2. Akustika, základní pojmy a veličiny v akustice

2.1 Předmět akustiky

Akustika je definována jako věda zabývající se fyzikálními ději, které jsou spojeny se vznikem zvukového vlnění, jeho dalším šířením a vnímáním zvuku sluchovým orgánem. Vlnění hmotného prostředí, o jehož existenci se můžeme přesvědčit sluchem, se v běžné řeči i ve fyzice nazývá zvuk.

Akustika se zabývá fyzikálními ději spojenými se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem.

2.2 Rozdělení akustiky

Obor akustika lze rozdělit na několik částí:
1. Fyzikální akustika – zabývá se způsobem vzniku a šíření zvuku. Dále se zabývá odrazivostí a pohltivostí zvuku v různých materiálech.
2. Hudební akustika – studuje zvuky včetně jejich kombinací s ohledem na potřeby hudby.
3. Fyziologická akustika – zabývá se vznikem zvuku v hlasovém orgánu člověka a jeho vnímáním v sluchovém orgánu.
4. Stavební akustika – zkoumá kvalitní podmínky poslechu hudby a řeči v obytných místnostech a sálech.
5. Elektroakustika – zabývá se záznamem, reprodukcí a šířením zvuku s využitím elektrického proudu.

2.3 Hluk jako environmentální faktor

Hlukem bývá označován každý nepříjemný a nežádoucí zvuk. Tato definice je ale subjektivní, protože pro někoho tentýž zvuk může být obtěžující a pro jiného přijatelný nebo dokonce i příjemný.

Hluk je definován jako zvuk, který člověka poškozuje (na zdraví, majetku nebo na životním prostředí), ruší nebo obtěžuje.

Základním parametrem určujícím účinek zvuku je jeho intenzita. Člověk se necítí dobře v prostředí s velmi nízkou hladinou akustického tlaku L_{pA} frekvenčně váženého filtrem typu A. Hodnoty hladin okolo 20 dB považuje spousta lidí za hluboké ticho. Hladina 30 dB je považována za příjemné ticho. Při hladinách nad 65 dB se již začínají projevovat účinky hluku především změnami vegetativních reakcí. Od 85 dB výše již dochází k trvalým poruchám sluchu a ve větší míře se projevují účinky na vegetativní systém a celou nervovou soustavu. Od 130 dB se obvykle účinky hluku mění na bolesti sluchového orgánu. Při hladinách cca 160 dB již dochází k protržení bubínku sluchového orgánu. Nadměrný hluk má rovněž negativní vliv na kvalitu a produktivitu práce a významně ohrožuje bezpečnost práce. Z těchto důvodů patří hluk k důležitým environmentálním faktorům.

2.4 Metody eliminace hluku

Existuje pět základních metod boje proti hluku:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · esf · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

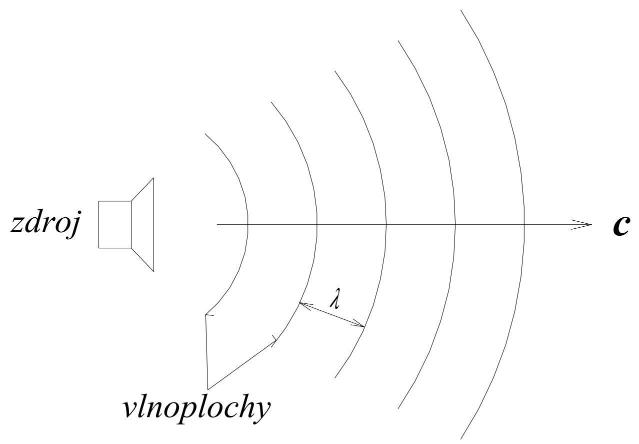
1. Metoda redukce hluku ve zdroji – spočívá v úplném odstranění zdroje hluku nebo se snížení jeho hlučnosti. Např. tlumením vibrací strojních zařízení lze dosáhnout částečného snížení vyzařovaného hluku strojních zařízení.
2. Metoda dispozice – spočívá ve vhodném umístění hlučných strojů a zařízení (resp. celých hlučných prostorů) od chráněných a méně hlučných prostorů. Této metody se využívá např. při územním plánování, projektování průmyslových zón, dopravních komunikací apod. tak, aby hlučné stroje a provozy neměly negativní vliv na akustickou pohodu v chráněných prostorech (např. školy, školky, sídliště, nemocnice, rekreační zóny apod.).
3. Metoda izolace – spočívá ve zvukovém odizolování hlučného stroje, zařízení nebo celého hlučného prostoru od chráněného prostoru prostřednictvím zvukoizolačních příček, stropů, krytů, zákrytů apod.
4. Metoda využívající zvukové pohltivosti materiálů – spočívá ve schopnosti některých materiálů a konstrukcí pohlcovat akustickou energii a transformovat ji na tepelnou energii. Aplikuje se především při snižování hlučnosti uvnitř místností.
5. Metoda využívající osobní ochranné pomůcky – tj. sluchátka, přilby nebo zvukově tlumicí zátky vkládané do ucha. Tato metoda se aplikuje, pokud z určitých důvodů nelze použít žádnou z předchozích metod nebo jestliže u těchto metod nedojde k dostatečnému snížení hlukové expozice člověka.

Nejlepších výsledků v boji proti hluku lze dosáhnout využitím vhodných kombinací výše uvedených metod.

2.5 Zvuk

Mechanickým vlněním pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 16 až 20 000 kmitů za sekundu se nazývá zvuk, který se v daném pružném prostředí (tj. v kapalinách, plynech nebo pevných látkách) šíří konečnou rychlostí. Jinak akustika se obecně zabývá mechanickými kmity ve větším frekvenčním rozsahu. Potom existují tři frekvenční pásma:
1. infrazvuk - mechanické vlnění pružného prostředí s frekvencí $f < 16$ Hz.
2. slyšitelný zvuk - mechanické vlnění pružného prostředí ve frekvenčním pásmu od 16 Hz do 20 kHz.
3. ultrazvuk - mechanické vlnění pružného prostředí s frekvencí $f > 20\,000$ Hz.

Podstatou zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 16 až 20 000 kmitů za sekundu.



Obr. 2.1: Šíření zvuku od zdroje

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

2.6 Akustické vlnění

Zvuk se může šířit v kapalinách, plynech nebo i pevných látkách formou akustického vlnění, jehož šíření je spojeno s přenosem energie. Částice daného prostředí se přitom nepohybují jednosměrně se šířícím se vlněním, ale kmitají pouze kolem svých rovnovážných stavů. U plynů a kapalin se vyskytuje pouze podélné akustické vlnění, protože tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. V pevných elastických látkách se může vyskytovat vlnění podélné i příčné. Tyto látky vykazují pevnost nejen v tahu a tlaku, ale i ve smyku. Kombinací těchto namáhání vzniká i ohybové kmitání.

Akustické vlnění se šíří od zdroje zvuku rychlostí šíření zvuku $\boldsymbol{c}$ skrz dané prostředí ve vlnoplochách (viz obr. 2.1). Vlnoplocha je charakteristická tím, že ve všech jejich bodech je v daném čase stejný akustický stav. Vzdálenost mezi vlnoplochami je vlnová délka λ. Kolmice na vlnoplochu je tzv. akustický paprsek.

Mezi pevnými látkami a plyny (resp. kapalinami) může docházet k přenosu kmitů. Každý hmotný element může být tzv. oscilátorem, který je považován za akustický oscilátor. K nejjednodušším oscilátorům patří pružina, struna, ladička apod.

2.6.1 Lineární oscilátor

Nejjednodušším typem oscilátoru je lineární oscilátor (viz obr. 2.2). Jedná se o periodický pohyb hmotného bodu, který probíhá po přímce a je popsán diferenciální rovnicí:

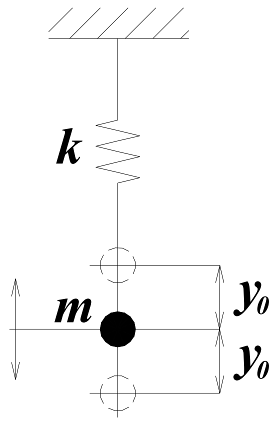
$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}\tau^2} + k \cdot y = 0, \tag{2.1}$$

kde m je hmotnost kmitajícího hmotného bodu, y je výchylka, τ je čas a k je tuhost pružiny. Řešením rovnice (2.1) je rovnice volných netlumených kmitů hmotného bodu:

$$y = y_0 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi), \tag{2.2}$$

kde y_0 je amplituda výchylky kmitání, ω je vlastní kruhová frekvence a φ je fázový úhel. Vlastní kruhová frekvence je dána rovnicí:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \tag{2.3}$$



Obr. 2.2: Lineární oscilátor

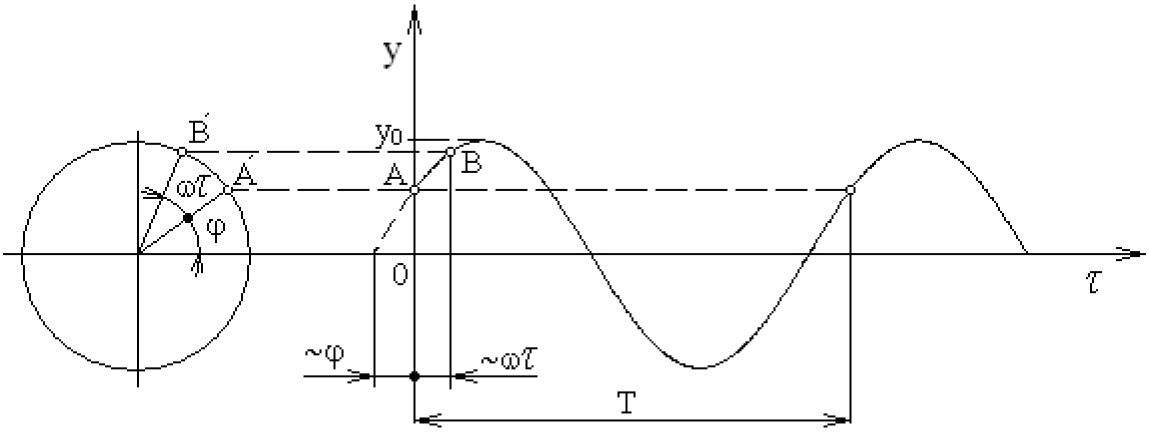
Časový průběh harmonického netlumeného kmitání je znázorněn na obr. 2.3. Z tohoto obrázku je zřejmé, že hmotný bod kmitá s amplitudou kmitání y_0 s periodou kmitání T.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE esf MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Perioda kmitání je přitom taková doba, za kterou se hmotný bod dostane z rovnovážné polohy přes obě krajní polohy do původního stavu.



Obr. 2.3: Časový průběh harmonického netlumeného kmitání

2.6.2 Kmitočet

Kmitočet (resp. frekvence kmitání) f určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Mezi frekvencí kmitání a dobou kmitu T (resp. úhlovým kmitočtem ω) platí vztah:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \tag{2.4}$$

Kmitočet je roven převrácené hodnotě periody kmitání.

2.6.3 Celková energie kmitajícího bodu

Při netlumeném harmonickém kmitání hmotného bodu platí zákon zachování energie, kdy celková energie E_c, která je dána součtem kinetické energie E_k a potenciální energie E_p, je v průběhu kmitání neustále konstantní:

$$E_c = E_p + E_k = konst. \tag{2.5}$$

Kinetická energie kmitajícího hmotného bodu závisí na rychlosti kmitání v hmotného bodu, která se stanoví derivací výchylky kmitání dle rovnice (2.2):

$$v = \frac{dy}{d\tau} = y_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi) = v_0 \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi). \tag{2.6}$$

kde v_0 je amplituda rychlosti kmitání.
Kinetickou energii E_k a potenciální energii E_p (s využitím rovnic (2.2) a (2.3)) hmotného bodu lze vyjádřit z jejich základních definic pomocí následujících vztahů:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot y_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot \tau + \varphi). \tag{2.7}$$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot y_0^2 \cdot \omega^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot \tau + \varphi). \tag{2.8}$$

Po dosazení rovnic (2.7) a (2.8) do rovnice (2.5) a následných úpravách se získá celková energie kmitajícího bodu:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot y_0^2 \cdot \omega^2 . \qquad (2.9)$$

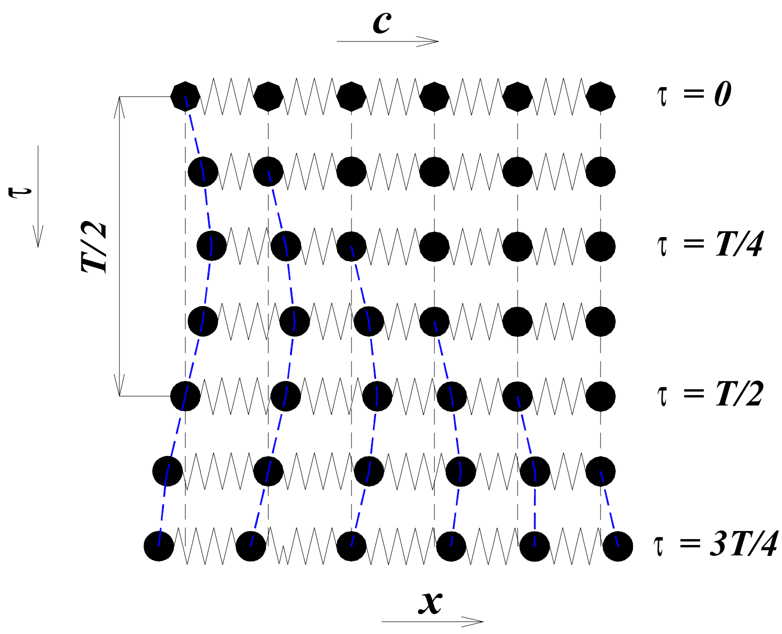
Z výše uvedené rovnice je zřejmé, že celková energie při netlumeném harmonickém kmitání hmotného bodu zůstává stále konstantní.

2.6.4 Podélné vlnění v bodové řadě

Prostorové vlnění je takový druh vlnění, které se šíří v trojrozměrném prostoru. Nejjednodušším typem vlnění je vlnění ve směru jedné souřadné osy. V tomto případě se jedná o podélné vlnění v bodové řadě. Na obr. 2.4 je schématicky znázorněna bodová řada, ve které má nastat šíření podélného vlnění. Jednotlivé hmotné body daného prostředí se vzájemně ovlivňují mezimolekulárními silami, které jsou na obr. 2.4 znázorněny ve formě pružinek. V této počáteční fázi před šířením rozruchu jsou tyto pružinky stejně stlačeny.

Obr. 2.4: Bodová řada před šířením akustického vlnění

Dojde-li k vychýlení např. prvního bodu dané bodové řady, dojde k šíření akustické vlny (viz obr. 2.5.). Od prvního bodu se dále přenáší rozruch k dalším bodům konečnou rychlostí šíření zvuku ***c*** v daném prostředí. Na obr. 2.5 je zřejmá poloha jednotlivých bodů v konkrétním čase τ. Dále je zřejmé, že při šíření akustické vlny dochází ke změnám vzdáleností mezi jednotlivými body. Může docházet ke zmenšení vzdálenosti dvou sousedních bodů (tzn. pružiny jsou stlačeny) nebo naopak ke zvětšení vzdálenosti mezi dvěma sousedními body (tzn. pružiny jsou zředěny). Podobným způsobem lze zakreslit i kmitání molekul při příčném vlnění, při kterém je rovina pohybu molekul kolmá ke směru šíření akustického signálu.



Obr. 2.5: Vývoj akustického vlnění v bodové řadě

V technické akustice se výchylka hmotného bodu, kterým je přenášen akustický signál, je značena písmenem ***u***. Její časová závislost je dána rovnicí:

$$u = u_0 \cdot \sin(\omega \cdot \tau + \varphi) , \qquad (2.10)$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · esf · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

kde u_0 je amplituda akustické výchylky.
Budeme-li se zajímat o velikost akustické výchylky ve vzdálenosti x od počátku při šíření rozruchu konstantní rychlostí c v homogenním prostředí, pak tento děj v daném místě x je opožděn o čas $\Delta\tau$ potřebný k uražení této dráhy:

$$\Delta\tau = \frac{x}{c}. \tag{2.11}$$

Potom akustická výchylka kmitajícího bodu je dána vztahem:

$$u = u_0 \cdot \sin\omega\left(\tau \mp \frac{x}{c}\right). \tag{2.12}$$

Záporné znaménko v rovnici 2.12 platí pro šíření vlny v kladném smyslu osy x. Podobně kladné znaménko ve výše uvedené rovnici platí pro šíření zvuku v záporném smyslu osy x.

2.6.5 Vlnová délka

Vlnová délka λ je určena vzdáleností mezi dvěma nejbližšími body bodové řady se stejným akustickým stavem v daném okamžiku. Resp. je to vzdálenost, kterou urazí akustická vlna v průběhu jednoho kmitu T. Potom pro vlnovou délku platí vztah:

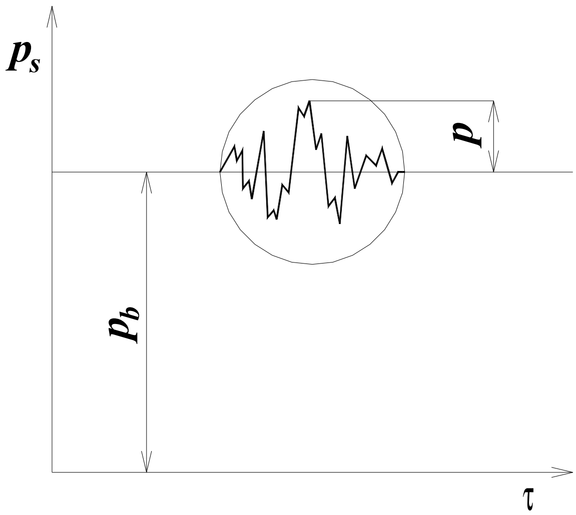
$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T. \tag{2.13}$$

2.6.6 Akustická rychlost

Akustická rychlost $\boldsymbol{v}$ je taková rychlost, se kterou kmitají jednotlivé částice prostředí, kterým se šíří zvuková vlna. První derivací akustické výchylky podle rovnice (2.12) je definována akustická rychlost:

$$v = \omega \cdot u_0 \cdot \cos\omega\left(\tau \mp \frac{x}{c}\right) = v_0 \cdot \cos\omega\left(\tau \mp \frac{x}{c}\right), \tag{2.14}$$

kde v_0 je amplituda akustické rychlosti.
Pozor! Je třeba si uvědomit, že akustická rychlost $\boldsymbol{v}$ a rychlost šíření zvuku $\boldsymbol{c}$ jsou dvě zcela odlišné veličiny.



Obr. 2.6: Časový průběh celkového statického tlaku p ve vzduchu

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

2.6.7 Akustický tlak

Při šíření zvuku v bodové řadě (viz obr. 2.5) jsou zřejmá místa se zředěním nebo zhuštěním částic. Tomu odpovídají místa podtlaku a přetlaku. S tím souvisí změny celkového statického tlaku vzduchu p_s, který je dán součtem středního barometrického tlaku p_b a akustického tlaku p (viz obr. 2.6). Akustický tlak p, který lidské ucho vnímá již od hodnoty $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, je přitom zanedbatelný ve srovnání s barometrickým tlakem ($p_b \cong 10^5$ Pa). Průběh akustického tlaku je analogický s průběhem akustické výchylky nebo akustické rychlosti. Pro harmonický signál lze akustický tlak vyjádřit rovnicí:

$$p = p_0 \cdot \cos\omega\left(\tau - \frac{x}{c}\right), \tag{2.15}$$

kde p_0 je amplituda akustického tlaku.

Z rovnice (2.15) je zřejmé, že akustický tlak závisí na kruhové frekvenci ω, resp. kmitočtu f. Reálné zvuky v našem životním prostředí ale nejsou akustické signály o jednom kmitočtu, ale skládají se z řady dílčích signálů. Z tohoto důvodu je třeba u akustických veličin (jako je např. akustický tlak, akustická rychlost nebo akustický výkon) pracovat s jejich frekvenčními spektry, která mohou být čárová (tzv. diskrétní) nebo spojitá.

2.7 Rychlost šíření zvuku

V kapalinách a plynech se může šířit pouze podélné vlnění, v pevných látkách se může šířit též příčné vlnění. Všeobecně se zvuk nejrychleji šíří v pevných látkách, nejpomaleji v plynech. Pro srovnání jsou v tab. 2.1 uvedeny rychlosti šíření podélného vlnění v některých látkách.

2.7.1 Rychlost šíření zvuku v kapalinách

Rychlost šíření podélného vlnění v kapalinách je dána vztahem:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \tag{2.16}$$

kde K je modul objemové pružnosti, ρ je hustota prostředí.

2.7.2 Rychlost šíření zvuku v plynech

Stanovení rychlosti šíření zvuku v plynech je složitější ve srovnání s šířením zvuku v kapalinách z důvodu dané stavové změny, která v plynu probíhá. Pro vlnění o kmitočtech $f > 20$ Hz jsou změny okamžitého akustického tlaku velmi rychlé a stavovou změnu lze považovat za adiabatickou. Potom pro rychlost šíření zvuku v plynech platí vztah:

$$c = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p_b}{\rho}}, \tag{2.17}$$

kde κ je Poissonova konstanta.

Speciálně pro vzduch v závislosti na teplotě t lze rychlost šíření zvuku stanovit podle rovnice:

$$c = 331{,}6 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273{,}1}}, \tag{2.18}$$

kde t je teplota vzduchu ve °C.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Látka	c_L [m·s⁻¹]
Vzduch 0 °C	332
Vzduch 20 °C	344
Dusík 0 °C	334
Helium 0 °C	971
Vodík 0 °C	1286
Voda 13 °C	1440
Petrolej 25 °C	1315
Aceton 20 °C	1190
Rtuť 20 °C	1451
Glycerin 20 °C	1923
Olovo	1410
Bukové dřevo	3900
Hliník	4800
Ocel	5750
Beton	3100
Cihly	2800
Sklo	5270
Plexisklo	1580
Tvrdá pryž	1400
Měkká pryž	70

Tab. 2.1: Rychlost šíření podélného vlnění v některých látkách

2.7.3 Rychlost šíření zvuku v pevných látkách

Rychlost šíření podélného vlnění v tenké tyči je dána vztahem:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{2.19}$$

kde E je Youngův modul pružnosti v tahu. Rychlost šíření podélného vlnění v desce je určena rovnicí:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho \cdot \left(1 - \mu^2\right)}}, \tag{2.20}$$

kde μ je Poissonův poměr příčné kontrakce, který se stanoví ze vztahu:

$$\mu = \frac{E - 2 \cdot G}{2 \cdot G}, \tag{2.21}$$

kde G je modul pružnosti ve smyku.
Rychlost šíření příčného vlnění v pevných látkách je dána vztahem:

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \tag{2.22}$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

V tělesech, u kterých převládá jeden nebo dva rozměry oproti ostatním (např. v tyčích nebo deskách), vzniká kombinace podélného a příčného vlnění, tzv. ohybové vlnění. Toto vlnění je příčinou vyzařování zvuku. Pro rychlost šíření ohybových vln v tyči platí vztah:

$$c_B = \sqrt{2\pi \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{4E \cdot J}{m'}}\,, \tag{2.23}$$

kde J [kg·m^2] je moment setrvačnosti průřezu tyče, m' [kg·m^{-1}] je hmotnost jednotkové délky tyče. Pro tyče obdélníkového průřezu lze rovnici (2.23) upravit do tvaru:

$$c_B = \sqrt{1{,}8 \cdot c_L \cdot h \cdot f}\,, \tag{2.24}$$

kde h je menší rozměr obdélníkového průřezu.

2.8 Akustický výkon

Předpokládejme ve směru osy x šíření rovinné vlny, která dopadá na měřicí plochu S (viz obr. 2.7). Zvukové paprsky přitom s měřicí plochou svírají úhel υ. Akustický výkon je definován rovnicí:

$$P = \frac{dE}{d\tau}\,, \tag{2.25}$$

kde E je akustická energie.

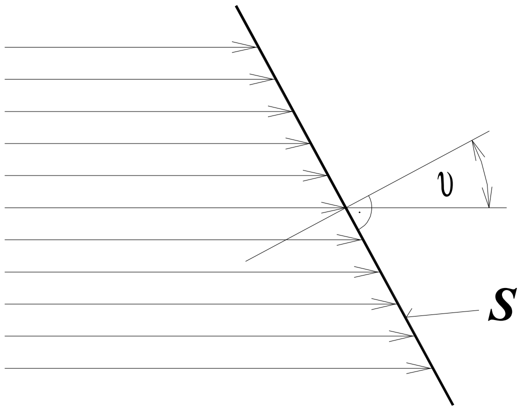
Akustický výkon je určen množstvím přenesené akustické energie za jednotku času.

Je-li akustický výkon vztažen na jednotku plochy, zavádí se tzv. měrný akustický výkon N [W/m^2]:

$$N = \frac{dP}{dS \cdot \cos\upsilon}\,. \tag{2.26}$$

Pokud je ve všech bodech uvažované rovinné vlny stejný akustický stav, lze rovnici (2.26) zjednodušit do tvaru:

$$N = \frac{P}{S \cdot \cos\upsilon}\,. \tag{2.27}$$



Obr. 2.7: Šíření rovinné vlny na měřicí plochu S

Výkon je dán všeobecně součinem akustické rychlosti v a působící síly F, která je úměrná součinu akustického tlaku p a plochy S. Potom lze psát:

$$P = F \cdot v = p \cdot S \cdot v\,. \tag{2.28}$$

Pokud měřicí plocha S je kolmá vzhledem ke zvukovým paprskům ($\cos\upsilon = 1$), pak lze na základě rovnic (2.27) a (2.28) vyjádřit měrný akustický výkon jako:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$N = p \cdot v\,. \tag{2.29}$$

2.9 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku závisí na měrném akustickém výkonu N a je dána rovnicí:

$$I = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T N d\tau\ , \tag{2.30}$$

kde T je doba integrace, která je u harmonických signálů rovna době jedné periody. Řešení rovnice (2.30) pro rovinnou vlnu je vztah pro intenzitu zvuku:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot u_0^2 = \frac{p_0^2}{2 \cdot \rho \cdot c} = p_{ef} \cdot v_{ef}\,, \tag{2.31}$$

kde p_{ef} a v_{ef} jsou efektivní hodnoty tlaku a akustické rychlosti, pro které platí rovnice:

$$p_{ef} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}\,, \tag{2.32}$$

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}\,. \tag{2.33}$$

V technické akustice lze běžnými přístroji spolehlivě měřit akustický tlak, ale ne akustickou rychlost. U rovinné vlny se využívá té fyzikální skutečnosti, že poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí je konstantní a je roven poměru:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho \cdot c = konst.\,, \tag{2.34}$$

kde Z [N·s/m^3]je tzv. měrný vlnový odpor prostředí, v němž se šíří akustická vlna. Dosazením rovnice (2.34) do rovnice (2.31) se získá vztah pro intenzitu zvuku u rovinné vlny:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c}\,. \tag{2.35}$$

Při šíření kulové vlny není akusticky tlak ve fázi s akustickou rychlostí. Potom pro intenzitu zvuku kulové vlny platí rovnice:

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot \cos\varphi\ , \tag{2.36}$$

kde φ je fázový úhel mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí.

2.10 Interference akustických vln

Šíří-li se bodovou řadou dvě nebo více vlnění, výsledné vlnění se skládá metodou superpozice. Při šíření vlnění ve více směrech je nutno tato vlnění skládat vektorově.

2.10.1 Interference vlnění o stejných frekvencích

Předpokládejme dvě akustická vlnění šířící se v bodové řadě v kladném smyslu osy x o stejných kruhových frekvencích ω s příslušnými amplitudami akustické výchylky (tzn. u_{01} a u_{02}) a fázovými úhly (tzn. φ_1 a φ_2). Potom pro akustické výchylky obou vlnění platí rovnice:

$$u_1 = u_{01} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right) + \varphi_1\right], \tag{2.37}$$

$$u_2 = u_{02} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right) + \varphi_2\right]. \tag{2.38}$$

Součtem předchozích dvou rovnic se získá amplituda výsledného vlnění:

$$u = u_0 \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right) + \varphi\right], \tag{2.39}$$

kde u_0 je amplituda výsledného vlnění a φ je fázový úhel výsledného vlnění, pro které platí rovnice:

$$u_0 = \sqrt{u_{01}^2 + u_{02}^2 - 2 \cdot u_{01} \cdot u_{02} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}, \tag{2.40}$$

$$tg\varphi = \frac{u_{01} \cdot \sin\varphi_1 + u_{02} \cdot \sin\varphi_2}{u_{01} \cdot \cos\varphi_1 + u_{02} \cdot \cos\varphi_2}. \tag{2.41}$$

Z rovnice (2.39) je zřejmé, že výsledné vlnění je opět harmonické vlnění šířící se v kladném smyslu osy x se stejnou kruhovou frekvencí ω jako obě dílčí akustická vlnění. Má ale obecně jinou amplitudu u_0 a jiný fázový posun φ. Dále je zřejmé, že velikost amplitudy tohoto vlnění závisí na rozdílu fázových úhlů obou vlnění v rovnici (2.40). Maximální amplituda výsledného vlnění nastane v případě, když:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2n \cdot \pi, \tag{2.42}$$

kde n je libovolné celé číslo (n = 0, 1, 2, 3….). Podobně minimální amplituda výsledného vlnění je dosažena za podmínky:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = (2n + 1) \cdot \pi. \tag{2.43}$$

Zvláštním případem tohoto vlnění může být takové vlnění, kdy dochází k vzájemnému rušení obou vlnění při jejich skládání. Takový děj nastane tehdy, jestliže amplitudy obou vlnění jsou stejné a fázový posun mezi těmito vlněními je roven π (viz rovnice (2.40)).

2.10.2 Úplné stojaté vlnění

Úplné stojaté vlnění je takový druh vlnění, při kterém se šíří proti sobě dvě vlnění se stejnými kruhovými frekvencemi a se stejnými amplitudami.

> Při úplném stojatém vlnění se šíří proti sobě dvě vlnění o stejných kruhových frekvencích a amplitudách.

Úplné stojaté vlnění je potom popsáno rovnicemi:

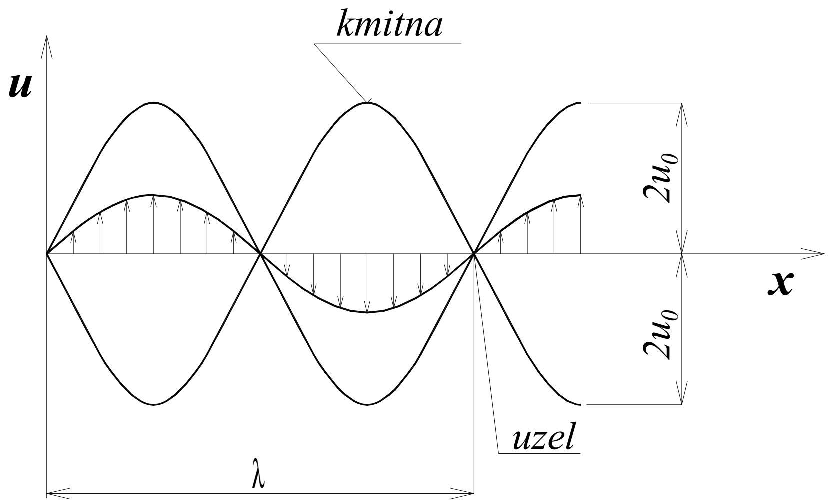
$$u_1 = u_0 \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right)\right], \tag{2.44}$$

$$u_2 = u_0 \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau + \frac{x}{c}\right)\right]. \tag{2.45}$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obr. 2.8: Úplné stojaté vlnění

Sečtením rovnic (2.44) a (2.45) se získá rovnice pro akustickou výchylku úplného stojatého vlnění:

$$u = u_1 + u_2 = 2u_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{x}{c}\right) \cdot \sin(\omega\,\tau) = U \cdot \sin(\omega\,\tau)\,, \tag{2.46}$$

kde U je amplituda úplného stojatého vlnění (v daném místě x) určená rovnicí:

$$U = 2u_0 \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{x}{c}\right). \tag{2.47}$$

Z rovnice (2.46) je patrné, že vlnění je opět harmonické s kruhovou frekvencí ω a jednotlivé částice kmitají se stejnou fází, ale obecně s jinou amplitudou U, protože $U = f(x)$. Potom amplituda U bude maximální v takových místech x, ve kterých bude platit:

$$\cos\frac{\omega \cdot x}{c} = \pm 1,\ resp.\ \frac{\omega \cdot x}{c} = n \cdot \pi\ , \tag{2.48}$$

kde n je libovolné celé číslo (n = 0, 1, 2, 3….). Maximální amplitudy se nazývají kmitny (viz obr. 2.8). Tato místa jsou od sebe vzdáleny ve vzdálenostech:

$$x = n \cdot \frac{c}{2f} = n \cdot \frac{\lambda}{2}. \tag{2.49}$$

Podobně místa minimálních (v tomto případě nulových) amplitud výsledného vlnění, které se nazývají tzv. uzly, jsou dosaženy za podmínky:

$$\cos\frac{\omega \cdot x}{c} = 0,\ resp.\ \frac{\omega \cdot x}{c} = (2n + 1) \cdot \frac{\pi}{2}. \tag{2.50}$$

Pro vzdálenost mezi uzly platí:

$$x = (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{4}. \tag{2.51}$$

Úplné stojaté vlnění se v praxi vyskytuje při odrazu akustického vlnění od překážky, jejíž odrazová plocha je akusticky tvrdá. V tomto případě se od této plochy odrazí veškerá dopadající akustická energie. Běžně ale dochází k určitému pohlcení akustické energie danou překážkou. V těchto případech vzniká při odrazu od dané překážky částečné stojaté vlnění.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

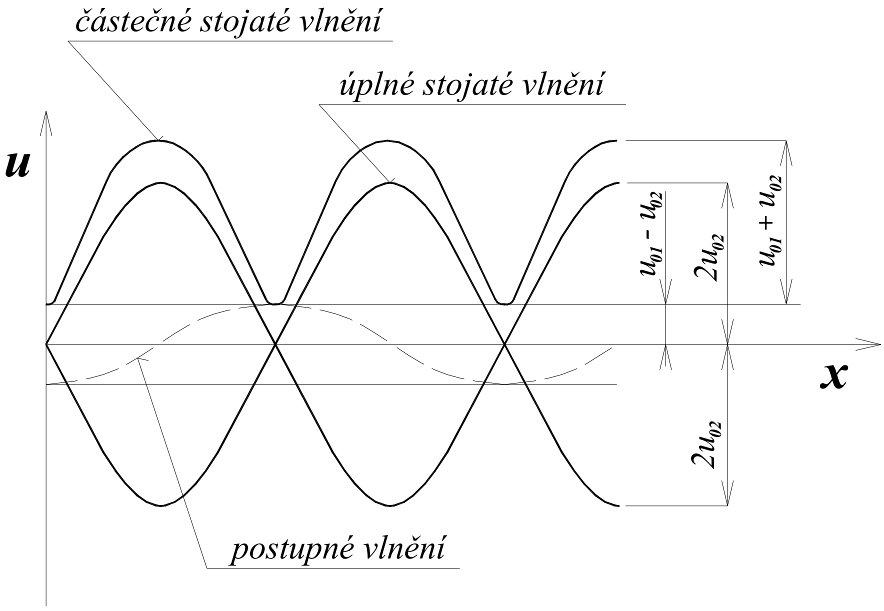
EVROPSKÁ UNIE · esf · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

2.10.3 Částečné stojaté vlnění

Úplné stojaté vlnění je takový druh vlnění, při kterém se šíří proti sobě dvě vlnění se stejnými kruhovými frekvencemi a s různými amplitudami.

Při částečném stojatém vlnění se šíří proti sobě dvě vlnění o stejných kruhových frekvencích a různých amplitudách.



Obr. 2.9: Částečné stojaté vlnění

Částečné stojaté vlnění je potom popsáno rovnicemi:

$$u_1 = u_{01} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right)\right], \tag{2.52}$$

$$u_2 = u_{02} \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau + \frac{x}{c}\right)\right]. \tag{2.53}$$

Sečtením rovnic (2.52) a (2.53) se získá rovnice pro akustickou výchylku úplného stojatého vlnění:

$$u = u_1 + u_2 = 2u_{02} \cdot \cos\left(\omega \cdot \frac{x}{c}\right) \cdot \sin(\omega\,\tau) + (u_{01} - u_{02}) \cdot \sin\left[\omega \cdot \left(\tau - \frac{x}{c}\right)\right]. \tag{2.54}$$

Z rovnice (2.54) je zřejmé, že částečné stojaté vlnění se skládá ze dvou složek. První složka charakterizuje úplné stojaté vlnění s amplitudou $2 \cdot u_{02} \cdot \cos(\omega x/c)$, druhý člen charakterizuje postupné vlnění s amplitudou $(u_{01} - u_{02})$.

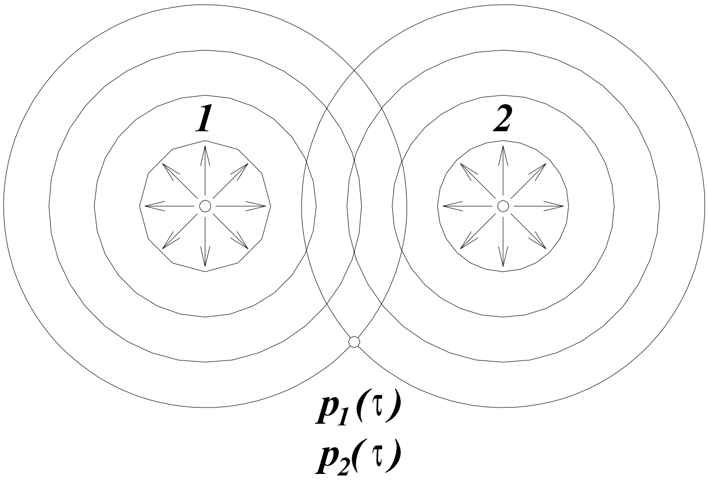
2.11 Výsledná intenzita zvuku při interferenci dvou vlnění

Předpokládejme dva zdroje zvuku (viz obr. 2.10), ze kterých se šíří akustické vlnění směrem k posluchači, v jehož místě je třeba stanovit výslednou intenzitu akustického vlnění. V místě posluchače se v důsledku zdrojů zvuku vyskytují dva časově proměnlivé akustické tlaky $p_1(\tau)$ a $p_2(\tau)$, jejichž součtem je určen výsledný akustický tlak:

$$p = p_{01} \cdot \sin(\omega_1 \cdot \tau + \varphi_1) + p_{02} \cdot \sin(\omega_2 \cdot \tau + \varphi_2). \tag{2.55}$$

Potom lze intenzitu zvuku vyjádřit vztahem:

$$I = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2}{\rho \cdot c} d\tau = \\ = \frac{p_{01}^2 + p_{02}^2}{2\rho \cdot c} + \frac{2 p_{01} \cdot p_{02}}{\rho \cdot c} \cdot \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \sin(\omega_1 \cdot \tau + \varphi_1) d\tau \cdot \sin(\omega_2 \cdot \tau + \varphi_2) d\tau \quad (2.56)$$



Obr. 2.10: Šíření vlnění ze dvou zdrojů zvuku

Rovnice (2.56) má dvě různá řešení v závislosti na velikosti kruhových frekvencí jednotlivých zdrojů zvuku.
V případě rozdílných velikostí kruhových frekvencí obou zvukových zdrojů (tzn. $\omega_1 \neq \omega_2$), integrál v rovnici (2.56) je roven nule a intenzita výsledného vlnění je dána vztahem:

$$I = \frac{p_{01}^2 + p_{02}^2}{2\rho \cdot c} = I_1 + I_2 . \quad (2.57)$$

Výsledná intenzita zvuku v případě rozdílných kruhových frekvencí zdrojů zvuku je tedy rovna součtu součtu intenzit od jednotlivých zdrojů zvuku.
Pokud jsou kruhové frekvence obou zvukových zdrojů stejné (tzn. $\omega_1 = \omega_2$), integrál v rovnici (2.56) je nenulový a intenzita výsledného vlnění je dána vztahem:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \frac{p_{1ef} \cdot p_{2ef}}{\rho \cdot c} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1) . \quad (2.58)$$

2.12 Hustota akustické energie

Hustota akustické energie w [J/m^3] je energie obsažená v objemové jednotce o elementárních rozměrech dx, dy a dz. Je definována rovnicí:

$$w = \frac{dE}{dV} . \quad (2.59)$$

Hustota akustické energie je definována akustickou energií obsaženou v objemové jednotce prostředí.

Po dosazení rovnice (2.9) do rovnice (2.59) lze hustotu akustické energie vyjádřit rovnicí:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY
OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot u_0^2 . \qquad (2.60)$$

Porovná-li se výše uvedená rovnice s rovnicí (2.31) pro výpočet intenzity zvuku, lze potom psát:

$$I = w \cdot c . \qquad (2.61)$$

2.13 Testové otázky ke kapitole 2

1. Definujte, co je to zvuk. Jaké jsou druhy zvuku a jejich příslušná frekvenční pásma?
2. Definujte pojem hluk. Vyjmenujte (včetně příkladů) metody eliminace hluku.
3. Nakreslete princip šíření zvuku ze zdroje. Definujte pojmy vlnová délka, vlnoplocha, kmitočet. Napište základní vztah pro vlnovou délku včetně významu a jednotek jednotlivých veličin.
4. Definujte pojmy akustický tlak a akustická rychlost. Napište rovnice pro jejich výpočet včetně významu a jednotek jednotlivých veličin. Vysvětlete pojmy rychlost šíření zvuku a akustická rychlost – jsou to tytéž veličiny? Pokud ne, rozlište tyto veličiny.
5. Rychlost šíření zvuku v pevných látkách, kapalinách a v plynech. Jaké vlnění se vyskytuje v těchto médiích. V kterých látkách se obecně šíří zvuk nejrychleji, resp. nejpomaleji. Uveďte základní vztahy včetně významu jednotlivých veličin pro rychlost šíření zvuku pro výše uvedená média.
6. Definujte pojmy akustický výkon, měrný akustický výkon a intenzita zvuku. Uveďte jejich definiční rovnice včetně významu jednotlivých veličin.
7. Definujte pojmy úplné stojaté vlnění a částečné stojaté vlnění. Stanovte akustickou výchylku pro obě tyto vlnění. Zakreslete průběhy těchto vlnění. Co jsou to kmitny a uzly? Ze kterých dvou složek se skládá částečné stojaté vlnění?
8. Definujte pojem hustota akustické energie. Napište její základní vztah včetně významu a jednotek příslušných veličin. Jaký je vztah mezi intenzitou zvuku a hustotou akustické energie? Uveďte ho.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

EVROPSKÁ UNIE · esf · MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ, MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY · OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost · Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ