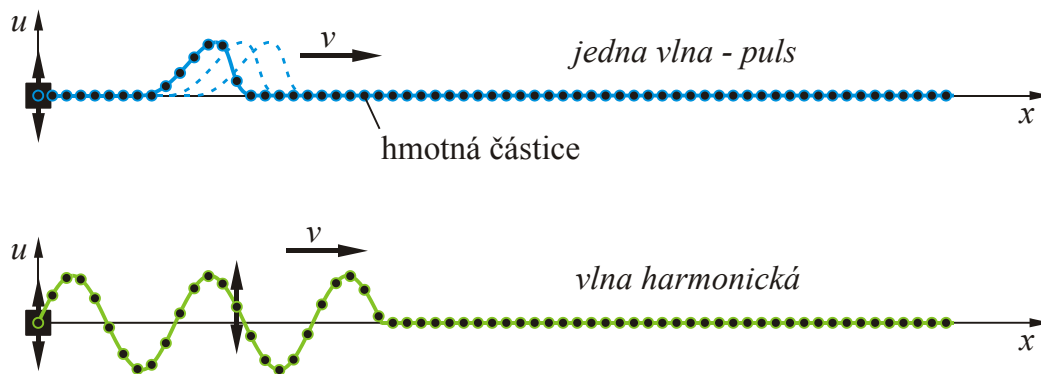


POZOROVÁNÍ VLN NA VLNOSTROJI

Obecná část

Vlna vzniká, pokud řada vzájemně vázaných kmitavých systémů vykonává postupně oscilace stejného typu. V hmotném prostředí kmitají kolem rovnovážné polohy hmotné částice spojené pružnými vazbami. Pohyb se přenáší s určitým zpožděním z jedné částice na druhou a tak postupuje hmotou. Samotné částice se



Obr. 1

ve směru šíření vlny nepřemísťují. Přemísťuje se pouze energie spojená s jejich pohybem a s napětím v pružných vazbách. Pokud částice kmitají ve směru kolmém na směr šíření vlny, nazýváme vlnu *příčnou* (*transverzální*). To je například vlna na napnutém provaze, na vodní hladině apod. (viz obr. 1). Pokud částice kmitají rovnoběžně se směrem šíření vlny, pak se jedná o vlnu *podélnou* (*longitudinální*). Typický případ je zvuk.

Pro demonstraci jevů spojených s vlnami se často používá tzv. vlnostroj (wave machine), se kterým se v této úloze seznámíte. Vlnostroj se skládá z řady kyvadel vzájemně spojených zkrutnou pružinou v jejich ose (nebo dvěma pružinami umístěnými symetricky po stranách). Každé kyvadlo má moment setrvačnosti I a zároveň působí přes pružinu na sousední kyvadlo vratným momentem síly, který je úměrný jejich vzájemnému úhlovému pootočení. Takový systém se chová jako výše popsané hmotné částice s pružnými vazbami a umožňuje přenos energie ve formě vlny. Budeme-li počátečním kyvadlem harmonicky (dle funkce \sin , \cos) kývat, budou po chvíli i ostatní kyvadla harmonicky kývat, ovšem s časovým zpožděním, které je přímo úměrné jejich vzdálenosti od počátečního kyvadla. Toto časové zpoždění určuje fázovou rychlost vzniklé vlny a podrobnou analýzou bychom zjistili, že závisí na momentu setrvačnosti kyvadel, torzní konstantě pružiny a také, od určité hranice, na budicí frekvenci. Aby byla fázová rychlost nezávislá na budicí frekvenci s max. 1% odchylkou, je třeba splnit podmínku:

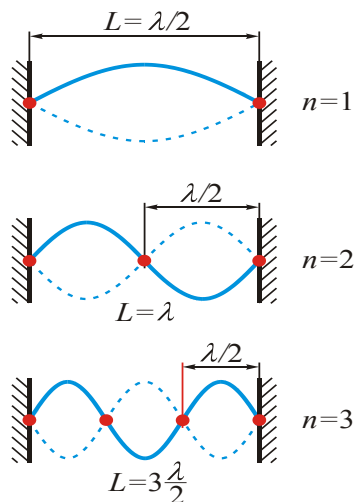
$$\lambda \geq 12,6d, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka sledované vlny a d je vzdálenost sousedních kyvadel. Dodržení podmínky nám zároveň zajistí dobrou pozorovatelnost takové vlny. Přesný vztah pro fázovou rychlost v závislosti na době kmitu kyvadla vlnostroje lze nalézt v literatuře [1]. Rychlost šíření oscilací v je svázána s frekvencí kmitů f a vlnovou délkou λ známým vztahem:

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

Tato rychlost je označována jako *fázová rychlost* vlny.

Úplná stojatá vlna vznikne, když proti sobě postupují dvě vlny se stejnou frekvencí a stejnou amplitudou. To můžeme udělat pomocí dvou synchronizovaných vysílačů, které budou tyto vlny vysílat proti sobě nebo zcela jednoduše odrazem vlny na tuhém popř. volném rozhraní. Na obr. 2 jsou nakresleny první tři případy stojaté vlny na vlnostroji (obecně v jakémkoliv prostředí, které umožňuje šíření vln) délky L omezeném na obou koncích tuhým rozhraním (koncová kyvadla



Obr. 2

jsou pevně ukotvena a nemohou se pohybovat). Na takovém rozhraní se vlna odráží celá a s opačnou fází. Stojatou vlnu lze potom vybudit pouze při splnění podmínky:

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

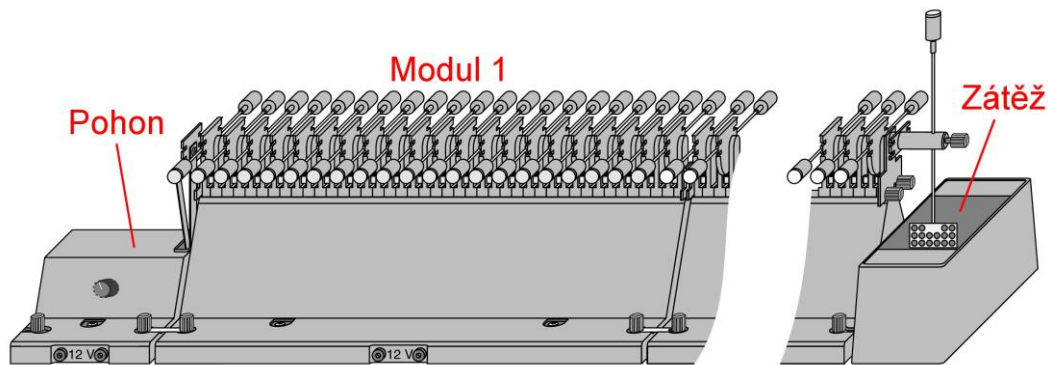
Pokud bychom se přesto pokusili vybudit vlnu s jinou vlnovou délkou, pak díky destruktivní iterferenci tato velmi rychle zanikne. Jednotlivé frekvence, které přísluší vlnovým délkám λ se nazývají *vlastní frekvence* soustavy:

$$f = \frac{v}{\lambda} = n \frac{v}{2L} \quad (4)$$

Frekvence pro $n = 1$ se nazývá základní (n -té) harmonická, další jsou vyšší harmonické (n -té).

Měření

Vlnostroj (obr. 3) se skládá ze tří spojených modulů, z nichž každý má 21 kyvadel. Na první kyvadlo prvního modulu je navázán budící zdroj vlny tvořený motorem s klikovým mechanismem (dále pohon). Změnou napájecího napětí pohonu lze regulovat frekvenci kývání prvního kyvadla. Maximální napájecí napětí je 12 V. Na konci vlnostroje je pak umístěna zátěž – svislé kyvadlo s destičkou ponořenou ve vodě. Má za úkol spotřebovat celou energii přicházející vlny, aby nedocházelo k odrazu vlny na konci vlnostroje a tím ke vzniku stojaté vlny (obdoba zátěže připojené na konec elektrického vedení, jež je rovna jeho vlnové impedanci). Díky tomuto uspořádání můžeme vytvořit postupnou vlnu s volitelnou frekvencí a můžeme např. ověřit platnost vztahu (2). Moduly jsou opatřeny elektromagnetickou brzdou, která umožňuje pohyb kyvadel okamžitě zastavit („zmrazit“ vlnu) a pohodlně změřit vlnovou délku. Ovládání se provádí pomocí



Obr. 3 Vlnostroj Leybold

třípolohového přepínače v rozvodné krabici. Před vlastním měřením je nutno zapnout regulovatelný napájecí zdroj pro pohon klikového mechanismu, voltmetr a dva zdroje (jsou zapojeny v sérii) pro napájení brzdy.

A. Určení fázové rychlosti pomocí frekvence a vlnové délky

Nastavte požadované napětí na zdroji pohonu a přepněte přepínač do polohy *POHON*. Pomocí stopky změřte dobu kmitu prvního kyvadla. Aby bylo měření přesnější, měřte dobu více (např. deseti) kmitů. Nejlepší je stopky zapínat a zastavovat, když je konec kyvadla v horní úvratí (tj. max. kladná výchylka). Při čítání 10 kmitů je třeba počítat od nuly (0: zapnout stopky, 10: zastavit stopky). Měření je vhodné natrénovat při malé frekvenci. Po měření doby kmitu dejte přepínač do polohy 0, připravte si metr a vyčkejte až se kývání utlumí.

Opět zapněte *POHON*. Jakmile se vytvoří na vlnostroji souvislá vlna (musí být dobře pozorovatelné dva sousední „vrcholy“ vlny), přepněte přepínač (rychle) do polohy *BRZDA* a změřte svinovacím metrem vlnovou délku od vrcholu k sousednímu vrcholu. Pak dejte přepínač do polohy 0. Nenechávejte brzdou dlouho zapnutou!! Přesnost měření vlnové délky je zde hodně subjektivní, záleží na dobrém odhadu vrcholu, tj. místa s maximální výchylkou.

Pracovní úkol

- 1) Proveďte měření doby 10 kmitů a vlnové délky pro napětí zdroje pohonu 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 11 V. Data uveďte do vhodné tabulky. Napětí 7 V nastavte přesně!
- 2) Vypočtěte (doma) z naměřených dat periody, frekvence a jednotlivé fázové rychlosti (uveďte do tabulky z předešlého úkolu). Zobraďte do grafu fázové rychlosti v závislosti na frekvenci vln. Pokud byla splněna podmínka (1), „závislost“ musí být přibližně konstantní.
- 3) Pro měření s napětím 7 V stanovte chybu měření doby kmitu¹⁾. U měření vlnové délky počítejte s chybou asi ± 1 cm.
- 4) Pro měření s napětím 7 V určete též chybu fázové rychlosti²⁾.

B. Určení fázové rychlosti přímým pozorováním

Zde fázovou rychlost určíte z doby běhu jednoho konkrétního místa na vlně přes celý vlnostroj. Nejlepší je sledovat jeden vybraný vrchol vlny (tj. místo s maximální kladnou výchylkou) od okamžiku jeho vzniku v prvním kyvadle (zapnete stopky) do průchodu posledním kyvadlem vlnostroje (stopky zastavíte). Měření je hodně zatíženo lidskou reakční dobou, tak proveďte měření desetkrát a vezměte aritmetický průměr, k němuž stanovte statistickou chybu. Tu pak musíte sloučit s přístrojovou chybou stopek (*Měření času stopkami*, str. 29 skript) podle pravidla skládání chyb (str. 17 skript nahoře).

Pracovní úkol

- 5) Proveďte desetkrát měření doby běhu vrcholu vlny přes vlnostroj pro napětí zdroje 7,00 V.
- 6) Změřte délku vlnostroje metrem od 1. kyvadla k poslednímu. Stanovte chybu tohoto měření.
- 7) Stanovte (doma) výslednou hodnotu doby běhu vlny včetně chyby.
- 8) Vypočtete fázovou rychlost vlny a její chybu²⁾.
- 9) Porovnejte rychlost z úkolu 8) s hodnotou získanou v úkolu 2).

C. Určení fázové rychlosti pomocí stojaté vlny

Fázovou rychlost určíme tak, že vytvoříme podmínky pro vznik stojaté vlny a tu vybudíme. Změříme délku od prvního k poslednímu kyvadlu vlnostroje a z ní určíme vlnovou délku λ (viz obr. 2). Po změření frekvence vlny vypočteme rychlost ze vztahu (2). Měření se provádí na samostatně stojícím modulu s 21 kyvadly. První kyvadlo je pevně fixováno pomocí destičky, poslední kyvadlo je volné, ale tím, že jej pevně uchopíte rukou, vytvoříte z něj tuhé rozhraní. Zároveň jím budete (s velmi malou amplitudou!) kývat a tak budít vlnu s vhodnou frekvencí. Po vybudění stojaté vlny si změříte frekvenci kývání některého kyvadla s maximální výchylkou (postupem stejným jako v měření **A**). Amplituda kývání nesmí být příliš velká – kyvadla nesmí narážet na své koncové dorazy!

Pracovní úkol

- 10) Změřte vzdálenost prvního a posledního kyvadla modulu vlnostroje.
- 11) Vybud'te postupně stojaté vlny pro $n = 1, 2, 3, 4, 5$ a změřte pro ně doby 10 kmitů.
- 12) Stanovte (doma) z naměřených dat periody, frekvence, vlnové délky a jednotlivé fázové rychlosti (uved'te do vhodné tabulky).
- 13) Porovnejte fázové rychlosti s hodnotami z úkolu 2) a zkuste najít důvod, proč jsou odlišné.

D. Pozorování odrazu na tuhém a volném rozhraní

Pro pozorování použijte opět samostatně stojící modul s 21 kyvadly. Na volném posledním kyvadle rukou vybudte pulz a pozorujte jak se odrazí na tuhém rozhraní (prvním, pevně zafixovaném kyvadle). Harmonická vlna se v tomto případě odrazí s opačnou fází, to znamená, že kladný pulz bude po odrazu záporný.

Pro pozorování odrazu na volném rozhraní odšroubujte fixační destičku prvního kyvadla. Toto kyvadlo pak použijte pro vybudení pulzu. Odraz pozorujte na posledním volném kyvadle. Zde se vlna odrazí se stejnou fází, pulz tedy nezmění svoji polaritu.

Při pozorování pravděpodobně zjistíte, že vícekrát odražený pulz postupně „ztrácí“ svůj původní tvar. Je to dáno nestejnou fázovou rychlostí i útlumem vlnostroje pro různé frekvence vln. Jak známo, i neperiodický signál (pulz) lze rozložit na harmonické složky pomocí Fourierovy transformace. Lze si tedy představit, že tyto harmonické složky se pohybují samostatně jako vlny různých frekvencí (od 0 do ∞) – ovšem s nestejnou fázovou rychlostí a útlumem, což způsobuje s narůstající uraženou drahou jejich vzájemné prostorové posouvání i změnu amplitud. Důsledkem je pak změna tvaru výsledné funkce – pulzu.

Pracovní úkol

14) Pozorujte odražený pulz kladné nebo záporné polarity na tuhém i volném rozhraní.

Literatura:

[1] LINDBERG, A. *Modular Wave Machine: Apparatus description, experiments and Wave machine theory*. Leybold Didactic GmbH, Germany, 1983.

Poznámky:

- ¹⁾ Přesnost měření doby N kmitů stopkami je dána reakční dobou obsluhy – viz *Měření času stopkami*, str. 29 skript. Je zřejmé, že chyba doby jednoho kmitu bude N krát menší (proto je výhodné měřit co nejvíce kmitů).
- ²⁾ Vyučující rozhodne zda budete počítat chybu fázové rychlosti u měření **A** nebo **B**. Rychlost je zde nepřímo měřená veličina, takže je potřeba použít *větu o přenosu chyby* pro součin/podíl (str. 18 skript).