnici nucených kmitů ve tvaru

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\delta \frac{dy}{dt} + \omega_0 y = A_0 \sin \Omega t,$$

kde

$$2\delta = \frac{h}{m}, \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad A_0 = \frac{F_0}{m}.$$

Zde δ představuje tlumení soustavy, ω_0 bude vlastní frekvencí signálu a A_0 je amplituda signálu.

Obecné řešení pohybové rovnice nucených kmitů bude

$$y = C e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi) + A \sin(\Omega t + \varphi).$$

Člen

$$y_1 = C e^{-\delta t} \sin(\omega t + \varphi)$$

představuje tlumený kmit s frekvencí

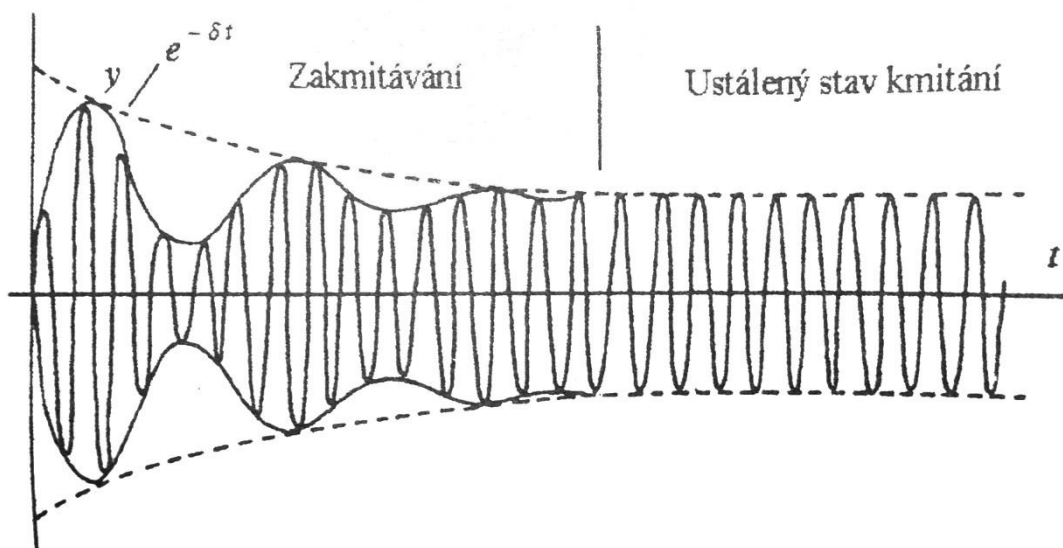
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

obecně různou od frekvence tlumící síly Ω . Časem tento člen zanikne a zůstane

$$y = y_2 = A \sin(\Omega t + \varphi),$$

tzv. ustálené řešení. Než však člen y_1 zanikne, bude výsledný kmit součtem dvou kmitů, tedy $y = y_1 + y_2$. Oba ale mají obecně různou frekvenci, a to ω a Ω .

Výsledným součtem dvou kmitů různé frekvence bude kmit s časově proměnnou amplitudou, tedy velmi složité kmity s rázy, které jsou vidět na obr. 10. Tomuto stavu říkáme **zakmitávání**.



Obr. 10 (Podobský, 1999, str. 34)

Zakmitávací procesy jsou v praxi velice závažné. Kolísání amplitudy může být tak velké, až dojde k poškození strojních součástí, nebo celého kmitajícího systému. V oboru hudebních nástrojů je naopak zakmitávání vítané, neboť ovlivňuje barvu zvuku jednotlivých druhů nástrojů.

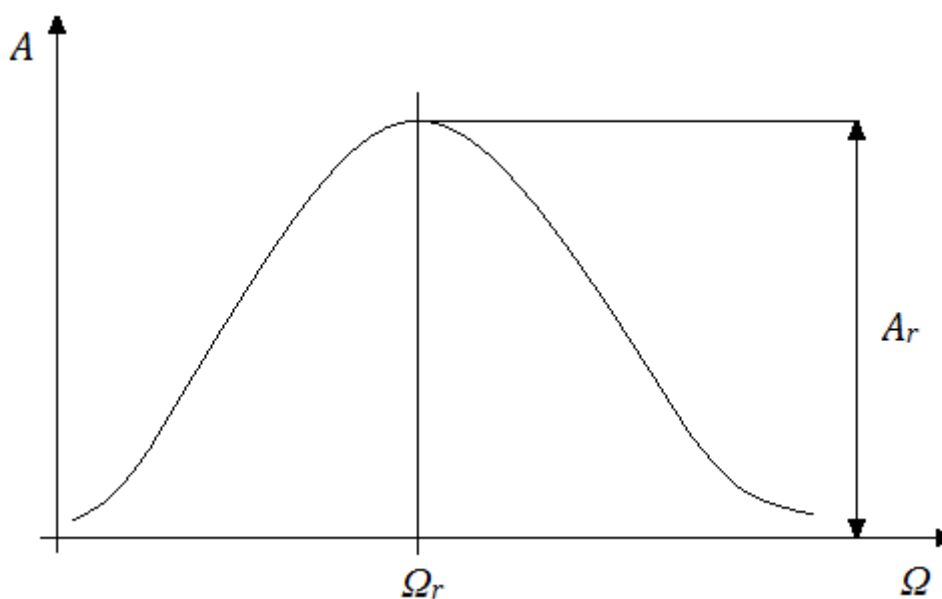
Ve druhém členu je

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2\Omega^2}}$$

a

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}.$$

Je vidět, že amplituda A nucených kmitů závisí na několika parametrech. Je to budící síla F_0 , hmotnost kmitajícího systému m , tlumení systému δ a také vlastní frekvence systému ω_0 a frekvence budící síly Ω . Tuto závislost můžeme vidět na *obr. 11*. Amplituda je maximální pro určitou frekvenci Ω_r . Tomuto stavu říkáme **rezonance** a frekvenci Ω_r **rezonanční frekvence**.



Obr. 11 Závislost amplitudy na frekvenci

Podle předchozího vzorce pro amplitudu bude amplituda maximální, pro minimální výraz $f(\Omega) = (\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\delta^2\Omega^2$.

Minimum tohoto výrazu získáme, pokud funkci $f(\Omega)$ zderivujeme a položíme ji rovnu nule.

Jednoduchým výpočtem dostaneme

$$\frac{df(\Omega)}{d\Omega} = -\omega_0^2 + \Omega^2 + 2\delta^2 = 0,$$

z čehož plyne, že

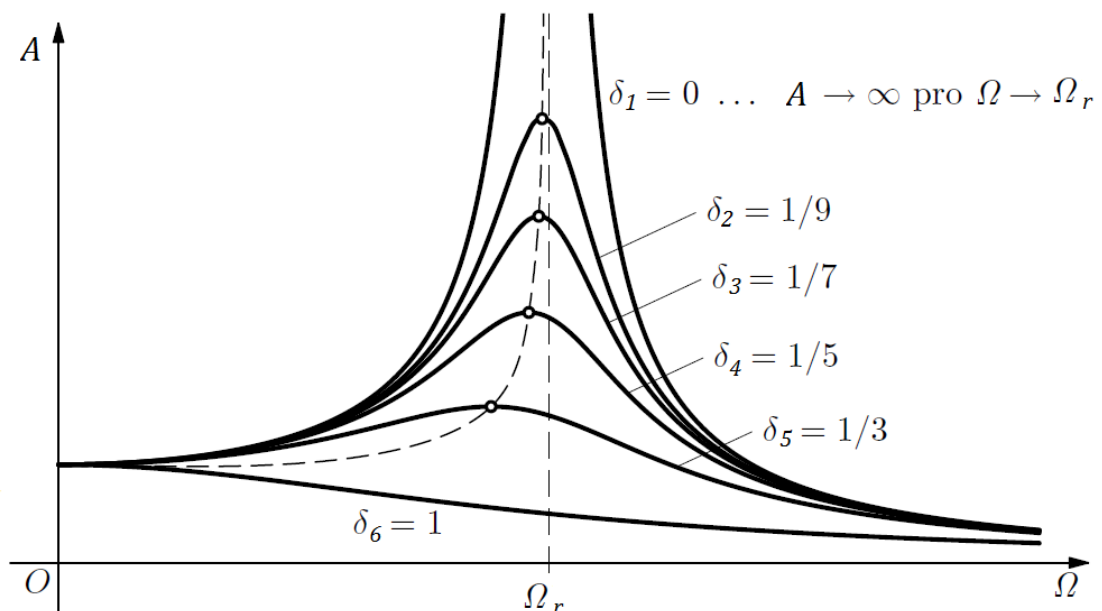
$$\Omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}.$$

Tato hodnota není stejná, ani jako frekvence vlastních kmitů ω_0 , ani jako frekvence kmitů tlumených ω , protože $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, ovšem stejně jako tato frekvence závisí na konstantě tlumení δ .

Velmi závažná je při rezonanci tzv. rezonanční amplituda A_r (obr. 11, obr. 12). Pokud dosadíme do vzorce pro amplitudu za rezonanční frekvenci Ω rezonanční frekvenci Ω_r , podle vzorce, obdržíme po úpravě výraz

$$A_r = \frac{F_0}{2 m \delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}.$$

Rezonanční amplituda tedy závisí nejen na velikosti síly F_0 a na hmotnosti kmitavé soustavy m , ale také na jejím tlumení δ . Bude-li tlumení nulové ($\delta_1 = 0$), rezonanční amplituda bude maximální. Při postupném zvyšování tlumení se bude rezonanční amplituda snižovat a minimální hodnoty dosáhne při hodnotě tlumení $\delta_6 = 1$ (obr. 12).



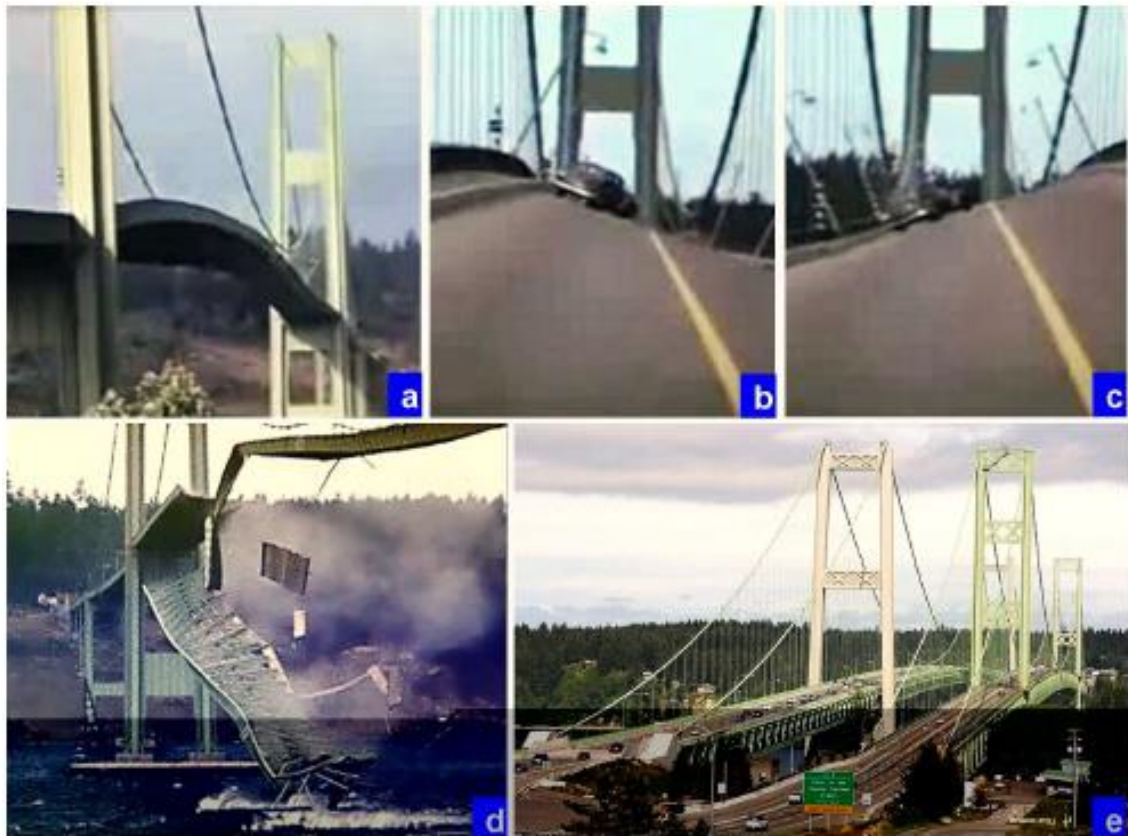
Obr. 12 Rezonance

V praxi to má významný důsledek. Předměty s malým tlumením, např. kovové tyče, struny se rozkmitají jen frekvencí velmi blízkou rezonanční frekvenci. Akustické útvary s velkým tlumením, jako např. vzduchové sloupce, dřevěné tyče a desky, je možné rozkmitat i frekvencí vzdálenou od jejich rezonanční frekvence.

Rezonance, která je v akustice jedním z nejdůležitějších fyzikálních jevů, může být jak užitečná, tak i škodlivá. Žádaná je například v elektronických obvodech, v oblasti hudebních nástrojů (rezonanční skřínky) i u stavby akustických sálů.

Přispívá ovšem také k vyšší hlučnosti prostředí, nebo mohou být nebezpečně rozkmitány různé součástky, až dojde k jejich poškození. Mohutnými mechanickými kmity je totiž materiál extrémně namáhán, takže může dojít k jeho prasknutí nebo zlomu. (Podobský, 1999, str. 31-36), (Faukner, 1939, str. 78-80), (Vybíral, 2014, str. 37-42)

Jasným příkladem, jak může být rezonance nebezpečná je případ, který se stal v roce 1940 nedaleko města Tacoma ve státě Washington. Lanový most, který byl v mořské úžině postaven, se důsledkem samobuzeného rezonančního kmitání zřítil. Most byl dlouhý 1810 m, přičemž jeho 12 m široká mostovka byla zavěšena pomocí lan na dvou ocelových pylonech o rozteči 855 m. Výška pylonů byla 188 m, z čehož 60 m bylo pod vodní hladinou. Most se 7. listopadu, tedy pouhé 4 měsíce po uvedení do provozu, dostal při rychlosti větru $67 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \doteq 19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ do rezonančního ohybově-torzního kmitání o asi 18 kmitech za minutu. Kmity byly buzeny aerodynamickými silami od větru rychlosti stálé velikosti a směru, po dobu asi 4 hodin. Při vzniklém divergentním kmitavém pohybu začala mostovka ve středním poli torzně kmitat s úhlovými amplitudami postupně až 40° , současně docházelo k ohybovému kmitání s příčnými amplitudami až 8,4 m. Nakonec došlo k porušení pevnosti hlavních nosných elementů a most se zřítil. K této havárii došlo proto, že se frekvence působícího větru shodovala s první rezonanční frekvencí mostu, to se mohlo stát díky nežádoucí souhře rychlosti větru, rozměrů hlavních součástí, rezonanční frekvence, málo vhodné konstrukce mostu a dlouhé době působení stálého větru. (Vybíral, 2014, str. 97-98)



Obr. 13 Most v Tacomě (USA): a, b, c) samobuzené ohybové a torzní kmitání, d) zřícení mostu 7. listopadu 1940, e) nové dva mosty postavené v letech 1952 (vpravo) a 2007 (vlevo). (Vybíral, 2014, str. 97)

1.5 Fyziologická akustika

Fyziologická akustika přistupuje k popisu zvuku z hlediska jeho vnímání lidským sluchovým orgánem, tj. uchem. Rozhodující je účinek zvuku působící na ucho, který se nazývá sluchový vjem.

1.5.1 Sluchový orgán

Sluchový orgán neboli ucho je po zraku druhý nejdůležitější senzorický orgán člověka. Ucho zachycuje zvukovou informaci ve formě zvukového vlnění, které vlny přivádí ke zpracování do mozku jako zvukový vjem.

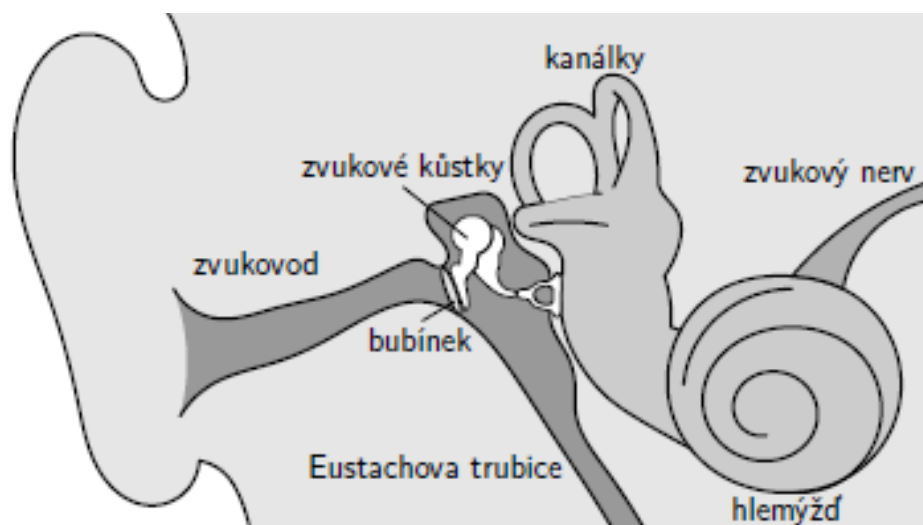
Ucho (*obr. 14*) je složitý orgán, který se skládá ze tří hlavních částí: zevního ucha, středního ucha a vnitřního ucha.

Zevní ucho tvoří boltec, který směřuje akustické tlakové vlny do zvukovodu a jeho prostřednictvím k bubínku (vazivová blanka o tloušťce asi 0,1 mm), který je akustickým vstupem do středního ucha. Zvuková vlna bubínek rozechvěje, ten ji

zesílí a předá ke zpracování do středního ucha. Výchylky bubínku jsou velmi malé, uprostřed na prahu slyšení při referenčním tónu, tj. o frekvenci 1 000 Hz jsou jen řádu 10^{-11} m.

Střední ucho je systém vzduchem vyplněných dutin vystlaných sliznicí, které je umístěno ve spánkové kosti. Na bubínek jsou napojeny tři sluchové kůstky, jsou jimi kladívko, kovádlínka a třmínek. Tato soustava kloubově spojených kůstek přenáší zvuk ve formě délkových a úhlových výchylek od bubínku do vnitřního ucha tak, že ploténka třmínku se dotýká oválného okénka v labyrintu, který je vstupem do vnitřního ucha. Střední ucho je propojeno s nosohltanem tzv. Eustachovou trubicí, která slouží k vyrovnání tlaku vzduchu ve středním uchu s tlakem v okolním prostředí. Střední ucho je odděleno od vnitřního ucha membránami.

Vnitřní ucho je tvořeno blanitým labyrintem, který je uložen v tzv. skalní kosti. Skládá se jednak z hlemýždě, který je vnitřním sluchovým ústrojím a jednak z vestibulárního aparátu, uloženého v kanálcích, který je statickým orgánem, sloužící ke vnímání polohy hlavy vzhledem k vertikálnímu směru. Vnitřní ucho je vyplněno kapalinou nazývanou se endolymfa. Na tzv. bazilární membráně hlemýždě se nachází Cortiho orgán, který je vlastním smyslovým sluchovým ústrojím. Funguje tak, že tlakové změny v endolymfě rozkmitávají bazilární membránu, což následně vyvolá podráždění vláskových sluchových buněk v Cortiho orgánu, to má za následek vznik akčních elektrických potenciálů, které jsou vedeny sluchovým nervem do centrálního analyzátoru v mozku, tím vzniká sluchový vjem. (Vybíral, 2014, str. 213-214)



Obr. 14 Hlavní součásti ucha (Vybíral, 2014, str. 213)

2 Použité programy

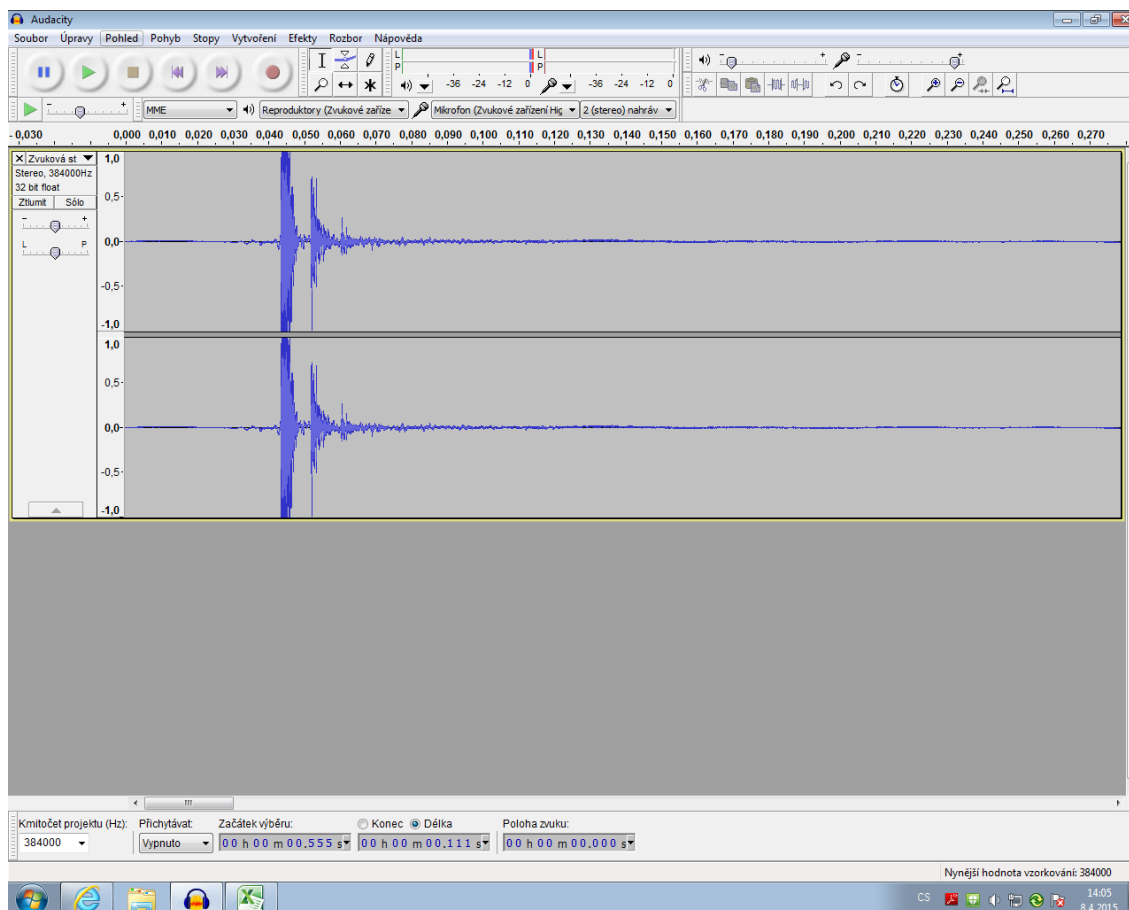
Jak již bylo řečeno dříve, tato bakalářská práce je zaměřena především na práci s programem Audacity a různá měření v něm. Pro jistá měření nebo jejich části bylo ovšem výhodnější použít jiný volně stažitelný program, ve kterém bylo možno zvuk snímat v reálném čase. Pro tento účel byl zvolen program Spectrum Lab.

2.1 Program Audacity

Audacity je zvukový editor a rekordér pro Windows, Mac OS X, GNU/Linux a další operační systémy. Tento volně stažitelný program byl vyvinut skupinou dobrovolníků pod vedením Dominica Mazzoniho pod GNU General Public License. Uživatelské rozhraní programu bylo přeloženo do mnoha jazyků včetně češtiny. Audacity může být využito k:

- Přímému nahrávání zvuku
- Převodu nahrávek z pásek a desek do digitálního záznamu nebo na CD
- Editaci zvukových souborů ve formátech Ogg Vorbis, AIFF, MP2, MP3, WAV, FLAC (od verze 1.3.2)
- Odstraňování šumu
- Rozdělování, stříhání a míchání písniček
- Změnám rychlosti a ladění nahrávek
- Vícestopému mixování písniček

Je také možné využít širokou škálu efektů k úpravě zvuku a pluginů. (Audacity, © 2015), (Informační komunikace, © 2015), (Wikipedia, © 2015)



Obr. 15 Ukázka okna programu Audacity

2.2 Program Spectrum Laboratory

Tento freewarový program patří mezi mnoho programů, které pro svůj provoz využívají zvukovou kartu. Spectrum Laboratory je velmi propracovaným nástrojem pro důkladnou analýzu zvukových signálů jak přivedených na zvukovou kartu, tak i uložených ve zvukových souborech *.wav.

Jeho součástí je celá řada přístrojů, jako například osciloskop, frekvenční analyzátor, modulátory a demodulátory, ale také generátory, filtry, směrovače nebo záznamník, kterými lze signál zpracovat. Protože tento program vytvořili radioamatéři, obsahuje také speciální funkce pro řízení transceiverů, příjem a vysílání znaků v digitálních komunikačních provozech nebo po přivedení příslušných signálů (radiových nebo zvukových z mikrofonů) určení směru ke zdroji signálu. Pomocí Spectrum Lab je také možno dekódovat časové údaje z dlouhovlnných vysílačů časových signálů nebo hlídat sledovaný signál a provádět naprogramované činnosti při dosažení nastavených hodnot. Jelikož je nastavování tak mnohostranné, uživa-

teli se může velice hodit funkce návratu do „továrního“ nastavení, kdyby se v nastavování ztratil. Výsledky měření i nastavení je vždy možné pro pozdější použití uložit.

Program se také výborně hodí k výukovým účelům, například je vhodný k zobrazování různých druhů modulace a změn jejich spekter při změnách parametrů. (Lukavský, 2008)

3 Praktická část

V praktické části se nejdříve zaměříme na různá měření, která je možno provádět v programu Audacity, ovšem například pro snímání zvuku v reálném čase bylo lepší použít jiný program, v mém případě to byl volně stažitelný program Spectrum Lab. Všechna tato měření je možné provádět se studenty na střední škole, mnohá také na škole základní.

Ve druhé části této kapitoly jsem se zaměřila na rezonanci sklenice na víno a jejího využití, k rozbití sklenice. Toto bylo velmi zajímavé měření, protože řešení této problematiky, podle mých zdrojů, není řádně zpracováno v žádné české literatuře, ale pouze v cizích publikacích, proto jsou i jako zdroje uvedeny anglicky psané články.

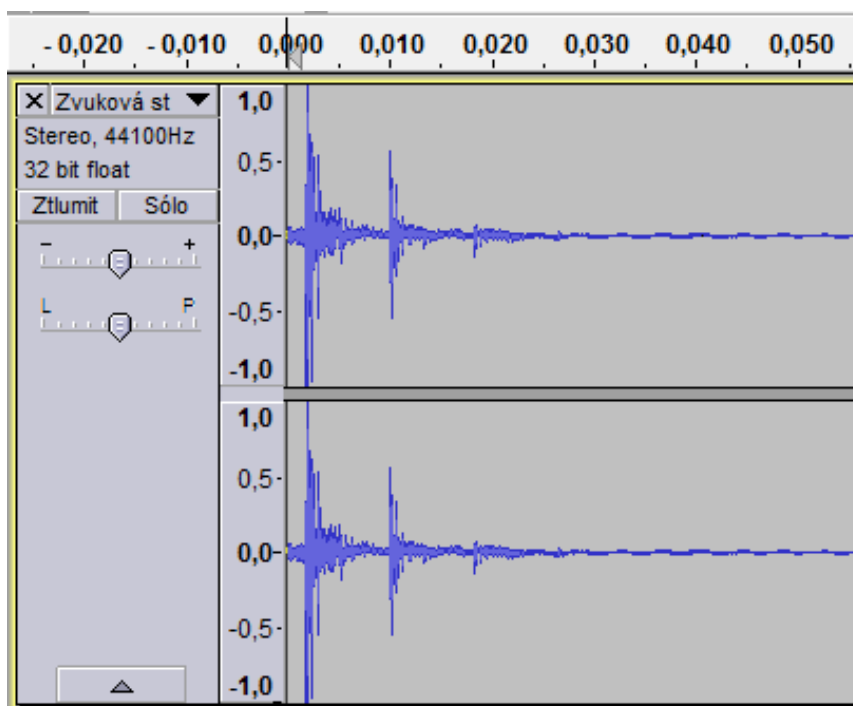
3.1 Závislost rychlosti zvuku na teplotě

Úkolem tohoto měření je co nejjednodušším způsobem změřit rychlost zvuku v novodurové trubce a dále závislost rychlosti zvuku na změnách teploty.

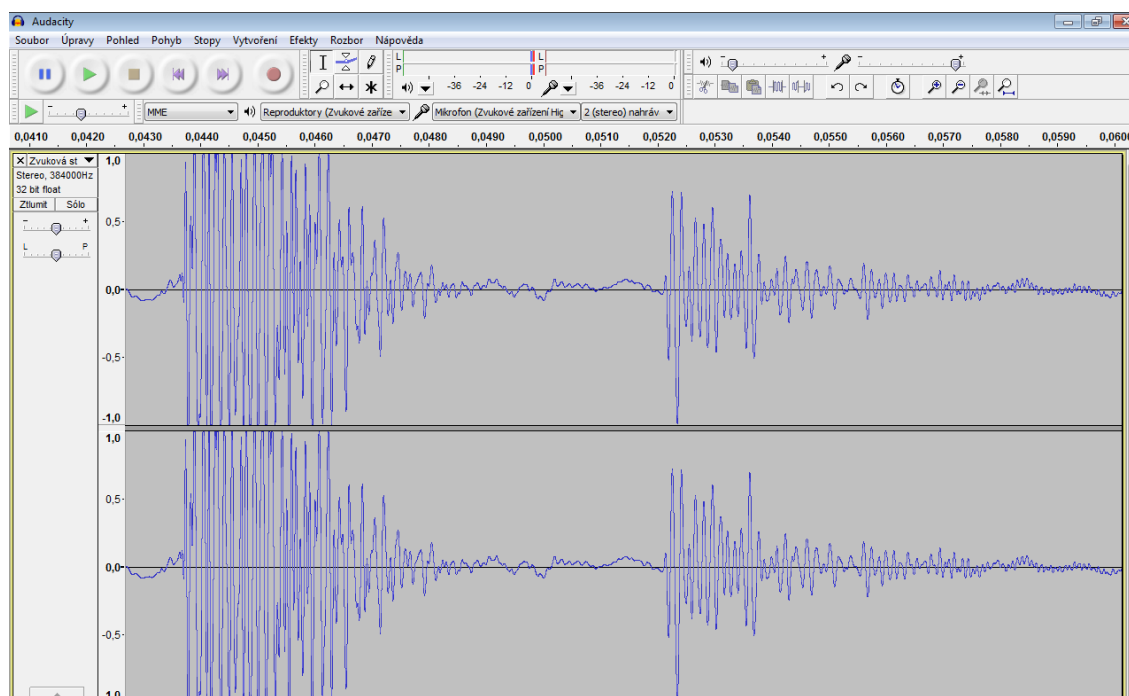
Pomůcky: Novodurová trubka, zdroj krátkého zvuku (např. karabina), mikrofon, program ke snímání zvuku (např. Audacity), překážka na uzavření trubky, teploměr, fén.

Postup měření: Do novodurové trubky uděláme přibližně v polovině malý otvor na umístění teploměru, kterým zjistíme teplotu uvnitř trubky, poté změříme délku trubky a umístíme ji do držáku. K jednomu jejímu konci přiblížíme mikrofon a druhý konec uzavřeme přepážkou. Na straně mikrofonu vytvoříme karabinou zvuk. Pomocí Audacity odečteme časový rozdíl mezi původním a odraženým zvukem (obr. 16, obr. 17) a podle vzorce $v_z = \frac{l}{\Delta t}$ vypočítáme rychlost zvuku, kde l je dráha uražená zvukem a Δt časový rozdíl původního a odraženého zvuku. Je důležité si uvědomit, že dráha, kterou zvuk urazí je oproti délce trubky dvojnásobná, zvuk se totiž pohybuje tam a zpět.

Dále trubku zahřejeme pomocí fěnu a celý postup opakujeme. Toto provádíme pro různé teploty. Teplotu můžeme i snižovat, například pomocí kapalného dusíku, což jsme pro několik měření provedli i my. (Jerje, 2012)



Obr. 16 Časový rozdíl původního a odraženého zvuku



Obr. 17 Časový rozdíl původního a odraženého zvuku - detail

Výsledky měření:

Délka trubky $d = 1,44$ m.

Dráha zvuku $l = 2,88$ m.

Pro naši délku trubky se odečtený časový rozdíl původního a odraženého zvuku, u všech teplot, pohyboval kolem hodnoty $8 \cdot 10^{-3}$ s, s roztoucí teplotou se tento časový rozdíl postupně snižoval.

Závislost rychlosti zvuku, spočítané z dříve zmíněného vzorce, tedy vzorce $v_z = \frac{l}{\Delta t}$, podle naměřených hodnot, na teplotě je dobré pro názornost zaneš do tabulky (tab. 1) a vytvořit z ní graf závislosti rychlosti zvuku na teplotě (graf 1). Teplotní závislost rychlosti zvuku, která je také zanesena v tabulce, spočítáme podle vzorce $v_z = (331,82 + 0,61\{t\}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v grafu tak získáme regresní přímku dané závislosti.

Je také dobré do grafu vynést chybové úsečky, jejichž délka skutečně odpovídá chybě měření, z grafu je poté vidět jak hodně se naměřené hodnoty rychlosti zvuku odchylují od teoreticky spočtené hodnoty.

Relativní chybu rychlosti zvuku vypočítáme jako součet relativních chyb dráhy zvuku a časového rozdílu, tedy $\delta v_z = \delta l + \delta t$, kde

$$\delta l = \frac{\Delta l}{l}, \quad \delta t = \frac{\Delta t}{t}.$$

Hodnoty $\Delta l \doteq 0,002$ m a $\Delta t \doteq 7,5 \cdot 10^{-5}$ s jsou absolutními chybami měření.

Potom

$$\delta v_z = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t},$$

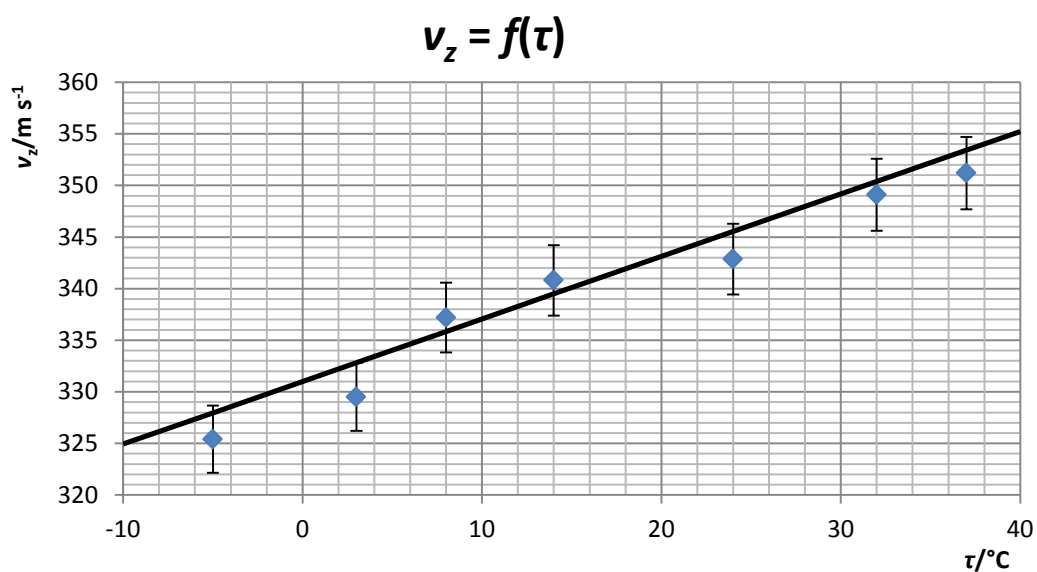
po dosazení

$$\delta v_z = \left(\frac{0,002 \text{ m}}{2,88 \text{ m}} + \frac{7,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}}{8 \cdot 10^{-3} \text{ s}} \right) \cdot 100 \%$$

Relativní chyba měření rychlosti zvuku $\delta v_z \doteq 1\%$.

$\tau/^\circ\text{C}$	$v_{\text{změř}}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_z/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
-5	325,40	327,97
3	329,50	332,82
8	337,20	335,85
14	340,80	339,48
24	342,86	345,54
32	349,09	350,39
37	351,20	353,42

tab. 1



Graf 1 Závislost rychlosti zvuku na změnách teploty



Obr. 18 Konstruktce měření rychlosti zvuku v trubce

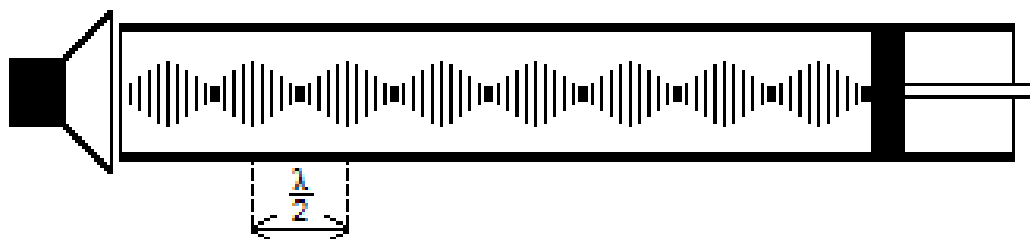
3.2 Měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí

Úkolem tohoto měření je změřit rychlost zvuku pomocí Kundtovy trubice.

Pomůcky: Kundtova trubice, tónový generátor (jedna z funkcí programu Audacity), reproduktor.

Postup měření: Nejdříve uvnitř Kundtovy trubice důkladným klepáním rozmístíme prášek, poté k ní přiblížíme reproduktor připojený k tónovému generátoru (možno využít program Audacity). Do reproduktoru pustíme zvuk o určité frekvenci, v našem případě to byla frekvence 700 Hz, při které bylo možné kmitny a

uzly nejlépe rozeznat. Poloha a viditelnost kmiten a uzlů se dá také ovlivňovat posouváním špuntu na levé straně. Podle vzorce $v_z = \lambda \cdot f$ poté spočítáme rychlost zvuku. Protože měříme vzdálenost buď dvou minim, nebo dvou maxim (obr. 19) musíme brát na zřetel, že se jedná pouze o $\frac{\lambda}{2}$, ale ve vzorci se počítá s celou vlnovou délkou. Je tedy nutné tuto hodnotu zdvojnásobit.



Obr. 19 Kundtova trubice

Výsledky měření:

Měřeno při teplotě $\tau = 21^\circ\text{C}$.

Zvuk pouštěný do trubice o frekvenci $f = 700 \text{ Hz}$.

Změřená vzdálenost dvou maxim $l = 23,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} = \frac{\lambda}{2}$.

Rychlost zvuku počítáme podle vzorce

$$v_z = \lambda \cdot f$$

$$v_z = 2l \cdot f$$

Po dosazení dostáváme

$$v_z = 2 \cdot 23,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 700 \text{ s}^{-1}$$

$$v_z = 333 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Výsledkem je rychlost zvuku při teplotě 21°C .

Chyby měření: Toto měření rychlosti zvuku je podstatně nepřesnější, než měření předchozí, protože je obtížné odečíst přesné místo uzlu nebo kmitny.

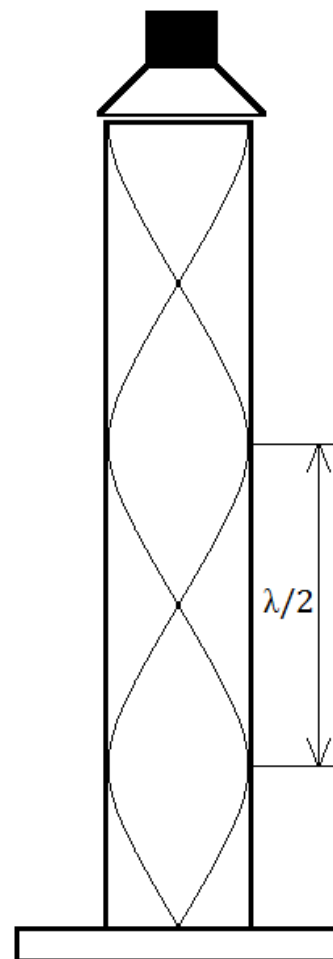
3.3 Měření rychlosti zvuku ve vodním sloupci

Úkolem tohoto měření je změřit rychlost zvuku ve vodním sloupci.

Pomůcky: Odměrný válec, sluchátka, novodurová trubka s malým průměrem, gumičky.

Postup měření: Postup je velmi podobný, jako u měření s Kundtovou trubicí, ovšem toto měření se lépe provádí ve školních podmínkách, má-li učitel dostatek pomůcek, mohou ho studenti měřit samostatně ve skupinách jako laboratorní práci.

Odměrný válec naplníme vodou, na novodurovou trubku přilepíme sluchátka tak, aby trubka nebyla úplně uzavřena, ale aby mohl zvuk vycházet po obou stranách. Poté do sluchátek pustíme zvuk o určité frekvenci (pomocí Audacity), v našem případě to byl zvuk o frekvenci 800 Hz, a trubku pomalu vsouváme do odměrného válce. Do míst dvou minim (resp. maxim) umístíme gumičky. Jejich vzdálenost změříme a podle stejného vzorce jako v případě Kundtovy trubice, tedy podle vzorce $v_z = \lambda \cdot f$, vypočítáme rychlost zvuku. Opět je důležité si uvědomit, že protože odečítáme vzdálenosti dvou minim (resp. maxim) naměříme pouze vzdálenost $\frac{\lambda}{2}$ (obr. 20) a pro výpočet je nutné tuto vzdálenost zdvojnásobit.



Obr. 20

Výsledky měření:

Měřeno při teplotě $\tau = 22^\circ\text{C}$.

Zvuk pouštěný do trubice o frekvenci $f = 800 \text{ Hz}$.

Změřená vzdálenost dvou maxim $l = 21,7 \cdot 10^{-2} \text{ m} = \frac{\lambda}{2}$.

Rychlost zvuku spočítáme podle vzorce

$$v_z = \lambda \cdot f$$

$$v_z = 2l \cdot f$$

Po dosazení získáme

$$v_z = 2 \cdot 21,7 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot 800 \text{ s}^{-1}$$

$$v_z = 336 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Výsledkem výpočtu je hledaná rychlost zvuku při teplotě 22°C .

Chyby měření: Jelikož se jedná o podobné měření, jako je měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí, jsou i důvody chyb měření velmi podobné. Tedy, odčítání mi-

nim (resp. maxim) je obtížné a může při něm dojít k velkým odchylkám. Proto nejpresnějším měřením rychlosti zvuku stále zůstává měření první, tedy měření rychlosti zvuku v trubce.

3.4 Dopplerův jev

Úkolem tohoto měření je ověřit, jak se mění frekvence při Dopplerově jevu a zda platí teoretické předpovědi.

Pomůcky: Pevný provázek, mobilní telefon s možností přehrávání zvuků, na kterém je nahrán zvuk o určité frekvenci, mikrofon, program ke snímání zvuku (např. Audacity).

Postup měření: Mobilní telefon pevně přivážeme na provázek. Spustíme tón, mobil roztočíme a zvuk natočíme pomocí mikrofonu. V Audacity přečteme frekvenci, při níž se telefon blíží a při níž se vzdaluje od mikrofonu. Měli bychom sledovat, že přibližuje-li se mobil směrem k mikrofonu, frekvence tónu se zvyšuje a naopak, když se mobil vzdaluje, frekvence tónu se snižuje, což přesně odpovídá teorii.

Tento postup je vhodný pro demonstraci tohoto jevu například ve výuce, ovšem pro konkrétní měření je mnohem účinnější zvolit postup jiný. Budeme k tomu opět potřebovat mobilní telefon s nahraným zvukem o určité frekvenci, mikrofon, dále motorem řízený otáčející se disk (v praxi je možné použít například vrtačku, ke které mobilní telefon připevníme, tento postup jsme v měření zvolili my) a program ke snímání zvuku, v tomto případě jsme použili program Spectrum Lab, protože bylo vhodnější zvuk snímat v reálném čase, ovšem bylo by možné použít i program Audacity. Na disk přilepíme mobil, tak aby reproduktor byl co nejbližší mikrofonu. Nyní spustíme tón a rotační motor, zvuk zároveň snímáme mikrofonem, který vyhodnocujeme pomocí programu (např. Spectrum Lab) v reálném čase. (Jerje, 2012), (Klein, 2014)

Výsledky měření:

Jako klidovou frekvenci zdroje jsme zvolili hodnotu $f_0 = (1000 \pm 2)$ Hz.

Vzdálenost zdroje zvuku od středu otáčení v případě mobilu připevněného k vrtačce $r = 5 \cdot 10^{-2}$ m.

Frekvence tónu přibližujícího se telefonu $f_1 = (1009 \pm 2)$ Hz.

Frekvence tónu vzdalujícího se telefonu $f_2 = (991 \pm 2)$ Hz.

Jak můžeme vidět frekvence přibližujícího se tónu je opravdu větší, než toho vzdalujícího se, naměřené výsledky tedy opravdu odpovídají teorii.

Nyní, protože známe frekvenci tónu přibližujícího i vzdalujícího se mobilu, můžeme podle vzorce $f_1 = f_0 \frac{v_z}{v_z - v}$ pro výpočet frekvence tónu, když se zdroj pohybuje a pozorovatel je v klidu, spočítat obvodovou rychlost zdroje.

Úpravou získáme

$$v = v_z \frac{f_1 - f_0}{f_1},$$

po dosazení dostáváme

$$v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \frac{1009 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}}{1009 \text{ Hz}}.$$

Obvodová rychlost zdroje je tedy $v = (3,03 \pm 0,02) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Absolutní chybu měření spočítáme, vynásobíme-li relativní chybu měření hodnotou obvodové rychlosti zdroje, tedy $\Delta v = v \cdot \delta v$, kde

$$\delta v = \frac{\Delta v_z}{v_z} + \frac{\Delta f_0}{f_0}.$$

Hodnoty absolutních chyb $\Delta v_z = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a $\Delta f_0 = 2 \text{ Hz}$, po dosazení do vzorce získáme

$$\delta v = \frac{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} + \frac{2 \text{ Hz}}{1000 \text{ Hz}}.$$

Relativní chyba obvodové rychlosti $\delta v \doteq 0,005$.

Absolutní chyba bude tedy $\Delta v \doteq 0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Hodnotu obvodové rychlosti si můžeme ověřit, pokud do vzorce dosadíme frekvenci tónu vzdalujícího se telefonu, hledaná rychlost zdroje bude poté záporná, ale hodnota by se neměla lišit.

Po dosazení dostáváme

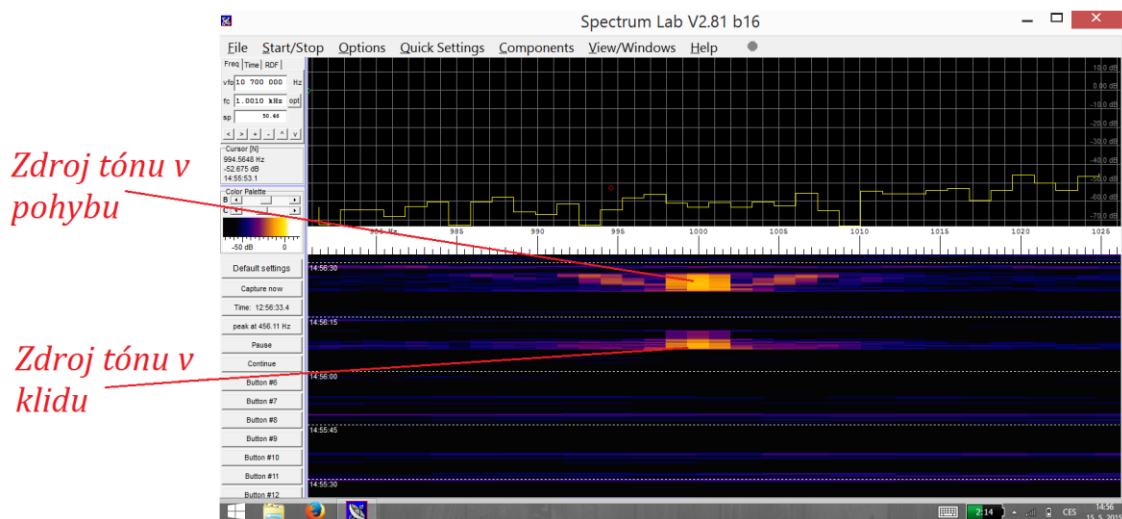
$$v = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \frac{991 \text{ Hz} - 1000 \text{ Hz}}{991 \text{ Hz}}.$$

Obvodová rychlost zdroje tedy bude $-v = (3,09 \pm 0,02) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

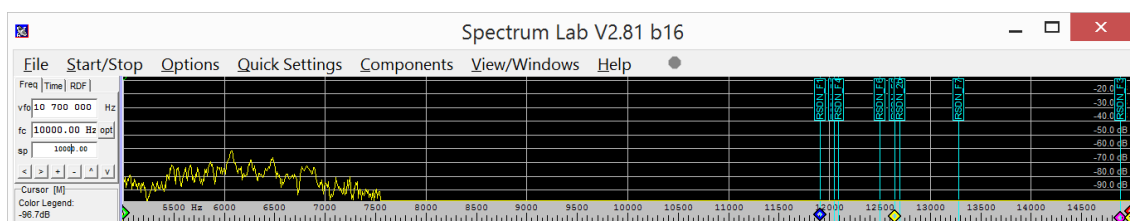
Jelikož známe vzdálenost zdroje zvuku r od středu otáčení, můžeme vypočítat také úhlovou rychlost, a to podle vzorce $\omega = \frac{v}{r}$.

Chyby měření: Jistá chyba měření může vzniknout při odečítání hodnoty frekvence, peak, který vznikne, může být totiž dosti široký. Tón, který pouštíme pomocí

mobilního telefonu, také není na 1kHz čistě monofrekvenční (obr. 21), z toho důvodu počítáme s hodnotou (1000 ± 2) Hz. Při použití tónu o vyšší frekvenci (v některých publikacích (Klein, 2014) je doporučováno až 19 kHz) se nepřesnost měření do jisté míry sníží. To ovšem v případě našeho měření nebylo možné, protože zvuková karta počítače snímá zvuk pouze do hodnoty přibližně 7,5 kHz (obr. 22).



Obr. 21



Obr. 22 Snímání zvukovou kartou

3.5 Elektromotorický monochord

Úkolem tohoto měření je změřit rychlost vlny na struně.

Pomůcky: Kytarová struna, závaží, malá cívka s ocelovým jádrem, může to být buď cívka ze starého telefonu o 1200 závitech, nebo například cívka o 1800 závitech, která se v kabinetu fyzikáře objevuje častěji, neodymový magnet, zesilovač nebo zvuková karta, závaží, svěrák.

Postup měření: Strunu, která je na jedné straně volná a na druhé straně má očko, upevníme volným koncem do svěráku. Druhý konec ve vzdálenosti přibližně 70 cm pověsíme přes hranu stolu a zatížíme 800 g závažím. Na konec ocelového jádra

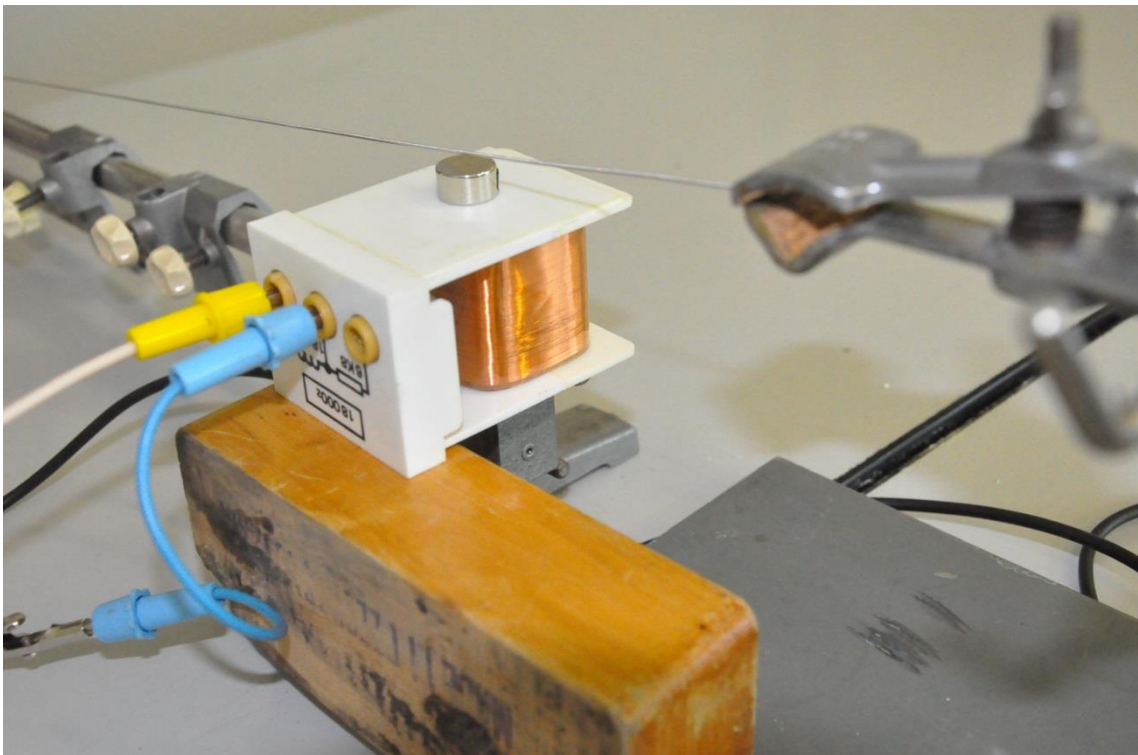
cívky umístíme magnet a cívku přiblížíme ke struně, tak aby byla asi 5 mm pod ní (obr. 23). Cívku jsme k počítači připojovali přes externí zvukovou kartu, aby nedošlo ke zničení interní zvukové karty počítače, pokud by bylo výstupní napětí na cívce příliš vysoké.

Měníme-li pomocí zvyšování zátěže na strunu její napnutí, mění se i frekvence kmitání struny, díky tomu se dá zjistit i rychlost vlny, šířící se po struně, při různých zátěžích. Podle vzorce používaného v předchozích měřeních pro zjišťování rychlosti zvuku, tedy $v = \lambda \cdot f$, kde λ je dvojnásobek délky kmitající struny, tedy délky struny od svěráku k hraně stolu a f je měřená frekvence kmitající struny.

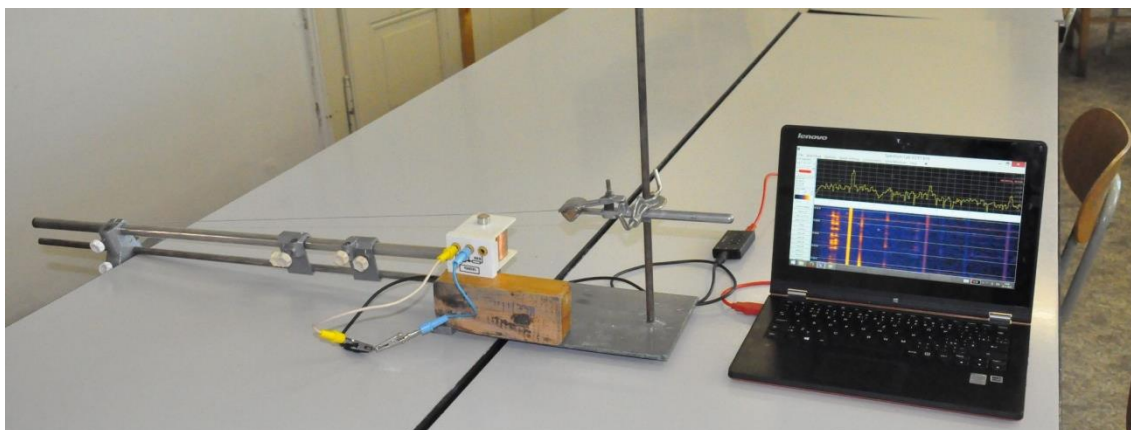
Rychlost vlny na struně můžeme také spočítat teoreticky. Používáme k tomu vzorec pro výpočet fázové rychlosti v_f vlny, šířící se po struně:

$$v_f = \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

kde F je síla napínající strunu tedy tíhová síla závaží působící na strunu a $\mu = \frac{m}{l}$, což je podíl hmotnosti struny a její délky. (Piskač, 2007)



Obr. 23 Detail umístění cívky



Obr. 24 Konstrukce elektromotorického monochordu

Výsledky měření:

Aktivní délka kmitající struny $l = 0,697$ m.

Pro přehlednost je dobré zanést naměřené hodnoty do tabulky (tab. 2), stejně tak i teoreticky vypočtené hodnoty rychlosti vlny na struně podle vzorce popsaného dříve.

V grafu (graf 2) je pak vynesena závislost rychlosti vlny na struně spočtené podle naměřených hodnot ze vzorce $v_z = \lambda \cdot f$ na hmotnosti závaží, které strunu napíná. Hodnoty spočítané rychlosti vlny jsou potom vyneseny také, a to formou regresní přímky.

Je také dobré do grafu vynést chybové úsečky, jejichž délka skutečně odpovídá chybě měření, z grafu je poté vidět jak hodně se naměřené hodnoty rychlosti vlny odchylují od teoreticky spočtené hodnoty.

Relativní chyba rychlosti vlny na struně se vypočítá jako součet relativní chyby délky skutečně kmitající struny a frekvence kmitání, tedy $\delta v = \delta l + \delta f$, kde

$$\delta l = \frac{\Delta l}{l}, \quad \delta f = \frac{\Delta f}{f}.$$

Hodnoty $\Delta l \doteq 0,001$ m a $\Delta f \doteq 2,5$ Hz jsou absolutními chybami měření.

Potom

$$\delta v = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta f}{f},$$

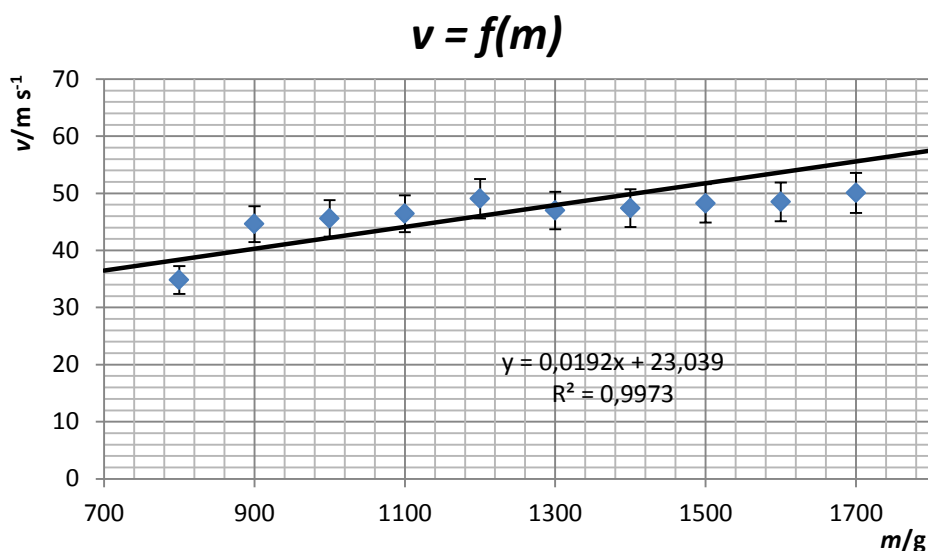
po dosazení

$$\delta v = \left(\frac{0,001 \text{ m}}{0,697 \text{ m}} + \frac{2,5 \text{ Hz}}{33 \text{ Hz}} \right) \cdot 100 \text{ \%}.$$

Relativní chyba měření rychlosti vlny na struně $\delta v \doteq 8 \%$.

m/g	F/N	$v/m \cdot s^{-1}$	f/Hz	$v_změřená/m \cdot s^{-1}$
800	7,85	37,84	24,98	34,82
900	8,83	40,14	32,0	44,61
1000	9,81	42,31	32,7	45,58
1100	10,80	44,38	33,3	46,42
1200	11,77	46,35	35,2	49,07
1300	12,75	48,24	33,7	46,98
1400	13,73	50,06	34,0	47,40
1500	14,72	51,82	34,6	48,23
1600	15,70	53,52	34,8	48,51
1700	16,68	55,17	35,9	50,05

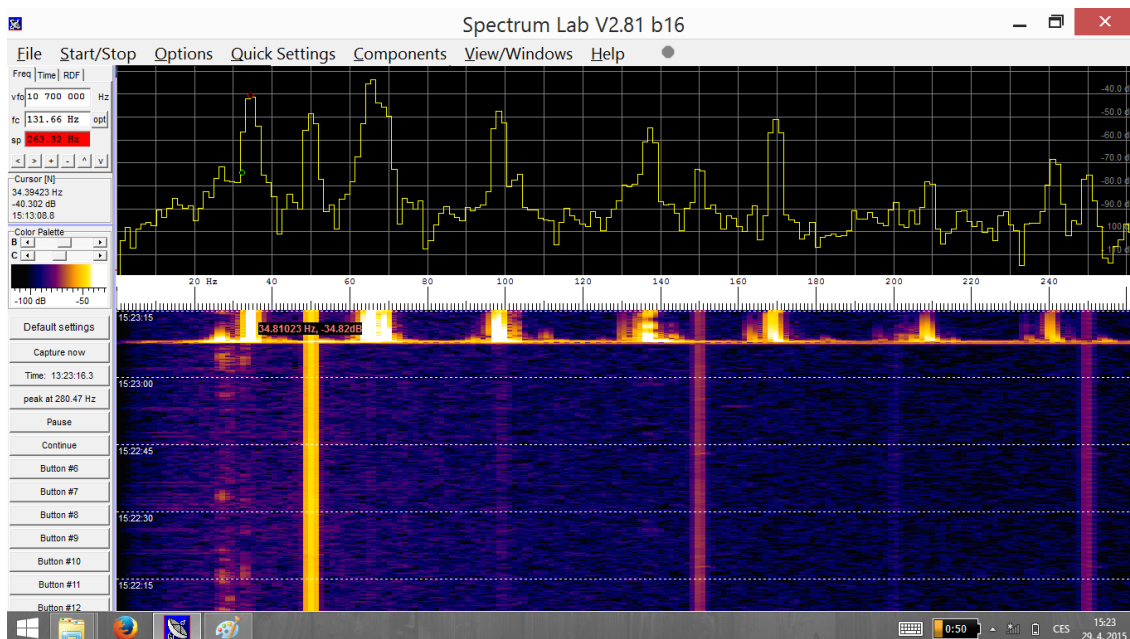
tab. 2



Graf 2 Závislost rychlosti vlny postupující po struně na hmotnosti zatížení struny

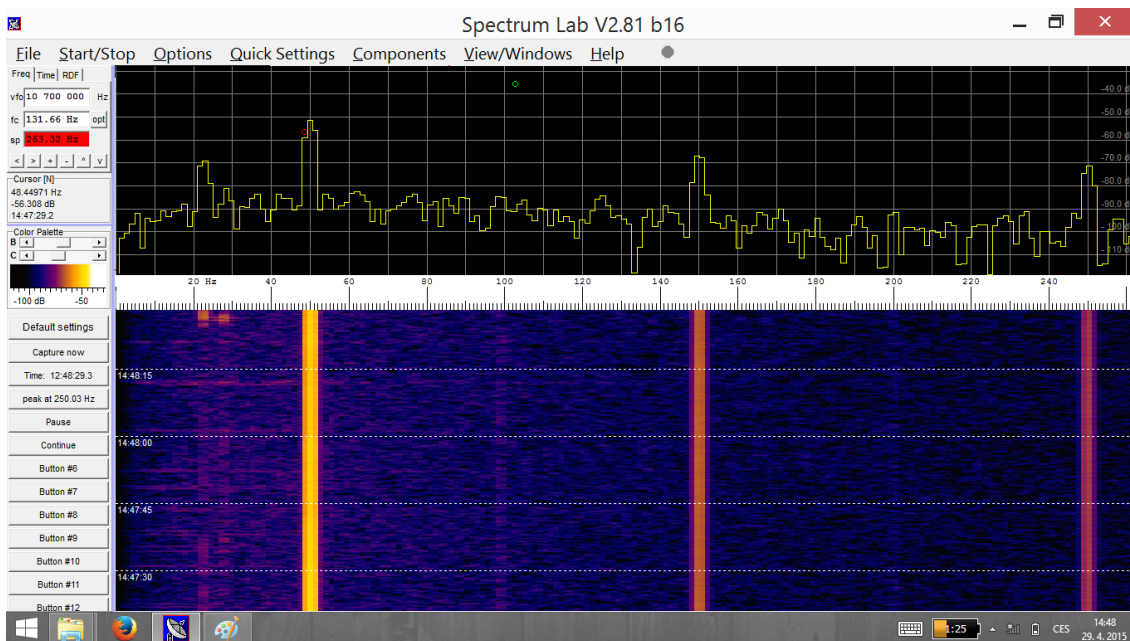
Chyby měření: Jistá chyba může nastat při odčítání hodnot frekvence, peak, který vznikne, je totiž dosti široký a i když jsme se snažili hodnotu odečítat uprostřed, jeho rozsah je až 5 Hz (obr. 25), takže chyba odčítání může být poměrně velká.

Při měření hraje velkou roli také to, že zátěž na strunu není dostatečná, aby byly odstraněny vyšší harmonické tóny, které výsledky měření ovlivňují (obr. 25).



Obr. 25 Kmitající struna

Na obr. 26 můžeme vidět, že měření ovlivňuje také frekvence síťového napětí 50 Hz, dále je zřejmé, že liché vyšší harmonické frekvence napětí jsou mnohem jasnější nežli sudé.



Obr. 26 Frekvence síťového napětí

3.6 Rezonance sklenice na víno

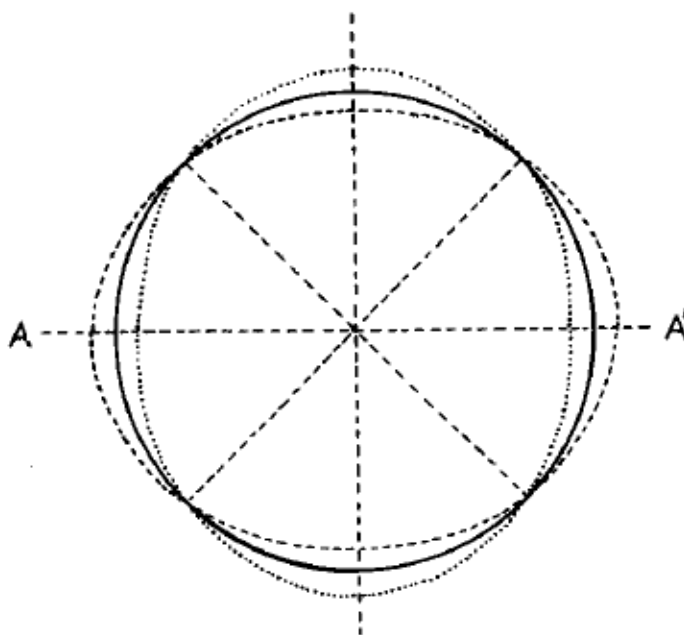
Pomůcky: Sklenice na víno, nejlépe hodně baňatá a s úzkou hranou, to je pro prasknutí nezbytné, reproduktor, tónový generátor (může být použit program Audacity), zdroj napětí.

Postup měření: Sklenice může začít kmitat pouze v okolí své rezonanční frekvence. Proto je nutné, tuto frekvenci nejdříve zjistit, jen tak dosáhneme toho, že se nám podaří sklenici rozbít. Rezonanční frekvenci nalezneme tak, že budeme vlhkým prstem přejíždět po hraně sklenice, tón, který se ozve, je právě o frekvenci, kterou hledáme, k přesnému změření frekvence je vhodné použít nějaký program, který snímá zvuk v reálném čase, například program Spectrum Lab. Periodičnosti síly, která je pro rezonanci typická, je dosahováno periodickým odtrháváním prstu od hrany sklenice.

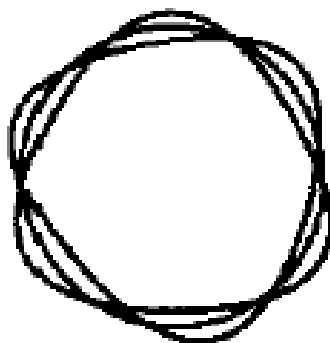
Dále sklenici přilepíme ke stolu tak, aby se nemohla pohybovat. Přiblížíme k ní reproduktor, může to být jakýkoliv malý reproduktor, který bude působit na celou plochu skleničky. Původně jsme zkoušeli využít tlakový reproduktor s malým rozptylem zvuku (obr. 29), jako mnohem účinnější se ovšem ukázal klasický, který jsme použili poté. Zvuk se díky němu rozložil po celé ploše sklenice, což napomohlo celkovému rozkmitání sklenice a jejímu následnému prasknutí. Reproduktor, připojený k tónovému generátoru a zdroji (případně může také posloužit program Audacity s funkcí generátoru), namíříme kolmo k ploše sklenice, aby na ni mohl zvuk působit rovnoměrně. V některých publikacích (Rueckner, 1993) je doporučováno na sklenici působit ze shora, to se nám ovšem experimentem podařilo vyvrátit jako ne příliš vhodné, lépe se nám osvědčila právě kolmá poloha.

Nyní na generátoru nastavíme tón blízky zjištěné rezonanční frekvenci, o tom, že sklenice kmitá, se můžeme přesvědčit tak, že dovnitř vložíme špejli, která se poté rozkmitá spolu se sklenicí. Okraj sklenice se deformuje vždy z tvaru kruhu do tvaru elipsy, zpět do kruhu a poté do jiné elipsy, kolmé k původní (obr. 27), nebo tzv. v šesti uzlech, což je nejvíce v kolika může kmitat (obr. 28). Je také dosti efektní použít k osvětlení sklenice stroboskop, názorně je poté vidět kmitání sklenice. Podaří-li se nám narazit na sklenici s vadou (v určitém místě je sklo zeslabené), s největší pravděpodobností sklenice praskne, dochází k tomu s frekvencí přibližně

o 1 až 2 Hz vyšší, než je zjištěná rezonanční frekvence (tab. 3). (Rueckner, 1993), (French, 1983)



Obr. 27 Eliptický tvar kmitání sklenice (French, 1983, str. 688)



Obr. 28 Vibrace sklenice se šesti uzly (Rueckner, 1993, str. 185)

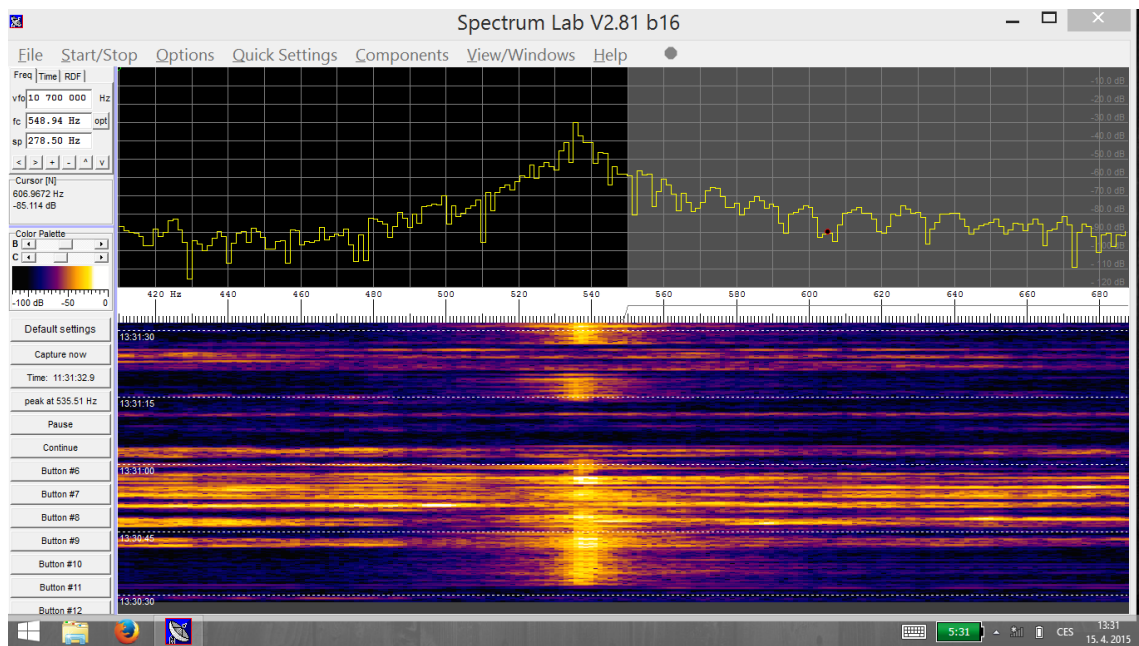
Jak je vidět v tab. 3, každá sklenice má jinou rezonanční frekvenci, proto je důležité měřit opravdu každou další sklenici zvlášť, i když se totiž jedná o stejný druh sklenic, frekvence se může výrazně lišit.

f_{rez}/Hz	f_p/Hz
537,0	538,7
545,5	546,5
532,0	533,2

tab. 3



Obr. 29 Konstrukce působení zvuku na sklenici s tlakovým reproduktorem



Obr. 30 Rezonanční frekvence kmitající sklenice

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést různá měření z oblasti akustiky pomocí volně stažitelného programu Audacity. Z praktického hlediska se však tento program v některých měřeních ukázal jako nedostatečný a bylo proto lepší použít také volně dostupný program Spectrum Lab, pomocí kterého lze zvuk snímat v reálném čase. Také ke generování tónů jsme ve většině případů využívali raději tónový generátor místo funkce v programu Audacity, jelikož se na něm tóny mění mnohem pružněji. V obou případech by ovšem bylo možné Audacity využít, i když jsme volili jiný postup.

Měření, která jsou v této bakalářské práci zpracována, mohou být velmi účinně využita učiteli ve výuce, buď pouze k demonstraci určitého jevu, nebo i jako samostatná laboratorní práce studentů. Všechna měření jsou vhodná pro střední školy, některá i pro druhý stupeň škol základních.

V příloze jsou poté fotografie z jednotlivých měření, které nebylo vhodné umístit přímo do textu. Součástí přílohy je také CD s videi kmitající a rozbíjející sklenice na víno.

Použitá literatura

Audacity. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001-2015 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Audacity>

Audacity – manuál. *Informační technologie*. [online]. [2015] [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://student.oapion.cz/ict/jine/audacity.html>

FAUKNER, Rudolf. *Moderní fyzika. [I. díl]*. Praha: R. Faukner, 1939. Knihovna Laboratoře; Sv. 1.

FRENCH, A. P. In *Vino Veritas: A study of wineglass acoustics. American Journal of Physics*. 1983, **51**(8): 688-694. DOI: 10.1119/1.13147. ISSN 00029505. Dostupné také z: <http://link.aip.org/link/?AJP/51/688/1>

JERJE, Tomáš. Audacity aneb jak zviditelnit zvuk. In: *Sborník veletrhu nápadů učitelů fyziky 17* [online]. 2012 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/17-17-Jerje.html>

KLEIN, P, M HIRTH, S GRÖBER, J KUHN a A MÜLLER. Classical experiments revisited: smartphones and tablet PCs as experimental tools in acoustics and optics. *Physics Education*. 2014, **49**(4): 412-418. DOI: 10.1088/0031-9120/49/4/412. ISSN 0031-9120. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0031-9120/49/i=4/a=412?key=crossref.3ae90dcebdf3d2e2152ed1874a9428f>

LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia Mechanické kmitání a vlnění*, Praha: Prometheus, 1994. ISBN 80-901619-6-0.

LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia Mechanické kmitání a vlnění*, Praha: Prometheus, 2012. ISBN 978-80-7196-387-5.

LUKAVSKÝ, Přemysl. Spectrum Lab. *BW češtiny.cz*. [online]. 14. 5. 2008 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://cestiny.idnes.cz/spectrum-lab-c9a-/Software.aspx?c=A080512_94096_bw-cestiny-software_bw

O Audacity. *Audacity*. [online]. [2015] [cit. 2015-05-18].

Dostupné z: <http://web.audacityteam.org/about/>

PISKAČ, Václav. Tři nové experimenty. In: *Sborník veletrhu nápadů učitelů fyziky 12* [online]. 2007 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z:

<http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-13-Piskac.html>

PODOBSKÝ, Jaroslav. *Procházky akustikou, I. část*. Hradec Králové: MAFY, 1999. ISBN 80-86148-28-9.

POSPÍŠIL, Jaroslav. *Mechanické a elektromagnetické kmity a vlny: Určeno pro posl. přírodověd. fak.* 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého, 1987.

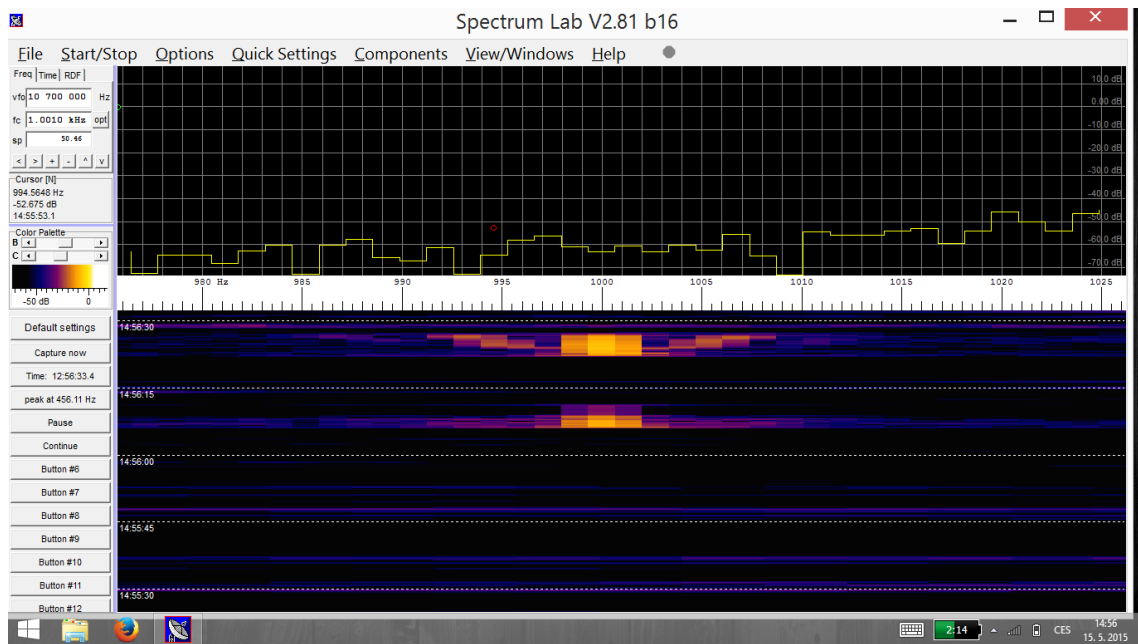
RUECKNER, Wolfgang. Lecture demonstration of wineglass resonances. *American Journal of Physics*. 1993, **61**(2): 184-186. DOI: 10.1119/1.17281. ISSN 00029505. Dostupné také z: <http://link.aip.org/link/?AJP/61/184/1>

VYBÍRAL, Bohumil. *Kmitání a vlnění*, Hradec Králové: GAUDEAMUS, 2014. ISBN 978-80-7435-379-6.

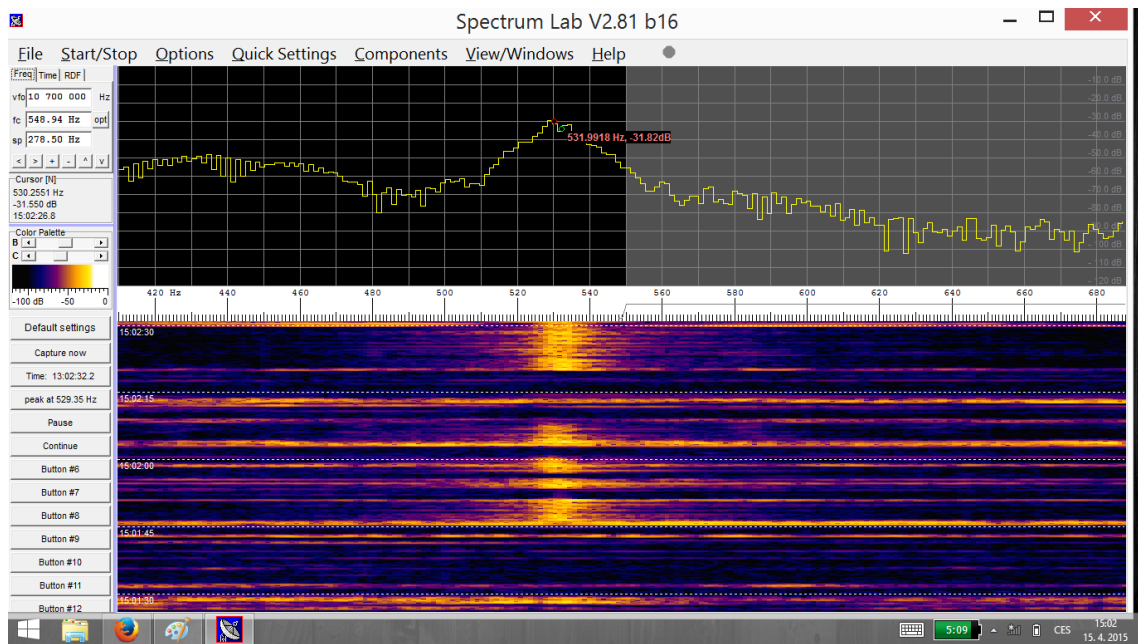
Příloha A - Fotografie



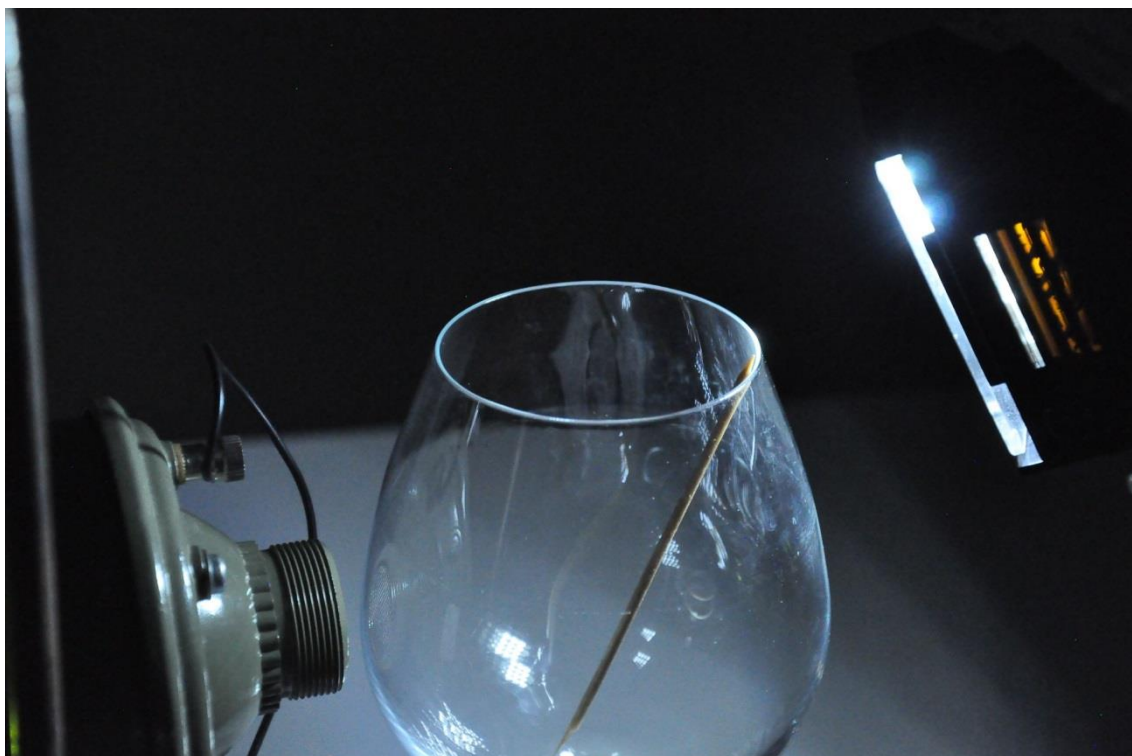
Měření rychlosti zvuku v odměrném válci.



Měření Dopplerova jevu, okno programu Spectrum Lab.



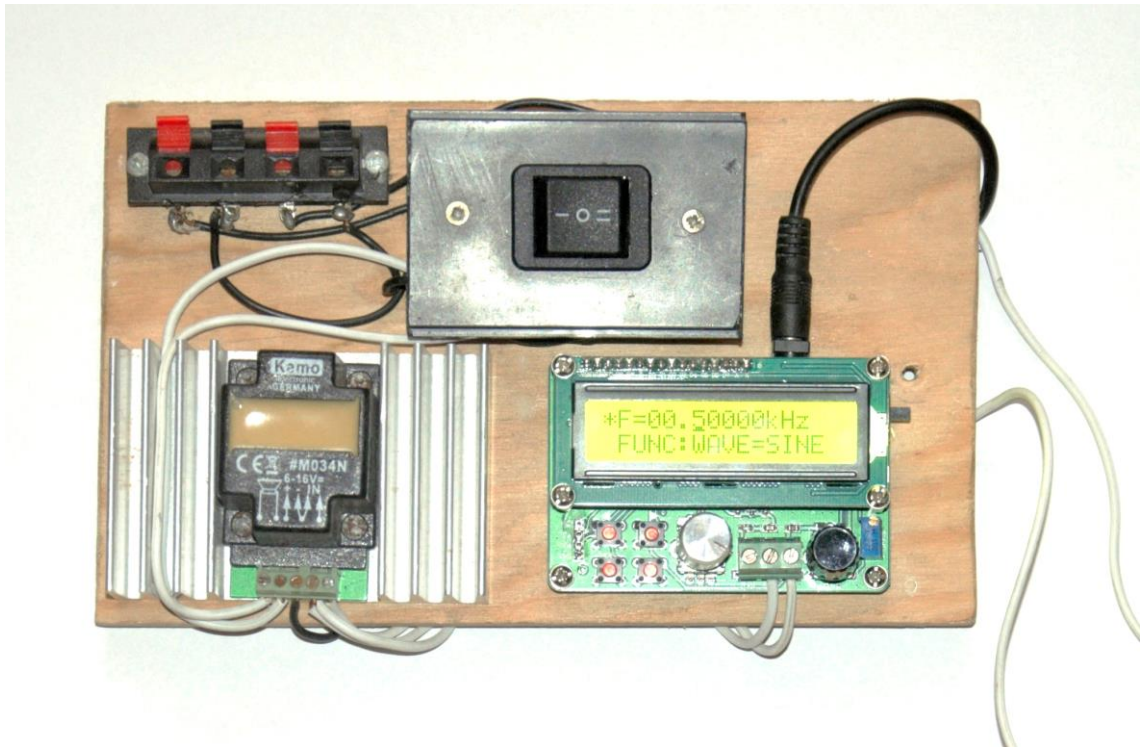
Rezonance sklenice na víno, okno programu Spectrum Lab.



Rezonance sklenice na víno.



Výsledky působení zvuku na sklenici v rezonanci.



Generátor kmitů se zesilovačem



Zvuková karta použitá při měření rychlosti vlnění na struně