

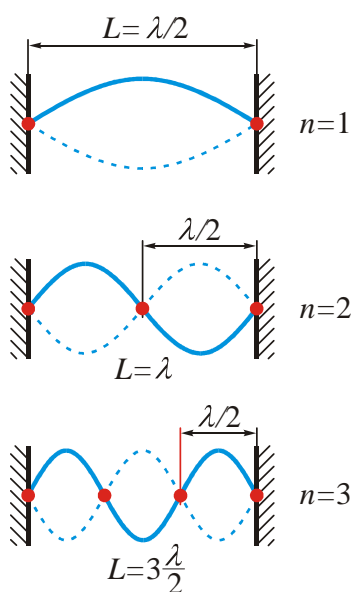
# VLNY NA STRUNĚ

## Obecná část

Je všeobecně známo, že kovová struna (nebo pružný provaz) upevněná na obou koncích může kmitat a vydávat proto zvuk. Frekvence kmitání jsou pevně dány vztahem:

$$f_n = \frac{v}{2L} \cdot n \quad , \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost vlny,  $L$  délka struny a  $n$  je kladný celočíselný parametr. Tyto frekvence se nazývají *vlastními*, přičemž frekvence pro  $n = 1$  se nazývá základní (1.) harmonická, další jsou vyšší ( $n$ -té) harmonické. Struna může samozřejmě kmitat současně na několika harmonických, podle toho, jak ji vybudíme. Odtud plyne charakteristický zvuk strunných hudebních nástrojů. Příčinou tohoto chování je fakt, že po struně se šíří příčná vlna rychlostí  $v$ , na koncích struny se odráží, proti sobě jdoucí vlny interferují a vzniká *stojatá vlna*. Struna při tom kmitá způsobem naznačeným na obr. 1.



Obr. 1

První tři módy kmitů struny

Rychlost šíření vlny  $v$  je svázána s frekvencí kmitů  $f$  a vlnovou délkou  $\lambda$  známým vztahem:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2)$$

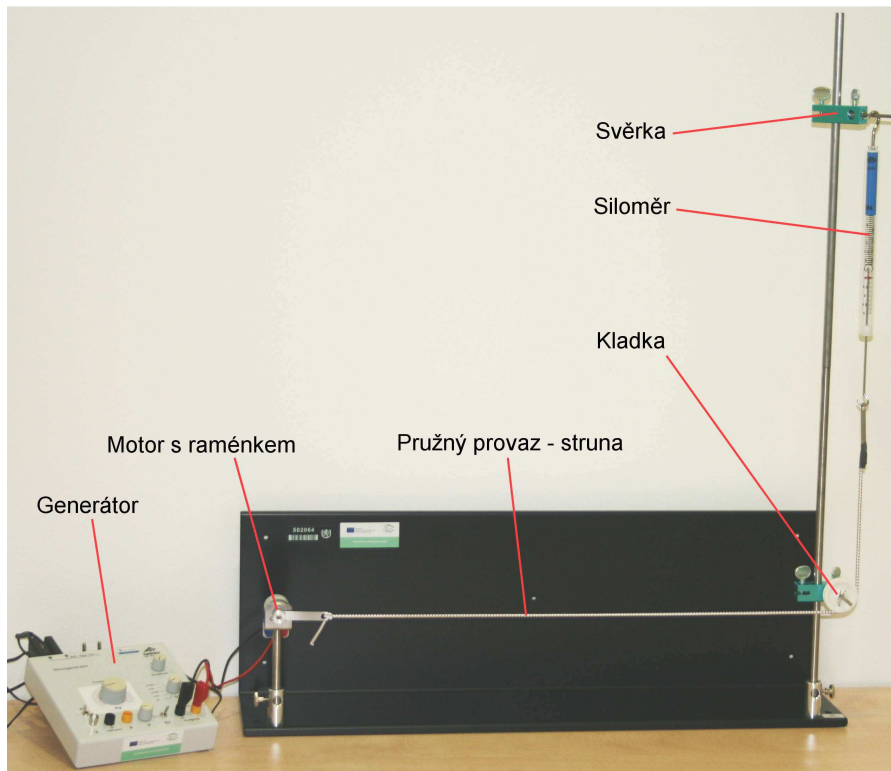
Tato rychlost je označována jako *fázová rychlost*. Vlnovou délkou  $\lambda$  můžeme definovat jako nejmenší vzdálenost, po které se opakuje tvar harmonické (sinusově buzené) vlny. Pro strunu se dá poměrně snadno odvodit (např. [1], kap. 17.6) vztah:

$$v = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad , \quad (3)$$

kde  $\tau$  [N] je napínací síla a  $\mu$  [kg/m] je hmotnost jednotkové délky struny. Vidíme, že pokud např. chceme zdvojnásobit základní frekvenci, musíme zvětšit napětí ve struně 4×.

## Měření

V experimentu budete měřit závislost vlnové délky stojaté vlny na frekvenci pro různá napětí struny. Zařízení pro měření je na obr. 2. Jako struna je použit pružný provaz napínaný siloměrem přes kladku. Na opačném konci je provaz buzen kmitavým pohybem raménka malého elektromotoru, napájeného střídavým napětím z generátoru. Kladka na pravé straně plní funkci pevně ukotveného konce struny, takže je zde vždy uzel stojaté vlny. Budicí elektromotor na levé straně však není zcela pevný (tuhý), ale ani zcela volný, takže zde bude stav mezi uzlem a kmitnou. Buzená strana provazu se tedy nebude přesně shodovat s vyobrazením na obr. 1. Provaz přesto vykazuje rezonanční chování, takže na některých frekvencích



Obr. 2 Zařízení pro generování stojatých vln na struně

se rozkmitá silně, na jiných bude nutné výrazně přidat amplitudu výstupního napětí generátoru, aby bylo možno kmitny (místa s maximálním rozkmitem) pozorovat. Vlnovou délku určíte změřením vzdálenosti co největšího počtu uzlů (nekmitající místa) svinovacím metrem<sup>1)</sup>. Vzdálenost sousedních uzlů je rovna vždy polovině vlnové délky. Amplitudu signálu generátoru volte co nejmenší, ale tak, aby byly kmitny i uzly dobře pozorovatelné. Příliš velká amplituda způsobuje vibrace celé aparatury, přehřívání zesilovače generátoru a snižuje životnost motoru. Výchozí nastavení a ovládání generátoru je patrné z obr. 3. Napínací sílu struny/provazu lze nastavit posouváním svěrky, na níž je zavěšen siloměr. Při napínání se provaz prodlužuje, takže se snižuje hmotnost jeho jednotkové délky  $\mu$ . Toto prodloužení je třeba změřit (pomocí dvou rysek na provazu) a započítat při ověřování vztahu (3). Při měření občas zkontrolujte popř. opravte napnutí, protože provaz časem „měkne“.

### Pracovní úkol

- 1) Proměřte závislost vlnové délky stojaté vlny na frekvenci pro napínací sílu struny



Obr. 3 Generátor s výkonovým zesilovačem

- 1, 2, 3 a 4 N. Frekvenci (asi 8 hodnot) nastavujte od 20 do 55 Hz. Při každé změně síly zároveň změřte vzdálenost mezi černými ryskami na struně/provazu. Jejich vzdálenost při nulové síle je shodná s délkou přiloženého volného kousku struny/provazu (viz úkol 2). Stanovte chybu měření vzdálenosti rysek a síly.
- 2) Změřte hmotnost přiloženého kousku struny/provazu. Digitální váha je v místnosti UC103. Stanovte chybu.
  - 3) Sestrojte (doma) graf závislosti vlnové délky  $\lambda$  na periodě kmitů budicího generátoru pro jednotlivé napínací síly. Směrnice takto vzniklých přímk jsou rovny fázovým rychlostem pro dané napínací síly. Určete fázové rychlosti lineární regresí<sup>2)</sup> (str. 19 skript, Excel – spojnice trendu, Calc, Matlab). Dále stanovte statistickou chybu jedné vybrané rychlosti (tj. chybu směrnice).
  - 4) Vypočtěte „teoretické“ hodnoty fázových rychlostí podle vztahu (3). Dále stanovte chybu fázové rychlosti stejné jako v předchozím úkolu. Jedná se o chybu nepřímo měřené veličiny – viz kapitola C na str. 17 skript.
  - 5) Porovnejte změřené fázové rychlosti s vypočtenými „teoretickými“, nejlépe formou tabulky. Pro vybranou rychlost, kde jste určovali chybu, proveďte toto porovnání dle standardního postupu<sup>3)</sup>.

#### Poznámky:

<sup>1)</sup> Chyba se při jednom měření stanovuje podle použitého měřidla (0,3 nejmenšího dílku stupnice), nicméně zde je problém v přesném odhadu místa uzlu (závisí na zkušenosti experimentátora), který nebude určitě lepší než 0,5 cm. Chyba měřidla je v tomto případě zanedbatelná.

<sup>2)</sup> Přímka má v tomto případě procházet počátkem (tj. má to být prostá přímá úměra  $y = kx$ ). Pak se používá vzorec na str. 19 skript. V Excelu je nutno zaškrtnout volbu "Hodnota Y=0".

<sup>3)</sup> Viz předposlední a závěrečný odstavec kapitoly „Chyby měření“ ve skriptech Fyzikální praktikum na str. 20.

#### Literatura

[1] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 8021418680.