OBSAH

Úvod

1 Kmitání mechanického oscilátoru
1.1 Kmitavý pohyb 15
1.2 Harmonické kmitání 18
1.3 Rychlost a zrychlení kmitavého pohybu 21
1.4 Fáze kmitavého pohybu 24
1.5 Složené kmitání 27
1.6 Dynamika kmitavého pohybu 32
1.7 Kyvadlo 35
1.8 Tlumené kmitání mechanického oscilátoru 39
1.9 Nucené kmitání mechanického oscilátoru 41
Shrnutí učiva 1. kapitoly 44

2 Mechanické vlnění
2.1 Vznik a druhy vlnění 48
2.2 Rovnice postupného vlnění 51
2.3 Interference vlnění 53
2.4 Odraz vlnění v řadě bodů. Stojaté vlnění 56
2.5 Vlnění v izotropním prostředí 59
Shrnutí učiva 2. kapitoly 62

3 Zvukové vlnění
3.1 Zdroje zvuku 65
3.2 Šíření zvuku. Rychlost zvuku 68
3.3 Vlastnosti zvuku 72
3.4 Hlasitost a intenzita zvuku 73
3.5 Ultrazvuk a infrazvuk 76
Shrnutí učiva 3. kapitoly 79

Výsledky úloh 81

Rejstřík 85

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

OBSAH CD

Rozšiřující učivo

R1 Kmitání mechanického oscilátoru
R1.1 Složené kmitání kmitavých pohybů se stejnou frekvencí složek . . 1
R1.2 Složené kmitání kmitavých pohybů s různou frekvencí složek . . . 4
R1.3 Složené kmitání navzájem kolmých kmitavých pohybů 7
R1.4 Harmonická analýza kmitání 10
R1.5 Přeměny energie v mechanickém oscilátoru 11
R1.6 Tlumené kmitání mechanického oscilátoru 14
R1.7 Rezonance mechanického oscilátoru 18

R2 Mechanické vlnění
R2.1 Chvění mechanických soustav 21
R2.2 Odraz a lom vlnění 24
R2.3 Ohyb vlnění 27

R3 Zvukové vlnění
R3.1 Hudební akustika 30
R3.2 Zdroje zvuku v hudební akustice 36
R3.3 Fyziologická akustika 42
R3.4 Dopplerův jev 47
Výsledky úloh 52

Teoretická cvičení

Cvičení 1 – Kinematika kmitavého pohybu 1
Cvičení 2 – Dynamika kmitavého pohybu 9
Cvičení 3 – Mechanické vlnění 20
Výsledky úloh 25

Laboratorní cvičení

Úvod k laboratorním cvičením 1
Cvičení 1 – Kmitání pružinového oscilátoru 3
Cvičení 2 – Určení tuhosti pružiny mechanického oscilátoru 10
Cvičení 3 – Ověření vztahu pro periodu kyvadla 14
Cvičení 4 – Měření rychlosti zvuku otevřeným rezonátorem 18

Testové úlohy

Historické poznámky

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

Slovníček fyzikálních pojmů

Animace k učivu

A1 Mechanické oscilátory
A2 Harmonické kmitání
A3 Souvislost kmitavého pohybu s pohybem po kružnici
A4 Fáze kmitavého pohybu
A5 Složené kmitání – stejné frekvence složek
A6 Složené kmitání – různé frekvence složek
A7 Složené kmitání – blízké frekvence složek
A8 Lissajousovy obrazce
A9 Obdélníkový kmit
A10 Mechanický oscilátor
A11 Kyvadlo
A12 Tlumené kmity mechanického oscilátoru
A13 Nucené kmitání mechanického oscilátoru
A14 Vázané mechanické oscilátory
A15 Postupné vlnění
A16 Stojaté vlnění
A17 Chvění pružného tělesa
A18 Odraz vlnění
A19 Lom vlnění
A20 Zvukové vlnění
A21 Rázová vlna

MODELY KMITÁNÍ OSCILÁTORŮ

(programy pro MS Excel, OpenOffice Calc a LibreOffice Calc)

M1 Harmonický pohyb

M1.1 Kinematické veličiny harmonického pohybu
M1.2 Počáteční fáze kmitání

M2 Složené kmitání

M2.1 Kmity stejného směru – stejné frekvence složek
M2.2 Kmity stejného směru – různé frekvence složek
M2.3 Kmity stejného směru – blízké frekvence složek
M2.4 Kmity navzájem kolmé – stejné frekvence složek
M2.5 Kmity navzájem kolmé – různé frekvence složek
M2.6 Složené kmitání více složek – Fourierova analýza

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

M3 Vlastní kmitání oscilátoru
M3.1 Kmitání pružinového oscilátoru (numerická metoda)
M3.2 Kmitání pružinového oscilátoru (analytická metoda)
M3.3 Přeměny energie v mechanickém oscilátoru
M3.4 Srovnání modelu kyvadla s matematickým kyvadlem
M3.5 Odchylka periody matematického a reálného kyvadla
M3.6 Síly působící na kyvadlo

M4 Nucené kmitání oscilátoru
M4.1 Nucené kmitání pružinového oscilátoru
M4.2 Rezonanční křivka
M4.3 Vázané oscilátory

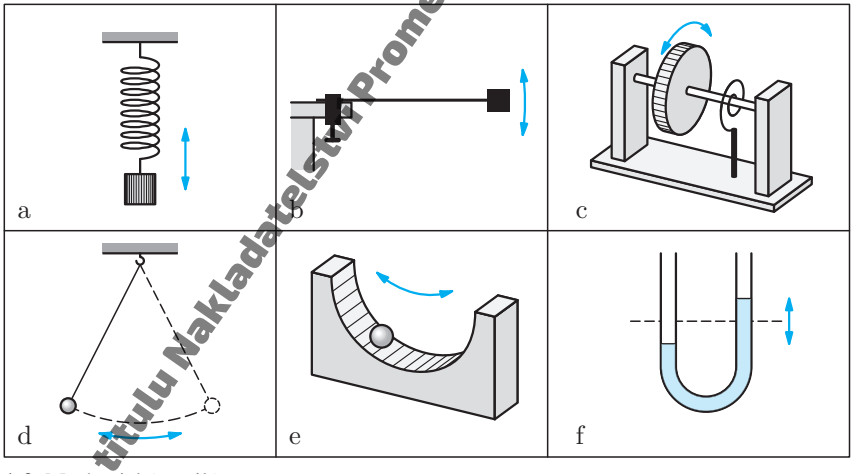
Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

1.1 Kmitavý pohyb

Zařízení, které volně, tzn. bez vnějšího působení, kmitá, je **mechanický oscilátor**. Jednoduchý mechanický oscilátor tvoří těleso (např. kovový váleček) zavěšené na pružině – **pružinový oscilátor** (obr. 1-2a).

Jestliže na pružinu zavěsíme těleso, pružina se prodlouží a těleso zůstane v klidu. Pružinový oscilátor zaujme rovnovážnou polohu. V ní na těleso působí dvě stejně velké síly opačného směru: tíhová síla $\boldsymbol{F}_G$ a **síla pružnosti** $\boldsymbol{F}_p$ (viz obr. 1-17, s. 33). Když např. tahem pružinu prodloužíme, síla pružnosti se zvětší a po uvolnění uvede těleso do kmitavého pohybu. Příčinou kmitání je tedy síla pružnosti, která vzniká při deformaci pružiny. Podobně je síla pružnosti příčinou kmitání mechanických oscilátorů na obr. 1-2b, c.

Kmitavý pohyb koná také těleso zavěšené na pevném vlákně (obr. 1-2d), které rozkmitáme vychýlením z rovnovážné polohy, tzn. ze svislého směru. Takový oscilátor nazýváme **kyvadlo**. Příčinou kmitání kyvadla je působení tíhové síly $\boldsymbol{F}_G$ na těleso oscilátoru. Podobně působením tíhové síly koná periodický pohyb kulička na obr. 1-2e nebo sloupec kapaliny v U-trubici (obr. 1-2f). Příklady kmitání mechanických oscilátorů jsou znázorněny animací na CD A1.

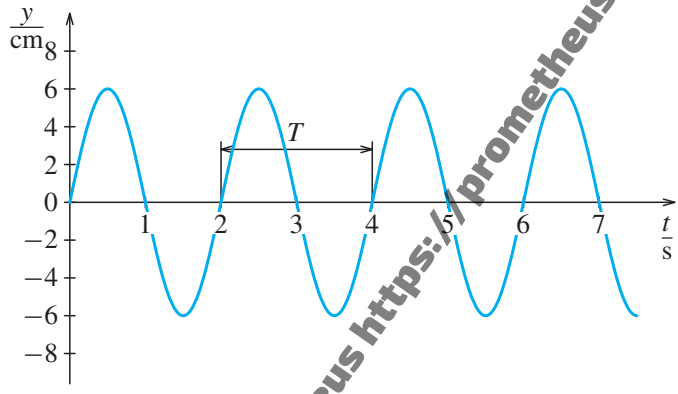


1-2 Mechanické oscilátory

Když srovnáme kmitání jednotlivých mechanických oscilátorů, vidíme, že trajektorie kmitajících těles může být přímočará i křivočará. V dalším výkladu se zaměříme jen na **kmitavý pohyb po přímce**. Příkladem takového kmitání je

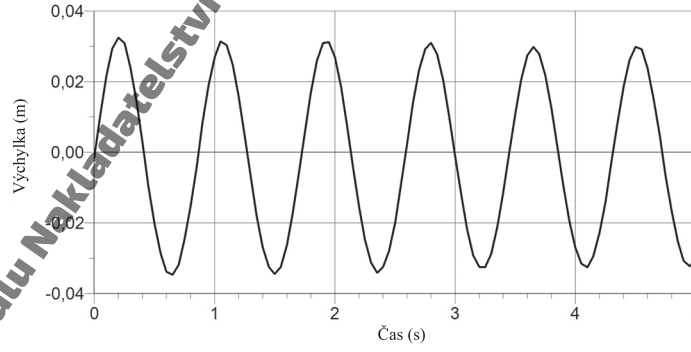
Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nak.cz

pohyb tělesa pružinového oscilátoru. Trajektorie tělesa (jeho těžiště) je úsečka a těleso se periodicky pohybuje mezi jejími krajními body. Pro popis kmitavého pohybu je důležitá závislost okamžité polohy kmitajícího tělesa na čase. Tuto závislost zobrazujeme jako **časový diagram**, který je grafem polohy tělesa jako funkce času (obr. 1-3). Na vodorovné ose je čas t a veličina y na svislé ose odpovídá okamžité poloze tělesa.



1-3 Časový diagram kmitání pružinového oscilátoru

Poznámka: Časový diagram kmitání pružinového oscilátoru můžeme získat experimentem, který je součástí laboratorního cvičení na CD LC1. Pohyb tělesa oscilátoru je snímán čidlem polohy a pohybu a na displeji počítače se zobrazí jako časový diagram kmitavého pohybu (obr. 1-4).



1-4 Časový diagram kmitání pružinového oscilátoru získaný měřicím systémem Vernier

Z časového diagramu je patrné, že při kmitavém pohybu těleso urazí ve stejných časových intervalech různé dráhy. To znamená, že **kmitavý pohyb je**

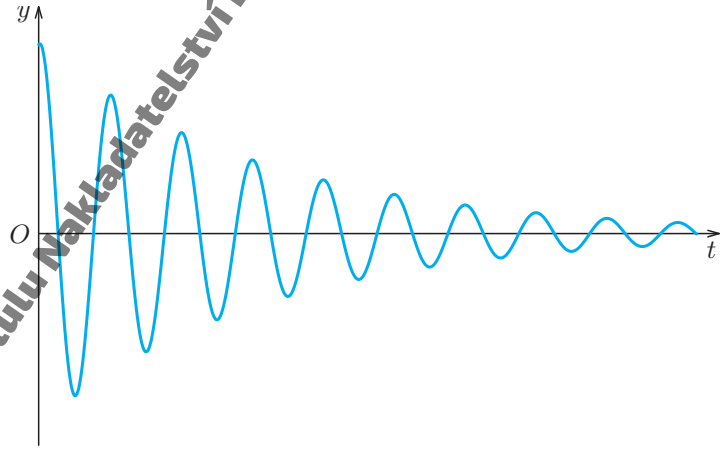
Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

1.8 Tlumené kmitání mechanického oscilátoru

Aby mechanický oscilátor kmital, musíme mu v počátečním okamžiku dodat energii. U pružinového oscilátoru prodloužíme pružinu a oscilátor tak získá potenciální energii pružnosti. Kyvadlo vychýlíme z rovnovážné polohy, zvýší se poloha tělesa kyvadla nad zemí a kyvadlo získá tíhovou potenciální energii. Při kmitavém pohybu se pak periodicky mění potenciální energie oscilátoru na energii kinetickou, která je největší při průchodu oscilátoru rovnovážnou polohou. Tyto přeměny energie se periodicky opakují. Podrobněji jsou přeměny energie v kmitajícím oscilátoru vyloženy na CD ↗R1.5.

Dosud jsme předpokládali, že se amplituda kmitání oscilátoru nemění a podle zákona zachování mechanické energie se potenciální energie periodicky mění jen na energii kinetickou a naopak. Takové kmitání označujeme jako **netlumené kmitání**. To je však jen fyzikální abstrakce. U skutečného oscilátoru vždy vznikají ztráty energie např. působením odporu prostředí, v němž oscilátor kmitá a mechanická energie se mění v jiné formy energie. Amplituda kmitů se postupně zmenšuje, až kmitání oscilátoru zanikne. Takové kmitání označujeme jako **tlumené kmitání**. Na obr. 1-21 je počítačem vytvořený časový diagram tlumeného kmitání. Průběh tlumeného kmitání při různém tlumení oscilátoru je znázorněn animací na CD ↗A1.2 a pro různé hodnoty tlumení ho řeší modely ↗M3.1 a ↗M3.2.

Dospěli jsme k závěru, že **vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené**.



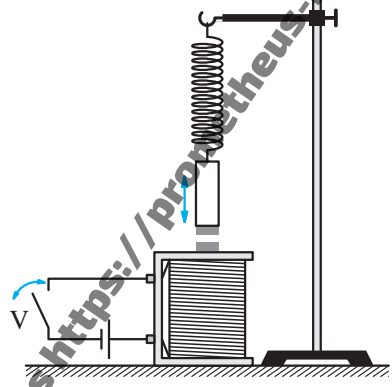
1-21 Tlumené kmitání

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

1.9 Nucené kmitání mechanického oscilátoru

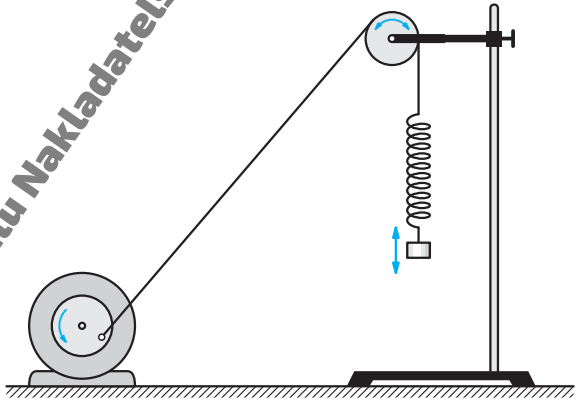
Přesvědčili jsme se, že vlastní kmitání mechanického oscilátoru je tlumené a po určité době zanikne. Jak lze dosáhnout toho, aby se amplituda kmitání oscilátoru neměnila a aby tak vzniklo **kmitání netlumené**?

Sledujme následující pokus (obr. 1-23). Jako oscilátor použijeme magnet zavěšený na pružině (místo magnetu to může být ocelový váleček, ke kterému přichytíme feritový magnet). Pod oscilátorem umístíme elektromagnet, který budeme pomocí vypínače V periodicky připojovat ke zdroji elektrického napětí. Pokud budeme vypínač uzavírat s jinou periodou, než je perioda vlastního kmitání oscilátoru, amplituda výchylky oscilátoru bude malá. Jestliže však budeme elektromagnetem působit na oscilátor s periodou odpovídající periodě vlastního kmitání, začne se oscilátor postupně rozkmitávat a jeho amplituda se podstatně zvětší.



1-23 Demonstrace netlumeného kmitání mechanického oscilátoru

V uvedeném pokusu se oscilátor rozkmital působením vnější síly. Vzniklo **nucené kmitání oscilátoru**. Nucené kmitání mechanického oscilátoru můžeme také demonstrovat pokusem podle obr. 1-24. Kotoučem, který se otáčí úhlovou



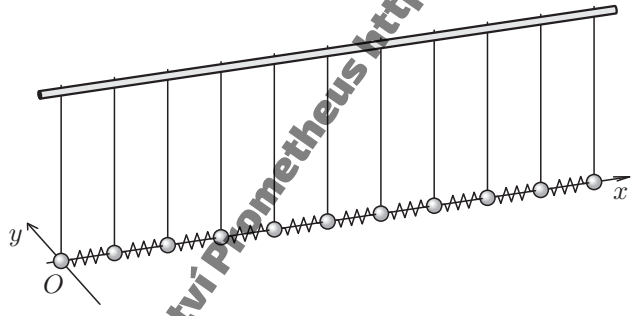
1-24 Demonstrace nuceného kmitání mechanického oscilátoru

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nak.cz

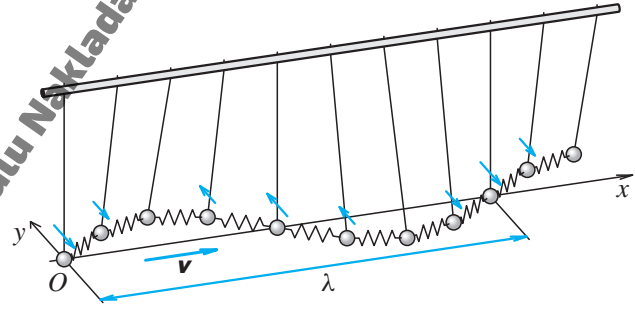
2.1 Vznik a druhy vlnění

Mechanické vlnění vzniká v látkách všech skupenství a jeho příčinou je existence vazebných sil mezi částicemi (atomy, molekulami) prostředí, kterým se vlnění šíří. Kmitání jedné částice se vzájemnou vazbou přenáší na další částici. Současně se tak na tuto částici přenáší energie kmitavého pohybu. Takové prostředí označujeme jako **pružné prostředí**. Pro jednoduchost z tohoto prostředí vybereme řadu částic, které leží na jedné přímce.

Jednotlivé částice jsou vlastně mechanické oscilátory navzájem spojené vazbou, jako je tomu v řadě kyvadel na obr. 2-2. Vazby mezi kyvadly jsou znázorněny malými pružinami. Jestliže první kyvadlo vychýlíme ve směru osy y a necháme ho volně kmitat, začnou postupně kmitat i ostatní kyvadla (obr. 2-3). Kmitání postupuje rychlostí $\boldsymbol{v}$ ve směru osy x. **Vzniká postupné vlnění a rychlost $\boldsymbol{v}$ je rychlost postupného vlnění.**



2-2 Řada mechanických oscilátorů spojených vazbou



2-3 Vznik postupného vlnění

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

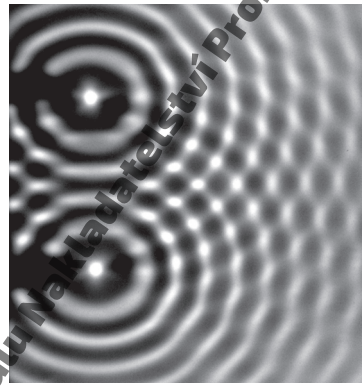
2 Postupné mechanické vlnění je popsáno rovnicí $\{y\} = 0{,}1 \sin 2\pi(5\{t\} - 3{,}3\{x\})$. Určete amplitudu, vlnovou délku a rychlost vlnění.

3 Zdroj vlnění kmitá s frekvencí 0,4 Hz a s amplitudou 5 cm. V počátečním okamžiku má nulovou výchylku i počáteční fázi. Určete okamžitou výchylku bodu vzdáleného 45 cm od zdroje v čase 12 s od počátečního okamžiku, jestliže vlnová délka vlnění je 60 cm. Napište rovnici postupné vlny.

4 Jaký tvar bude mít rovnice postupné vlny, jestliže počáteční fáze zdroje vlnění není nulová, ale má hodnotu $\pi/4$?

2.3 Interference vlnění

Všimněme si, co se stane, když na vodní hladinu dopadnou místo jednoho kamene současně kameny dva. Vzniknou dvě kruhové vlny, které se navzájem překrývají. Při svém pohybu se však neovlivňují a šíří se navzájem nezávisle. V místech, kde se vlny překrývají, však pozorujeme, že amplituda jednotlivých vln má různou velikost. Dobře to vidíme na obr. 2-9, který byl pořízen pomocí demonstračního zařízení pro pozorování vln na vodní hladině, periodicky rozkmitávané ve dvou bodech.



2-9 Interference vlnění na vodní hladině

Nestejná amplituda překrývajících se vln je výsledkem **skládání vlnění** neboli **interference vlnění**. Interference vlnění se projevuje tak, že výsledný kmitavý pohyb hmotných bodů prostředí je určen superpozicí kmitání vyvolaných vlněním.

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

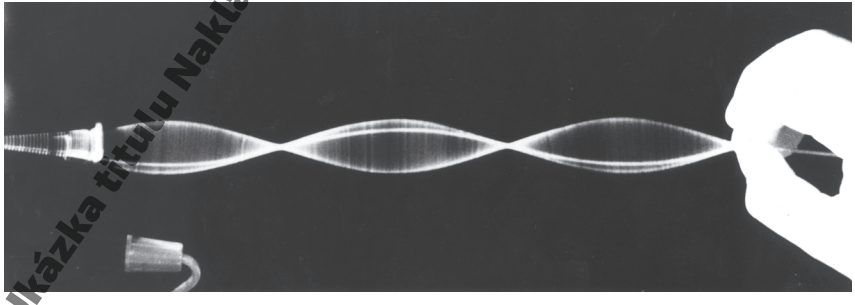
Výsledek pokusu je na obr. 2-13, který zachycuje harmonickou vlnu před odrazem a po odrazu. Jestliže k pevnému konci dospěl nejdříve vrch vlny a po něm důl, pak po odrazu je situace opačná. Nejdříve postupuje důl odražené vlny a teprve pak její vrch. Můžeme říct, že fáze odražené vlny je opačná.

Jiný průběh má odraz vlnění v případě, že konec lana není upevněn, tzn. jeho konec je volný. Můžeme to provést např. tak, že lano necháme volně viset. Výsledek pokusu znázorňuje obr. 2-14. Na rozdíl od předcházejícího případu odraz probíhá tak, že fáze odražené vlny je stejná jako fáze vlny před odrazem.

Na konci řady bodů, kterou se šíří postupné vlnění, nastává odraz vlnění. Na pevném konci se vlnění odráží s opačnou fází a na volném konci se odráží se stejnou fází.

Jestliže jeden konec pružného vlákna trvale harmonicky kmitá, postupuje vlnění ke druhému konci, zde se odráží a postupuje opačným směrem, tzn. zpět ke zdroji vlnění. Nastává zajímavý a velmi důležitý případ, kdy interferují dvě stejná vlnění – přímé a odražené, která postupují stejnou rychlostí opačnými směry.

Tento děj lze snadno demonstrovat. Pružné vlákno na jednom konci upevníme a druhým koncem kmitáme. Výsledek pokusu je na obr. 2-15. Vidíme, že na rozdíl od dosud uvažovaného postupného vlnění, kdy všechny body postupně kmitají se stejnou amplitudou výchylky, je v tomto případě amplituda výchylky jednotlivých bodů kmitajícího vlákna různá. Některé body vlákna dokonce zůstávají trvale v klidu. Průběh vlnění na vlákně vytváří dojem ustáleného stavu, jako by vlna na vlákně stála a nepohybovala se. Tento zvláštní druh vlnění označujeme jako **stojaté vlnění**.

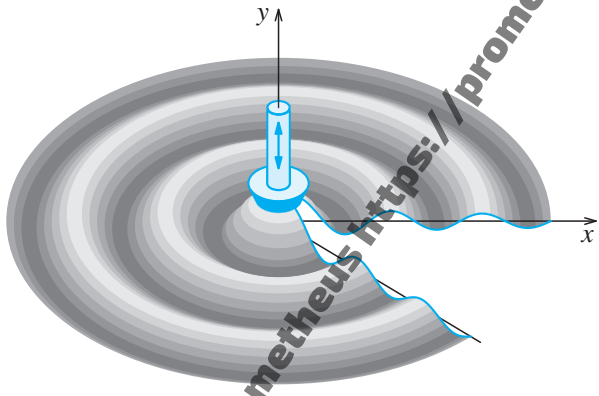


2-15 Demonstrace stojatého vlnění

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

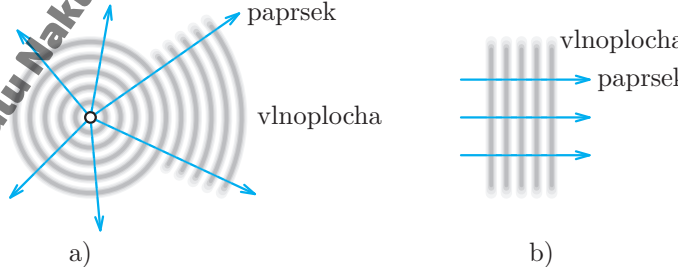
ných bodů spojených pružnou vazbou. V přírodě se však setkáme s případy, kdy se vlnění šíří v prostoru, popř. v rovině. Takto se např. šíří ve vzduchu zvuk nebo vlnění na vodní hladině, jak je to patrné na obr. 2-1.

Když vodní hladinu v jednom bodě rozkmitáme, šíří se vlnění z tohoto bodu všemi směry (obr. 2-17). Kruhový tvar vln svědčí o tom, že rychlost vlnění je ve všech směrech stejná. To znamená, že vlnění postupuje prostředím, které má z hlediska šíření vlnění ve všech bodech stejné vlastnosti. Takové prostředí nazýváme **izotropní prostředí**. Všechny body na této kružnici kmitají se stejnou fází.



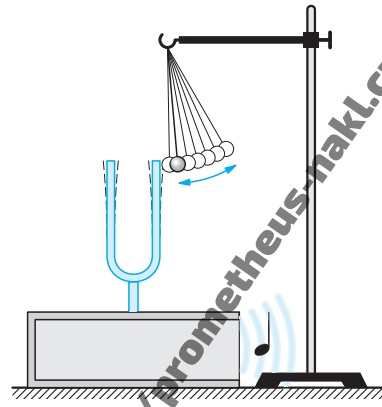
2-17 Šíření vlnění v rovině

Podobně můžeme považovat za izotropní prostředí vzduch, kterým se šíří zvuk. V určitém okamžiku dospěje zvukové vlnění ve všech směrech od zdroje zvuku do stejné vzdálenosti. Kmitající body leží na povrchu kulové plochy a tuto plochu nazýváme **vlnoplocha**. Směr šíření vlnění v daném bodě určuje kolmice k vlnoploše, která se nazývá **paprsek** (obr. 2-18a).



2-18 Vlnoplocha a paprsek

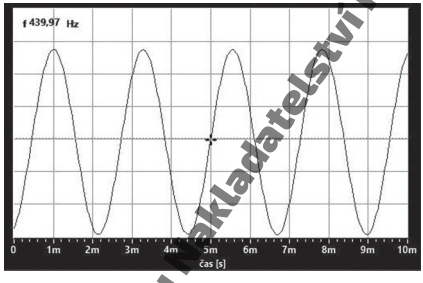
Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz



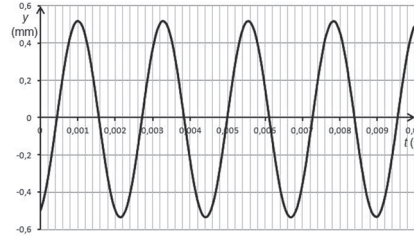
3-1 Demonstrace zdroje zvuku

tónu a[1] používaná v *hudební akustice* (viz CD R3.1). Časový diagram kmitání ladičky získaný pomocí počítače je na obr. 3-2.

Poznámka: Pro záznam zvuků pomocí počítače existují programy, které využívají zvukovou kartu počítače. Připojením mikrofonu můžeme získat nejen záznam zvuku, ale zvuk lze také analyzovat, popř. převést záznam do podoby tabulky dat a dále je zpracovat např. tabulkovým procesorem. Záznamy v této kapitole byly získány programem Soundcard Scope 1.46 a časové diagramy byly vytvořeny programem MS Excel (obr. 3-2b).



a)



b)

3-2 Kmitání ladičky: a) monitor počítače, b) graf získaný programem MS Excel

Podobně získáme záznam zvuku různých hudebních nástrojů. Např. na obr. 3-3 je záznam zvuku flétny a houslí. Zjišťujeme, že zvuk hudebních nástrojů je sice periodický, ale není harmonický.

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

po odrazu ode dna. Určete hloubku moře, jestliže odražený signál dospěl k přijímači sonaru za 0,6 s po jeho vyslání. Rychlost zvuku ve vodě viz tabulka 3.1.

3.3 Vlastnosti zvuku

Vlastnosti zvuku rozhodují o kvalitě sluchového vjemu. Sluchem snadno rozeznáme třeba vysoký tón houslí a hluboký tón basy, zvuky mohou být sotva slyšitelné, nebo i takové, že před nimi musíme sluch chránit. Tyto vlastnosti se objektivně vyjadřují fyzikálními veličinami, které můžeme změřit nezávisle na subjektivních pocitech vznikajících při vnímání zvuku. Často však je pro nás důležitější než objektivně zjištěná hodnota akustické veličiny subjektivní hodnocení zvuku, které lépe vystihuje sluchový vjem.

Periodické kmitání zvukové frekvence neboli tón charakterizuje jeho výška a barva.

Výška tónu je určena jeho frekvencí. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje frekvence absolutní výšku tónu.

Absolutní výšku tónu lze poměrně snadno měřit přístroji pro měření zvukových frekvencí nebo pomocí počítačového programu pro analýzu záznamu zvuku. Sluchem však absolutní výšku tónu většinou nedokážeme určit, a proto je pro subjektivní hodnocení zvuků důležitější relativní výška tónu.

Relativní výška tónu je určena podílem frekvence daného tónu k frekvenci vhodně zvoleného základního tónu.

V hudební akustice je základním srovnávacím neboli referenčním tónem tzv. *komorní a*. Jeho frekvence stanovená mezinárodní dohodou je 440 Hz (hudební označení a^1). V hudbě se poměrem frekvencí dvou tónů vyjadřují *hudební intervaly*. Podrobněji jsou fyzikální základy hudební akustiky vyloženy na CD ↗R3.1, ↗R3.2.

Složené tóny jsou výsledkem superpozice většího počtu harmonických kmitání s různými frekvencemi. Tón s nejnižší frekvencí je **základní tón** a jeho frekvence určuje absolutní výšku složeného tónu. Další složky tónu označujeme jako **vyšší harmonické tóny** a jejich frekvence jsou určitými násobky frekvence základního tónu. Amplitudy vyšších harmonických tónů se s rostoucí frekvencí obvykle zmenšují.

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz

Shrnutí učiva 3. kapitoly

Akustika se zabývá fyzikálními ději spojenými se vznikem, šířením a vnímáním zvuku. Patří vedle mechaniky a optiky k nejstarším částem fyziky. Šíření zvuku můžeme popsat jako děj v přenosové soustavě, kterou tvoří zdroj zvuku, prostředí, kterým se zvuk šíří, a přijímač zvuku (např. lidské ucho nebo mikrofon záznamového zařízení).

Zvuk je mechanické vlnění o frekvenci přibližně 16 Hz až 20 kHz, které vnímáme sluchem. Mechanické vlnění o vyšší frekvenci než 20 kHz je **ultrazvuk**, frekvenci nižší než 16 Hz má **infrazvuk**.

Přenos zvuku je možný jen v látkovém prostředí. Zdrojem zvuku je chvění pružných těles.

Periodické zvuky jsou **hudební zvuky** nebo **tóny**. Zvuk s harmonickým průběhem je jednoduchý tón. Periodické zvuky složitějšího průběhu jsou složené tóny. Tóny a jejich vzájemnými vztahy se zabývá hudební akustika.

Zvuk se šíří pružným látkovým prostředím libovolného skupenství. V plynech a v kapalinách se zvuk šíří jako vlnění podélné. V pevných látkách může vznikat také vlnění příčné. Jeho rychlost je jiná než rychlost vlnění podélného.

Šíření zvuku charakterizuje **rychlost zvuku**. Rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě 0 °C a hustotě suchého vzduchu 1,293 kg · m^{-3} je 331,82 m · s^{-1}. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na teplotě t podle vztahu:

$$v_t = (331{,}82 + 0{,}61\{t\})\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem vzduchu a je stejná pro zvuková vlnění všech frekvencí. V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu.

Šíření zvuku je ovlivněno i překážkami, na které zvukové vlnění dopadá. Vzniká odraz i ohyb zvukového vlnění. Zvláštním případem odrazu zvuku od rozlehlé překážky je **ozvěna**.

Základní vlastnosti zvuku jsou: výška, barva a hlasitost.

Výška tónu je určena jeho frekvencí. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje frekvence absolutní výšku tónu. Pro subjektivní hodnocení zvuků je zavedena relativní výška tónu. Relativní výška tónu je určena podílem frekvence daného tónu k frekvenci referenčního tónu

Ukázka titulu Nakladatelství Prometheus https://prometheus-nakl.cz