

Pár věcí z tábora 4 – tentokrát o zvuku

LEOŠ DVORÁK

Matematicko-fyzikální fakulta UK, Praha

Účelem tohoto příspěvků je podělit se o několik nápadů, týkajících se kmitání, vlnění a zvuku. Jde o náměty na menší i větší projekty, které jsme realizovali na jarním soustředění pro posluchače studia učitelství fyziky v Malé Hrašticí (v květnu 2001) a na Letním mat.-fyz. táboře pro středoškoláky v Kletečné u Humpolce v červenci t.r. Zájemci mohou najít informace o našich již tradičních soustředěních a táborech v příspěvcích v minulých ročnících sborníku *Veletřhu nápadů* [1], [2] a aktuálně na webu, viz [3], [4].

V letošním roce byla nosným tématem obou soustředění „hudba sfér“ – tedy kmitání, vlnění a zvuk. Účastníkům byla nabídnuta poměrně široká řada témat, z nichž si mohli vybrat a dle svého zájmu dohodnout konkrétní projekt. Na táboře pro středoškoláky měl každý projekt svého vedoucího resp. konzultanta z řad studentů, doktorandů a pracovníků MFF. (Jeden projekt navíc vedla A.Marencáková z MFF UK Bratislava, takže tým konzultantů měl mezinárodní složení.) Šlo o projekty, které nebyly předem do detailu „nalinkované“, měly velkou míru volnosti a účastníci i konzultanti mohli projevit značnou míru kreativity. Lze konstatovat, že všichni jsme se v projektech leccos naučili.

Dále jsou stručně komentována vybraná témata, konstrukce, náměty a některé zkušenosti.

„Co všechno může hrát“

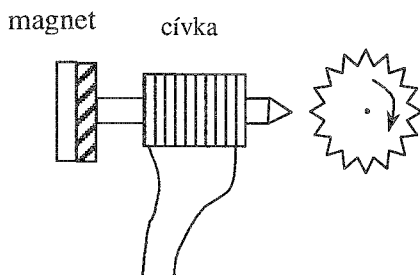
Velmi vděčné téma. Zadat úkol vyrobit „něco, co vydá zvuk, tón apod.“ znamená dostat neuvěřitelně různorodé výsledné konstrukce – a to i když jde o úkol „na rozehřátí“ a je na něj minimum času.

„Hraje“ opravdu téměř vše, co vezmete do ruky. Kupodivu třeba i **papírová rulička od toaletního papíru**. Při úderu dlaní vydává zvuk, který má dobře definovanou výšku. Zakryjete-li druhý konec dlaní, je zvuk o oktávu nižší. Zvuky stejných výšek jsou slyšet, když foukáme na hranu ruličky. K určení výšky zvuku lze použít i počítač, ale o tom blíže v tématu věnovanému rezonanci.

Z trochu náročnějších projektů to může být **Savartova siréna**, tedy například proužek papíru, na který naráží roztočené ozubené kolečko, třeba z Merkura. Nebo **Seebeckova siréna**: rotující kolečko s otvory, na které foukáme tenkou tryskou vzduch. Kolečko může pohánět motorek napájený z ploché baterie, tryskou může být plastické brčko. Frekvenci zvuku (způsobeného přerušováním proudu vzduchu) můžeme lehce spočítat z počtu

otáček kolečka za sekundu a z počtu otvorů v kolečku. Jestliže za kolečko přidáme trubičku vhodné délky, zvuk je silnější díky rezonanci.

Středně náročný je model **Hammondových varhan**. Tvoří jej rotující železné kolečko se zaoblenými zuby, k nimž přiblížíme cívku na jádře z měkkého železa. Z druhé strany jádra přidáme feritový magnet. Vývody od cívky připojíme k zesilovači.



Při otáčení kolečka se zuby přibližují k jádru a zase vzdalují, a podle toho jádrem prochází větší resp. menší magnetický tok. Díky změnám magnetického toku se v cívce indukuje napětí. Po zesílení zesilovačem uslyšíme tón. Je pravdou, že reálně se podařilo docílit spíš zvuk podobný zvuku leteckého motoru dvouplošníků z dob „Odvážných mužů na

létajících strojích“, ale zvuk o dané frekvenci to je. A Hammondovy varhany skutečně takovýto princip tvorby tónu užívaly.

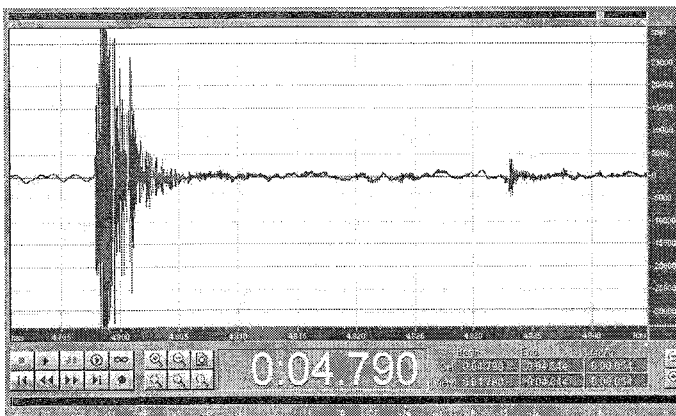
Jak rychle se šíří zvuk?

Měřit rychlost zvuku lze buď velmi jednoduše, jen se stopkami, nebo s využitím modernějších technologií.

K jednoduchému měření stačí opravdu **stopky, dva lidé a dva kusy dřeva**. Třísknout o sebe nad hlavou dvěma kusy dřeva se osvědčilo jako zdroj zvuku slyšitelný do vzdálenosti přes 300 m. Třísknutí je také na tuto vzdálenost vidět. Princip je jednoduchý. Jeden člověk třískne dřevy. Druhý člověk, vzdálený 150 až 350 metrů, spustí stopky v okamžiku, kdy uvidí náraz dřev. Jakmile uslyší ránu, stopky zastaví. Samozřejmě, že se do výsledku promítá reakční doba – jak na signál, přijatý zrakem, tak na akustický. Ovšem pokud se reakční doby příliš nemění, stačí měření opakovat pro různé vzdálenosti (např. 150 m, 200 m, 250 m, 300 m a 350 m) a výsledky proložit lineární závislost (přímku). Sklon přímky určuje, jak doba šíření zvuku roste s rostoucí vzdáleností a konstantní reakční doby se do něj nepromítají. Rychlost zvuku lze z něj proto určit přesněji – není problém dostat hodnoty mezi 320 až 350 m/s.

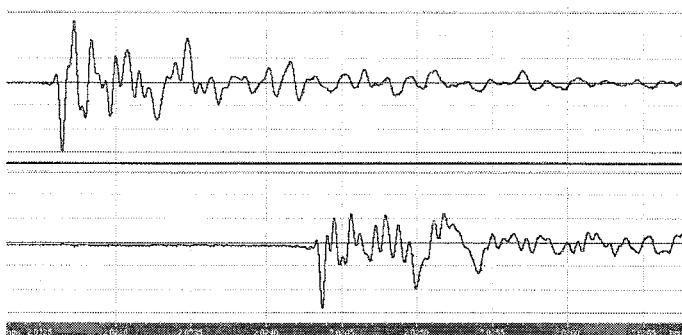
Druhá možnost je využít **odrazu zvuku o vzdálenou překážku**. Velmi vhodný je panelový dům s balkóny – rohy balkónů fungují jako koutové odražeče a odražený zvuk je proto dobře slyšet.

Pokud je stěna odražející zvuk velmi blízko (například 5 až 12 metrů), žádný člověk nejen nestačí reagovat a mačkat stopky, ale ani si neuvědomí dva různé zvuky. Mikrofon připojený k počítači ale může zachytit jak původní, tak odražený zvuk. Zvuky lze nahrát do počítače (k tomu stačí i program Záznam zvuku z Příslušenství Windows). Vhodným programem lze pak záznam zvuku prohlédnout a odečíst časový interval mezi zvukem a jeho odrazem. Autorovi se osvědčil program *CoolEdit2000*, který lze získat jako shareware a používat po dobu 30 dní. (Viz [5]. Program funguje i po uplynutí 30 dnů, ale neumožňuje již zvuky ukládat na disk.) Část obrazovky tohoto programu, ilustrující, jak vypadá přímý zvuk a zvuk odražený od 6 metrů vzdálené stěny, ukazuje obrázek.



Je třeba poznamenat, že zdrojem zvuku v tomto případě nebylo třísknutí dřev. Takový zvuk totiž trvá velmi dlouho, takže odražený zvuk se v původním zvuku prostě ztratí. Potřebujeme zvuk, který obsahuje pokud možno vysoké frekvence a přitom se rychle utlumí. Nejlepší se ukázalo ťuknout hranou nože od přístroje do malého kousku kovu a oba kusy přitom držet v ruce, aby se jejich kmity rychle utlumily.

Máme-li dva mikrofony a zvuková karta počítače umožňuje nahrávat stereofonní signál (tedy dva oddělené kanály), lze jednoduše oba mikrofony umístit třeba 1 metr od sebe a v záznamu signálu porovnat, o kolik přišel zvuk k jednomu mikrofonu dříve, než k druhému. Vhodným zvukem je opět ťuknutí dvou kovových předmětů. Jak ukazuje obrázek (pro situaci, kdy vzdálenost mikrofونů byla 60 cm), lze začátek zvuku určit s poměrně dobrou přesností. Rychlost zvuku tak lze jednoduše určit s chybou ne větší než 1 až 2 m/s.



Dokonce, položíme-li mikrofony na dřevěnou laťku a t'ukneme do laťky, můžeme, byť spíše řádově, změřit i rychlost šíření zvuku v pevném materiálu. (Pro dřevo skutečně dostaneme řádově 3 km/s.)

Je otázkou, zda dnes počítač se zvukovou kartou lze považovat za jednoduchou pomůcku – ale téměř tomu už tak začíná být. Mikrofon může být typ určený pro připojení k počítači (v ceně něco přes 100 Kč), nebo lze užít malý elektretový mikrofon prodávaný v obchodech s elektronickými součástkami (v ceně asi 15,- Kč; nutno ale ještě připočítat ceny za přívodní vodiče, nejlépe tenký stíněný kabel, a konektor a vodiče k mikrofonu a konektoru připájet). Odměnou za trochu pokusničení s celou sestavou je podle mého názoru jedno z nejnázornějších měření rychlostí zvuku.

Něco málo o rezonanci

Zesílíme-li signál z tónového generátoru vhodným zesilovačem a přivedeme do reproduktorové soustavy, lze ukázat **rezonanci strun na kytarě**. Při našich pokusech byla reproduktorová soustava položena ústím reproduktorů nahoru a na ni byla položena zadní stěna kytary. Nastavením frekvence tónového generátoru na frekvenci kmitů struny (podle sluchu a pak jemně doladovat) lze dosáhnout toho, že se příslušná struna rozkmitá s amplitudou až asi milimetr. Ve zvuku vydávaném reproduktory sice zvuk struny zaniká, ale při pohledu z boku jsou kmity struny vidět. Dají se prokázat i tak, že se struny jemně dotkneme tenkým papírkem, stéblem trávy apod. – je zřetelně vidět, jak od struny odskakuje. Nejlépe se rozkmitávají prostřední struny (A, D a G).

Studovat lze i **rezonanci kmitů vzduchu v lahvi od minerálky**. (Případně od jiného nápoje, ale v našem případě šlo o minerálku. Láhev by ale měla být skleněná, plastové láhve mají velký útlum.) Vložíme-li do láhve malý elektretový mikrofon a sledujeme-li signál z něj na osciloskopu, lehce najdeme frekvenci, při níž má signál výrazné maximum. Kmity můžeme budít například

sluchátky, připojenými na výstup tónového generátoru – sluchátka přiblížíme k hrdlu láhve. Lze také zkusit zpívat u hrdla láhve tóny různé výšky. Přivedeme-li výstup z mikrofonu do zesilovače a posloucháme výsledný signál ve sluchátkách, uslyšíme všechny zvuky z okolí zkreslené, tak trochu „jako ze sudu“ – je v nich značně zvýrazněna právě rezonanční frekvence. Pokud výstup zesilovače připojíme k reproduktoru, celá soustava mikrofon v láhvi-zesilovač-reproduktor se rozhouká na rezonanční frekvenci.

Rezananční frekvence je samozřejmě dána velikostí láhve. (A zčásti jejím tvarem a závisí i na teplotě vzduchu. Jde víceméně o Helmholtzův rezonátor, ale k tomu snad blíže někdy jindy.) Jde o stejnou frekvenci, jako má tón, který vyloudíme foukáním na hrdlo láhve. Je to zřejmě už při porovnání sluchem. Pokud bychom chtěli měřit frekvenci vyluzovaného tónu, můžeme zvuk nahrát do počítače a využít třeba již zmíněného programu *CoolEdit*. V něm si prostě necháme zobrazit spektrum signálu a podíváme se, která frekvence má největší amplitudu. Podobně můžeme určovat rezonanční frekvence píšťal, ale třeba i již výše zmíněné papírové roličky.

Kmitů struny a jak je snímat

Ke studiu kmitů struny si lze postavit jednoduchý **monochord**, v němž lze strunu napínat definovanou silou a měnit její délku. Ukázalo se, že je vhodné mít strunu svisle a zatěžovat ji závažím (přes jednozvratnou páku, aby se posunem závaží po páce dala síla jemně nastavit). Pak lze ověřovat, nakolik přesně platí známý vzorec pro frekvenci kmitů.

Zde pro nedostatek místa upozorníme jen na jednu zajímavou možnost, jak snímat kmitů struny: Konec struny připojíme na vstup zesilovače (jeden konec na „zem“ a druhý na „živý“ pól vstupu). Ke struně z boku přiblížíme magnet. Kmitající struna je pak vodičem pohybujícím se v magnetickém poli a proto se na jejích koncích indukuje napětí. Jeho velikost je řádově kolem milivoltu nebo méně, ale po zesílení lze signál reprodukovat, přivést na osciloskop či jinak dále zpracovávat.

Stojaté vlnění na gumičce

Jen stručně jeden jednoduchý nápad, jak demonstrovat příčné stojaté vlnění: Na několika metrech napjaté tenké kloboukové gumy vytvoříme velice názornou řadu uzlů a kmiten, jestliže gumičku poblíž konce rozkmitáme pomocí běžného (vibračního) holicího strojku, jemuž sundáme kryt.

Co všechno může hrát a zpívat aneb rozličné reproduktory

Po chvíli experimentování můžete s překvapením zjistit, že jako reproduktor může fungovat i extrémně jednoduchá konstrukce.

Snad nejjednodušší je vzít malý kousek pěnového polystyrénu (čtvereček o hraně zhruba 5 cm, tloušťka stačí 1 cm) a na jeho obvod navinout několik

závitů tenkého smaltovaného měděného drátu. Naviňte tolik závitů, aby odpor vzniklé cívčky byl asi 10 ohmů. Použijete-li o něco silnější drát, bude možná muset být závitů několik desítek.

Vzniklou cívčku volně pověste za tenké přívodní dráty a připojte ji k výstupu zesilovače místo reproduktoru. (Proto je třeba, aby cívčka neměla příliš malý odpor, abychom nepoškodili zesilovač. Také pozor, aby v přívodních drátech nenastal zkrat!) Na vstup zesilovače můžeme přivést signál z tónového generátoru nebo hudební signál z magnetofonu apod. Pokud nyní k vytvořené cívčce přiblížíme silnější magnet, uslyšíme pískání nebo hudbu.

Zvuk z tohoto „reproduktoru“ je velmi slabý, i když do cívčky použijeme výkon 1 watt i více. Polystyrenová destička skutečně není nejvhodnější membránou pro reproduktor, navíc závity cívčky s ní nejsou nijak pevně spojeny a proto nemůžeme očekávat lepší výsledky. Ovšem celá konstrukce je velmi názorná, jasně ilustruje účinky síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli a pro žáky může být dosti atraktivní, že takováto primitivní konstrukce vůbec hraje.

Pro vyšší hlasitost potřebujeme větší membránu a silnější magnetické pole v okolí cívky. Membrána zhotovená z tenkého papíru vypnutého v pevném rámu se neosvědčila – má výrazné rezonance na určitých frekvencích, takže zvuk je velmi dunivý. (Ovšem můžeme ji také využít. Položíme-li membránu vodorovně a nasypeme na ni trochu jemné soli, můžeme při rezonanci pozorovat, jak zrnka soli nadskakují a přemísťují se do míst uzlů a vznikají tak vlastně Chladniho obrazce.)

Nejvýhodnější se ukázala membrána ve tvaru kužele z tvrdé čtvrtky, na jejíž užší konec byla nalepena eliptická cívčka navinutá na tvrdém papíře. Aby se závity cívky nemohly volně pohybovat a síla se z nich přenášela na membránu, byly závity zality kalafunou. K nanesení a roztavení kalafuny posloužila pistolová páječka. Odpor cívky byl asi 5 ohmů. Takovouto cívku lze připojit zesilovači určenému pro reproduktory s odporem 4 ohmů. (Dodržíte-li odpor cívky, není nutné bát se poškození zesilovače, před čímž varují autoři podobné konstrukce [6].)

Do cívky zasahoval železný pásek, na jehož druhém konci byl jeden pól silného feritového magnetu. Pásek sloužil jako pólový nástavec. Díky tomu byly závity cívky v poměrně silném magnetickém poli. Při připojení signálu ze zesilovače hrál takto zkonstruovaný reproduktor v tiché místnosti dostatečně nahlas a vcelku překvapivě kvalitně.

Membránu stačilo držet v ruce za okraj, nebo ji v několika místech připevnit pomocí izolepy k silnějšímu kartonu, v němž byla pro membránu vyříznuta díra. Celou konstrukci lépe ukáže fotografie (viz dále odkaz na [www stránku](#)).

Poděkování

Za vedení projektů na letním táboře děkuji Mgr. Miroslavu Jílkovi, Mgr. Peterovi Žilavému, Mgr. Andree Marenčákové, posluchači MFF UK Martinu Švecovi, jakož i vedoucím matematických projektů RNDr. Vojtěchu Kapsovi, CSc. a posluchači MFF Lukáši Poulovi. Za technickou pomoc děkuji Ing. Petru Grygárkovi. Za mimoodborný program zde i na soustředění posluchačů učitelství patří zvláštní dík skupinám (převážně posluchačů MFF) vedeným Zdeňkou Broklovou.

Mgr. Jílek vedl výše popsané projekty týkající se sirén, modelu Hammondových varhan a studia struny. Další výše uvedení konzultanti vedli další zajímavé projekty, jejichž popis se do tohoto příspěvku již nevešel – snad budou některé v budoucnu popsány např. na webu. Na výše popsaných projektech pracovali účastníci letního tábora: Áda a Mirek (sirény a model Hammondových varhan), Dáša (studium struny), Věrka a Jiří (měření rychlosti zvuku odrazem o překážku, ručně i pomocí počítače), Tomáš a Libor (reproduktory). Uznání si ale zaslouží i ostatní účastníci pracující na dalších projektech. Na soustředění v Malé Hrašticí se problému měření rychlosti zvuku přímou metodou věnovali posluchači MFF Martin Svoboda a Jaromír Kekule a další, kteří jim pomáhali. Za entusiasmus, fantastickou atmosféru a spoustu práce patří můj upřímný dík všem účastníkům soustředění.

Fotografie, ev. další detaily k uvedeným konstrukcím můžete najít na webu na adrese <http://kdf-ls.karlov.mff.cuni.cz/veletrh/2001/dvorak/ParVeci4.htm>.

Literatura

- [1] *Dvořák L.*: Trocha heuristiky z Malé Hraštic. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 5. Ed.K.Rauner. ZČU Plzeň, 2000. s. 143-146.
- [2] *Dvořák L.*: Pár věcí z tábora 3. Ve sborníku [1], s.147-150.
- [3] <http://kdf.mff.cuni.cz/pub/Akce2000/Hrastic/Heur.htm>
- [4] <http://physics.mff.cuni.cz/win/pub/tabory/archa/home.htm>
- [5] <http://www.syntrillium.com/>
- [6] *Rojko M., Vomastek P.*: Jednoduchý reproduktor. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 3. Ed.K.Rauner. ZČU Plzeň, 1998. s. 112-113.