

2. MECHANICKÉ VLNĚNÍ

je děj, při němž se kmitání šíří látkovým prostředím.

- Šíření vln není spojeno s přenosem látky. Vlněním se přenáší energie.

2. 1. VZNIK A DRUHY VLNĚNÍ

- Příčinou vlnění je existence vazeb mezi částicemi prostředí, kterým se vlnění šíří.
- Současně se na částice přenáší energie kmitavého pohybu.

Takové prostředí se nazývá **pružné prostředí**. Částice se chovají jako MO spojené vazbou

Zdrojem mechanického vlnění je mechanický oscilátor, ze kterého se vlnění šíří určitou rychlostí.

V závislosti na směru výchylky kmitání jednotlivých bodů a směru šíření vlnění se vlnění dělí na:

1. vlnění příčné

- body prostředí kmitají kolmo ke směru šíření vlnění
- je typické pro pevná pružná tělesa tvaru tyčí, vláken, ...
- vlnění na hladině rybníka, chvění tyče, do níž udeříme kladivem, ...

2. vlnění podélné

- body prostředí kmitají ve směru šíření vlnění
- je typické pro tělesa (všech skupenství), která jsou pružná při změně objemu
- body se zhušťují a zředňují

Rozdělení vlnění podle přenosu energie:

- vlnění postupné** – vzniká postupným rozkmitáním bodů v pružném látkovém prostředí, energie se vlněním přenáší
- vlnění stojaté** - energie se vlněním nepřenáší

$$\lambda = v \cdot T = \frac{v}{f}$$

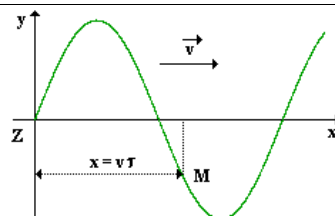
- v – rychlost postupného vlnění
- λ – vlnová délka je vzdálenost dvou nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází

2. 2. ROVNICE POSTUPNÉHO VLNĚNÍ

Okamžitá výchylka závisí

- nejen na čase t ,
- ale také na vzdálenosti x od zdroje vlnění
- kmitání zdroje vlnění je popsáno rovnicí
- Z – zdroj vlnění (harmonicky kmitá)
- τ – čas za který dospěje vlnění od zdroje do bodu M

$$y = y_m \cdot \sin \omega t$$



rovnice postupné vlny

- platí pro příčné i podélné vlnění v homogenním prostředí
- předpokládáme, že vlnění není tlumené $y_m = \text{konst.}$

$$\lambda = vT \Rightarrow T = \frac{\lambda}{v}$$

$$x = v\tau \Rightarrow \tau = \frac{x}{v}$$

$$y = y_m \cdot \sin \omega(t - \tau)$$

$$y = y_m \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v} \frac{1}{\lambda} \right)$$

$$y = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Fáze vlnění

$$2\pi \left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} \right)$$

- jestliže vlnění postupuje ve směru osy x
- + jestliže vlnění postupuje proti směru osy x

Všechny veličiny popisující vlnění jsou funkcemi času a funkcemi polohy bodu, kterými vlnění prochází.

2. 3. INTERFERENCE VLNĚNÍ

Jestliže pružným prostředím postupuje dvě nebo více mechanických vln, dochází k jejich skládání.

Př.: Dvě vlnění se stejnou λ , y_m , v

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d}{\lambda}$$

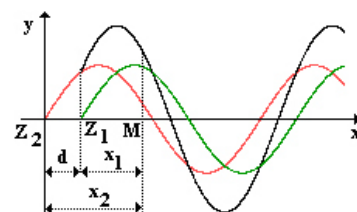
$$d = x_2 - x_1$$

$$y_1 = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right)$$

$$y_2 = y_m \cdot \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

$$\Delta\phi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1)$$



ϕ – fázový rozdíl

d – dráhový rozdíl - vzdálenost 2 bodů, ve kterých mají dvě vlnění stejnou fázi

Zvláštní případy interference $d = \text{celistvému počtu půlvln interferujících vlnění}$:

1. $d = \text{sudému počtu půlvln}$

- vlnění se setkávají se **stejnou fází**, vzniká interferenční **maximum**
- amplituda výsledného vlnění rovna $y_m = y_{m1} + y_{m2}$

$$d = 2k \frac{\lambda}{2}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

2. $d = \text{lichému počtu půlvln}$

- vlnění se setkávají s **opačnou fází**, vzniká interferenční **minimum** ($y_{m1} = y_{m2}$ vlnění zaniká)
- amplituda výsledného vlnění je rovna $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$

$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

2. 4. ODRAZ VLNĚNÍ V ŘADĚ BODŮ

nastává na konci řady bodů, kterou se šíří postupné vlnění

- na pevném konci se vlnění odráží s opačnou fází
- na volném konci se vlnění odráží se stejnou fází

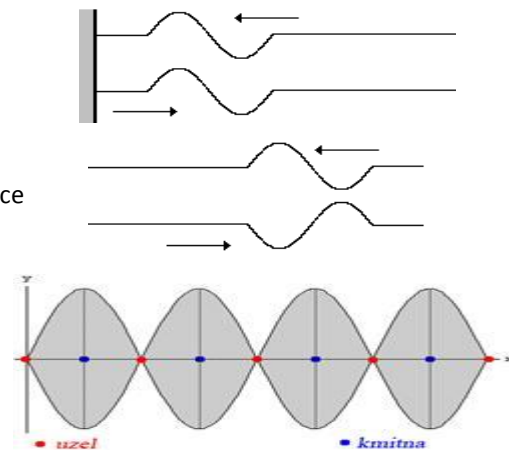
STOJATÉ VLNĚNÍ

vzniká interferencí dvou stejných vlnění (stejně λ , γ_m , f), která postupují proti sobě
Například skládáním postupného přímého vlnění a vlnění odraženého od pevného konce daného prostředí.

Kmitna stojatého vlnění je bod, který kmitá s maximální amplitudou. ($y = y_m$)

Uzel stojatého vlnění je bod, který zůstává v klidu (tj. jeho amplituda je nulová).

Vzdálenost dvou sousedních uzlů (nebo kmiten) je $\lambda/2$.



1. Při postupném vlnění

- kmitají všechny body se stejnou amplitudou, ale s různou fází, která se s časem mění
- fáze se šíří rychlostí, která se také označuje jako fázová rychlost,
- energie se přenáší.

2. Při stojatém vlnění

- kmitají všechny body mezi dvěma uzly se stejnou fází ale různou amplitudou výchylky (závislé na poloze bodu)
 - Energie se nepřenáší, pouze se mění potenciální energie pružnosti v kinetickou a naopak.
 - Může být příčné i podélné.
 - Vlnění příčné je zdrojem zvuku u strunných nástrojů (kytara, housle, ...)
 - Vlnění podélné vzduchového sloupce v duté části nástroje je příčinou zvuku u dechových nástrojů (klarinet, trubka)
- Toto stojaté vlnění označujeme jako chvění.

2. 5. CHVĚNÍ MECHANICKÝCH SOUSTAV

Frekvence stojatého vlnění nemůže být libovolná. Obecně je možné vytvořit stojaté vlny, pro něž platí:

$$l = k \frac{\lambda}{2}$$

$k = 1, 2, \dots$

Na strunu se tedy vejde celočíselný násobek poloviny vlnové délky f_z – **základní frekvence**:

Základní frekvence je dána geometrickými rozměry pružného tělesa, v němž vzniká chvění.

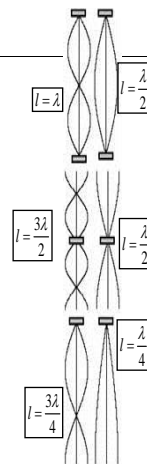
Pružné těleso se chová jako mechanický oscilátor.

$$f_z = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$$

Vyšší harmonické frekvence – násobky f_z – $f = k \cdot f_z$

- na pevném konci vzniká uzel
- na volném konci – kmitna
 1. těleso je upevněno na obou koncích - struna na kytarě, struna v klavíru, tyč vetknutá mezi dvě stěny,
 2. pružné těleso je upevněno uprostřed – jen liché násobky - ozvučná dřívka držaná uprostřed, ...
 3. pružné těleso je upevněno na jednom konci - hraní na láhev od piva foukáním přes její hrdlo.

Chvění vzniká i na deskách různého tvaru - Chladniho obrazce.



2. 6. VLNĚNÍ V IZOTROPNÍM PROSTŘEDÍ

Izotropní prostředí – má ve všech bodech a směrech stejné vlastnosti.

Vlnoplocha – plocha, na níž leží body, do kterých vlnění dospělo za tutéž dobu.

Body vlnoplochy kmitají se stejnou fází.

Paprsek – je kolmice k vlnoploše, určuje směr šíření vlnění.

Neznáme-li polohu zdroje, ale známe tvar vlnoplochy v určitém okamžiku, umíme určit tvar vlnoplochy v okamžiku dalším, použijeme tzv. **Huygensův princip**.

EV spolu interferují, ale ruší se všude, kromě nové vlnoplochy.

Každý bod vlnoplochy V_1 , do něhož dospělo vlnění v určitém časovém okamžiku, lze považovat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách EV.

Vlnoplocha V_2 v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch.

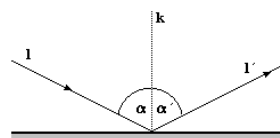
2. 7. ODRAZ VLNĚNÍ

vlnění se při dopadu na neprostupnou překážku odráží

Zákon odrazu

Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu dopadu $\alpha = \alpha'$
Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu

(Rovina dopadu je dána dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu k .)



LOM VLNĚNÍ

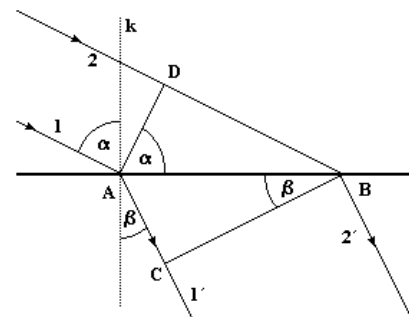
nastává při průchodu vlnění rozhraním dvou prostředí

- projevuje se změnou směru
- τ – doba průchodu
z D \rightarrow B, A \rightarrow C
- v_1 – rychlost šíření v 1. prostředí
- v_2 – rychlost šíření ve 2. prostředí

$$\begin{aligned} |DB| &= |AB| \sin \alpha \\ |AC| &= |AB| \sin \beta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |DB| &= v_1 \tau \\ |AC| &= v_2 \tau \\ \frac{|DB|}{|AC|} &= \frac{v_1 \tau}{v_2 \tau} = \frac{v_1}{v_2} \end{aligned}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n$$



Zákon lomu vlnění

- α – úhel dopadu
- β – úhel odrazu
- n – index lomu

Mohou nastat dva případy.

1. **lom ke kolmici** ($\alpha > \beta$) – pokud $v_1 > v_2$

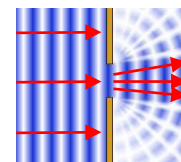
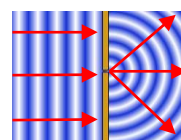
2. **lom od kolmice** ($\alpha < \beta$) – pokud $v_1 < v_2$

Poměr sinu úhlu dopadu k sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí konstantní a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

2. 7. OHYB VLNĚNÍ

ovlivňuje směr šíření vlnění

- vlnění se šíří i za překážkou
 - malých rozměrů
 - velkou, v níž je otvor
- vlnění se odchyluje od svého původního směru tím více, čím je otvor menší
- ohyb je výraznější s větší vlnovou délkou
- každý bod je zdrojem elementárního vlnění, která spolu interferují – Huygensův princip



3. ZVUKOVÉ VLNĚNÍ

AKUSTIKA – se zabývá fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem.

zvuk – mechanické vlnění, které vnímáme sluchem.

Rozlišujeme:

1. infrazvuk – $f < 16$ Hz,
2. zvuk slyšitelný lidským uchem – 16 Hz $< f < 16$ kHz,
3. ultrazvuk – $f > 16$ kHz;

Přenosová soustava

1. **zdroj** zvuku
2. **prostředí**, kterým se zvuk šíří
3. **přijímač** zvuku (lidské ucho, mikrofon, ...)

3. 1. ZDROJE ZVUKU

Zdrojem zvuku je chvění pružných těles, přenáší se do okolního prostředí a vzbuzuje v něm zvukové vlnění.

Základní dělení zvuků

1. **tóny** (hudební zvuky) – grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je periodická funkce
 - **tóny jednoduché** - mají harmonický průběh, tj. grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je funkce sinus
 - **tóny složené** - jejich průběh je periodický, ale už se nejedná o sinusoidu. Zvuky obsahují kromě základní frekvence ještě i vyšší harmonické, na základě nichž dokážeme jednotlivé zdroje zvuku odlišit. Samohlásky lidské řeči, zvuky hudebních nástrojů, ...
2. **hluky** (šumy, praskání, skřípání, ...) – grafem závislosti intenzity (hlasitosti) na čase není periodická funkce souhlásky lidské řeči, ...

Ladička – rezonanční skříпка zesílí zvuk ladičky (kmitá harmonicky s konstantní frekvencí).

3. 2. ŠÍŘENÍ ZVUKU

- ve vzduchu se zvuk šíří jako podélné postupné vlnění
- přenos zvuku je možný jen v pružném látkovém prostředí, (se snižujícím se tlakem zvuk slabne, ve vzduchoprázdnu zaniká)
- šíří se i v pevných látkách, ve kterých vzniká i příčné vlnění (beton, ocel, sklo, ...)
- plst', polystyrén – snižují úroveň hluku

rychlost zvuku

- ve vzduchu závisí na nečistotách, vlhkosti a teplotě (**ne na tlaku**), pro výpočty $v = 340$ m.s⁻¹
 $v_t = (331,82 + 0,61\{t\})$ m.s⁻¹ 0°C, 1,293 kg.m⁻³ ← hustota suchého vzduchu
- rychlost je stejná pro všechny frekvence
- v kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší
- **ozvěna** – odraz zvuku od rozlehlé překážky (stěna, skála, ...)
- **dozvuk** – prodloužená doba trvání zvuku a jeho zesílení (pozor při projektování sálů, síní...)

3. 3. VLASTNOSTI ZVUKU

Tóny charakterizuje výška a barva. Výška tónu je určena jeho frekvencí.

- **základní tón** – je tón s nejnižší frekvencí
- **vyšší harmonické tóny** – násobky frekvence základního tónu
- **relativní výška tónu** – je poměr frekvence daného tónu a frekvence vhodně zvoleného srovnávacího tzv. referenčního tónu
 - v hudební akustice 440 Hz (komorní a)
 - v technické praxi 1000 Hz
- **barva tónu** – je určena vyššími harmonickými tóny, jejich frekvencí a amplitudami (Díky tomu rozlišujeme hudební nástroje se stejnou výškou tónu.)

3. 4. HLASITOST A INTENZITA

Hlasitost zvuku je subjektivní a závisí na citlivosti sluchu. Ucho je nejcitlivější na zvuky 700 Hz – 6000 Hz.

Objektivní hodnocení vyjadřuje:

1. **Akustický výkon** P zvukového vlnění množství energie ΔE přenesené za čas Δt od zdroje k přijímači
2. **Intenzita zvuku** I na plochu ΔS kolmou ke směru šíření zvuku se přenese akustický výkon ΔP

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$
$$[P] = W$$

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$
$$[I] = Wm^{-2}$$

- **Práh slyšení** – $\downarrow I$, kterou jsme schopni vnímat
- **Práh bolesti**

Poměr největšího a nejmenšího akustického výkonu v logaritmické stupnici se vyjadřuje v jednotkách bel.

(V praxi se používají decibely – dB.) Intenzita zvuku se s rostoucí vzdáleností zmenšuje. (s^{-2})

3. 5. ULTRAZVUK

- mechanické vlnění s frekvencí větší než 16 kHz
- pro lidské ucho neslyšitelný, slyší ho psi, delfíni, netopýři...
- $\lambda_{UZ} < \lambda_{ZVUKU}$ – šíření ultrazvuku je méně ovlivněno ohybem.
- výrazný je jeho odraz od překážek
- je méně pohlcován v kapalinách a pevných látkách.
- zdrojem je elektronický generátor

Použití ultrazvuku

1. **lékařství** – signál prochází tělem a od vnitřních orgánů se odráží zpět, detektory je přijat a dále zpracován. (nahrazuje rentgen), Sono jater, ultrazvuková kontrola plodu budoucí matky, ...
2. **ultrazvuková defektoskopie** – funguje na stejném principu: ultrazvuk se odráží od vady výrobku (dutina, příměs, ...) , lze zjistit polohu vady
3. **sonar** (SOund Navigation And Ranging) – průzkum mořského dna: ultrazvuk dopadá na mořské dno a odráží se zpět. Lze vykreslit trojrozměrný reliéf dna.
4. **užití jeho vibrací** – vypuzování plynů z kapalin a roztavených kovů, skla, ...; vytváření suspenze, emulze (tuk ve vodě, ...); čištění součástek (jemné mechanismy, čočky brýlí, ...)
5. **v přírodě** - orientace netopýřů, povely pro psa, dorozumívání se delfínů, ...

Použití ultrazvuku přináší pro živé organismy také riziko. Exponované buňky se mohou poškodit:

1. **mechanicky** – buňky při určitých frekvencích rezonují a trhají se
2. **termicky** – energie ultrazvuku se při jeho absorbování přemění na teplo
3. **chemicky** – dochází ke změnám ve struktuře a složení chemických látek, vznikají volné radikály, inaktivují se enzymy
4. **excitačně** – molekuly se energeticky vzbuzují (podobně jako při ionizaci)

U lidí se po ultrazvukové expozici pozorují výrazné poruchy v krvi, bolest hlavy, únava, mdloby, bušení srdce, narušuje se funkce pohlavních žláz, ... Při trvalém působení ultrazvuku může dojít k ochrnutí (smrti).

INFRAZVUK

- je mechanické vlnění s frekvencí menší než 16 Hz
- lidské ucho ho nevnímá
- dobře se šíří ve vodě („hlas moře“ předpovídající několik hodin před vlnobitím jeho příchod) vnímají ho ryby, medúzy
- při frekvencích blízkých frekvenci tlukotu srdce je pro člověka nebezpečný.
- nebezpečné jsou $f = 6 - 7$ Hz, při nichž rezonují tkáně a poškozují se buňky ve svalech a nervovém systému.
- Infrazvuk s velmi vysokou amplitudou (a tedy vysokou energií) může i zabít (infrazvukové zbraně).

3. 6. DOPPLERŮV JEV

Při vzájemném pohybu zdroje zvuku a pozorovatele, vnímá pozorovatel jinou frekvenci, než je frekvence kmitání zdroje.

Přibližuje-li se zdroj – vyšší f , vzdaluje-li se zdroj – nižší f .