

Literatura

- [1] Zemětřesení. [online], [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://geotech.fce.vutbr.cz/studium/geologie/skripta/ZEMETR.htm>.
- [2] Zemětřesení – Přírodní katastrofy a environmentální hazardy – multimediální výuková příručka. [online] [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/~herber/quake.htm>.
- [3] SEP Seismometer System. [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <http://bit.ly/lM3bwLY>.
- [4] Seismographs in Schools. [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <https://www.iris.edu/hq/sis/>.
- [5] TC1 Vertical Seismometer Plans. [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <https://tclseismometer.wordpress.com/>.
- [6] Slinky. Wikipedia. [online]. [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slinky/>.
- [7] Seznámení s Arduinem. [online]. [cit. 2015-1-21]. Dostupné z: <http://www.hwkitchen.com/news/arduino-uvod-1/>.
- [8] Kubínová, Š., Šlégr, J.: PhysDuino – Dostupný systém pro školní laborování založený na platformě Arduino. [online]. [cit. 2015-1-21]. Dostupné z: <http://lide.uhk.cz/prf/ucitel/slegrjal/physduino/>.
- [9] Šlégr, J.: Jednoduchý seismograf pro školní použití. [online]. [cit. 2015-1-21]. Dostupné z http://lide.uhk.cz/prf/ucitel/slegrj_al/seismo/.

Tři netradiční oscilátory – konstruktivistický přístup k výuce fyziky

ČENĚK KODEJŠKA – GIORGIO DE NUNZIO

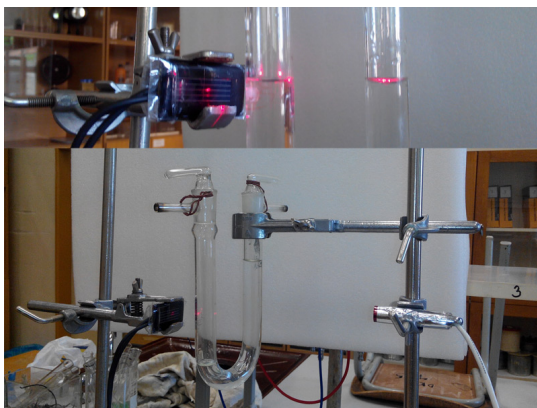
Gymnázium, Nový Bydžov – Università del Salento, Itálie

(Dokončení z minulého čísla)

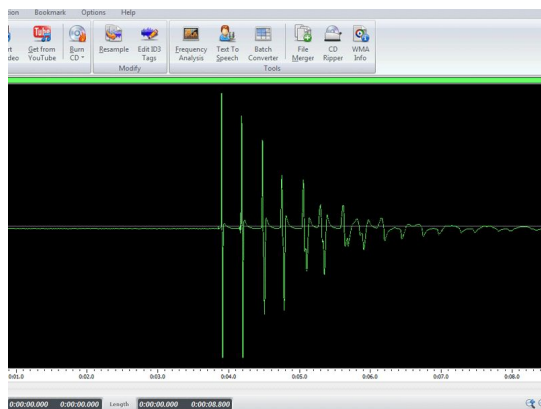
3. Určení logaritmického dekrementu útlumu kmitů vodního sloupce v U-trubici

Pro realizaci kmitů v U-trubici jsme použili U-trubici opatřenou kouty se zábrusem, které nám umožnily udržet výchylku vodního sloupce

v trubici. Oscilátor jsme pak aktivovali otočením kohoutu. Nejprve jsme v rovnovážné poloze kapaliny zaměřili laserový paprsek na meniskus v jednom rameni U-trubice. Pak jsme vytvořili v trubici fouknutím přetlak nebo nasátím podtlak, a v jednom rameni jsme uzavřeli kohout. Druhý musí zůstat trvale otevřený nebo musí být druhé rameno bez kohoutu. Voda tak zůstane v nerovnovážné poloze s výchylkou y . Po spuštění měření v programu FAE jsme otevřeli kohout a nechali proběhnout tlumené kmity vodního sloupce. Uspořádání experimentu je na obr. 6 a oscilogram kmitů můžete vidět na obr. 7.



Obr. 6 Kmity vodního sloupce v U-trubici s detailem rovnovážné polohy



Obr. 7 Oscilogram kmitů vodního sloupce v U-trubici

Vnitřní průměr trubice jsme určili posuvným měřidlem, kterým jsme změřili průměr spodního konce kónického zábrusu, jehož rozměr je totožný s vnitřním průměrem U-trubice. Kmity jsou dobře registrovatelné i bez obarvení vody a na obr. 7 je vidět i rychlý pokles amplitudy.

Pro vlastní odečet amplitudy je třeba v programu FAE změnit obvyklou vertikální stupnici z hodnoty *Sample Values* nebo *Decibel Values* na *Normalized values*. Nastavení provedeme na záložce nazvané *Options*, která obsahuje kartu pojmenovanou *Editor View*. Na ní se nachází dvě tlačítka: *Horizontal Scale* a *Vertical Scale*. Normalizovaná stupnice na vertikální škále má rozsah od 0 do 110 normalizovaných jednotek. Vzhledem k tomu, že při výpočtu koeficientu útlumu počítáme s poměrem dvou po sobě jdoucích amplitud, je jednotka stupnice nevýznamná. V dalším kroku jsme porovnali naměřenou hodnotu periody tlumených kmitů s výpočtem podle vztahu (14) nebo (15). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2 Určení logaritmického dekrementu útlumu a periody tlumených kmitů

Č. měř.	A_n	A_{n+1}	δ	T_{exp} (s)	b (s^{-1})	T (s)
1	100	90	0,105	0,575	0,183	0,595
2	107	95	0,119	0,571	0,208	0,595
3	105	85	0,211	0,575	0,367	0,595
4	107	90	0,173	0,576	0,300	0,595
5	107	95	0,119	0,568	0,210	0,595
6	60	47	0,244	0,650	0,375	0,677
7	74	47	0,454	0,645	0,704	0,678
8	73	45	0,484	0,644	0,752	0,678
9	65	47	0,324	0,649	0,499	0,677
10	60	45	0,288	0,661	0,436	0,677

Objem kapaliny v trubici u měření 1 až 5 byl $V = 31$ ml, u měření 6 až 10 byla jeho hodnota $V = 40$ ml. Vnitřní průměr trubice měl velikost $d = 15 \cdot 10^{-3}$ m. Z těchto hodnot lze určit délku vodního sloupce jako $l = 4V/\pi d^2$, která pro prvních pět měření měla hodnotu $l = 0,176$ m, které odpovídá perioda netlumených kmitů $T_0 = 0,595$ s. Pro dalších pět měření vychází délka vodního sloupce $l = 0,227$ m a perioda $T_0 = 0,676$ s.

Odečet amplitud A_n a A_{n+1} jsme provedli u prvních pěti měření nejprve pro první dvě největší hodnoty a pro dalších pět měření jsme amplitudy odečítali na třetím a čtvrtém píku. Logaritmický dekrement útlumu δ jsme určili z rovnice (10), ze které jsme vypočítali i koeficient tlumení b ze vztahu $b = \delta/T_{\text{exp}}$. Hodnota periody T_{exp} byla určena experimentálně v programu FAE, hodnota periody T byla vypočítána ze vztahu (15).

Z výsledků naměřených hodnot je patrné, že experimentálně určená perioda T_{exp} je vždy menší než T_0 , což odporuje teoretickému závěru, který plyne z rovnice (14) nebo (15). Vysvětlení tohoto závěru se nám prozatím nepodařilo najít. Průměrná hodnota periody tlumených kmitů byla určena v případě prvních pěti měření jako $T = (0,595 \pm 0,002)$ s, v případě druhých pěti měření jsme dospěli k $T = (0,650 \pm 0,003)$ s. Z výše uvedeného vyplývá, že výpočet periody tlumených kmitů podle výše zmíněných vztahů potvrzuje hypotézu, že koeficient tlumení b má na velikost periody zanedbatelný vliv a platí $T \doteq T_0$. Ke stejnému závěru dospěli i Tesař a Bartoš, viz [3].

Dále můžeme konstatovat, že logaritmický dekrement útlumu δ vypočítaný z poměru A_3 a A_4 je v průměru 2,5krát větší než ten, který je určený z poměru A_1 a A_2 . Tento rozdíl může být sice způsoben rozdílným množstvím kapaliny v trubici u prvních pěti a posledních pěti pokusů, ale ověřili jsme si, že i v rámci daných pěti měření není tato veličina konstantní, jak předpokládá teorie, ale hodnota δ je u poměru třetího a čtvrtého píku přibližně dva krát větší než u poměru prvního a druhého píku.

Předpokládáme, že se zde při pohybu kapaliny v U-trubici projevují další jevy (např. tření mezi stěnou trubice a kapalinou, viskozita kapaliny), které ovlivňují jak tlumení, tak periodu reálných kmitů.

4. Určení poloměru a momentu setrvačnosti prstence z periody jeho kmitů

Pro poslední problémovou úlohu jsme zvolili určení poloměru R a momentu setrvačnosti prstence J_0 vzhledem k ose otáčení procházející jeho těžištěm. To se v ideálním případě nachází mimo vlastní těleso prstence přímo v jeho středu.

Největším problémem pro studenty bylo odvození pohybové rovnice kmitů prstence, protože fyzické kyvadlo není standardním obsahem tematických plánů, a teorii bylo potřeba studentům speciálně vysvětlit.

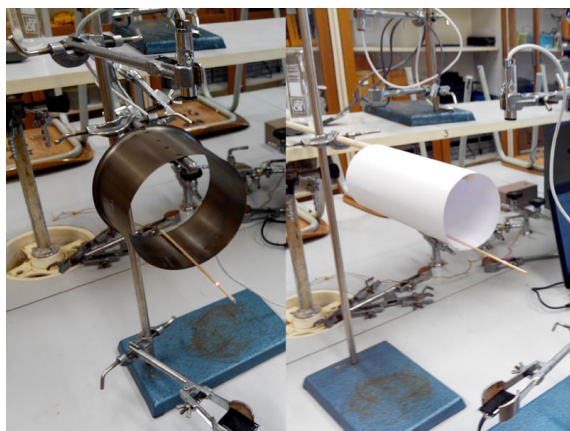
Pak se již mohli zabývat vlastní realizací experimentu a navrhnout materiál nebo předmět, ze kterého bude možné prsteneček vyrobit. Z několika

různých variant jsme pak vybrali kovový nástavec, který se běžně používá na vstupu do komínového tělesa, a papírový prstenec vyrobený z tvrdé čtvrtky. I zde byl uplatněn konstruktivistický princip, že studenti museli najít takové řešení, které je levné a snadno realizovatelné.

Prstenec jsme opatřili špejlí, která při kmitání přerušovala paprsek optické brány. Délka špejle by měla být zejména v případě lehkého papírového prstence co nejkratší, aby její hmotnost nezkreslovala vlastní měření. V případě papírového prstence jsme na základě několika cvičných experimentů dospěli k závěru, že krátké prstence jsou díky své malé hmotnosti nevhodné, a špejle připevněná izolepou k vnitřní straně prstence značně zvyšuje chybu měření. Proto jsme finální laboratorní cvičení provedli s prstencem vyrobeným z celé čtvrtky formátu A4. I zde platí, co bylo řečeno v minulé kapitole. Před vlastním cvičením je třeba věnovat minimálně jedno laboratorní cvičení přípravě experimentu, výrobě prstenců a nácvičku správného rozkmitání prstence.

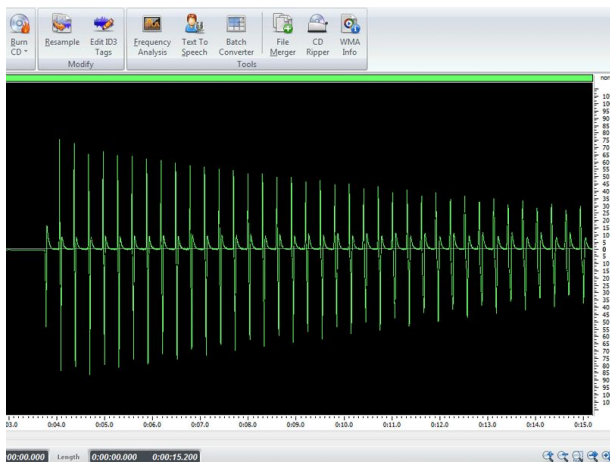
Naši poslední hypotézou bylo, že vlivem připevněné špejle (a u papírového prstence i vlivem jeho nízké hmotnosti) bude relativní chyba měření větší než 10 %, a že i tento experiment patří spíše do oblasti teoretického procvičení a pro experimentální ověření fyzikální veličiny, jako je např. moment setrvačnosti prstence, se nehodí.

Uspořádání experimentu můžeme vidět na obr. 8, kde je v levé polovině zobrazen kovový prstenec a v pravé je provedení s papírovou variantou. Průběh kmitů je vyobrazen na obr. 9.



Obr. 8 Experimentální uspořádání kmitů prstence

Prstenec byl zavěšen na 1 m dlouhých, kulatých tyčích o průměru 8 mm nebo 10 mm, které se používají k uchycení koberce na schodišti. V případě papírového provedení se také osvědčilo připevnit špejle na tu stranu prstence, kde byl izolepou slepen dohromady. Na protější straně prstence pak nic nebrání hladkému průběhu kmitavého pohybu.



Obr. 9 Oscilogram kmitů prstence zavěšeného na vodorovné tyči

Experimentálně zjištěné hodnoty pro oba prstence jsou uvedeny v tabulce 3. Kovový prstenec o poloměru $R_1 = (65 \pm 1)$ mm měl hmotnost $m_1 = (143,2 \pm 0,5)$ g, papírový prstenec o poloměru $R_2 = (45 \pm 2)$ mm vážil $m_2 = (12,1 \pm 0,5)$ g, přičemž hmotnost byla měřena digitálními váhami bez připevněné špejle. Hmotnost špejle jsme při výpočtech považovali vzhledem k hmotnosti prstenců za zanedbatelnou. Poloměry jsme určili z průměrů prstenců, které jsme změřili pomocí posuvného měřidla.

Periodu kmitů jsme zaznamenávali v programu FAE a následně jsme z rovnice (20) vypočítali poloměr prstence. Známe-li poloměr prstence a periodu kmitů, můžeme ze vztahu (19) vypočítat nejprve moment setrvačnosti J prstence vzhledem k ose otáčení, která neprochází těžištěm, a pak ze vztahu

$$J_0 = J - md^2 = J - mR^2$$

i moment setrvačnosti vzhledem k ose otáčení procházející těžištěm prstence. Tuto hodnotu pak můžeme porovnat s teoreticky vypočítanou hodnotou ze vztahu (18).

Tabulka 3 Určení momentu setrvačnosti prstenců

kovový prsteneček			papírový prsteneček		
$\frac{T}{s}$	$\frac{J}{10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{J_0}{10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{T}{s}$	$\frac{J}{10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{J_0}{10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$
0,689	99,8	49,9	0,612	52,5	26
0,690	100,4	50,2	0,609	51,5	26
0,690	100,4	50,2	0,611	52,2	26
0,687	98,7	49,3	0,610	51,8	26
0,691	101,0	50,5	0,610	51,8	26
0,689	99,8	49,9	0,612	52,5	26
0,686	98,1	49,1	0,605	50,2	25
0,685	97,5	48,8	0,607	50,8	25

Absolutní chybu jednotlivých hodnot momentu setrvačnosti J určíme z rovnice (23) a podobně pro určení chyby měření v případě J_0 vyjdeme ze vztahu (24):

$$\Delta J = J \left(\frac{2\Delta T}{T} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (23)$$

$$\Delta J_0 = J_0 \left(\frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta R}{R} \right) \quad (24)$$

Průměrná hodnota momentu setrvačnosti vzhledem k ose otáčení neprocházející těžištěm stanovená ze všech měření má v případě kovového prstence velikost $J = (100 \pm 1) \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, analogicky stanovená průměrná hodnota momentu setrvačnosti vzhledem k ose otáčení procházející těžištěm byla určena jako $J_0 = (50 \pm 1) \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Hodnota J_0 vypočítaná z rovnice (18) má velikost $J_0 \doteq 61 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

I když relativní chyba měření δJ_0 činí pouze 1,2 %, z porovnání experimentálně naměřené hodnoty a teoreticky vypočítané hodnoty J_0 plyne, že experimentální hodnota je o cca 18 % menší než teoreticky vypočítaná.

Závěr

Zabývali jsme se třemi novými experimenty se zvukovou kartou, jejichž teoretické i experimentální provedení vychází z konstruktivistického pojetí teorie učení. U každého experimentu jsme na základě dosavadních zkušeností s obdobnými experimenty, viz [1, 2], stanovili hypotézu o velikosti relativní chyby měření a použitelnosti zajímavého myšlenkového experimentu pro reálné fyzikální měření v podmínkách školní laboratoře.

Výhodou všech experimentů byla opět cenová dostupnost použitých pomůcek a základního vybavení, jednoduchost provedení experimentů a možnost jejich realizace v rámci laboratorních cvičení. Novým přístupem tentokrát bylo to, že sami žáci museli na základě teoretické přípravy navrhnout postup provedení a cenově dostupné pomůcky k uskutečnění experimentu.

Experimenty byly nejprve studentům předloženy v teoretické rovině jako myšlenkový experiment. Žáci měli odvodit, na základě řešení lineární homogenní diferenciální rovnice, výsledný vztah pro periodu netlumených kmitů. Z takto získaného vztahu byla pak určena veličina, jejíž velikost měli na základě měření periody kmitů daného oscilátoru vypočítat a na závěr určit i chybu měření.

V prvním experimentu jsme zkoumali kmity zkumavky v kapalině, ze kterých jsme určovali hustotu kapaliny. Zde se jako nejtěžší pro žáky ukázalo být vyvážení zkumavky, aby kmitala svisle, a při pohybu se neky-mácela ze strany na stranu, což se při teoretickém výkladu vůbec nepředpokládalo. Průměrná hodnota hustoty vody určené tímto způsobem byla $\rho = (1020 \pm 30) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Relativní chyba měření činí $\delta\rho = 3 \%$, což je v dobrém souladu s měřením realizovaným ve školní laboratoři.

Druhý experiment se zabýval kmity kapalinového sloupce v U-trubicí. Žáci pomocí naměřené periody a velikosti amplitud určovali logaritmický dekrement útlumu a koeficient tlumení, a vyhodnocovali vliv tohoto parametru na velikost periody. V souladu s obecně známými fakty (viz např. [3]), jsme dospěli k závěru, že experimentálně naměřená hodnota periody tlumených kmitů a teoreticky vypočítaná hodnota netlumených kmitů se neliší o více než o 4 % (což je odchylka v rámci chyby měření), takže platí $T \doteq T_0$.

Ve třetím experimentu jsme řešili kmity tenkého prstence zavěšeného na vodorovné tyči. Pro kovový prstenec jsme získali díky jeho tvaru odchylku od teoretické hodnoty momentu setrvačnosti vůči ose otáčení procházející těžištěm tělesa J_0 cca 10 %, v případě papírového prstence, vytvořeného

ze čtvrtky papíru, se experimentálně zjištěná hodnota J_0 se 4 % relativní chybou měření shodovala s teoreticky vypočítanou hodnotou.

Závěrem můžeme konstatovat, že při velké pečlivosti provádění experimentů a zejména na základě důkladné předchozí přípravy a předběžného testování, lze úspěšně realizovat fyzikální měření s relativní chybou do 4 %. Nepotvrdila se tedy naše původní hypotéza, že myšlenkové experimenty slouží pouze k teoretickému procvičení nabytých znalostí žáků a pro reálné měření nejsou vhodné. Ověřili jsme, že pomocí takovýchto experimentů, jsou-li provedeny výše uvedeným způsobem, lze dosáhnout ve školní laboratoři uspokojivých výsledků.

Výše popsané experimenty mohou být použity jako dobrý námět pro teoreticko-experimentální činnost v rámci semináře z fyziky na gymnáziu nebo jako laboratorní praktikum v prvním nebo druhém ročníku vysoké školy.

Experimentální ověřování probíhalo v součinnosti s Katedrou matematiky a fyziky na Univerzitě v Salentu, která se připojila do malého mezinárodního průzkumu, zaměřeného na dlouhodobé zkoumání vlivu realizace experimentů s využitím počítače na výběr přírodovědně zaměřených oborů při rozhodování o dalším studiu na vysoké škole. Výzkum v rámci České republiky byl již ukončen, italsí studenti budou průzkumu podrobeni během následujících několika týdnů. Výsledky tohoto výzkumu by měly být známy během několika dalších měsíců a naši další společnou snahou bude tyto závěry publikovat v odborném zahraničním periodiku, zaměřeném na didaktiku fyziky a výuku fyziky na středních školách.

Literatura

- [1] *Kodejška, Č.*: Tři nové fyzikální experimenty se zvukovou kartou PC. MFI, 24 (2015), s. 109–123.
- [2] *Kodejška, Č. a kol.*: Fyzikální experimenty se zvukovou kartou PC. MFI, 22 (2013), s. 343–350.
- [3] *Tesař, J., Bartoš, P.*: Kmitavý pohyb trochu jinak. [online]. [cit. 03. 05. 2015] Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/13-31-Tesar.html>.
- [4] *Šedivý, P. a kol.*: Harmonické kmity mechanických soustav. Knihovnička Fyzikální olympiády č. 44, MAFY, Hradec Králové, 2000, s. 12–13.