

BUZENÝ TLUMENÝ HARMONICKÝ OSCILÁTOR

Obecná část

Mechanický oscilátor, tak jak bývá prezentován na přednáškách, je tvořen pružinou, tlumičem a tělesem, jež vykonává přímočarý kmitavý pohyb. Vnější buzení zajišťuje obyčejný klikový mechanismus poháněný motorem. Oscilátor můžeme ale také sestavit z tělesa, které koná rotační kmitavý pohyb, a ze zkrutné pružiny. Takový systém se také někdy nazývá torzní kyvadlo. V naší laboratorní úloze je „zkrutná pružina“ realizována dvěma vinutými pružinami, které jsou navázány na rotující těleso pomocí lanka a kladky (viz obr. 1). Těleso (hliníkový disk) vykonává rotační kmitavý pohyb kolem nějaké rovnovážné polohy a my můžeme měřit jeho úhel otočení θ . Kladka pochopitelně nesmí prokluzovat. Tlumení je realizováno magnetem, jehož magnetické pole indukuje v pohybujícím se disku vířivé proudy, ty dají vzniknout dalšímu magnetickému poli, které silově interaguje s polem magnetu. Důležité je, že vzniklý brzdný moment síly je úměrný úhlové rychlosti tělesa. Diferenciální rovnice popisující takový systém (bez vnějšího buzení) pak vypadá takto:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + \kappa\theta = 0, \quad (1)$$

kde t je čas, θ úhel otočení disku vzhledem k rovnovážné poloze, I moment setrvačnosti disku, b konstanta tlumení a κ je torzní konstanta pružiny. Součin $\kappa\theta$ udává moment, kterým se pružiny snaží vrátit disk do rovnovážné polohy, pokud jej vychýlíme o úhel θ . Výraz $b \frac{d\theta}{dt}$ představuje brzdný moment tlumiče, jeho velikost je přímo úměrná okamžité úhlové rychlosti. Nakonec výraz

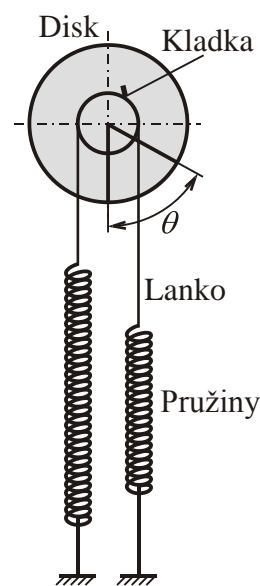
$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = I\varepsilon$ je moment síly, kterým musíme působit na disk, abychom mu udělili

úhlové zrychlení ε . Disk (válec) s poloměrem R a hmotností m , rotující kolem své osy, má moment setrvačnosti:

$$I = \frac{1}{2} mR^2. \quad (2)$$

Rešením rovnice (1) je funkce popisující úhlovou výchylku disku poté, co jej vychýlíme z klidové polohy a uvolníme:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\left(\frac{b}{2I}\right)t} \sin(\omega t + \varphi). \quad (3)$$



Obr. 1

Jedná se tedy o tlumené harmonické kmity, jejichž amplituda exponenciálně klesá. Pro úhlovou frekvenci kmitů platí:

$$\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{I} - \frac{b^2}{4I^2}} \quad (4)$$

Pokud budeme na oscilátor působit vnějším momentem síly o harmonickém průběhu s frekvencí ω_{ext} , v diferenciální rovnici přibude další člen:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + \kappa\theta = M_0 \sin(\omega_{\text{ext}} t), \quad (5)$$

kde M_0 je amplituda vnějšího („budicího“) momentu síly. Ustálené řešení této rovnice už je složitější:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_{\text{ext}} t + \varphi), \quad (6)$$

kde amplituda výchylky θ_0 již není konstanta, ale funkce budicí úhlové frekvence ω_{ext} :

$$\theta_0 = \frac{M_0}{\sqrt{I^2(\omega_{\text{ext}}^2 - \omega_0^2)^2 + b^2\omega_{\text{ext}}^2}}, \quad (7)$$

kde ω_0 je úhlová frekvence, kterou by kmital nebuzený a netlumený (tj. $b = 0$) oscilátor:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{I}}. \quad (8)$$

Maximální hodnoty dosahuje amplituda výchylky θ_0 pro budicí frekvenci:

$$\omega_{\text{rez}} = \sqrt{\frac{\kappa}{I} - \frac{b^2}{2I^2}}. \quad (9)$$

V tomto okamžiku říkáme, že systém je „v rezonanci“, a tuto frekvenci nazýváme „rezonanční“. Vidíme, že rezonanční frekvence pro amplitudu **výchylky** závisí na velikosti tlumení b . Fázový rozdíl φ mezi budícím momentem a výchylkou disku je dán vztahem:

$$\text{tg}\varphi = \frac{\omega_{\text{ext}} b/I}{\omega_{\text{ext}}^2 - \omega_0^2}. \quad (10)$$

Pokud bychom se zajímali o úhlovou rychlost disku (je dána derivací výchylky (6) podle času), zjistili bychom zajímavou skutečnost: amplituda **úhlové rychlosti** dosahuje maxima při jediné frekvenci $\omega_{\text{ext}} = \omega_0$, bez ohledu na výši tlumení.

Měření

Měření budeme provádět na zařízení na obr. 2. Hliníkový disk (nahore) je otočně uložen a jeho úhlová výchylka je snímána optickým snímačem (modrá krabička). Zároveň je na hřídeli kladka, která pomocí lanka (1,5 závitu) spojuje disk s pružinami. Levá pružina je opět lankem přes kladku druhého snímače spojena s klikou budicího elektromotoru. Rychlost otáčení kliky je úměrná napájecímu

napětí elektromotoru. Snímače a motor jsou připojeny přes interface k počítači. Rozhraní se zapíná stisknutím a podržením tlačítka vlevo nahoře. Popis ovládacího programu je ke stažení na webu fyzikálních praktik (prostudovat!) a je vytištěn u úlohy.

A. Měření úhlové frekvence nebuzeného oscilátoru

Tlumicí magnet oddalte co nejvíce od disku (je připevněn na šroubu). Budete zaznamenávat úhlovou výchylku disku v závislosti na čase. Pro ten účel nahrajte do měřicího programu soubor s nastavením *MereniA.cap*. Klikněte *Record*, pootočte disk asi o $\frac{1}{2}$ otáčky a uvolněte. Nechte proběhnout asi 15 kmitů a měření zastavte. Změřte dobu deseti celých kmitů pomocí nástroje *Coordinates*. Z hodnoty pak určete (doma) úhlovou frekvenci.

B. Určení torzní konstanty pružiny

Nahrajte soubor *MereniB.cap*. Uvidíte displej zobrazující úhlovou výchylku disku. Zapněte měření. Zavěste na horní konec jedné z pružin 20g závaží. Zaznamenejte úhel, o který se disk pootočí. Pak vypněte měření a odstraňte závaží.

C. Určení momentu setrvačnosti disku

Opište si z disku jeho hmotnost a změřte průměr pomocí posuvného měřítka (vydá vyučující). Nezapomeňte stanovit chybu měření.

D. Automatické měření rezonančních křivek

Nahrajte soubor *MereniD.cap*. Program v tomto nastavení budí systém a kreslí graf závislosti amplitudy výchylky disku na úhlové frekvenci budicího mechanismu. Po spuštění (*Record*) se frekvence zvyšuje od minimální do maximální hodnoty a pak se měření samo zastaví. Sběr dat trvá 500 sekund. Změřte dvě rezonanční křivky pro dvě hodnoty tlumení – vzdálenosti magnetu od disku: 5 a 3 mm. Druhou hodnotu 3 mm ponechte nastavenou pro úkol F. Pak kvalitativně zhodnoťte tvar křivek. Jak ovlivňuje velikost tlumení tvar křivek (šířku, maximální amplitudu, rezonanční frekvenci)? Nakonec analyticky vyhodnoťte rezonanční křivku pro tlumení 3 mm tak, že proložíte naměřená data očekávanou funkcí (7). V programu je třeba zvolit *User Defined Fit*. Před spuštěním fitování je třeba alespoň přibližně odhadnout a vložit počáteční hodnoty fitovaných parametrů. Opište si naitované parametry a použijte je pro stanovení rezonanční frekvence ω_0 a koeficientu tlumení b . Naměřená data ponechte v programu pro úkol E.



Obr. 2

E. Pozorování fázového rozdílu mezi buzením a úhlovou výchylkou disku

Použijte naměřená data z předchozího úkolu. Pro 3mm tlumení (*Run#2*) nechte zobrazit do grafu časový průběh úhlové výchylky snímače buzení (*Angle, Ch P2*) a snímače disku (*Angle, Ch P1*). Uvidíte dva harmonické průběhy. Podle pokynů vyučujícího vyberte v grafu místo pro měření (v čase kdy nastala rezonance, nebo pozdějším). Průběhy si vhodně zvětšete tak, abyste v okně grafu viděli asi 1,5 periody sinusovek. Pomocí nástroje *Coordinates* změřte periodu buzení a časové zpoždění mezi buzením a odezvou disku. Z těchto hodnot pak určíte doma frekvenci a fázový rozdíl φ .

F. Přímé měření koeficientu tlumení

Pro tlumení 3 mm zaznamenejte výchylku disku v závislosti na čase. Za tím účelem nahrajte soubor *MereniF.cap*. Pak vynulujte senzor. Vychylte disk asi o jednu otáčku (6,28 rad) doprava (ve směru hodinových ručiček) a držte jej. Zapněte měření (*Record*) a disk uvolněte. Až se kmitání disku zcela zastaví, záznam zastavte. Proveďte fitování harmonickým tlumeným průběhem (*Damped sine fit*). Nafitované parametry si opište.

Pracovní úkoly – analýza naměřených dat

- A) Z naměřené doby 10 kmitů určete úhlovou frekvenci.
- B) Vypočtete moment síly, kterým působilo závaží na disk, víte-li, že poloměr kladky disku je 24 mm. Vypočtete torzní konstantu pružiny podle definičního vztahu: $\kappa = M/\theta$. Používejte zásadně základní jednotky (radiány, Nm).
- C) Vypočtete moment setrvačnosti disku I podle vztahu (2). Stanovte jeho chybu pomocí věty o přenosu chyby na str. 17 skript.
- D) Uveďte zhodnocení tvaru rezonančních křivek. Z parametrů fitování druhé křivky (tlumení 3 mm) stanovte frekvenci ω_0 a koeficient tlumení b . Pro jeho výpočet použijte moment setrvačnosti I z úkolu C. Získanou frekvenci ω_0 porovnejte s teoretickou hodnotou ze vztahu (8), do kterého dosadíte výsledky z úkolů B a C.
- E) Změřené časové zpoždění mezi průběhy převedte na fázový posuv (v radiánech) a porovnejte s teorií (vztah 10). Do vztahu (10) použijte hodnoty I a b získané v úkolech C a D.
- F) Z nafitovaných parametrů vypočtete koeficient tlumení b a porovnejte s hodnotou získanou v úkolu D. Pro výpočet použijte moment setrvačnosti I z úkolu C. Z nafitovaných parametrů určete také úhlovou frekvenci tlumených kmitů a porovnejte ji s teoretickou hodnotou spočtenou ze vztahu (4). Do vztahu (4) dosazujte hodnoty získané v úkolech B, C, F.