FYZIKA

Nové vydání učebnice Mechanické kmitání a vlnění

OLDŘICH LEPIL

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

Učebnice *Fyzika pro gymnázia – Mechanické kmitání a vlnění* je součástí osmidílného souboru monotematických učebnic. Vydalo ji nakladatelství Prometheus, které vzniklo před 25 lety v září 1993 a gymnaziální učebnice patří k jeho prvním nakladatelským počinům. Uplynulých 25 let prověřilo kvalitu těchto učebnic, které byly průběžně inovovány a patří k základnímu fondu učebnic pro střední školy. Učebnice Mechanické kmitání a vlnění vyšla v prvním vydání v roce 1994 a navazuje na tzv. „federální“ učebnice, které byly vytvořeny v průběhu 80. let minulého století v gesci Výskumného ústavu pedagogického v Bratislavě (podrobněji viz [1]). Původní učební text byl výrazněji inovován v roce 2001, kdy vyšlo třetí, upravené vydání učebnice.

Nové, páté přepracované vydání završuje současnou inovaci učebnic fyziky pro gymnázium, kterou nakladatelství Prometheus realizuje od roku 2013. V přepracovaném vydání vyšlo celkem pět z celkového souboru osmi monotematických učebnic pro gymnázia (viz katalog nakladatelství Prometheus: http://www.prometheus-nakl.cz). Inovované učebnice představují netradiční komplexní učební pomůcku, jejíž standardní knižní podobu doplňují další elektronické učební materiály na přiloženém CD. I za poměrně krátkou dobu, po kterou inovované učebnice vycházejí, však došlo k výraznému posunu ve vývoji prostředků pro prezentaci elektronických materiálů, jako jsou nové typy notebooků bez mechaniky CD, tablety a čtečky e-knih. To by mohlo ztěžovat praktické využití přiloženého CD. Proto nakladatelství připravilo pro uživatele učebnic možnost, jak získat

elektronickou část učebnice přímo z úložiště nakladatelství. Můžete si ji ke konkrétní učebnici stáhnout z adresy http://www.prometheus-data.cz/. Příslušný postup je zde u každé učebnice uveden. Je ovšem možné také překopírovat CD z počítače vybaveného mechanikou CD na flash disk, popř. přímo do tabletu nebo čtečky.

Výběr a zpracování učiva v knižní části učebnice odpovídá poznatkům, které uvádí Rámcový vzdělávací program pro gymnázia (RVPG; viz [2, s. 28]). Ten však vymezuje vzdělávací obsah tematického celku Mechanické kmitání a vlnění tak stručně, že je pro zpracování školního vzdělávacího programu (ŠVP) učitelem prakticky bezcenný. Proto lze považovat za výchozí učební materiál pro tvorbu osnov v ŠVP spíše obsah a pojetí učiva, jak ho prezentuje knižní část učebnice.

Mechanické kmitání a vlnění patří k nejstarším tématům ve vývoji obsahu školské fyziky, s poznatky sahajícími až do starého Řecka. Je možné diskutovat o tom, co ještě dnes patří do učiva na střední škole s všeobecným zaměřením, a co už je spíše jen seznámení s historií vývoje fyziky, s poznatky z části již bez valného přínosu k potřebám technologicky rozvinuté společnosti. Typickým příkladem takového historizujícího učiva jsou poznatky o kyvadle, které snad jediné ve vztahu k této učebnici vyvolalo určité diskuse (viz [3]). Ty se ani tak netýkaly standardního metodického postupu, kterým se dospěje ke vztahu pro periodu kyvadla, v současnosti už s problematickým praktickým významem, ale v podstatě jen obrázku zobrazujícího síly, které na kyvadlo působí.

Je na učiteli, zda kyvadlo vůbec do výuky zařadí, poněvadž RVPG to explicitně nepožaduje. Nicméně kyvadlo je jednoduchý fyzikální objekt spjatý s osobností Galilea Galileiho, s historií měření času apod. Z didaktického hlediska je cenná možnost realizovat ve školních podmínkách jednoduché experimentální měření tíhového zrychlení. To je také důvod, proč učivo o kyvadle i v novém vydání učebnice přetrvává v podobě modelu, o který se opírá vytváření pojmů *mechanický oscilátor* a *harmonické kmitání*. V učebnici je také nově zpracováno laboratorní cvičení s kyvadlem s použitím měřicího systému Vernier (viz dále).

Harmonické kmitání kyvadla předpokládá, že počáteční výchylka kyvadla je malá. Při demonstracích však učitelé většinou volí výchylku větší, při níž už pohyb kyvadla přesně neodpovídá teorii uvedené v textu učebnice a jeho perioda se prodlužuje. Se zřetelem k tomu je Cvičení 2 na CD nově rozšířeno o řešený příklad 5 (viz dále).

Celkově lze učivo o mechanickém kmitání a vlnění chápat hlavně jako propedeutiku k učivu, které je pro současnost podstatně významnější, a je jím učivo o elektromagnetickém kmitání a vlnění. Takovou koncepci mělo zpracování tohoto učiva ve zmíněných „federálních“ učebnicích, kde bylo mechanické kmitání součástí integrované poznatkové soustavy o periodických dějích. RVPG však tuto koncepci vrátil zpět až do 19. století, když ho řadí do úvodního tematického celku středoškolské fyziky, čili do mechaniky.

Pro nové vydání učebnice je charakteristický podstatně zmenšený rozsah knižní části, odpovídající přibližně 2/3 rozsahu 3. vydání učebnice. Samotná struktura učiva se nezměnila a zahrnuje opět tři základní tematické celky: 1. Kmitání mechanického oscilátoru, 2. Mechanické vlnění, 3. Zvukové vlnění. Do knižní části nejsou zahrnuta Teoretická cvičení a Laboratorní cvičení, která byla přesunuta mezi doplňující elektronické materiály na CD (obr. 1).

Obr. 1

Rozšiřující učivo

Klíčovou součástí učebních materiálů na CD je *Rozšiřující učivo*, obsahující poznatky, které nejsou do RVPG zahrnuty. Učiteli je tak dána možnost využít tyto materiály při výuce podle individuálně koncipovaných ŠVP. Z učiva o mechanickém kmitání oscilátoru jsou zde zpracovány zejména poznatky o složeném kmitání a podrobněji jsou vyloženy poznatky o tlumeném kmitání a rezonanci mechanického oscilátoru. Výklad mechanického vlnění je rozšířen o chvění mechanických soustav, odraz, lom a ohyb vlnění, což jsou významné pojmy pro pozdější výklad vlnové optiky.

Zcela nově jsou zpracovány tři články učiva akustiky: 1. Hudební akustika, 2. Zdroje zvuku v hudební akustice a 3. Fyziologická akustika. Na základě historických souvislostí jsou objasněny základní pojmy hudební akustiky – *hudební interval* a *tónová stupnice*. Konsonance a disonance tónů je ilustrována časovými diagramy hudebních intervalů vytvořenými programem MS Excel. V dalším článku jsou vyloženy fyzikální principy vybraných hudebních nástrojů. Vedle klasických strunných a dechových nástrojů jsou popsány také typy elektroakustických hudebních nástrojů. Ve třetím článku jsou poznatky o sluchovém orgánu doplněny výkladem pojmů *binaurální slyšení* a *stereofonie*. Rozšiřující učivo uzavírá výklad *Dopplerova jevu*, obsažený již v předchozích vydáních učebnice.

Teoretická cvičení

Změny ve výběru řešených příkladů a úloh teoretických cvičení jsou minimální. Je využita možnost použít u obrázků více barev, takže některé časové diagramy jsou pro lepší přehlednost nově vygenerovány pomocí programu MS Excel. V Cvičení 1 (úloha 6) jsou nově uvedeny zvětšené obrazové předlohy časových diagramů harmonických kmitání s poměrem frekvencí 1 : 2, 1 : 3 a 2 : 3. Předlohu si žáci mohou vytisknout a s využitím sítě souřadnic vyhledat body grafu, který odpovídá superpozici obou kmitání.

Do Cvičení 2 je nově zařazen příklad 5, který řeší pohyb jednoduchého kyvadla při větší počáteční výchylce, než odpovídá požadavku na vznik harmonického kmitání. Příklad uvádíme v plném znění.

Příklad 5

V učivu o kyvadle jsme se zabývali jen pohybem kyvadla s malou počáteční výchylkou. Uvažujte nyní jednoduché kyvadlo o délce 1 m, jehož počáteční úhlová výchylka je 60°. Těleso kyvadla má hmotnost 0,1 kg. Určete velikost a směr výsledné síly, která na těleso kyvadla působí při okamžité výchylce 30° ($g \doteq 10\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$).

Řešení

$l = 1$ m, $m = 0{,}1$ kg, $\alpha_\mathrm{m} = 60°$, $\alpha = 30°$; $F = ?$, $\beta = ?$

Při velké počáteční výchylce kyvadla se těleso kyvadla pohybuje zrychleným pohybem po kružnicové trajektorii o poloměru odpovídajícím délce l kyvadla. V počátečním okamžiku je těleso kyvadla v klidu a působí na něj jen tíhová síla $\boldsymbol{F}_G$, kterou rozložíme na radiální složku $\boldsymbol{F}_\mathrm{r}$ ve směru vlákna a tečnou složku $\boldsymbol{F}_\mathrm{t}$ ve směru tečny k trajektorii. Radiální složka napíná vlákno kyvadla a její pohybový účinek se ruší tahovou silou $\boldsymbol{T}$ vlákna (obr. C2-3). Když se těleso kyvadla začne pohybovat, zvětšuje se jeho rychlost a na těleso působí kromě uvedených sil ještě síla dostředivá $\boldsymbol{F}_\mathrm{d}$, která má v každém okamžiku stejný směr jako tahová síla. Pro velikost tahové síly platí

$$T = F_\mathrm{d} + F_\mathrm{r} = \frac{mv^2}{l} + mg\cos\alpha.$$

Velikost tahové síly se tedy s rostoucí rychlostí kyvadla postupně zvětšuje a při průchodu kyvadla rovnovážnou polohou je největší, zatím co tečná síla je v tomto okamžiku nulová.

Velikost dostředivé síly určíme ze zákona zachování mechanické energie. V počátečním okamžiku je těleso kyvadla ve výšce h_0 nad rovnovážnou polohou a jeho potenciální energie vzhledem k rovnovážné poloze

$$E_\mathrm{p0} = mgh_0 = mg(l - l\cos\alpha_\mathrm{m}) = mgl(1 - \cos\alpha_\mathrm{m}). \tag{1}$$

Jakmile se těleso kyvadla začne pohybovat, zmenšuje se jeho potenciální energie, která se mění na energii kinetickou. Pro celkovou energii kyvadla pak platí

$$E_\mathrm{p0} = E_\mathrm{k} + E_\mathrm{p} = \frac{1}{2}mv^2 + mgl(1 - \cos\alpha). \tag{2}$$

Úpravou rovnic (1) a (2) dostaneme pro velikost dostředivé síly vztah

$$F_\mathrm{d} = \frac{mv^2}{l} = 2mg(\cos\alpha - \cos\alpha_\mathrm{m})$$

a po dosazení

$$F_\mathrm{d} = 2 \cdot 0{,}1 \cdot 10 \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}\right) \text{ N} \doteq 0{,}73 \text{ N}.$$

Tečná složka tíhové síly má v tomto okamžiku velikost

$$F_\mathrm{t} = mg\sin\alpha = 0{,}50 \text{ N}.$$

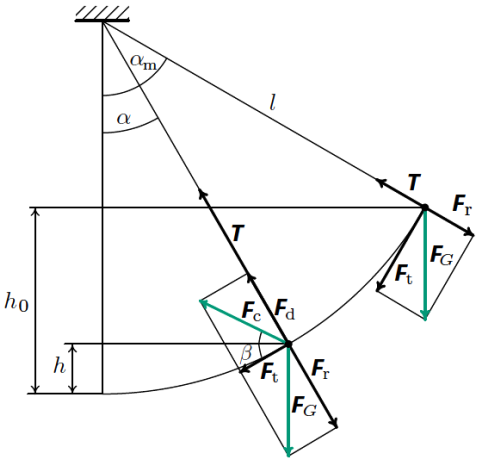
Část tahové síly je kompenzována radiální složkou tíhové síly, takže velikost celkové síly F_c působící na těleso kyvadla

$$F_\mathrm{c} = \sqrt{F_\mathrm{d}^2 + F_\mathrm{t}^2} = \sqrt{0{,}73^2 + 0{,}50^2} \text{ N} \doteq 0{,}88 \text{ N}.$$

Celková síla svírá se směrem tečny k trajektorii úhel β, pro který platí

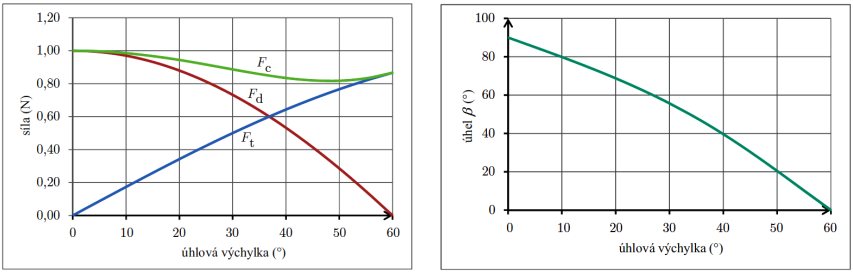
$$\operatorname{tg}\beta = \frac{F_\mathrm{d}}{F_\mathrm{t}} = \frac{0{,}73}{0{,}50} \doteq 1{,}46 \Rightarrow \beta \doteq 56°.$$

Při okamžité úhlové výchylce 30° působí na těleso kyvadla celková síla 0,88 N, která se směrem tečny k trajektorii svírá úhel přibližně 56°.



Obr. C2-3

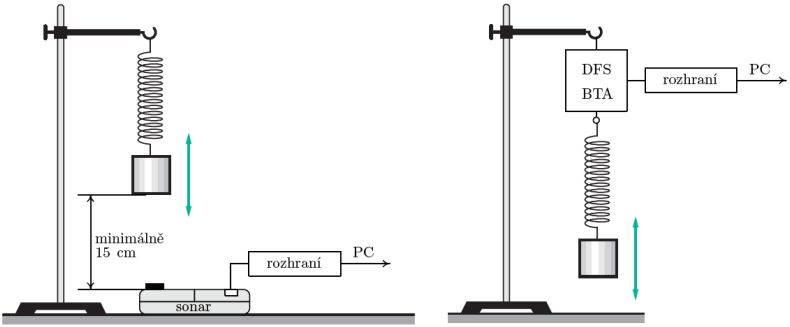
Poznámka: Graf změny velikosti tečné síly F_t, dostředivé síly F_d, celkové síly F_c a úhlu β v průběhu čtvrtiny periody kyvadla je na obr. C2-4. Graf byl vytvořen pomocí modelu M3.6 (viz Modely kmitání oscilátorů).



Obr. C2-4

Laboratorní cvičení

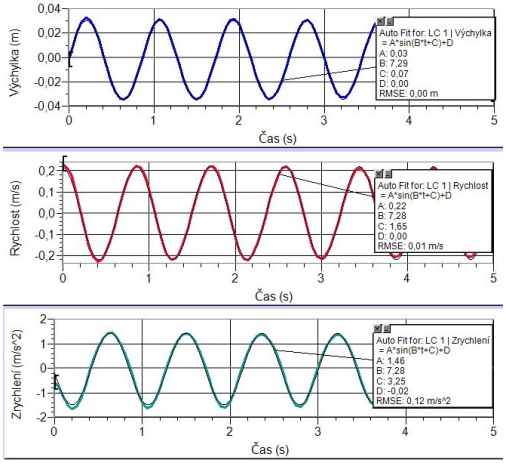
Laboratorní cvičení k učivu o mechanickém kmitání a vlnění patří k oblíbeným a léty prověřeným úlohám. V novém vydání učebnice jsou tyto úlohy rozšířeny o experimenty podporované počítačovým měřicím systémem Vernier. Nově je zařazeno Cvičení 1 *Kmitání pružinového oscilátoru*, jehož cílem je praktické seznámení se systémem Vernier a jeho senzory. Úloha je navržena ve dvou variantách, s použitím senzoru polohy a pohybu a s použitím siloměru DFS-BTA (obr. L1-1).



Obr. L1-1

Získaný záznam kmitání žáci vyhodnotí programem Logger Pro a fitováním získají rovnice pro jednotlivé kinematické veličiny kmitání pružinového oscilátoru (obr. L1-3). Ze získaných konstant je nejzajímavější konstanta C, která určuje počáteční fázi jednotlivých veličin v radiánech. Výpočtem žáci určí fázový rozdíl mezi veličinami v násobcích π ($\Delta\varphi = k\pi$). S využitím dat na obr. L1-3 např. vychází pro fázový rozdíl výchylky a rychlosti oscilátoru

$$k = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\pi} = \frac{1{,}65 - 0{,}07}{\pi} \doteq 0{,}50.$$

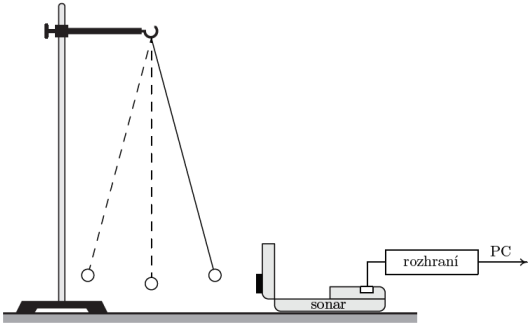


Obr. L1-3

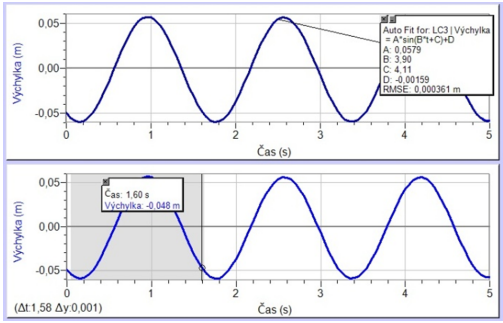
Obdobným způsobem je v úloze 3 *Ověření vztahu pro periodu kyvadla* určeno tíhové zrychlení. Záznamem pohybu kyvadla podle obr. L3-1 se získá časový diagram kmitání (měření bylo provedeno s kyvadlem o délce závěsu $l = 0{,}65$ m) a fitováním se určí příslušná rovnice kmitání (obr. L3-3). Z ní je patrné, že konstanta B určuje úhlovou frekvenci ω kmitání kyvadla. Při známé délce l kyvadla je tíhové zrychlení určeno výpočtem:

$$g = \omega^2 l = 3{,}90^2 \cdot 0{,}65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \doteq 9{,}89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Výsledek se liší od hodnoty tíhového zrychlení v naší zeměpisné šířce přibližně o 1 %.



Obr. L3-1

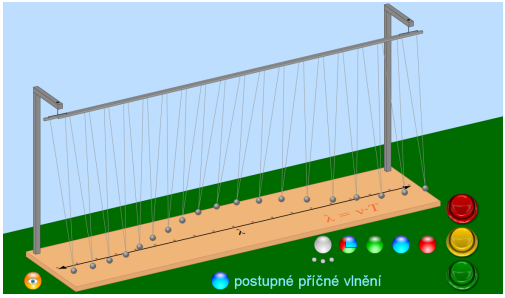


Obr. L3-3

Na přípravě laboratorních cvičení podporovaných měřicím systémem Vernier se podíleli náměty, konzultacemi i ověřováním navržených experimentů *RNDr. Čeněk Kodejška, Ph.D.* a *Mgr. Václav Pazdera*. Autor oběma děkuje za spolupráci.

Animace

Významnou podporou názorné výuky učiva o mechanickém kmitání a vlnění jsou animace, které znázorňují většinu klíčových fyzikálních dějů tohoto učiva. Autorem velmi kvalitních animací je učitel Střední průmyslové školy ve Zlíně *RNDr. Vladimír Vaščák*, který na svých webových stránkách (`https://www.vascak.cz/`) prezentuje velké množství dalších, volně dostupných výukových materiálů. Po dohodě s autorem byl proveden výběr vhodných animací k učebnici a některé animace byly vytvořeny nově, popř. byly upraveny tak, aby byly v souladu s textem učebnice. Příkladem může být zdařilá animace pro výklad postupného podélného i příčného vlnění (obr. 2).



Obr. 2

Na CD je celkem 21 animací, z nichž 14 se týká mechanického kmitání a 7 mechanického vlnění. Animace jsou připraveny ke spuštění v operačních systémech Windows jako spustitelné EXE-soubory. Některé prohlížeče nedovolují z bezpečnostních důvodů přímo spouštět soubory z prohlížeče, v takovém případě je vždy možné soubor spustit přímo ve složce Animace na CD.

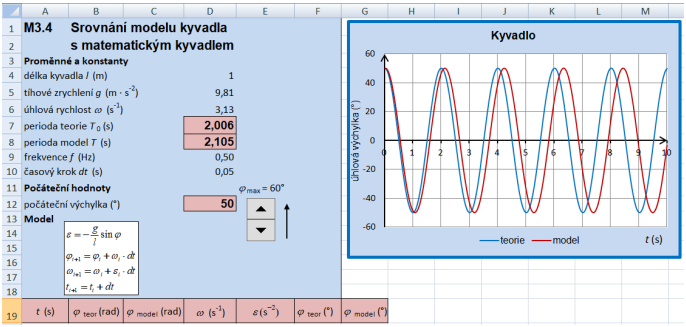
Modely kmitání oscilátorů

Všechny předcházející inovované učebnice s CD obsahují také videoexperimenty speciálně vytvořené pro jednotlivé učebnice. V případě učebnice Mechanické kmitání a vlnění bylo od zařazení videoexperimentů upuštěno, poněvadž na webu je k dispozici velké množství videozáznamů k tomuto učivu, i když je třeba k mnohým přistupovat kriticky. Nově místo toho byly zařazeny interaktivní modely, které si učitel i žáci mohou modifikovat, popř. i sami vytvářet.

Počítačové modely k tomuto učivu byly již v minulosti součástí 1. vydání učebnice z r. 1994. Bylo to vlastně u nás poprvé, co přímo do učebnice byly takové interaktivní počítačové modely zařazeny. Modely v 1. vydání učebnice byly vytvořeny programem FAMULUS, který ovšem v současnosti již použít nelze a jeho vhodná náhrada není k dispozici. Proto byly pro tvorbu modelů metodou *dynamického modelování* [4] použity standardní tabulkové kalkulátory, které jsou aplikacemi tzv. kancelářských balíků s univerzálním použitím. V praxi nejrozšířenější je tabulkový kalkulátor MS Excel, který však není volně šiřitelným programem. Proto jsou modely souběžně připraveny také pro tabulkové kalkulátory kancelářského balíku LibreOffice Calc, popř. OpenOffice Calc.

Soubor modelů tvoří čtyři sešity, které lze otevírat z menu CD, popř. hypertextovým odkazem v úvodním textu k modelům nebo přímo z podadresářů na CD, odpovídajících použitému tabulkovému kalkulátoru. Sešity obsahují následující témata: M1 *Harmonický pohyb* (2 modely), M2 *Složené kmitání* (6 modelů), M3 *Vlastní kmitání oscilátoru* (6 modelů), M4 *Nucené kmitání oscilátoru* (3 modely).

Všechny modely mají jednotné zpracování, využívající prvních 19 řádků k přehledu veličin, z nichž některé lze měnit pomocí posuvníků. Uveden je také model v obecné podobě. Výstupem modelů jsou grafy, které se zobrazují na stejném listu sešitu jako model. Odtud lze graf překopírovat a využít např. k přípravě prezentace do výuky apod. Výhodou tabulkového kalkulátoru také je, že jakákoliv změna veličiny modelu se okamžitě projeví ve výstupním grafu. Pro ilustraci je uvedena kopie obrazovky modelu M3.4 (obr. 3). Z grafu je patrná odchylka časových diagramů kmitání matematického kyvadla (teorie) a kyvadla s počáteční výchylkou 50° (model).



Obr. 3

Textovými částmi obsahu CD jsou ještě *Historické poznámky* a *Slovníček fyzikálních pojmů*. Historické poznámky zpracovala *RNDr. Radmila Hýblová* a obsahují životopisné medailonky 11 významných osobností historie fyziky a krátké historické přehledy vývoje měření času od použití kyvadla až po atomové hodiny, měření rychlosti zvuku a vývoje přístrojů pro záznam zvuku. Slovníček fyzikálních pojmů je výběrem veličin a jevů daného učiva, které však nejsou řazeny abecedně, ale jsou uspořádány podle posloupnosti poznatků v učebnici. Kapitoly Slovníčku korespondují s kapitolami v učebnici a výběr příslušného pojmu usnadňuje interaktivní rejstřík v úvodu. U každého hesla je uveden jeho anglický ekvivalent a některá hesla rozšiřují poznatky nad rámec učiva v učebnici.

Po technické stránce CD připravil *Mgr. Lukáš Richterek, Ph.D.* a obrázky nakreslil programem METAPOST *PaedDr. Přemysl Šedivý*. I když v přepracovaném vydání učebnice převážně nejde o zcela nový text, byl rukopis znovu posouzen lektory, kterými byli *doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.* a *RNDr. Čeněk Kodejška, Ph.D.* Pro tisk učebnici velmi pečlivě připravili redaktoři nakladatelství Prometheus *Mgr. Milena Osobová* a *PaedDr. Bohuslav Rothanzl*.

Autor děkuje všem spolupracovníkům, lektorům i redaktorům za dobře odvedenou práci. Věřím, že se nové zpracování učebnice stane pro učitele i žáky gymnázií užitečnou učební pomůckou. Všichni spolupracovníci také rádi přijmou připomínky, které by mohly přispět k dalšímu zlepšení knihy i doplňujících materiálů na CD.

Literatura

[1] *Lepil, O.*: K vývoji učebnic fyziky pro střední školy gymnaziálního typu. MFI, roč. 22 (2013), Příloha č. 4, s. P16.

[2] Rámcový vzdělávací program pro gymnázia, VÚP, Praha, 2007. Dostupné na: http://www.msmt.cz/vzdelavani/skolstvi-v-cr/skolskareforma/ramcove-vzdelavaci-programy

[3] *Lepil, O.*: Poznámka k silám působícím na kyvadlo. MFI, roč. 25 (2016), č. 4, s. 276.

[4] *Lepil, O., Richterek, L.*: Dynamické modelování, Repronis, Ostrava, 2007. Dostupné na: http://ufm.sgo.cz/ke_stazeni/Dynamicke_modelovani.pdf