

Mýlil se Einstein?

JAN NOVOTNÝ

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Ve světovém roce fyziky 2005 jsem ve statí [1] psal o slavné Einsteinově práci [2], která položila základy speciální teorie relativity, a připomněl jsem i to, jak se Einstein na několika řádcích vyrovnal s tzv. *paradoxem hodin*. Ze své teorie snadno odvodil vztah mezi časem τ hodin pohybujících se rychlostí u a časem t nehybných hodin

$$\tau = \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \cdot t \quad (1)$$

a konstatoval, že podle toho se hodiny na rovníku unášené otáčející se Zemí budou poněkud zpoždovat za hodinami na pólu. Einstein zřejmě myslel na možnost experimentálního ověření vztahu, a uvedl jej proto i v první aproximaci Taylorova rozvoje podle podílu u/c . Ani tato přesnost ovšem nebyla v době jeho života dosažitelná. Teprve později se měření času natolik zdokonalilo, že Einsteinův vztah bylo možno ověřit na letadlech běžných linek, jejichž rychlost je několikanásobně menší než rychlost otáčení Země na rovníku.

Představme si na chvíli, že by již kolem roku 1905 byla experimentální fyzika schopna porovnat chod hodin v různých zeměpisných šířkách s přesností potřebnou pro ověření Einsteinova tvrzení. Výsledek by možná Einsteinem otrásl – očekávaný efekt by nenastal.

Musím se přiznat, že v době, kdy jsem psal zmíněný článek, jsem to sám nevěděl. Za poučení vděčím především tomu, že se v Brně narodil *Kurt Gödel*. U příležitosti oslav stého výročí jeho narození v roce 2006 zavítal do Brna významný relativista profesor *Wolfgang Rindler*. Před setkáním

s ním jsem považoval za vhodné aspoň prolistovat jeho knihu [3]. A hned při prvním otevření jsem narazil na větu na str. 198: „Jak dnes víme (také z měření), neexistuje vůbec žádný rozdíl mezi během času pro hodiny na pólu a hodiny na rovníku.“

Jak je to možné? Mýlil se snad Einstein? To se chci pokusit čtenáři objasnit.

V době, kdy Einstein budoval základy speciální teorie relativity, neměl ještě důvod se zabývat vlivem gravitace na plynutí času. Uvažoval proto o rotující Zemi jako o obyčejném kolotoči. Na něm by vztah (1) opravdu platil. S pomocí úhlové rychlosti ω a poloměru oběžné dráhy r jej můžeme přepsat jako

$$\tau = \sqrt{1 - \left(\frac{\omega r}{c}\right)^2} \cdot t = \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} \cdot t, \quad (2)$$

zavedeme-li potenciál odstředivé síly

$$\varphi = -\frac{(\omega r)^2}{2}.$$

Vztah (2) jsme dostali ze vztahu (1) čistě přepočtem, bez použití jakýchkoliv dalších fyzikálních poznatků. Porovnání vztahů je však zajímavé: efekt, který je v inerciální vtažné soustavě vysvětlován jako důsledek dilatace času na hodinách unášených Zemí, může být v neinerciální soustavě spojené s kolotočem, v níž se hodiny nepohybují, vysvětlen jako vliv potenciálu odstředivé síly (či přesněji rozdílu potenciálu v místě hodin oproti potenciálu ve středu kolotoče).

Pokusme se nyní domyslet v úvodu naznačenou „alternativní historii“. Kdyby se Einstein dověděl, že vztah (1) na rotující Zemi nefunguje, přepsal by jej asi do podoby (2) a napadlo by ho, že chod hodin je z hlediska rotující soustavy ovlivňován potenciálem. V případě rotující Země by však mělo jít o celkový potenciál tíhové síly, v níž je (i v rámci newtonovské mechaniky) spojen vliv gravitace a setrvačnosti takovým způsobem, že lokálními měřeními nejsme schopni oba vlivy oddělit. Mořské vody vytvářejí ekvipotenciální plochu tohoto potenciálu, a proto hodiny umístěné u hladiny moře v libovolné zeměpisné šířce jdou stejným tempem. Jak říká Rindler v citované knize: „Povrch zploštělé Země je prakticky ekvipotenciální plochou. Bude to zřejmé, představíme-li si Zemi jako tuhnoucí kapalný míč rotující jako tuhé těleso: kdyby její povrch nebyl ekvipotenciální, celkové pole by mělo komponentu tečnou k povrchu a ta by nutila kapalinu se pohybovat, což by narušilo rovnováhu.“ K tomu jen poznamenejme, že místa

stejně (ale nenulové) nadmořské výšky již nejsou přesně ekvipotenciálními plochami.

Se základními znalostmi z teorie relativity můžeme vliv potenciálu na plynutí času rozebrat obecněji. Vlastní čas τ ve vztahu (1) je (až na koeficient $1/c$, kterého se relativisté rádi zbavují volbou jednotek, v nichž je rychlost světla rovna jedné) zobecněná vzdálenost mezi událostmi neboli *interval* s v čtyřrozměrném prostoročase speciální teorie relativity. Délku světočáry (i zakřivené) v prostoročase můžeme získat integrací elementárního intervalu

$$ds = cd\tau = \sqrt{g_{ik}dx^i dx^k} \quad (3)$$

(přes opakovaný index se sčítá, což je symbolika, kterou v zájmu urychlení relativistických výpočtů zavedl sám Einstein). V Minkowskiho souřadnicích $x^i = (x^0, x^\alpha) = (ct, x, y, z)$ v plochem prostoročase s diagonální maticí *metrických koeficientů* $g_{ik} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ dostaneme z (3) po zavedení komponent rychlosti $u^\alpha = dx^\alpha/dt$ infinitesimální tvar vztahu (1)

$$d\tau = \frac{1}{c}ds = \frac{1}{c}\sqrt{c^2dt - dx^2 - dy^2 - dz^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \cdot dt. \quad (4)$$

V neinerciální vztažné soustavě s křivočarými souřadnicemi x^i platí stále vztah (3), ale metrické koeficienty jsou funkcemi souřadnic. Uvažujme o hodinách, které se v této soustavě nepohybují. Diferenciály prostorových souřadnic v (3) jsou pak rovny nule a namísto (4) dostaneme

$$d\tau = \sqrt{g_{00}} \cdot dt = \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} \cdot dt, \quad (5)$$

když jsme položili $g_{00} = 1 + 2\varphi/c^2$. Obdrželi jsme tak infinitesimální podobu vztahu (2). V neinerciálních soustavách v nezakřiveném prostoročase speciální teorie relativity nám veličina φ vyjde přepočtem. V prostoročase zakřiveném svou hmotnou výplní, jakým se zabývá obecná teorie relativity, bychom tento potenciál vypočítali ze slavných Einsteinových rovnic nalezených roku 1915.

Co nám dává právo pokládat veličinu

$$\varphi = \frac{(g_{00} - 1)c^2}{2} \quad (6)$$

za potenciál tíhového pole? Ukázali jsme již (vztah (2)), že na kolotoči je φ potenciálem odstředivé síly. Ve vnějším centrálně symetrickém gravitačním poli dává obecná teorie relativity Schwarzschildovo řešení, v němž je

$$g_{00} = \frac{1 - \kappa M}{rc^2}, \quad (7)$$

kde κ je gravitační konstanta, M hmotnost tělesa budícího pole, r radiální souřadnice udávající poloměr křivosti koule spojující body o této souřadnici (vzhledem k zakřivení prostoru ji nemůžeme ztotožňovat se vzdáleností od středu tělesa, která ostatně ani není přístupná měření). Takže φ se opět rovná potenciálu, jak jej známe z Newtonovy teorie.

Mohli bychom uvést ještě několik podobných příkladů, existuje však i obecnější důvod. Jsou jím pohybové rovnice částice v prostoročase s danou metrikou, které se odvozují z požadavku maximálnosti délky světočáry spojující dvě události čili integrálu z výrazu (3). Čtenář znalý elementů variačního počtu, jak se obvykle probírají v souvislosti s Lagrangeovými rovnicemi, by možná dokázal tyto pohybové rovnice odvodit, i když by se setkal s několika technickými potížemi. Rovnice by mu ukázaly, že naše φ je skutečně vhodným vystižením potenciálu silového působení na částici v zakřiveném prostoročase, které vnímáme jako „tíhovou sílu“, přičemž podle obecné teorie relativity nemá vůbec smysl rozkládat ji na část působenou neinerciálností soustavy a část působenou zdroji zakřivení prostoročasu. Potenciál má tak v teorii relativity dvojí úlohu – ovlivňuje jak pohyb částic, tak i chod hodin.

Z vyjádření (3) můžeme získat i obecný vzorec pro chod hodin, neomezuující se na případ, kdy hodiny jsou v klidu v uvažované vztažné soustavě. Pak bude infinitesimální interval *vlastního času* $d\tau$ spojen s obdobným intervalem *souřadnicového času* dt vztahem, v němž bude spolu s velikostí rychlosti pohybu hodin u a *skalárním potenciálem* φ vystupovat ještě *vektorový potenciál* γ . Tyto potenciály (či přesněji jejich prostorové a časové derivace) se objeví i v pohybových rovnicích. Porovnání vztahů ukáže na zajímavé podobnosti a rozdíly mezi gravitačním a elektromagnetickým působením. Rád bych se této problematice věnoval v následujícím článku. Netrpělivý čtenář najde nejsrozumitelnější výklad o *dynamických potenciálech* v Møllerově monografii [4] (která se v našich odborných knihovnách vyskytuje nejspíše v ruském překladu).

Vliv potenciálu na plynutí času bývá často nesprávně chápán, což vede k množství pochybných výkladů. I dobří fyzikové, kteří nejsou specialisty

v oblasti teorie relativity, mají tendenci chápat jej obdobně jako vliv běžných fyzikálních faktorů na chování přístrojů. Např. zvýšení teploty mění rozměry součástí mechanických hodin a tím ovlivňuje jejich chod, kyvadlové hodiny jdou různým tempem na různých místech zemského povrchu díky rozdílnosti tíhového zrychlení. Naproti tomu ovlivnění času dané vztahem (3) je *univerzální vliv*, který se týká všech hodin – a všech fyzikálních procesů – bez rozdílu, takže pozorovatel pohybující se spolu s hodinami si jej (pokud nesleduje také vzdálené hodiny) nemůže vůbec povšimnout. Podle toho, jak volíme vztaznou soustavu a způsob určování času v ní, můžeme rozdíl mezi vlastním a souřadnicovým časem připisovat různým faktorům, jak to ukazují již vztahy (1) a (2), kde rozdíl chodu hodin v různých místech kolotoče připisujeme jednou rychlosti a podruhé potenciálu. Pokud bychom chtěli jednoznačně pojmenovat příčinu popsaného rozdílu chodu hodin, bylo by nejlépe říci, že je jí metrika prostoročasu, kterou lze měřením vlastního času různě se pohybujících hodin zjistit. Přístupný a zároveň hluboký výklad o univerzálních vlivech a o měření metriky prostoročasu najde čtenář v knize prof. *Kuchaře* [5]. Čtenáři, který by si chtěl zopakovat základní poznatky teorie relativity, lze doporučit výklad samotného *Einsteina* [6], knihu [7] určenou především středoškolským učitelům, příslušné kapitoly knih [8], [9], multimediální učebnici [10] a v případě dostatečné matematické průpravy i monografii [11].

Na závěr odpovíme na otázku z názvu článku. Einstein se roku 1905 mýlil i nemýlil. Správně určil zpomalení chodu hodin, jaké by podle speciální teorie relativity nastalo na kolotoči se zanedbatelným vlivem na zakřivení prostoročasu. Nemohl ovšem ještě vědět, že Země prostoročas ve svém okolí nezanedbatelně zakřivuje, což vyplývá (až) z obecné teorie relativity. Proto jeho předpověď neodpovídala realitě.

Literatura

- [1] *Novotný, J.*: Brána relativity otevřená. Školská fyzika VIII, č. 3 (2004/2005) s. 6.
- [2] *Einstein, A.*: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik 17 (1905) s. 891.
- [3] *Rindler, W.*: Relativity. Special, General, and Cosmological. Oxford University Press 2006, s. 198.
- [4] *Möller, C.*: The Theory of Relativity. Clarendon Press, Oxford 1962. (Ruský překlad: Теория относительности. Atomizdat, Moskva 1975).
- [5] *Kuchař, K.*: Základy obecné teorie relativity. Academia, Praha 1968, s. 40, 65.
- [6] *Einstein, A.*: Teorie relativity. VUTUM, Brno 2005.

- [7] *Bartuška, K.*: Kapitoly ze speciální teorie relativity. SPN, Praha 1989.
- [8] *Horský, J. – Novotný J. – Štefaník M.*: Mechanika ve fyzice. Academia, Praha 2002.
- [9] *Brdička, M. – Hladík, A.*: Teoretická mechanika. Academia, Praha 1987.
- [10] *Novotný, J. – Jurmanová, J. – Geršl, J. – Svobodová, M.*: Základy teorie relativity. Elektronická učebnice, Elportál, Brno 2006.
- [11] *Votruba, V.*: Základy speciální teorie relativity. Academia, Praha 1977.

Tvořivá výuka fyziky na základní škole. Divergentní fyzikální úlohy

VÁCLAV MEŠKAN

Pedagogická fakulta ZČU, Plzeň, Fakultní základní škola L. Kuby, České Budějovice

1. Úvod

Téma tohoto článku může při současných pokusech o reformu školství znít učiteli jako klišé a přesto tento článek vychází z každodenní praxe. Autor sám je učitelem fyziky na základní škole, kde dennodenně prožívá radosti a strasti běžného učitele na plný pracovní úvazek. Právě pohled pod pokličku současné „moderní“ školy odkrývá stále řadu problémů. Uvozovky u slova moderní při současné vybavenosti škol moderní technikou vlastně nejsou na místě. Autor článku má osobní zkušenosti se základní školou, která vlastní interaktivní tabuli v každé odborné učebně a dokonce v některých kmenových třídách, v každé třídě stojí na učitelském stole počítač, škola již nepoužívá papírovou třídní knihu, ale elektronický datábázový systém. Vyspělá technologie většinou zpřijemňují a zefektivňují práci učitelů, přidělávají starosti správcům počítačového systému a dětem dávají najevo, že škola není zcela zastaralou institucí, plnou muzejních exponátů.

Skrývá se ovšem pod tímto pozlátkem opravdu moderní škola? Právě každodenní praxe ukazuje, jak hluboko je v celém systému a myslích většiny učitelů zakořeněno tradiční zastaralé paradigma, které jako pomyslná žába na prameni brání novému proudu ve vzdělávání.

Prvotní otázkou, kterou by si měli položit všichni učitelé na všech stupních škol, je, zda spolu se změnou současné společnosti, o níž zde nemá smysl polemizovat, není potřeba změnit i filosofii vzdělávání. Vznik Rámcových vzdělávacích programů je dobrým pokusem o tuto změnu, ale otázkou zůstává, zda veškeré změny neproběhly na většině škol pouze formálně.

Dnešní žák vyrůstá v prostředí, které se velmi liší od prostředí, v němž vyrůstali jeho učitelé. Jsou to v tuto chvíli především všudypřítomné a každému dostupné mohutné informační toky, které nás nutí přehodnotit priority současného vzdělávání. Nadále již není potřeba zahlcovat žáky kvantem informací, které stejně nakonec nezůstanou v paměti žáků uchovány. Mnohem aktuálnějším problémem je naučit své žáky informace vyhledávat, přijímat je kriticky a dále je tvořivě zpracovávat. „Platí, že chceme-li naučit příliš mnoho, trpí samostatné přemýšlení a jeho převádění do skutků. Škola se stává paradoxně překážkou rozvoje tvůrčích schopností a dovedností žáka. Návyk učit se a nepřemýšlet a nehledat nové se později obtížně odstraňuje [29].“

Rozdíl mezi tradiční výukou a výukou zaměřenou na samostatnou kreativní práci dětí lze popsat v termínech transmisivní (předávací) respektive konstruktivistické výuky. Zatímco transmisivní styl výuky předává žákům hotové poznatky a její hlavní výukovou metodou je výklad, konstruktivistický styl vede žáky k samostatnému aktivnímu vytváření vlastních poznatků a kreativnímu manipulování s nimi. Hlavní výukovou metodou konstruktivistické výuky je metoda problémová [22]. Transmisivní výuka je zaměřena na rozvoj paměti žáků, konstruktivistické výuka rozvíjí myšlení. Naším cílem by mělo být *nahradit didaktiku paměti didaktikou myšlení* [24]. Je nutné změnit vztah k informacím, které nemají být nadále účelem, ale prostředkem či stavebním materiálem rozvoje osobnosti.

Kreativita či tvořivost jako nejvyšší projev lidského myšlení je metou, ke které by se měl moderní vzdělávací proces přibližovat! Na špatný stav školství v této oblasti upozornil poprvé již v roce 1950 J. P. Guilford [6] a svou prací významně přispěl k výzkumu v oblasti kreativity. Padesát let po Guilfordovi hodnotí situaci vzdělávacího systému Dacey: „Školy potlačují kreativitu, učitelé, spolužáci a vzdělávací systém jako celek společně redukuje potřebu dítěte vyjádřit vlastní tvůrčí možnosti. Student, který klade originální a nečekané dotazy nebo předkládá alternativní odpovědi, bývá autoritářským učitelem dokonce označován za rušivý element. Škola dále zabraňuje tvořivosti tím, že poskytuje nízkou toleranci vůči selhání.[4]“

2. Pedagogická tvořivost

Bylo by zcela nad rámec tohoto článku pokoušet se o vyčerpávající rozbor pojmu tvořivost, ačkoliv pro realizaci tvořivé výuky je dostatečná znalost problematiky psychologie tvořivosti nezbytnou. V tuto chvíli pouze stručně nastíníme některé důležité poznatky.

Tvořivost a tvořivá výuka je stále často nesprávně spojována s tvořivostí uměleckou (expresivní), která je ovšem pouze jedním z projevů tvůrčího myšlení. Jiným důležitým pojmem je tvořivost technická (vědeckotechnická), která bývá neprávem považována za méně významnou než zmíněná tvořivost umělecká [24]. Ve skutečnosti jsou ovšem oba druhy tvořivosti projevem téhož tvůrčího potenciálu. Umělecké dílo pouze více než vědecké a technické vyvolává tvůrčí proces i u recipienta [10].

Tvořivost či kreativita je v soudobé literatuře chápána jako proces generování nových, neobvyklých, ale současně přijatelných a užitečných myšlenek, řešení a nápadů [18]. Produkt tvořivosti ve školní výuce, který klasifikuje Erazim a Bakalář [2] jako „pedagogický vynález“, není zpravidla významný z hlediska širší společnosti, ale jeho hodnota je posuzována s ohledem k individuálním možnostem jedince, je dána mimo jiné věkem a předchozí tvůrčí zkušeností. Produkt pedagogické tvořivosti nechápeme jako cíl, nýbrž prostředek k posouzení vývoje tvůrčích schopností jedince. V běžné výuce se pak tvořivost projevuje zvědavostí, kladením otázek a bohatostí užítkováných nápadů. Tvořivost ve smyslu originality je spíše výjimečným jevem [28].

3. Konvergentní a divergentní myšlenkové operace

Myšlení spojené s kreativitou je často popisováno jako divergentní, jenž je opakem myšlení konvergentního, které se naopak účastní procesu řešení běžných výukových problémů. Konvergentní postupy směřující k jednomu správnému výsledku jsou například typické pro řešení naprosté většiny matematických a fyzikálních úloh [26]. Jakkoliv je řešení úlohy problémové, výsledkem je vždy pouze jedno řešení. Naproti tomu divergentní myšlenkové postupy vedou k co největšímu množství řešení. Typickou úlohou v testech divergentního myšlení je například úkol navrhnout co nejvíce využití nějakého běžného předmětu (cihly, klíče,..).

Skutečný tvořivý proces je ovšem interakcí konvergentních a divergentních myšlenkových postupů [18]. Řešení reálných problémů totiž nekončí vygenerováním velikého množství asociací, hypotéz či řešení (divergentní operace), ale na závěr celého procesu je z navržených možností vybrána

jedna, která se jeví jako nejvhodnější či nejprínosnější (konvergentní operace) [26].

S ohledem na význam divergentních myšlenkových operací v kreativním procesu se stává důležitou skutečnost, na níž v nedávné době poukázali Lokšová a Lokša [18], že v současném vzdělávání jsou divergentní úlohy zastoupeny pouze asi čtyřmi procenty, ačkoliv jako ideální zastoupení je uváděno 15 % – 30 % divergentních úloh.

4. Metodika tvořivé výuky

V konstruktivistickém pojetí výuky je kreativita vlastností, již je nutno rozvíjet, připravovat pro ni vhodné podmínky a odstraňovat překážky jejího rozvoje [21]. Jako předstupeň žákovské kreativity chápeme aktivní a samostatnou činnost žáka [19]. Posloupnost **aktivita** → **samostatnost** → **tvořivost** navržená Maňákem, kterou chápeme jako tři stupně angažovanosti a kvality žákovi činnosti (tedy vlastně fáze rozvoje tvořivosti žáka), umožňuje vytvořit jasnou strukturu či osnovu „tvořivé metodiky“ a pomáhá učiteli jasně směřovat a plánovat svou činnost tak, aby výuka směřovala k rozvoji kreativity žáka (více viz například [19], [20], [22]).

Pro realizaci tvořivé výuky ovšem nestačí pouze vytvořit portfolio samostatných aktivit a her. Ve hře zůstává stále mnoho překážek tvořivé práce a otázka motivace žáků.

Problematickou motivace, ačkoliv jde o klíčový a velmi široký bod stručně shrneme tak, že skutečně kreativní činnost bude pro žáka motivující sama o sobě. Používané metody navíc dokážou aktivizovat poznávací potřeby žáků a umožní jim zažít úspěch. Pro případné další studium odkazují např. na literaturu [8], [17], [13].

Z běžných bariér tvořivé práce ve školní výuce uváděných v literatuře (například [20]) vybírám následující:

- Orientace na úspěch
- Zákaz otázek
- Rozlišování práce a hry
- Preference konvergentních úloh
- Autoritářství
- Nízká tolerance vůči selhání
- Práce pod tlakem
- Zanedbávání motivace

Samostatná a tvořivá práce vyžaduje pohodu, důvěru, odstranění napětí a také dostatek času pro přemýšlení a prožívání [20]. Důležitou roli

v tvořivé výuce hraje také humor, který s tvořivostí jednoznačně souvisí, má motivační účinky a při zařazení do fáze testování prokazatelně snižuje úzkost žáků [14].

5. Tvořivá výuka fyziky na základní škole

Součástí výuky fyziky jsou tradičně některé metody, které spadají do oblasti konstruktivistické výuky – experimentování, problémová výuka (viz např. [16], [17], [22], [27]), laboratorní práce a měření a heuristická výuka (pojem heuristika pochází z oblasti technické tvořivosti. Bližší informace k heuristickým metodám viz např. [1], [12], [29], [30]). Jsou-li tyto metody učitelem pravidelně a správně využívány, měla by mít fyzika jako školní předmět téměř výsadní postavení v rozvoji tvořivosti a v oblíbenosti mezi žáky. Výzkumy i každodenní praxe ovšem ukazují, že skutečnost je přesně opačná. Výsledky výzkumů ([5], [11]) poukazují, že žáci vnímají fyziku jako předmět neoblíbený, obtížný a vyučované znalosti nepotřebné. Činnosti, které jsou žáky při výuce fyziky preferované (například experimentování), jsou zařazovány v praxi pouze málo. Většina učitelů nevyužívá výše zmíněných prostředků z důvodu časové náročnosti a náročnosti na přípravu (především materiální) nebo je nevyužívá správně. Problémová, projektová či heuristická výuka vyžadují zkušenosti, trénink a znalosti metodiky ze strany učitele. Žáci navíc musejí být na tento styl výuky zvyklí, což platí pro všechny další méně užívané metody.

Cestu k nápravě znepokojivé situace spatřuji v následujících bodech:

- Faktografická složka by měla být omezena na nutné minimum (stanovené v současnosti dokumentem RVP). Tento nepopulární bod vychází z konceptu konstruktivistické výuky. Je již potvrzeno, že znalosti žáků vzdělávaných touto cestou (výzkumy prováděné v USA, alternativní školy) jsou skutečně menší, než v případě tradiční výuky [21], výsledky moderní výuky by ovšem podle mého názoru měly být měřeny dovednostmi (kompetencemi) informace získávat a získané informace zpracovávat a využívat k řešení problémů. Východiskem je v tomto případě přesvědčení, že předaný hotový poznatek není žádný poznatek a s největší pravděpodobností se v paměti recipienta při současném vytížení dlouho neuchová.
- Ve výuce by měla být systematicky rozvíjena pozitivní atmosféra beze strachu. Tento strach je v tradiční výuce fyziky vyvoláván především subjektivně vnímanou neschopností řešit zadané úlohy (neúspěch je

trestán negativním hodnocením, které má mnohdy z pohledu žáka poměrně závažný dopad – trest rodičů, špatné známky na vysvědčení), práci pod neustálým tlakem a autoritářským vedením učitele. Důležitým nástrojem odstraňování úzkosti ve všech fázích výuky (včetně testování) je zmíněný humor, který by neměl být považován za nevhodnou či nepatřičnou součást výuky [14].

- Nové učivo je žáky osvojováno aktivně na základě dříve aktivované poznávací potřeby či potřeby řešení problému. Nové poznatky by měly být pevně zasazeny do systému stávajících poznatků a prekonceptů žáka. Důležitým nástrojem se zde může stát používání myšlenkových map a diagramů ve fázi expozice učiva ([3], [7]).
- Převládající výukovou strategií je problémová a heuristická výuka, volené výukové metody kladou důraz na aktivitu, samostatnou práci žáků a kooperativní vyučování, přičemž je předem potřeba zvážit všechny nedostatky a přínosy těchto metod tak, aby nebylo ohroženo dosažení zvolených cílů výuky ([15], [19], [21]).
- Ve fázi fixace a opakování učiva by mělo být zařazováno více **divergentních úloh**. Tato problematika je ovšem v současné době stále velmi nedostatečně zpracována. Některé náměty uvádím v další části.
- Je-li od žáka vyžadován tvořivý přístup, musí být žák za svůj kreativní výkon také ohodnocen. Žák musí dostat jasný signál, kdy je od něj vyžadována základní úroveň poznatků a kdy je očekáván tvořivý přístup.

Pořadí jednotlivých bodů zde není podstatné, v praxi se totiž jednotlivé body částečně překrývají a navzájem doplňují.

6. Divergentní fyzikální úlohy

Jde o úlohy vyžadující od žáka divergentní myšlení, které, jak jsem se již zmínil, má klíčové postavení v procesech tvořivosti a v tradičním školství je požadováno ve velmi omezené míře. Jde o kapitolu, která není dosud příliš zpracována. Z uvedené literatury pouze Pietrasinski [24] uvádí obecnou podobu problémů podporujících tvořivý přístup žáka, tedy takové, které od řešitele požadují určité divergentní postupy:

- Jak je možno tuto věc zlepšit?
- K jakému novému účelu je možné tuto věc použít?
- Co by se stalo, kdyby došlo ke změně těchto podmínek?
- Jak budou moci tuto věc využít, když s ní udělám to a to?

Některé z nich jsme použili jako námět pro naši práci. Důležitým požadavkem, aby mohly být úlohy efektivně zařazeny do výuky, ovšem stále zůstává, aby s jejich pomocí docházelo k efektivnímu upevňování a aplikaci získaných poznatků, nikoliv pouze ke kreativnímu hraní. Zařazení divergentních úloh lze očekávat především ve fázi opakování, v době, kdy si již žáci dostatečně osvojili základní úroveň učiva. Vzhledem k časové náročnosti stojí za úvahu zařazování divergentních úloh v rámci domácí přípravy žáků.

V následující části uvádím některé náměty, jež v současnosti testujeme ve výuce fyziky na základní škole. Ke každému přidám stručný komentář k dosavadním zkušenostem. Uvědomuji si, že předkládaný výčet není úplný, měl by být pouze inspirací čtenáři ve vlastní kreativní práci. Vycházím přitom z předpokladu, že: „Kreativní učitel má také kreativní žáky.“ [23].

7. Některé náměty divergentních fyzikálních úloh

Navrhni příklad, aby výsledek byl . . .

Tento námět pochází od Maňáka [19] a představuje dobře využitelný nástroj především v některých oblastech učiva. Zadání příkladu může vypadat následovně:

Navrhni fyzikální úlohu, aby výsledek byl asi 1 000 J.

Zvolený příklad poskytuje skutečně široký prostor pro tvorbu úloh. Učitel může podle potřeby vymezit určitou oblast učiva (Vymysli úlohu na výpočet tepla, aby výsledek byl . . .).

U všech podobných úloh, stejně jako u dalších námětů platí, že učitel bude muset ze začátku věnovat určitý čas důslednému hodnocení, než si žáci na takový druh práce zvyknou. Žákům bude chvíli trvat, než pochopí, co se od nich očekává a zpočátku budou, pod pohnutkou rychle se úkolu zbavit, odvádět nekvalitní práci.

Vhodné je zprvu poskytnout žákovi metodu, vysvětlit mu postup při řešení. Příklad postupu pro uvedenou úlohu je následující:

- 1) Určím povahu (druh) počítané fyzikální veličiny podle její jednotky. Jednotku 1 J znají žáci osmého ročníku jako jednotkou práce (mechanické, elektrické), mechanické energie (polohové, pohybové) a tepla. Pro ilustraci volíme mechanickou energii.
- 2) Uvědomím si postup při určování zvolené fyzikální veličiny. Polohová energie závisí na hmotnosti tělesa m , tíhovém zrychlení g a výšce h ($E_p = mgh$).

3) Vytvořím takovou konfiguraci, aby výsledek byl 1 000 J.

Příklad: $m = 20 \text{ kg}$; $g = 10 \text{ N/kg}$; $h = 5 \text{ m}$

Zvolenou konfiguraci veličin „oživím“. To znamená, že si uvědomím, jaké těleso může mít hmotnost 20 kg a co se s ním může stát, aby se jeho polohová energie změnila o 1 000 J.

Možný výsledek:

Pes Alík vyběhl po schodech do druhého patra domu. Jak se změnila jeho polohová energie, je-li Alíkova hmotnost 20 kg a druhé patro se nachází 5 metrů nad zemí?

nebo

Maruška skáče z pětimetrového skokanského můstku. O kolik se sníží Maruščina polohová energie, je-li její hmotnost 20 kg?

Předmětem hodnocení bude **fyzikální správnost, množství různých kategorií vymyšlených úloh a jejich zpracovanost**.

Za obecné zásady pro realizaci tohoto a dalších podobných námětů (vytvořené na základě praktických zkušeností) považuji tyto:

- 1) Učitel musí neustále vyžadovat fyzikální správnost (v případě drobných nedostatků je vhodné úlohu využít k diskusi s třídou).
- 2) Musí žákům vysvětlit, že cílem je vytvořit co nejvíce odlišných (ale přitom vhodných) úloh, nikoliv stejnou úlohu s drobnými obměnami.
- 3) Úloha by měla mít konkrétní slovní podobu, nikoliv pouze „mrtvá“ čísla (viz následující námět divergentní úlohy – vypočítej a oživ příklad).

Uvedená úloha je velmi komplexní a v případě učiva, které je pro žáka nové a není dostatečně zažité, je mnohdy poměrně složitá. Za určitý předstupeň této úlohy lze považovat následující námět.

Vypočítej a „oživ“ úlohu

Úloha je zadána pouze formou symbolů a čísel. Úkolem řešitele je určit, o jakou fyzikální veličinu se jedná, úlohu vypočítat a oživit ji, neboli vymyslet úloze smysluplné slovní zadání.

Příklad: Vypočítej a oživ následující úlohu.

$$m = 2 \text{ kg}$$

$$c = 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\Delta t = 20^\circ\text{C}$$

$$Q = ? \text{ J}$$

Jedná se o jednoduchý, ale přitom dobře použitelný nástroj, který navíc, stejně jako předchozí úloha, velmi detailně prověří žákovu porozumění probíranému učivu (podle mých zkušeností dokonce lépe, než tradiční „hotová“ fyzikální úloha).

Zařazení předchozích dvou námětů může v praxi vypadat následovně:

Žáci ve výuce probrali výpočet tlaku a nyní tuto látku procvičují. V první fázi žáci řeší tradiční úlohy připravené učitelem. Následuje úloha typu „Vypočítej a oživ příklad“, samozřejmě na výpočet tlaku, a konečně dostanou úkol: Vymysli tři úlohy na výpočet tlaku, aby výsledky byly 1 Pa, 1 kPa a 1 MPa.

Následuje výčet dalších možných námětů na divergentní fyzikální úlohy. Jejich zařazení závisí na kreativitě a odborných dovednostech učitele.

Vymysli úlohu k obrázku/video

Žákovi je předložen obrázek či video a zadán úkol vymyslet k této předloze relevantní fyzikální úlohu. Často je vhodné (nebo nutné) omezit zadání na konkrétní oblast učiva.

Zprvu je obrázek možné připravit jako zadání nonverbální fyzikální úlohy, kdy jsou přímo v obrázku uvedeny všechny nebo alespoň hlavní potřebné informace formou obrazové informace. Příklad nonverbálních úloh připravených studenty pedagogické fakulty v Českých Budějovicích si lze prohlédnout na [31].

Navrhni pokus, kterým bys potvrdil, že ...

Tento typ úlohy nepotřebuje zvláštní komentář. Úloha typu – Navrhni experiment, kterým bys dokázal platnost Ohmova zákona, lze dnes již považovat za téměř tradiční problémovou experimentální úlohu. Učitel může ovšem požádat žáky, aby navrhli co nejvíce způsobů, jak například ověřit platnost určitého fyzikálního zákona, nebo upřesnit podmínky například o použití určitého předmětu (navrhni co nejvíce způsobů, jak pomocí cihly ověřit platnost pravidla rovnováhy na dvouramenné páce).

Sestav fyzikální test

Další úlohou, která dobře prověří porozumění probíranému učivu, může být úkol sestavit krátký test z předem vybraných témat. Požadavkem na test je, aby byl použitelný a aby vybrané úlohy byly zajímavé. Nakonec je možné jej skutečně použít, zajímavé je například nechat v některé příští hodině vypracovat test samotného autora. Otázkou ke zvážení je potom hodnocení takového testu. Například hodnotit známkou pouze kvalitně zhotovené a bezchybně vypracované testy.

K čemu lze využít ...

Podobné úlohy na netradiční užití předmětů jsou běžné v testech kreativity [8]. Úloha může být vtipným zpestřením výuky, někdy je ale těžké ohlídat, abychom se pohybovali stále v rámci výuky fyziky (například návrh využití laboratorní váhy jako houpačky pro křečky). Aby učitel udržel aktivitu žáků v mezích výuky fyziky, je nutné zadání úlohy poněkud zúžit.

Příklad příliš širokého zadání: Navrhni, k čemu lze využít čajovou lžičku.

Úloha, která je jinak dobrým cvičením kreativních schopností, je samozřejmě zcela nevhodná pro potřeby výuky fyziky. Aby úloha plnila svůj účel, je nutné zadat ji konkrétněji:

Navrhni, k čemu lze *ve fyzice* využít *hliníkovou* čajovou lžičku.

Možné odpovědi se okamžitě nabízí: určení hustoty hliníku, zkoumání tepelné vodivosti kovů, ale třeba měření délky, ...

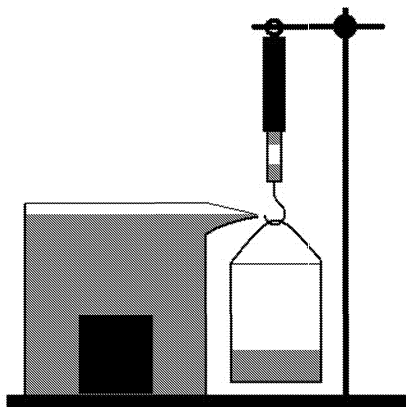
Stále jde ovšem o úlohu, kterou je těžké nasměrovat pouze na konkrétní tematický celek tak, aby úloha přispěla k plnění stanovených cílů výuky.

Navrhni zařízení, které. (uprav zařízení, aby ...)

Úloha technicky tvořivého rázu, která může mít v případě tvořivého učitele dobré využití. Jde vlastně o obdobu úlohy „Navrhni pokus“.

Příklad: Navrhni zařízení, pomocí něhož bychom mohli měřit vztlačovou sílu působící na malá tělesa.

Možný výsledek je na obr. 1. Kapalina vytlačená ponořeným tělesem přetéká do nádoby zavěšené na siloměru.



Obr. 1 K divergentní úloze „Navrhni zařízení“

Jak se změní svět, přestane-li existovat ...

Přestane-li existovat (platit) zákon setrvačnosti; přestane-li existovat elektrická energie; přestane-li existovat tření, ...

Jde o vhodné náměty na společnou diskusi s možností překvapivých závěrů. Žák může taktéž dostat za úkol nakreslit svět, ve kterém neplatí některý fyzikální zákon.

Kreslicí divergentní úlohy

Divergentní úlohy, ve kterých má žák za úkol kreslit, jsou příjemným zpestřením. Vzhledem k časové náročnosti jsou takové úlohy ovšem určené spíše k domácí přípravě. Vhodné je jejich zařazení v rámci projektové výuky, kdy mohou žáci svůj úkol zpracovávat v hodinách výtvarné výchovy nebo informatiky a na závěr uspořádat výstavu svým výtvorů. V kreslicích úlohách se na rozdíl od předchozích verbálních úloh uplatňuje mimo jiné figurální tvořivost [8].

Ve všech kreslicích úlohách by žáci měli být podporováni v odvaze být vtipní a originální. Jde nám v tomto případě o proces tvorby, nikoliv o samotný výsledek. A opět zde samozřejmě platí požadavek fyzikální správnosti.

Nakresli obrázek, na němž bude těleso o určitých vlastnostech

V šestém ročníku se žáci seznamují s některými fyzikálními veličinami, jako je délka, hmotnost, objem a další. Při té příležitosti mohou dostat za úkol nakreslit těleso o určitém objemu, hmotnosti, rozměrech, čímž žák trénuje svůj odhad. Požadavky kladené na obrázek mohou být komplikovanější – žák může například dostat za úkol nakreslit obrázek, na kterém budou spolu účinkovat tělesa o hmotnostech 100 kg, 70 kg, 100 g a 1 000 kg.

Nakresli obrázek, na němž bude probíhat určitý fyzikální děj

Tato úloha je obdobou předchozí. Vhodným námětem budou některá abstraktnější témata, kdy úloha nutí žáka s pojmem pracovat a dát mu konkrétní podobu. Žák může dostat za úkol například nakreslit obrázek na téma tepelná výměna, difuze, sublimace, ... (fakt, že si učitel zprvu nedokáže představit, co by sám nakreslil, není důvodem takovou úlohu nezadat; možná bude výsledky svých žáků mile překvapen).

Nakresli fyzikální zákon

Další obdoba předchozí úlohy. Příkladem může být úkol nakreslit obrázek na téma zákon setrvačnosti. Součástí obrázku bude slovní znění zákona.

Vytvoř zadání fyzikální úlohy beze slov; obrázek jako zadání příkladu

Podstatou úkolu je vytvořit vlastní jednoduchou nonverbální úlohu (viz předchozí odstavce). Žáci musí být dobře seznámeni s takovým typem úloh, v opačném případě by byl úkol pro žáka příliš abstraktní.

Nakresli vtip s fyzikální tematikou

Úloha velmi vhodná jako námět pro projekt zakončený školní výstavou zdařilých výsledků. Některé náměty a povedené vtipy si může zájemce prohlédnout v [32].

8. Závěr

Článek stručně shrnuje východiska a některé náměty pro výuku fyziky tak, jak je v současnosti testována na Fakultní základní škole v Českých Budějovicích [33]. Ačkoliv z provedených pokusů prozatím není možné stanovit jakékoliv obecně platné závěry, mé dosavadní zkušenosti naznačují nárůst zájmu žáků o předmět a především zvýšení obliby předmětu. Takto připravené hodiny fyziky jsou zábavnější a provázené příjemnou atmosférou.

Cílem výzkumu je navrhnout a prakticky ověřit metodiku, jež umožní efektivně rozvíjet osobnost žáka a především jeho tvořivé schopnosti, a pokusit se tak přispět ke změně obrazu školské fyziky z obtížného, těžko stravitelného a neužitečného předmětu na předmět, jehož hlavním cílem je poznávání zákonitostí okolního světa skrze kreativní objevitelskou činnost. Cílem takové výuky je vytvořit žáka, který je ve své činnosti plně angažovaný a samostatný s tvůrčím pohledem na své okolí.

Autor bude vděčný za jakékoliv připomínky a další náměty pro svou další práci na adresu meskan@email.cz.

Literatura

- [1] *Andersek, K., Beneš J.*: Metody řešení technických problémů. SNTL, Praha, 1984.
- [2] *Bakalář, E., Erazím, P.*: Kapitoly z psychologie tvořivosti. Dům techniky ČSVTS, Praha 1986.
- [3] *Buzan, T.*: Mentální mapování. Portál, Praha 2007.
- [4] *Dacey, J. S., Lennon, K. H.*: Kreativita. Grada, Praha 2000.
- [5] *Dvořák, L. a kol.*: Lze učit fyziku lépe a zajímavěji? Matfyzpress, Praha 2008.
- [6] *Fasko, D.*: Education and Creativity. In: Creativity Research Journal 2000 – 2001 Vol. 13.
- [7] *Fisher, R.*: Učíme děti myslet a učit se. Portál, Praha 2004.

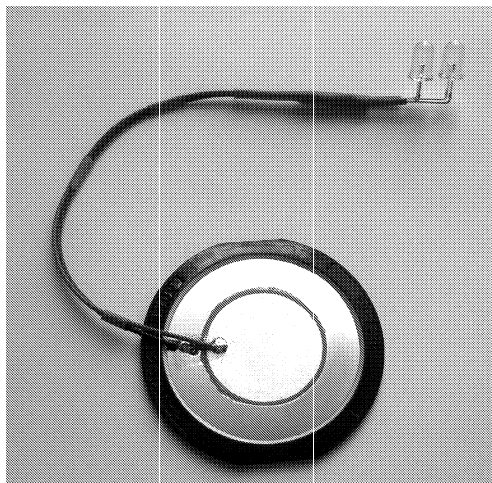
- [8] *Guilford, J. P.*: The Nature of Human Intelligence. McGraw-Hill Education, New York 1967.
- [9] *Hlavsa, J., Jurčová, M.*: Psychologické metody zisťovania tvorivosti. Psychodiagnostické a didaktické testy, Bratislava 1978.
- [10] *Hlavsa, J.*: Psychologické základy teórie tvorby. Academia, Praha 1985.
- [11] *Höfer, G. a kol.*: Postoje žáků základní a střední školy k výuce fyziky. Matfyzpress, Praha 2005.
- [12] *Honzíková, J.*: Nonverbální tvorivost v technické výchově. Západočeská univerzita, Plzeň 2008.
- [13] *Hrabal, V., Man, F., Pavelková, I.*: Psychologické otázky motivace ve škole. SPN, Praha 1984.
- [14] *Jurčová, M.*: Humor při stimulácii tvorivosti ve škole. In: Tvořivá škola. Paido, Brno 1998.
- [15] *Kasíková, H.*: Kooperativní učení, kooperativní škola. Portál, Praha 1997.
- [16] *Kašpar, E., Janovič, J., Březina, F.*: Problémové vyučování a problémové úlohy ve fyzice. SPN, Praha 1982.
- [17] *Lokšová, I., Lokša, J.*: Pozornost, motivace, relaxace a tvorivost dětí ve škole. Portál, Praha 1999.
- [18] *Lokšová, I., Lokša, J.*: Tvořivé vyučování. Grada, Praha 2003.
- [19] *Maňák, J.*: Rozvoj aktivity, samostatnosti a tvorivosti žáků. Masarykova univerzita, Brno 1998.
- [20] *Maňák, J.*: Stručný nástin metodiky tvořivé práce ve škole. Paido, Brno 2001.
- [21] *Pecina, P., Zormanová, L.*: Metody a formy aktivní práce žáků v teorii a praxi. Masarykova univerzita, Brno 2009.
- [22] *Pecina, P.*: Tvorivost ve vzdělávání žáků. Masarykova univerzita, Brno 2008.
- [23] *Petrová, A.*: Tvorivost v teorii a praxi. Vodnář, Příbram 1999.
- [24] *Pietrasinski, Z.*: Psychologie správného myšlení. Orbis, Praha 1964.
- [25] *Průcha, J.*: Moderní pedagogika. Portál, Praha 2005.
- [26] *Sawrey, J., Telford, Ch.*: Educational psychology. Allyn and Bacon, INC., Boston 1968.
- [27] *Skalková, J.*: Obecná didaktika. ISV, Praha 1999.
- [28] *Směkal, V.*: Úloha školy v rozvíjení aktivity, samostatnosti a tvorivosti žáků. In: Tvořivá škola. Paido, Brno 1998.
- [29] *Votruba, L.*: Rozvíjení tvorivosti techniků. Academia, Praha 2000.
- [30] *Wimmer, M.*: Jak rozvíjet technickou tvorivost. Práce, Praha 1990.
- [31] <<http://fyzweb.cz/materialy/nonverb/>>
- [32] <<http://www.scholaludus.sk/>>
- [33] <<http://www.zsroznov.cz/>>

Demonstrujeme piezoelektrický jev

JIŘÍ ERHART

Technická Univerzita, Liberec

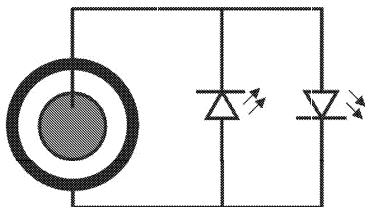
Piezoelektrina je velmi zajímavým příkladem přímé přeměny mechanického tlaku na elektrický náboj a napětí. Příímý piezoelektrický jev spočívá ve vytváření elektrických nábojů na určitých plochách krystalu při vhodně zvoleném směru mechanického tlaku. Tento jev si můžeme názorně demonstrovat pomocí jednoduchých piezoelektrických prvků běžně dostupných v obchodech s elektrotechnickými součástkami – např. piezoelektrické membrány použitelné pro piezoelektrické sirénky. Použijeme např. piezoelektrickou membránu – unimorf typu KPS-100 – obr. 1. Membrána je tvořena tenkým plechem o průměru 45 mm a tloušťce kolem 0,1 mm (např. mosaz nebo slitina NiFe) a tenkým plátkem piezoelektrické keramiky PZT o průměru 25 mm a podobné tloušťky. Membrána je na obvodu ještě vybavena plastickým držákem sloužícím k jejímu mechanickému připevnění. Keramika je z obou stran elektrodována stříbrnou pastou



Obr. 1 Piezoelektrická membrána KPS-100 s připojenými LED diodami

a jednou plochou pevně nalepena na plech. Prohnutí plechu vede potom k průhybu také na keramickém prvku a ke generaci elektrického náboje a napětí.

Pro detekci piezoelektricky generovaného náboje užijeme některou z dostupných LED diod o průměru 5 mm s vyšším propustným napětím – např. modrá LED (typ OSUB5111A-RS, s propustným napětím 3,4 V) nebo bílá LED (typ OSPW53E1A-JK, s propustným napětím 3,4 V). Při použití LED diody s menším propustným napětím je vzniklý náboj v okamžiku otevření diody menší a „bliknutí“ diody je tak méně zřetelné. Diody připojíme k membráně paralelně v opačném směru proti sobě (obr. 2).



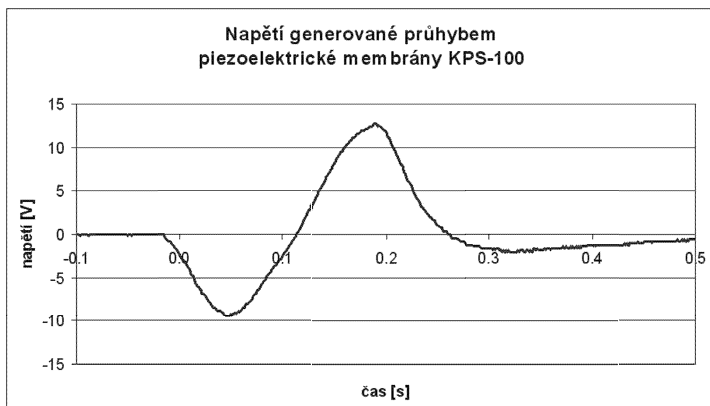
Obr. 2 Zapojení LED diod na piezoelektrické membráně

Při prohnutí membrány v jednom směru (např. tah v piezoelektrickém keramickém prvku) je otevřena jen jedna z diod a náboj protéká touto diodou. Při mechanické deformaci v opačném smyslu (tlak v keramickém piezoelektrickém prvku) je potom otevřena druhá dioda a náboj protéká druhou diodou. Při zatlačení na membránu a následném uvolnění tlaku tak vidíme postupně záblesk na první a pak druhé diodě. Takto je pěkně demonstrován lineární charakter piezoelektrického jevu, kdy je vzniklý náboj přímo úměrný mechanickému napětí

$$\frac{Q}{S} = d \cdot T,$$

kde Q je postupně generovaný náboj, T je působící mechanické napětí, d je nábojový piezoelektrický koeficient pro piezoelektrickou keramiku a S je plocha keramického prvku. Použitá piezoelektrická keramika PZT má nábojový koeficient přibližně $d = 200 \text{ pC/N}$. Velikost piezoelektricky generovaného napětí vyvolaného malou deformací membrány je zobrazena na obr. 3 a dosahuje hodnot 10 V. Použitá membrána má kapacitu 65 nF a během maxima napětí tak je nabita nábojem 650 nC a v její mechanické

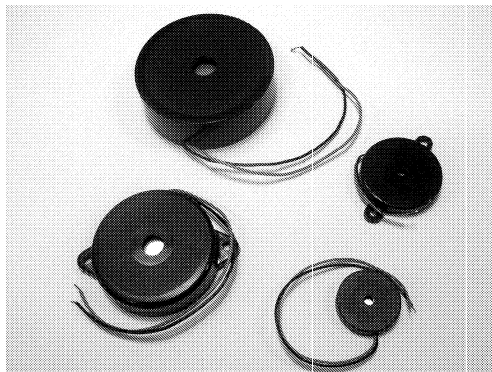
deformaci je uložena energie $3 \mu\text{J}$ převedená piezoelektrickým jevem na elektrickou formu.



Obr. 3 Piezoelektricky generované napětí při průhybu a uvolnění membrány KPS-100. Měřeno na osciloskopu

Piezoelektrická membrána může posloužit také pro demonstraci principu (nízkofrekvenčního) senzoru zrychlení – akcelerometru. Pokud celou membránou lehce ťukneme o podložku, uvidíme záblesk současně na obou připojených LED diodách. V principu jde ovšem o dva postupné záblesky, následující však ve velmi krátkém časovém intervalu. Při ťuknutí membránou o podložku dochází k její deformaci a mechanickým kmitům s typickou časovou periodou odpovídající vlastní frekvenci kmitů membrány. Vzhledem k rozměrům membrány je tato frekvence několik stovek Hz. Deformace piezoelektrického prvku opačného znamení (tah, tlak) během následujících půlperiod kmitu nastávají po sobě během několika milisekund. Tento časový interval však není naše oko schopno rozlišit a tak pozorujeme dva „současné“ záblesky. Na tomto principu pracují nízkofrekvenční piezoelektrické akcelerometry, pro které se používá kruhová nebo pravoúhlá piezoelektrická membrána (*bimorf*). Citlivost akcelerometru se dá dále zvýšit zatížením membrány tzv. seismickou hmotou. Náboj vzniklý na membráně se elektronicky zesiluje a kalibruje na hodnotu zrychlení. Piezoelektrický akcelerometr je zcela nezávislý na vnějším napájení a nepotřebuje žádný vnější zdroj (baterii). Na stejném principu lze také z vibrací piezoelektrického prvku „sklízet“ mechanickou energii a přímo ji měnit na elektrickou

formu – tzv. „*energy harvesting*“. Tato energie je ovšem relativně velmi malá a tak může být použita jen pro napájení zařízení s malou spotřebou.



Obr. 4 Piezoelektrické membrány v rezonanční skříňce – piezoelektrické sirénky

Piezoelektrickou membránu můžeme využít také pro demonstraci obráceného piezoelektrického jevu, kdy aplikace střídavého elektrického napětí vede ke střídavé mechanické deformaci membrány. Při použití akustických frekvencí v rozsahu 16 Hz – 20 kHz vydává membrána slyšitelný zvuk. Největších hladin akustické intenzity dosahujeme pro buzení membrány na vlastní rezonanční frekvenci jejích kmitů. Pro zesílení akustické intenzity se membrána také umísťuje do rezonanční skříňky, tzv. Helmholtzova rezonátoru – obr. 4. Takováto piezoelektrická sirénka snadno dosáhne hladiny akustické intenzity 100 dB ve vzdálenosti několika centimetrů na ose skříňky. Pro napájení membrány postačí obyčejný tónový generátor (generátor funkcí) s amplitudou signálu do 10 V. Více o parametrech piezoelektrických membrán v přehledném článku [1].

L i t e r a t u r a

- [1] *Půlpán, P. – Erhart, J.*: Parametry piezoelektrických unimorfů, *Elektro* 1/2005, str. 4–6.