KMT/FPV – Fyzika pro přírodní vědy

10. přednáška, 29. 11. 2011

Jiří Kohout

Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy, Fakulta pedagogická, Západočeská univerzita v Plzni

Obsah přednášky

- Zvuk, tón, hluk
- Harmonická analýza, barva tónu
- Šíření zvuku, ozvěna
- Dopplerův jev, rázová vlna
- Intenzita zvuku, hladiny hlasitosti,
- Ultrazvuk a infrazvuk

Zvukové vlnění

Zvuk – podélné mechanické vlnění mající schopné vyvolat u člověka sluchový vjem, což odpovídá frekvenci 16 Hz – 20 kHz (nižší frekvence – infrazvuk, vyšší – ultrazvuk). Může se šířit pouze v látkovém prostředí.

Zdroje zvuku - ladička, kmitání struny, kmitání vzduchového sloupce v dechových nástrojích, kmitání hlasivek… (vždy platí, že kmitání zdroje se šíří ve formě vlnění)

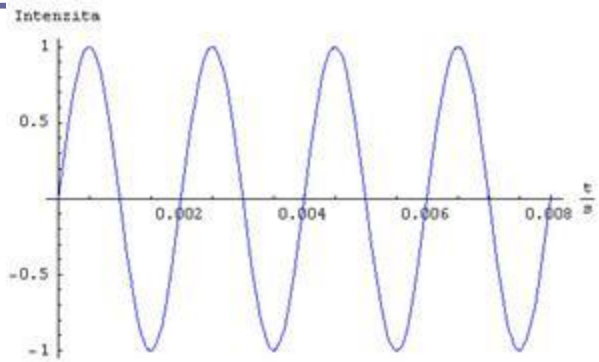
Nauka o zvuku – **akustika**, dále se dělí na

- fyzikální akustika (vznik a šíření zvuku, fyzikální nástroje)
- hudební akustika (principy hudebních nástrojů, ladění…)
- fyziologická akustika (fungování hlasivek a ucha)
- stavební akustika (zvuk v místnostech, dobrá „akustika“)
- elektroakustika (záznam a reprodukce zvuku elektronicky)
- psychoakustika – vliv zvuku na lidskou psychiku, libozvučnost hlasu…

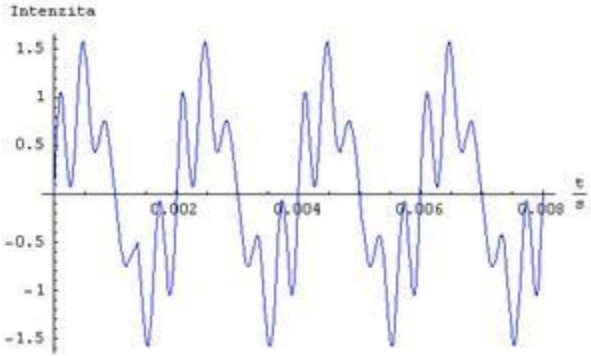
Tón, hluk

Podle průběhu výchylky zdroje zvuku na čase (ta udává i časový průběh vzniklého vlnění v daném bodě) rozlišujeme:

- Základní tón – harmonický (sinusový) průběh – například zvuk ladičky
- Složený tón – periodický, avšak neharmonický průběh, je jej možné rozložit na řadu periodických průběhů (harmonická analýza) – například zvuk většiny hudebních nástrojů, ale i samohlásky řeči
- Hluk – neperiodický průběh, nelze jednoznačně určit frekvenci – různé praskání, skřípání, ale i souhlásky řeči!



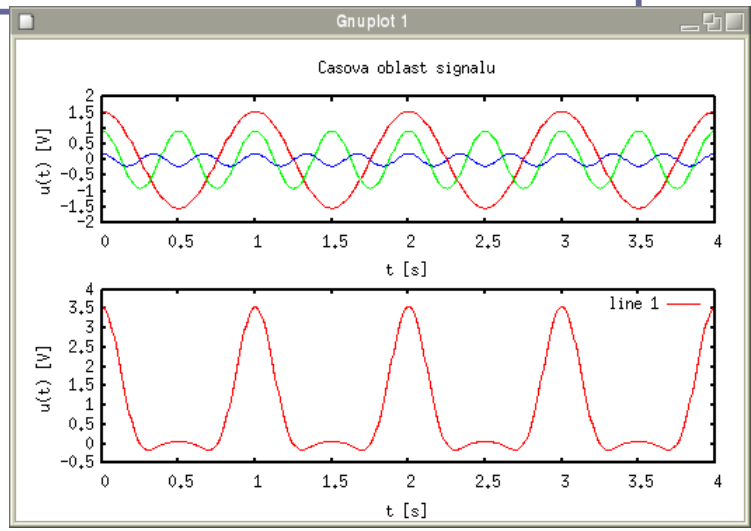
základní tón



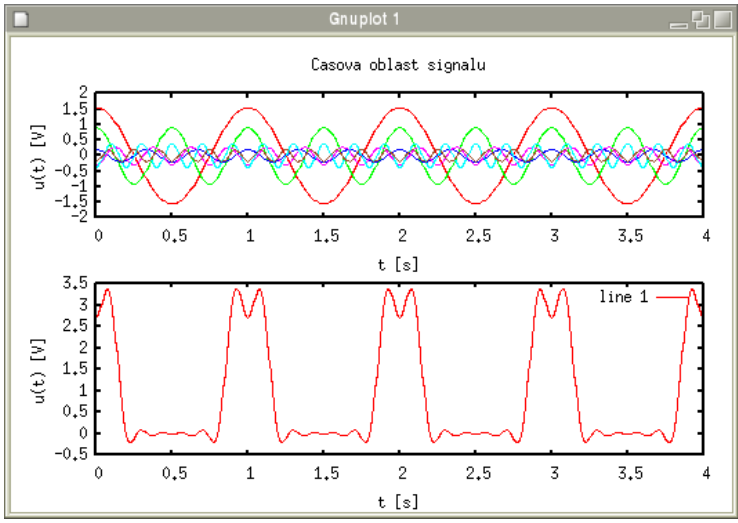
složený tón

Harmonická analýza

- Zaměřme se nyní na případ složeného tónu. Ukazuje se, že neharmonickou funkci popisující výchylku y(t) lze matematicky (tzv. Fourierova harmonická analýza) rozložit v součet harmonických funkcí majících postupně úhlové frekvence ω (frekvence složeného tónu), 2*ω, 3*ω,…, amplitudy A_1, A_2, A_3,… a fázové posuvy φ_1, φ_2, φ_3,… Platí tedy:
- $y(t) = A_1*\sin(\omega*t+ \varphi_1) + A_2*\sin(\omega*t+ \varphi_1) + A_3*\sin(\omega*t+ \varphi_1)+\ldots$



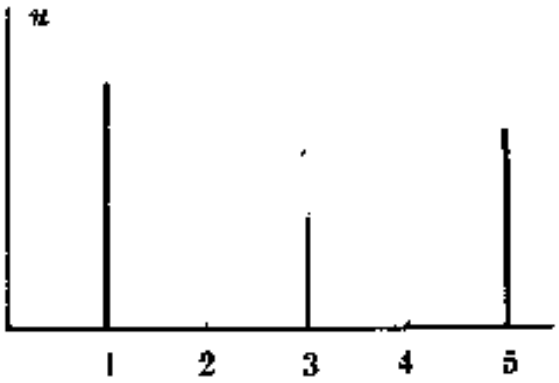
rozklad – 3 složky



rozklad – 6 složek

Harmonická analýza 2

- Jaký je význam jednotlivých členů rozkladu? 1. člen (tzv. první harmonická) udává výšku tónu. Amplitudy dalších členů (**vyšší harmonické**) poté určují **barvu tónu**. Právě díky jejich existenci můžeme rozlišit tóny stejné výšky zahrané na housle či kytaru. Kdyby byly všechny tóny samy o sobě harmonické stejně jako u ladičky, rozlišit by to nešlo!
- Barvu tonu tedy lze popsat pomocí tzv. **frekvenční charakteristiky tonu** – grafu určujícího amplitudy 1. a především vyšších harmonických



typické frekvenční spektrum - housle

Ohmův akustický zákon

Viděli jsme, že amplitudy vyšších harmonických určují barvu tónu. Otázka zní, zda je barva ovlivněna i fázovými posuvy těchto harmonických? Odpověď dává tzv. **Ohmův akustický zákon**:

Barva tonu je dána pouze amplitudami, na fázových posuvech nezáleží.

K její popisu tedy plně postačuje frekvenční spektrum, není potřeba určovat fázové spektrum. O platnosti Ohmova akustického zákona se můžeme přesvědčit pomocí tzv. **harmonického syntezátoru (program umožňující míchat vyšší harmonické s různými amplitudami a různými fázovými posuvy)**

Barvě tónu konkrétních hudebních nástrojů se budeme více věnovat v další přednášce – v hudební akustice.

Šíření zvuku

Z přednášky o mechanickém vlnění víme, že zvuk se může šířit pouze v látkových prostředích, ve vakuu to není možné. Ne v každém látkovém prostředí se však zvuk šíří stejně, různá je jak jeho rychlost, tak i to jak moc jej dané prostředí pohlcuje.

Z pohledu rychlosti platí, **že silnější vazby mezi částicemi vedou k větší rychlosti.** Nejpomaleji se tak zvuk zpravidla šíří ve vzduchu (zde však silně závisí na tlaku, čím je větší, tím je zvuk rychlejší!), další jsou zpravidla kapaliny a nejrychleji se šíří zvuk v pevných látkách

Látka	Rychlost zvuku [m/s]
Vzduch	340
Voda	1 500
Rtuť	1 400
Beton	1 700
Led	3 200
Ocel	5 000
Sklo	5 200

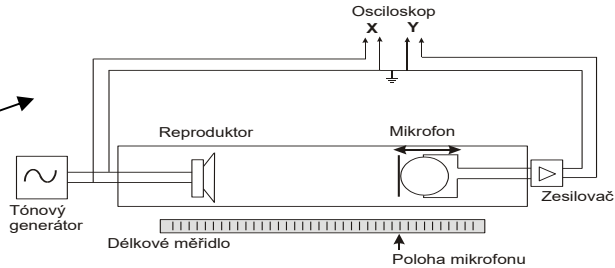
Rychlosti šíření zvuku při pokojové teplotě

Šíření zvuku 2

Rychlost šíření zvuku však závisí i na teplotě, v případě vzduchu se rychlost s rostoucí teplotou zvětšuje zhruba o 0,6 °C za sekundu (to vede např. k rozladění hudebních nástrojů při přechodu do prostoru s jinou teplotou)

Jak lze vlastně rychlost zvuku měřit? V minulosti využití toho, že světlo je mnohem rychlejší než zvuk (současný světelný a zvukový signál → určení času, o který je zvuk pomalejší → výpočet rychlosti vztahem $v = s/t$, kde s je vzdálenost pozorovatele). Nyní např. pomocí rezonance vzduchového sloupce určíme pro danou frekvenci f vlnovou délku λ, rychlost pak spočteme vztahem $v = f^* \lambda$ (nepřímé měření). Další možnost – tvar Lissajouseových obrazců sledovaných na osciloskopu (také určení λ při známém f)

Schéma měření rychlosti zvuku pomocí Lissajouseových obrazců



Šíření zvuku 3

Další důležitou otázkou je to, jak se zvuk v daném prostředí pohlcuje. Obecně platí, že k pohlcování zvuku dochází hlavně u nepružných materiálů, typicky plsť, polystyren, plata od vajíček apod. Tyto materiály se používají ke snížení úrovně hluku.

Bezodrazová místnost – totální pohlcení zvuku při dopadu na stěny, slouží k akustickým měřením.

Dozvuková komora – opačný extrém, nedochází prakticky k žádnému pohlcení, dochází k výraznému prodloužení doby trvání tónu (k tzv. dozvuku)

Bezodrazová místnost

Dozvuková komora

Ozvěna, dozvuk

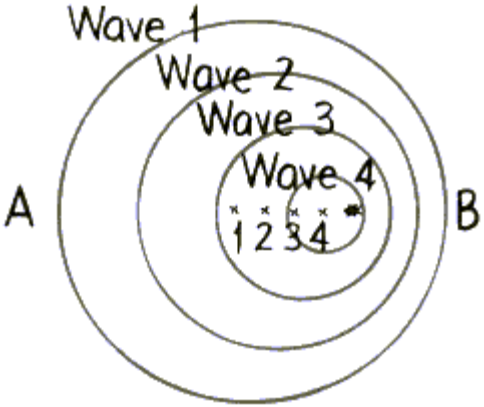
Šíření zvuku je ovlivněno překážkami, na které zvukové vlnění dopadá. Při odrazu od rozlehlé a dostatečně vzdálené překážky (budova, skalní stěna) může dojít ke vzniku **ozvěny**. Lidské ucho totiž odliší dva zvuky, mezi nimiž uplynulo alespoň 0,1 s. To je zároveň doba potřebná k vyslovení slabiky.

Pokud trvá déle než 0,1 s, než se zvuk odrazí od překážky (tj. překážka je alespoň 17 metrů daleko, protože 17*2/340 = 0,1) a vrátí zpět, dochází ke vzniku **jednoslabičné ozvěny**. Při větších vzdálenostech mohou nastat i ozvěny víceslabičné. Při vzdálenosti menší než 17 m už původní a odražený zvuk nerozlišíme, to se projeví jako **dozvuk**.

Dopplerův jev

Uvažujme situaci, kdy stojíme na místě a zdroj zvuku se pohybuje (např. sanitka jedoucí kolem nás). Ze zkušenosti víme, že výška tonu je jiná ve chvíli, kdy se sanitka blíží k nám a když od nás odjíždí.

To je důsledkem tzv. **Dopplerova jevu**. Z matematického rozboru vyplývá, že když sanitka jede rychlostí u směrem k nám, vnímáme vyšší frekvenci f_1, pro kterou platí $f_1 = f/(1-u/v)$. V opačném případě poté frekvenci f_2, kde $f_2 = f/(1+u/v)$. Přitom f je frekvence samotné houkačky sanitky (slyšeli bychom ji tak, kdyby nedocházelo k pohybu, v je pak rychlost zvuku)



V bodě A je vnímaná frekvence nižší, než má pohybující se zdroj (méně husté vlnoplochy) , v bodě B je frekvence naopak vyšší (hustější vlnoplochy)

Dopplerův jev 2

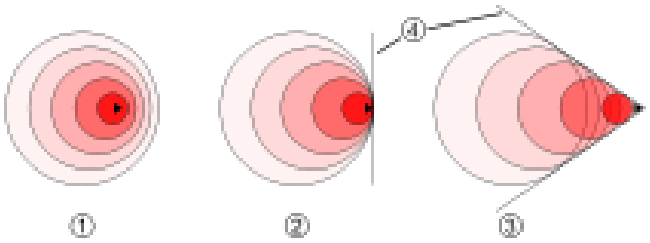
Dopplerův jev nastává pochopitelně i v situaci, kdy je zdroj zvuku v klidu a pozorovatel se proti němu pohybuje rychlostí w. V takovém případě platí, že vnímaná vyšší frekvence f_1 je při pohybu rychlostí w směrem ke zdroji dána vztahem $f_1 = (1+w/v)*f$, při pohybu směrem od zdroje je pak vnímaná nižší frekvence f_2 dána vztahem $f_2 = (1-w/v)*f$, kde v je rychlost zvuku a f vlastní frekvence zdroje.

Do třetice, Dopplerův jev nastane i ve chvíli, kdy se pohybují zdroj i pozorovatel. Zde je však vztah pro frekvence složitější…

Dopplerův jev je významný i u elektromagnetického vlnění, slouží k určení rychlosti vzdálených objektů v astronomii (tzv. rudý posuv – souvislost s rozpínáním vesmíru)

Rázová vlna

Co se stane ve chvíli, když rychlost zdroje zvuku překoná rychlost šíření zvuku v daném prostředí (typický příklad – nadzvukové letouny, u nichž je rychlost udána **Machovým číslem** – násobky rychlosti zvuku)?? Vznikne **rázová vlna**, v níž dochází k prudkému stlačení zvuku. Je v ní soustředěna značná energie → když dorazí k zemskému povrchu, nastává **akustický třesk**.



Formování rázové vlny

Rázová vlna však nastane i u jiných typů vlnění, když je rychlost zdroje větší než rychlost šíření – viz. rázová vlna vznikající za lodí plující po řece apod.

Intenzita zvuku, hladiny intenzity

Nyní se budeme zabývat tím, jak posoudit intenzitu a následně hlasitost zvuku. Zvukové vlnění je spojeno s přenosem energie, tudíž by bylo rozumné jeho intenzitu určovat na základě množství energie přenesené za jednotku času jednotkovou plochou. Zavádíme proto veličinu **intenzita zvuku** (značení I), pro kterou platí:

I = W/(S*t) = P/S, kde W je energie, která prošla plochou S kolmou na směr šíření zvuku za čas t. Jednotkou intenzity zvuku je tedy $W*m^{-2}$.

V praxi se však raději pracuje se veličinou **hladinu intenzity zvuku**, jež se udává v decibelech. Platí pro ni vztah: $L = 10*\log (I/I_0)$, kde $I0 = 10^{-12}$ W/m^{-2}, což odpovídá prahu slyšení. Hladina intenzity zvuku je tedy zavedena tak, že změna intenzity o jeden řád znamená změnu hladiny intenzity od 10 decibelů!

Intenzita zvuku, hladiny intenzity 2

Typ zvuku	Intenzita zvuku ($W*m^{-2}$)	Hladina intenzity (dB)
Práh slyšení	10^{-12}	0
Šelest listí	10^{-11}	10
Šum listí	10^{-10}	20
Pouliční šum v tichém místě	10^{-9}	30
Tichý rozhovor	10^{-8}	40
Normální pouliční hluk	10^{-7}	50
Normální rozhovor	10^{-6}	60
Hluk na frekvent. ulicích, vysavač	10^{-5}	70
Hluk v tunelu, symfonický orchestr	10^{-4}	80
Hluk motorových vozidel	10^{-3}	90
Pneumatická vrtačka	10^{-2}	100
Hlasité stroje, rocková kapela	10^{-1}	110
Startující letadlo	10^{0}	120
Práh bolesti	10^{1}	130

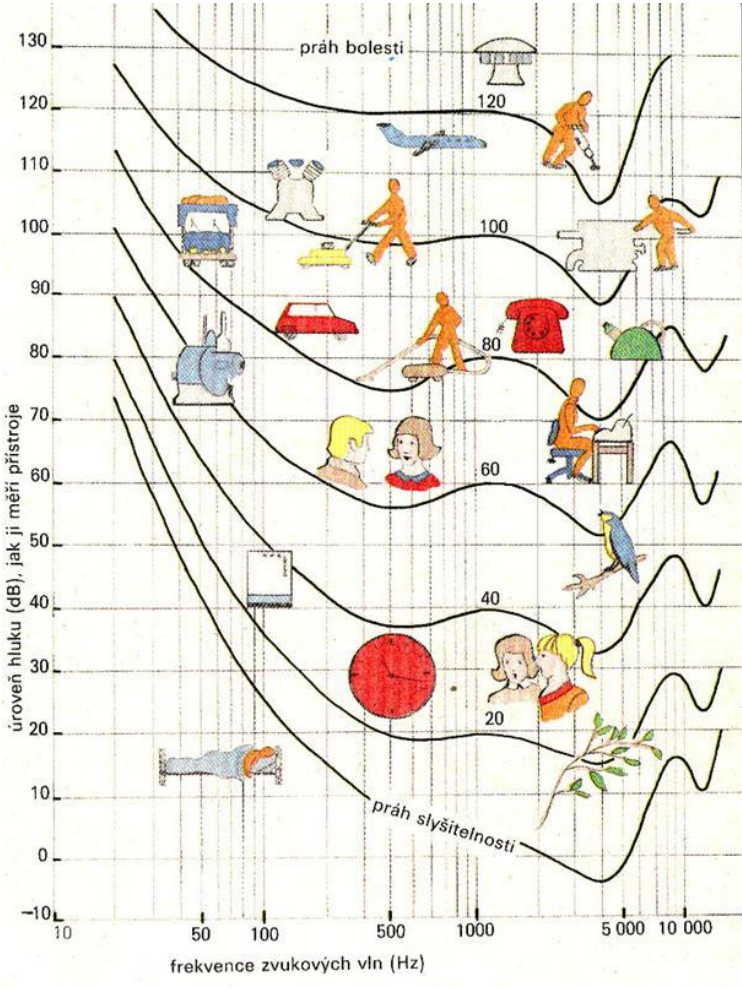
Intenzita zvuku, hladiny intenzity 3

Uvedený přehled je třeba brát s velkou rezervou, vždy totiž záleží na tom, jak jsme daleko od zdroje zvuku. Pokud se zvýší naše vzdálenost od zdroje dvakrát, klesne intenzita zvuku čtyřikrát (závislost na druhé mocnině vzhledem k zachování energie přenášené vlnění!), což odpovídá poklesu zhruba o 6 dB!

Obecně platí, že trvalý příkon velké zvukové energie je pro ucho škodlivý (při překročení prahu bolesti riziko prasknutí bubínku), může docházet k poruchám sluchu, ale i k ovlivnění celé nervové soustavy. Proto jsou stanoveny normy pro maximální možnou hlučnost v daném prostředí.

Hlasitost zvuku – závislost na frekvenci

Intenzita zvuku i hladina intenzity jsou objektivní fyzikální veličiny založené na energii přenášené zvukovým vlněním. **Naše ucho však již tak objektivní není, na různé frekvence je různě citlivé!** Proto je potřeba zavést fyzikální veličinu, která tuto různou **citlivost na různé frekvence podchytne – hlasitost zvuku,** jejíž jednotkou je 1 son (hladina intenzity je 40 dB při dané referenční frekvenci 1000 Hz). Pro jiné frekvence je třeba experimentálně určit na základě citlivosti ucha.



Ultrazvuk a infrazvuk

Ultrazvuk – podélné mechanické vlnění s frekvencí nad 20 kHz. Nevnímáme ho sluchem, pro některé živočichy je však slyšitelný (píšťalky pro psy). Využití v lékařské diagnostice, ultrazvukový signál o vysoké frekvenci se odráží od vnitřních orgánů a následně je přeměněn na signál elektrický, což umožňuje zobrazit vnitřní orgány. Další využití – ultrazvuková defektoskopie (zkoumání vnitřních vad materiálu)

Infrazvuk - podélné mechanické vlnění s frekvencí pod 16 Hz. Méně významný než ultrazvuk, při frekvenci, která je blízká frekvenci kmitání lidského srdce (zhruba 1,2 – 1,3 Hz) však může být nebezpečný.

Shrnutí hodiny

- **Vědět, co je základní tón, složený tón a hluk, vědět, jaký z těchto tonu dává ladička a jaký zpravidla hudební nástroje**
- **Vědět, že barva tonu je určena pouze amplitudami vyšších harmonických, nikoliv jejich frekvencemi**
- **Vědět, jak závisí rychlost zvuku ve vzduchu na teplotě a na tlaku**
- **Vědět, jak se mění frekvence zvuku, když je pozorovatel v klidu a zdroj zvuku v pohybu i v případě, kdy je tomu naopak (Dopplerův jev)**
- **Vědět, jaká podmínka musí být splněna, aby vznikla rázová vlna**
- **Umět převádět mezi intenzitou zvuku (watty na metr čtvereční) a hladinou intenzity zvuku (decibely)**
- **Vědět, kolikrát se sníží intenzita zvuku, pokud se vzdálíme od zdroje na x-násobek původní vzdálenosti**

- Příští přednáška – 6. 12. 2011
- Téma: Základy hudební akustiky