

1.8. Mechanické vlnění



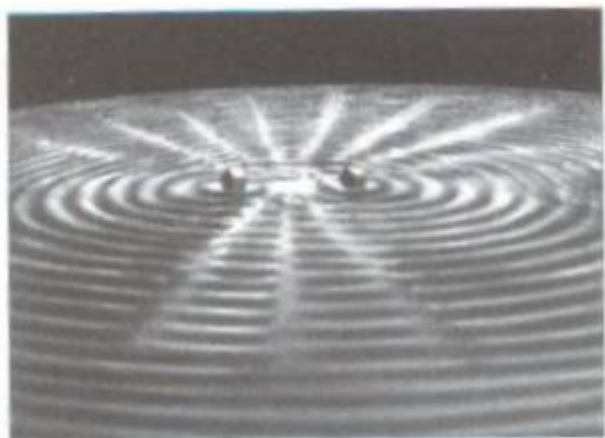
1. Umět vysvětlit princip vlnivého pohybu.
2. Umět srovnat a zároveň vysvětlit rozdíl mezi periodickým kmitavým pohybem jednoho bodu s periodickým vlnivým pohybem bodové řady.
3. Znat charakteristické veličiny vlnivého pohybu a jejich jednotky:
 - periodu,
 - frekvenci,
 - úhlovou frekvenci,
 - amplitudu,
 - vlnovou délku
 - fázovou rychlost.
4. Umět vysvětlit rozdíl mezi maximální rychlostí kmitající částice a fázovou rychlostí.
5. Umět vysvětlit fázový rozdíl..
6. Znat souvislost mezi fázovým a dráhovým rozdílem.
7. Znat druhy vlnění a umět vysvětlit odlišnosti.
8. Umět definovat energii vlnivého pohybu a hustotu energie.
9. Vysvětlit pojmy výkonu a intenzity vlnění.



Dosud jsme při studiu uvažovali pouze harmonický pohyb izolované částice (hmotného bodu nebo tělesa), která konala kmitavý pohyb kolem rovnovážné polohy.

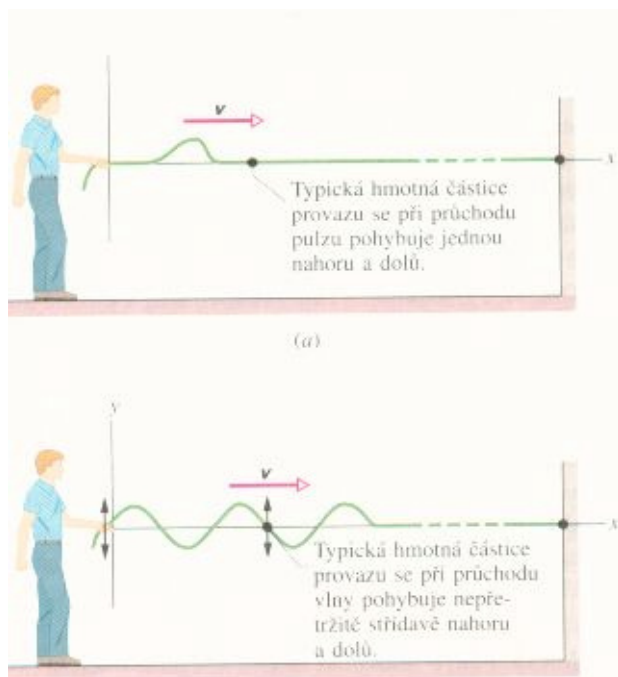
Jestliže takový objekt bude součástí hmotného prostředí (tuhého, kapalného, plynného), pak se kmity neomezí jen na samotný hmotný bod, ale budou se přenášet i na sousední body tohoto prostředí.

Z místa prvotního kmity – **zdroje** – se bude přenášet rozruch i na ostatní body prostředí. Říkáme, že v prostředí vzniká vlnění, případně, že prostředím se šíří **postupná vlna**.



Typickým příkladem vzniku vlnivého pohybu je vlnivý pohyb, který vzniká na vodní hladině po dopadu kamene. Molekuly vodní hladiny jsou postupně uvedeny do kmitavého pohybu. V tomto případě se šíří ze zdroje vlnění (místa rozruchu) rovinná vlna.

Obr. 1.8.-1



Obr. 1.8.-2

Dalším příkladem může být rozkmitání volného konce hadice rukou. Jednotlivé body hadice postupně vykmítávají ze svých původních klidových rovnovážných poloh. Hadicí se pak šíří vlnění.

V uvedených (nebo dalších) případech se daným prostředím šíří vlnění konečnou rychlostí, která závisí na molekulových vazbách mezi částicemi. Prostředí jako celek však zůstává v klidu.

Jednotlivé body pouze kmitají kolem rovnovážných poloh. Tato poloha zůstává stálá.

Vlnění je jedním z nejrozšířenějších fyzikálních dějů. Šíří se jím zvuk, světlo, pohyby v zemské kůře při zemětřesení. Vlnění má různou fyzikální podstatu a může mít i složitý průběh. Základní poznatky o vlnění je možné nejsnadněji objasnit na **vlnění mechanickém**.

1.8.1. Popis mechanického vlnění

Mechanické vlnění se šíří v hmotném prostředí. Jednotlivé body jsou navzájem spojeny molekulovými silami (pružnou vazbou). Prostřednictvím této vazby se přenáší rozruch z jednoho bodu na druhý. Nejpráhlednější je vlnivý pohyb v bodové řadě, kdy jedna její částice začne kmitat. Vznikne **lineární postupná vlna**. Body prostředí mohou kmitat v libovolných směrech:

1. napříč ke směru šíření vlnění – **příčná vlna**,

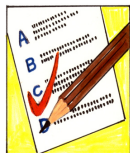


Obr. 1.8.-3

2. podél směru šíření vlnění – **podélná vlna**.



Obr. 1.8.-4



TO 1.8.-1. Mechanické vlnění se šíří

- a) ve vakuu
- b) v hmotném prostředí
- c) nezáleží na prostředí

TO 1.8.-2. U postupného mechanického vlnění se

- a) šíří energie
- b) nešíří energie
- c) dochází k přenosu hmoty
- d) nedochází k přenosu hmoty

1.8.1.1. Rychlost šíření vlnění



V daném hmotném prostředí se vlnění šíří konstantní rychlostí **v**. To znamená, že pro popis rychlosti můžeme použít vztah pro rychlost rovnoměrného pohybu

$$v = \frac{s}{t} \quad 1 \quad 1.8.-1$$

Vzdálenost, do které se rozruch rozšíří za dobu kmitu (periodu) **T** krajního bodu, se nazývá **vlnová délka** **λ**. Jednotkou vlnové délky je m.

Perioda **T** je doba kmitu jednoho bodu řady. Jednotkou je sekunda (s).

Převrácenou hodnotou periody je **frekvence** **f**. Jednotkou je hertz (Hz=s⁻¹). Platí

$$f = \frac{1}{T}.$$

Jednotkou periody je s, jednotkou frekvence je s⁻¹ nebo též Hz.

Úhlová frekvence **ω** (rad.s⁻¹) je na základě teorie kmitavého pohybu daná vztahem

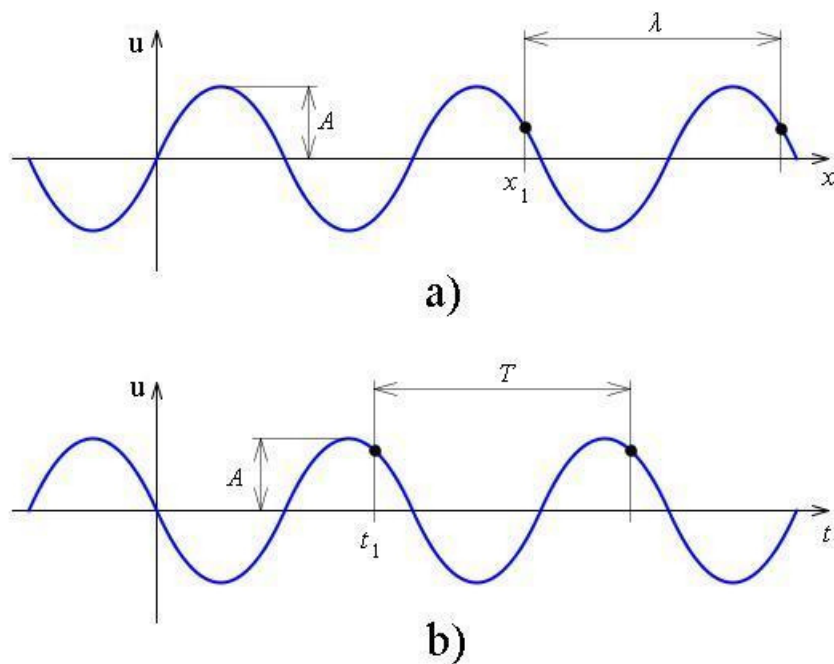
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Pak rychlost šíření vlnění je možné vyjádřit vztahem

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad \text{nebo}$$

$$v = \lambda f \quad 1.8.-2$$

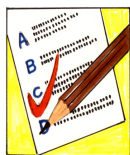
Rychlost **v** nazýváme **fázovou rychlostí**.



Obr. 1.8.-5

Pak **vlnová délka** λ je nejkratší vzdálenost dvou bodů, které kmitají se stejnou fází.

Při přestupu vlnění do jiného prostředí zůstává frekvence stejná, mění se fázová rychlost a vlnová délka.



TO 1.8.-3. Jednotkou periody je

- a) s
- b) s^{-1}
- c) min
- d) min^{-1}

TO 1.8.-4. Jednotkou frekvence je

- a) s
- b) s^{-1}
- c) Hz
- d) Hz^{-1}

TO 1.8.-5. Pro fázovou rychlost platí

- a) $v = \lambda T$
- b) $v = \frac{\lambda}{T}$
- c) $v = \frac{\lambda}{f}$
- d) $v = \lambda f$

TO 1.8.-6. Fázový rozruch se šíří prostředím

- a) periodicky proměnnou rychlostí
- b) konstantní rychlostí

- c) nedochází k šíření fáze
- d) rychlost roste

TO 1.8.-7. Postupná vlna je charakterizována vlnovou délkou 6 m a frekvencí 3 Hz. Určete fázovou rychlost

- a) 9 m.s^{-1}
- b) 2 m.s^{-1}
- c) 3 m.s^{-1}
- d) 18 m.s^{-1}



Prostředím se šíří postupné vlnění jehož úhlová frekvence je $12\pi \text{ rad.s}^{-1}$ a rychlost šíření vlnění je 6 m.s^{-1} . Určete vlnovou délku tohoto vlnění.

$$\omega = 12\pi \text{ rad.s}^{-1}, v = 6 \text{ m.s}^{-1},$$

Pro vlnovou délku platí ze vztahu pro fázovou rychlost $\lambda = \frac{v}{f}$.

Frekvenci f kmitavého pohybu vyjádříme ze vztahu $\omega = 2\pi f$. Pak $f = \frac{\omega}{2\pi}$.

Po dosazení do vztahu pro vlnovou délku je $\lambda = \frac{v2\pi}{\omega} = \frac{6 \cdot 2\pi}{12\pi} = 1 \text{ m}$.

Vlnová délka je 1 m.

1.8.1.2. Matematické vyjádření okamžité výchylky postupné vlny



Budeme uvažovat řadu bodů. Krajní bod řady (zdroj vlnění) kmitá s výchylkou popsanou rovnicí
 $u = A \sin(\omega t)$.

Poznámka:

Okamžitá výchylka hmotného bodu z rovnovážné polohy při vlnivém pohybu se obvykle značí u .

Bod řady ve vzdálenosti x bude uveden do kmitavého pohybu s časovým zpožděním τ .

Pak rovnice pro výchylku tohoto bodu bude zapsaná ve tvaru

$$u = A \sin \omega(t - \tau).$$

Protože vlnění se šíří konstantní rychlostí, pak

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

Dosadíme do vztahu pro výchylku

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

1.8.-3

Protože fázová rychlost je $v = \frac{\lambda}{T}$,

pak

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{\frac{\lambda}{T}} \right) = A \sin \omega \left(t - \frac{T x}{\lambda} \right). \quad 1.8.-4$$

Vzhledem k tomu, že $\omega = \frac{2\pi}{T}$, pak

$$u = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T x}{\lambda} \right). \quad 1.8.-5$$

Po úpravě získáme rovnici

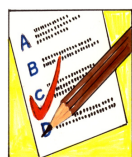
$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad 1.8.-6$$

Tato rovnice představuje vztah pro okamžitou výchylku bodu, který leží ve vzdálenosti x od zdroje vlnění v časovém okamžiku t .

Jestliže nebudeme uvažovat útlum vlnění v daném prostředí, pak amplituda kmitů jednotlivých bodů řady bude stejná.

Vlnění se šíří v kladném směru osy x . V případě, že by se vlnění šířilo opačným směrem, bylo by v rovnici kladné znaménko.

Říkáme, že vlnění je děj dvojnásob periodický. Okamžitá výchylka závisí na čase a na umístění bodu v řadě.



TO 1.8.-8. Postupné vlnění je charakterizováno rovnicí $u = 0,05 \sin 2\pi \left(\frac{t}{8} - \frac{x}{16} \right)$.

Určete amplitudu vlnění.

- a) 5 cm
- b) 0,05 cm
- c) 5 m
- d) 0,05 m

TO 1.8.-9. Postupné vlnění je charakterizováno rovnicí $u = 0,05 \sin 2\pi \left(\frac{t}{8} - \frac{x}{16} \right)$. Určete periodu vlnění.

- a) 8 Hz
- b) 8 s
- c) 16 Hz
- d) 16 s

TO 1.8.-10. Postupné vlnění je charakterizováno rovnicí $u = 0,05 \sin 2\pi \left(\frac{t}{8} - \frac{x}{16} \right)$. Určete vlnovou délku vlnění.

- a) 0,05 cm
- b) 8 m
- c) 16 cm
- d) 16 m

TO 1.8.-11. Postupné vlnění je charakterizováno rovnicí $u = 0,05 \sin 2\pi \left(\frac{t}{8} - \frac{x}{16} \right)$. Určete fázovou rychlost vlnění.

- a) 160 m.s^{-1}
- b) 128 m.s^{-1}
- c) 2 m.s^{-1}
- d) $0,5 \text{ m.s}^{-1}$



Jakou rovnici má vlna o frekvenci 40 Hz, amplitudě 2 cm, která postupuje rychlostí 80 m.s^{-1} .

- a) v kladném směru osy x
- b) v záporném směru osy x

$$f = 40 \text{ Hz}, A = 0,02 \text{ m}, v = 80 \text{ m.s}^{-1}$$

a) Rovnice okamžité výchylky vlny je

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Vlnová délka

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{80}{40} = 2 \text{ m}$$

Můžeme ji přepsat do tvaru

$$u = A \sin 2\pi \left(f t - \frac{x}{\lambda} \right) = 0,2 \sin \left(40 t - \frac{x}{2} \right) \text{ m}$$

b) V rovnici změníme pro orientaci znaménko

$$u = A \sin 2\pi \left(f t + \frac{x}{\lambda} \right) = 0,2 \sin \left(40 t + \frac{x}{2} \right) \text{ m}$$



Jaká je amplituda, perioda, frekvence, vlnová délka a fázová rychlost postupné vlny, dané rovnicí $u = 0,04 \sin 6\pi \left(8t - \frac{2x}{4} \right)$ v metrech.

Rovnice postupné vlny je

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Zadanou vlnu upravíme na tento tvar

$$u = 0,04 \sin 2\pi \left(24t - \frac{6x}{4} \right).$$

Srovnáním dostaneme výsledky

$$1. A = 0,04 \text{ m},$$

$$2. 24t = \frac{t}{T} \Rightarrow T = \frac{1}{24} \text{ s},$$

$$3. \frac{6x}{4} = \frac{x}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{4}{6} = \frac{2}{3} \text{ m},$$

$$4. f = \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{1}{24}} = 24 \text{ Hz},$$

$$5. v = \lambda f = \frac{2}{3} \cdot 24 = 16 \text{ m.s}^{-1}$$

1.8.1.3. Fázový a dráhový rozdíl



Jestliže rovnici pro okamžitou výchylku

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

upravíme na tvar

$$u = A \sin \left(2\pi \frac{t}{T} - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right).$$

A srovnáme s rovnicí kmitavého pohybu

$$u = A \sin(\omega t - \varphi),$$

pak člen

$$\varphi = 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad 1.8.-7$$

představuje fázový posuv bodu ve vzdálenosti x od zdroje vlnění vůči tomuto bodu.

Jestliže budeme uvažovat dva body řady ve vzdálenostech x_1 a x_2 , pak jejich fázový rozdíl bude

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi \frac{x_2}{\lambda} - 2\pi \frac{x_1}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x. \quad 1.8.-8$$

Fázový rozdíl $\Delta\varphi$ bude úměrný dráhovému rozdílu Δx .

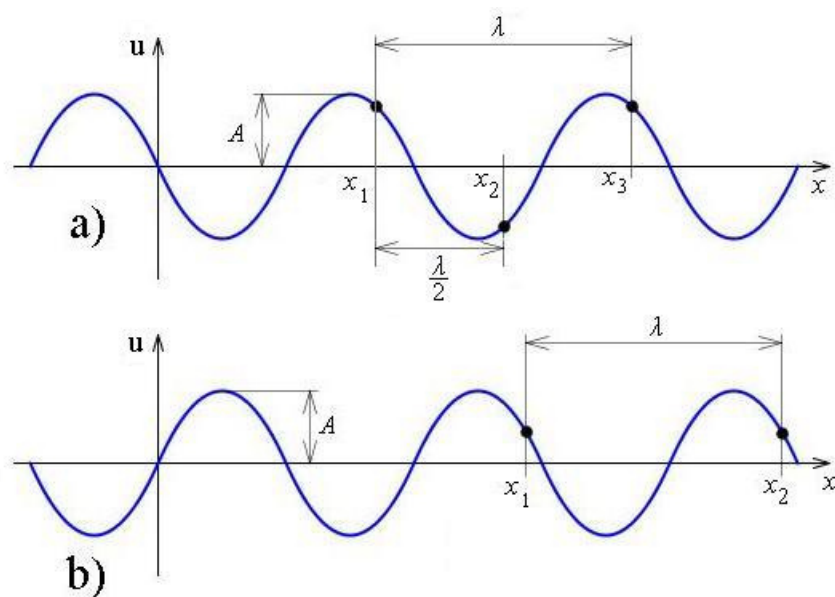
Jestliže budeme uvažovat dva body řady, jejichž vzájemná Δx vzdálenost bude rovna sudému násobku polovin vlnových délek $\Delta x = 2k \frac{\lambda}{2}$ to je $\Delta x = k\lambda$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$, pak fázový

rozdíl $\Delta\varphi$ bude roven $\Delta\varphi = 2k\pi$ a oba body budou kmitat ve fázi. Budou dosahovat maxima a minima současně.

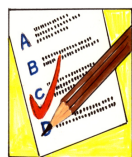
Body x_1, x_3 na obr. 1.8.-8a, body x_1, x_2 na obr. 1.8.-8b jsou ve fázi. Vzdálenost mezi nimi je rovna vlnové délce λ .

Jestliže vzdálenost dvou bodů Δx bude rovna lichému násobku polovin vlnových délek $\Delta x = (2k-1)\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 1, 2, 3, \dots$, pak fázový rozdíl $\Delta\varphi$ bude roven $\Delta\varphi = (2k-1)\pi$ a oba body budou kmitat v opačné fázi. V okamžiku, kdy jeden bod bude v maximu, bude druhý bod v minimu.

Body x_1, x_2 na obr. 1.8.-8a jsou v opačné fázi. Vzdálenost mezi nimi je $\frac{\lambda}{2}$.



Obr. 1.8.-6



TO 1.8.-12. Fázový rozdíl $\Delta\varphi$ je určen vztahem

a) $\Delta\varphi = 2\lambda\pi(\Delta x)$

b) $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x$

c) $\Delta\varphi = \frac{2\pi\lambda}{\Delta x}$

d) $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x$

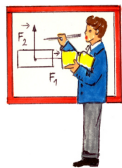
TO 1.8.-13. Jestliže body kmitají ve fázi, pak $\Delta\varphi$ je rovno

- a) lichému násobku π rad
- b) sudému násobku π rad

TO 1.8.-14. Jestliže body kmitají v opačné fázi, pak $\Delta\varphi$ je rovno

- a) lichému násobku π rad

b) sudému násobku π rad



Určete fázový rozdíl mezi dvěma body, které leží ve vzdálenostech $x_1 = 16$ cm a $x_2 = 48$ cm od zdroje vlnění, jestliže vlnění se šíří rychlostí $v = 128 \text{ m.s}^{-1}$ s frekvencí $f = 400$ Hz.

$$x_1 = 0,16 \text{ m}, x_2 = 0,48 \text{ m}, v = 128 \text{ m.s}^{-1}, f = 400 \text{ Hz}$$

Fázový rozdíl je

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

K výpočtu je nutné určit vlnovou délku

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{128}{400} = 0,32 \text{ m}.$$

Pak

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{0,32}(0,48 - 0,16) = \frac{2\pi}{0,32} 0,32 = 2\pi \text{ rad}.$$

Body budou ve fázi.



Jaká je vlnová délka postupné vlny, jestliže dva body ve vzdálenosti $\Delta x = 0,8$ m jsou fázově posunuty o $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$ rad?

Fázový rozdíl je

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x,$$

pak

$$\lambda = \frac{2\pi}{\Delta\varphi} \Delta x = \frac{2\pi}{\frac{\pi}{2}} 0,8 = 3,2 \text{ m}.$$

Vlnová délka je 3,2 m

1.8.1.4. Energie vlnění

Každá částice kmitající kolem rovnovážné polohy má energii kmitavého pohybu

$$E = \frac{1}{2} k A^2,$$

kde $k = m\omega^2$ je konstanta charakterizující pružnost prostředí a A je amplituda kmitů.

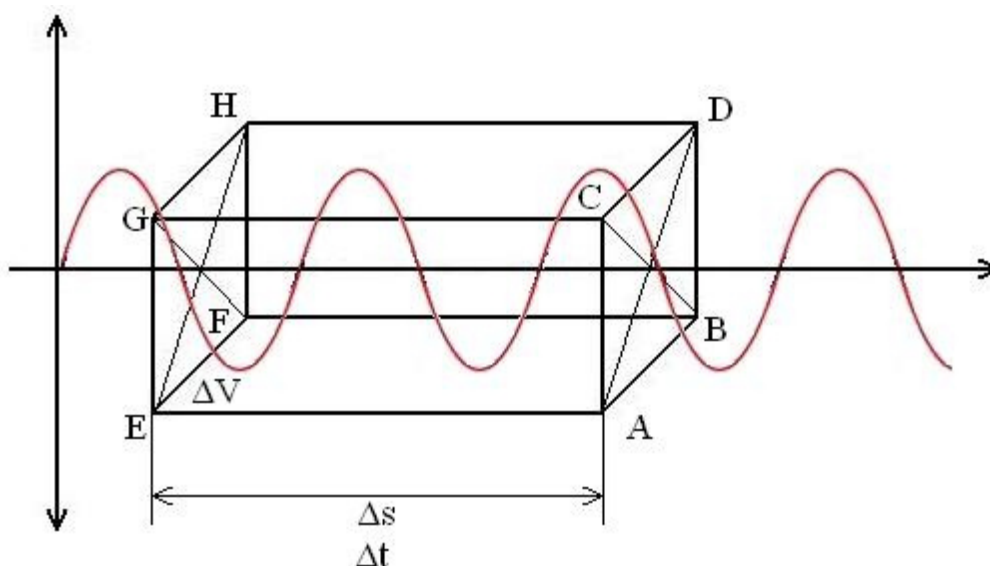
Kmitová energie se přenáší z jednoho bodu na druhý, proudí z jednoho místa prostředí do druhého. Hovoříme o **toku energie** Φ .

Pokud se bude prostředím hustoty ρ šířit postupná vlna, pak v objemovém elementu ΔV , který bude mít hmotnost Δm bude celková energie

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m \omega^2 A^2.$$

Zavedeme veličinu **hustotu energie w** , která bude obsažena v objemovém elementu. Pak

$$w = \frac{\Delta E}{\Delta V} = \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta V} \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2. \quad 1.8.-9$$



Obr. 1.8.-7

V případě, že budeme uvažovat objem ΔV , který bude tvořit kvádr ABCDEFGH, pak se rozruch, který prostoupí ploškou $\Delta S = ABCD$ rychlostí v , dostane za dobu Δt do vzdálenosti Δs .

Pro celkovou energii pak bude platit

$$\Delta E = w \Delta V = w \Delta S \Delta s = w \Delta S v \Delta t. \quad 1.8.-10$$

Tok energie Φ vysílané zdrojem vlnění do prostředí za jednotku času Δt představuje výkon zdroje vlnění P . Jednotkou toku energie výkonu je watt (W).

Výkon, a tím zároveň tok energie, charakterizuje vztah

$$\Phi = P = \frac{\Delta E}{\Delta t}. \quad 1.8.-11$$

Jestliže by zdroj vlnění vysílal do prostoru energii proměnné hodnoty, bylo by nutné tento vztah zapsat ve tvaru

$$\Phi = \frac{dE}{dt}. \quad 1.8.-12$$

Zavedeme veličinu **intenzita vlnění I** , což je množství celkové energie ΔE , která projde jednotkovou plochou ΔS kolmou na směr šíření vlnění za jednotku času Δt .

Definujeme ji vztahem

$$I = \frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta E}{\Delta S} \text{ nebo } I = \frac{dE}{dt dS} = \frac{d\Phi}{dS}.$$

Po úpravě lze intenzitu zapsat jako

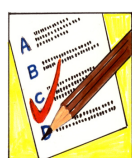
$$I = \frac{P}{\Delta S}. \quad 1.8.-13$$

Jednotkou intenzity je W.m^{-2} .

Protože

$$\Delta E = w \Delta V = w \Delta S \Delta s = w \Delta S v \Delta t, \text{ pak}$$

$$I = wv = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2. \quad 1.8.-14$$



TO 1.8.-15. Hustota energie vlnění w je

- a) množství energie procházející jednotkovou plochou
- b) množství energie procházející jednotkovou plochou za jednotku času
- c) množství energie v jednotkovém objemu

TO 1.8.-16. Tok energie Φ vlnění je

- a) práce zdroje
- b) výkon zdroje
- c) hustota energie
- d) energie vysílaná zdrojem za jednotku času

TO 1.8.-17. Intenzita vlnění I je

- a) energie zdroje vysílaná jednotkovou plochou
- b) výkon vyzařovaný jednotkovou plochou zdroje vlnění
- c) energie vyzařovaná zdrojem jednotkové plochy za jednotku času
- d) práce zdroje vlnění

TO 1.8.-18. Jednotkou toku energie Φ je

- a) W
- b) J
- c) J.s
- d) J.s^{-1}

TO 1.8.-19 Jednotkou intenzity I je

- a) W.m^{-1}
- b) W.m^{-2}
- c) J.m^{-2}
- d) W.m



Popište změnu intenzity vlnění v závislosti na vzdálenosti r od bodového zdroje vlnění konstantního výkonu P .

Vlnění se šíří ze zdroje ve tvaru kulových vlnoploch. Plochu kulové vlnoplochy určíme jako obsah povrchu koule o poloměru r . Pak $S = 4\pi r^2$.

Intenzita $I = \frac{P}{4\pi r^2}$. S rostoucí vzdáleností intenzita klesá.

1.8.1.5. Vlnová rovnice



Vlnová rovnice představuje **pohybovou rovnici postupné vlny**. Jejím řešením by měl být vztah pro okamžitou výchylku y , kterou máme zapsanou ve tvaru

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Poznámka:

Zapíšeme-li pohybovou rovnici kmitavého pohybu $\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0$, vidíme, že obsahuje derivaci druhého řádu. Jejím řešením je rovnice $y = A \sin(\omega t + \varphi_0)$. Tato pohybová rovnice má jen jednu proměnnou veličinu, a tou je čas t .

Protože vztah pro okamžitou výchylku y hmotného bodu postupné vlny obsahuje dvě proměnné **čas t** a **umístění x** , bude obsahovat pohybová rovnice dvě parciální derivace – podle x a podle t .

Rovnici pro okamžitou výchylku nejprve upravíme, a pak budeme postupně dvakrát derivovat podle obou proměnných veličin

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{xT}{\lambda} \right).$$

Protože $v = \frac{\lambda}{T}$, pak

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

Provedeme první a druhou derivaci posledního výrazu podle času t :

$$1. \quad v = \frac{\partial u}{\partial t} = \omega A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

představuje vztah pro okamžitou rychlost bodu ve vzdálenosti x v čase t

$$2. \quad a = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

představuje vztah pro okamžité zrychlení bodu ve vzdálenosti x v čase t

Nyní provedeme první a druhou parciální derivaci podle místa x :

$$1. \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\omega}{v} A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$2. \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{\omega^2}{v^2} A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = -\frac{1}{v^2} \omega^2 A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right).$$

Srovnáme obě druhé parciální derivace a můžeme psát

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

1.8.-15

Tato rovnice představuje pohybovou rovnici postupné lineární vlny, která se šíří ve směru osy x , a to **jednorozměrnou**.

Pokud bychom chtěli zapsat pohybovou rovnici postupné vlny šířící se v prostoru, pak by rovnice obsahovala parciální derivace podle t, x, y, z .

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad 1.8.-16$$

V tomto případě se jedná o třírozměrnou pohybovou rovnici, kterou můžeme pomocí tzv. Laplaceova operátoru

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

zapsat ve zkráceném tvaru

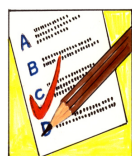
$$\Delta u = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}.$$

V nejobecnějším případě, výchylku (elongaci) uvažujeme jako vektor, je vlnová rovnice ve tvaru

$$\Delta \mathbf{u} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}. \quad 1.8.-17$$

Poznámka:

Označení u by nyní představovalo okamžitou výchylku hmotného bodu kolmou ke směru šíření vlny u příčné vlny a rovnoběžnou se směrem šíření vlny u podélného vlnění.



TO 1.8.-20. Rovnice $u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$.

- popisuje jen vlnu příčnou
- popisuje jen vlnu podélnou
- popisuje vlnu příčnou i podélnou
- nepopisuje ani příčnou ani podélnou vlnu

TO 1.8.-21. Bodovou řadou se šíří příčná postupná netlumená vlna s konstantní fázovou rychlostí. Potom libovolný bod této řady vykonává harmonické kmity se

- a) stejnou frekvencí, ale různou amplitudou
- b) různou frekvencí, ale stejnou amplitudou
- c) stejnou frekvencí i stejnou amplitudou
- d) stejnou frekvencí, amplitudou i fází

TO 1.8.-22. Vlna, jejíž perioda je T a frekvence f , se šíří rychlostí v . Které z následujících definic jsou správné pro definici vlnové délky ?

- a) $\lambda = vT$
- b) je nejmenší vzdálenost dvou bodů, kmitajících se stejnou fází
- c) je vzdálenost, o kterou postoupí fáze za dobu jedné period
- d) $\lambda = \frac{v}{f}$

TO 1.8.-23. Ve směru osy x se šíří rovinná vlna vlnové délky λ . Čemu je rovna nejkratší vzdálenost d dvou bodů prostředí, které kmitají s opačnou fází ?

- a) $d = 2\lambda$
- b) $d = \frac{\lambda}{2}$
- c) $d = \lambda$
- d) $d = 4\lambda$

TO 1.8.-24. V homogenním prostředí se šíří vlna. Fázovou rychlostí rozumíme

- a) maximální rychlost, se kterou se pohybuje každá kmitající částice
- b) střední rychlost kmitajících částic
- c) rychlost, s jakou se šíří rozruch bodovou řadou

TO 1.8.-25. Vlna přechází z prostředí, ve kterém se šíří fázovou rychlostí v do prostředí, kde je fázová rychlost vlny 2krát menší. Frekvence vlny

- a) bude 2krát větší
- b) zůstane konstantní
- c) bude poloviční

TO 1.8.-26. Vlna přechází z prostředí, ve kterém se šíří fázovou rychlostí v do prostředí, kde je fázová rychlost vlny 2krát menší. Vlnová délka vlny

- a) bude 2krát větší
- b) zůstane konstantní
- c) bude poloviční

TO 1.8.-27. Rovnice pro okamžitou výchylku postupné vlny je

- a) $u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$
- b) $u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{f} - \frac{x}{\lambda} \right)$

$$c) u = A \sin 2\pi \left(f t - \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$d) u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{v} \right)$$

TO 1.8.-28. Jednotkou intenzity zvuku I je:

- a) W.m
- b) W.m⁻¹
- c) W.m⁻²
- d) W⁻¹.m

TO 1.8.-29. Jednotkou výkonu P zdroje zvuku je:

- a) W,
- b) J.s⁻¹,
- c) J,
- d) W.s⁻¹



U 1.8.-1. Jakou frekvenci má rovinná vlna, která na překonání dráhy rovnající se 300-násobku vlnové délky potřebuje čas 15 s?

U 1.8.-2. Výchylka postupného vlnění v řadě bodů je $u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$. Určete vlnovou délku, jestliže úhlová frekvence je $16 \pi \text{ rad.s}^{-1}$ a rychlost vlnění je 8 m.s^{-1} .



KO 1.8.-1. Definujte vlnění příčné.

KO 1.8.-2. Definujte vlnění podélné.

KO 1.8.-3. Vysvětlete, co představuje termín vlnová délka

KO 1.8.-4. Vysvětlete pojem fázové rychlosti

KO 1.8.-5. Jaký je vztah mezi fázovým a dráhovým rozdílem?

KO 1.8.-6. Jaký musí být dráhový rozdíl, aby dva body řady vlny byly v opačné fázi?

KO 1.8.-7. Jaký musí být dráhový rozdíl, aby dva body řady vlny byly ve stejné fázi?

KO 1.8.-8. Co je izotropní prostředí?

KO 1.8.-9. Co je anizotropní prostředí?

KO 1.8.-10. Vysvětlete pojem toku energie.

KO 1.8.-11. Vysvětlete pojem hustoty energie.

KO 1.8.-12. Co je intenzita vlnění?