

FYZIKA

Fyzika větrných elektráren^{*)}

OLDŘICH LEPIL

Přírodovědecká fakulta UP, Olomouc

V 90. letech minulého století nastal velký rozmach využití energie větru jako alternativního a obnovitelného zdroje elektrické energie. V naší krajině se objevily a stále objevují další věže větrných elektráren a zatím co v roce 1991 byla v provozu jediná větrná elektrárna (dnes už neexistující větrná elektrárna Kuželov v podhůří Bílých Karpat s instalovaným výkonem 151 kW), v roce 2008 jich bylo již 111. Celkový instalovaný výkon větrných elektráren na území České republiky na konci roku 2008 byl 150 MW, přičemž jen v letech 2007 a 2008 byly uvedeny do provozu 52 větrné elektrárny o celkovém výkonu přibližně 95 MW. Elektrická energie získaná ve větrných elektrárnách v roce 2008 představuje 242 GWh, přičemž celkový využitelný potenciál větrné energie na našem území je asi 6 TWh [1].

I když v roce 2008 odpovídala energie z větrných elektráren přibližně jen 0,3 % celkové spotřeby elektrické energie v ČR, lze očekávat další nárůst produkce energie z větru. To je důvod, proč by ve výuce fyziky měl být žák seznámen s principy a podmínkami využití větrné energie, s klady a zápory tohoto odvětví energetiky.

Ve větrné elektrárně se získává elektrická energie přeměnou z kinetické energie proudícího vzduchu. Příímým zdrojem mechanické energie je otáčení rotoru, jehož osa může být svislá nebo vodorovná. V současnosti převládají větrné elektrárny s vodorovnou osou, jejichž rotor tvoří vrtule s několika listy, obvykle se třemi. Listy vrtule mají podobný profil jako vrtule

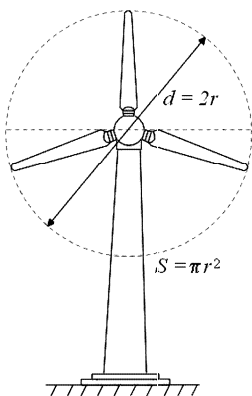
^{*)} Příspěvek je ukázkou z knihy *Fyzika aktuálně – příručka nejen pro učitele*, která právě vychází v nakladatelství Prometheus.

letadel a do pohybu je uvádí aerodynamická vztlaková síla. Počet listů ovlivňuje frekvenci otáčení rotoru, která je tím menší, čím větší je počet listů. Poloha listů vrtule bývá u moderních větrných elektráren nastavitelná, a to umožňuje regulaci vztlakové síly. Tím se mění frekvence otáčení rotoru elektrárny a tedy i její okamžitý výkon. Při velkých rychlostech větru je možné listy nastavit tak, že vztlaková síla je nulová a rotor se zastaví.

Energie větru

Uřídíme energii větru a posoudíme možnost její přeměny na energii otáčivého pohybu soustrojí větrné elektrárny. Budeme uvažovat větrnou elektrárnu, jejíž rotor má průměr $d = 2r$, takže účinná plocha S rotoru větrné elektrárny, kterou proudí vzduch, je $S = \pi r^2$ (obr. 1). Výpočet provedeme pro rovnoměrný pohyb vzduchu o hustotě ρ , který proudí stálou rychlostí v . Jestliže vzduch urazí za dobu Δt dráhu Δs , bude hmotnost vzduchu, který projde účinnou plochou rotoru, rovna $m = \rho S \Delta s$ a pro celkovou kinetickou energii vzduchu dostáváme

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho S \Delta s v^2.$$



Obr. 1 Rotor větrné elektrárny

Pokud by veškerou tuto energii bylo možné využít, získali bychom výkon

$$P = \frac{E_k}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho S \frac{\Delta s}{\Delta t} v^2 = \frac{1}{2}\rho S v^3.$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že pro využití větrné energie je rozhodující rychlost větru. Kdybychom uvažovali např. průměrnou rychlost větru v České republice ve výšce 10 m nad zemí, která je $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, byl by při hustotě vzduchu $\varrho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ výkon připadající na 1 m^2 účinné plochy rotoru $P/S = 0,6v^3 \approx 38 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (veličina se označuje jako hustota výkonu). Větrné elektrárny se budují v lokalitách, kde je průměrná rychlost větru alespoň $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a tomu odpovídá hustota výkonu $130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, tedy téměř 3,5krát větší.

Výkon větrné elektrárny ovlivňuje také hustota vzduchu, která se v místě elektrárny může měnit v závislosti na změnách tlaku a teploty vzduchu. Pro určení hustoty vzduchu vyjdeme ze stavové rovnice ideálního plynu ve tvaru

$$pV = \frac{m}{M_m}RT,$$

kde $M_m = 29 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ je efektivní molární hmotnost vzduchu. Pro hustotu vzduchu pak platí vztah

$$\varrho = \frac{m}{V} = \frac{M_m}{R} \frac{p}{T} = \frac{1}{287} \frac{p}{T},$$

kde p je tlak vzduchu v pascalech a T je termodynamická teplota vzduchu v kelvinech. V blízkosti povrchu země lze při zjednodušených výpočtech uvažovat již uvedenou přibližnou hodnotu hustoty vzduchu $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

V praxi však je možné využít jen podstatně menší část energie větru. Tímto problémem se ve 20. letech 20. století zabýval rakouský inženýr *Albert Betz* (1885–1968), který zkoumal možnost využití energie větru k pohonu. Jestliže např. plochou rotoru proudí vzduch rychlostí v_1 (vstupní rychlost), předává mu část energie a rychlost vzduchu se zmenší na rychlost v_2 (výstupní rychlost). Můžeme uvažovat, že vzduch zařízením proudí průměrnou rychlostí $\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$ a hmotnost vzduchu, který projde rotorem za jednotku času, je $\bar{m} = \varrho S \bar{v}$.

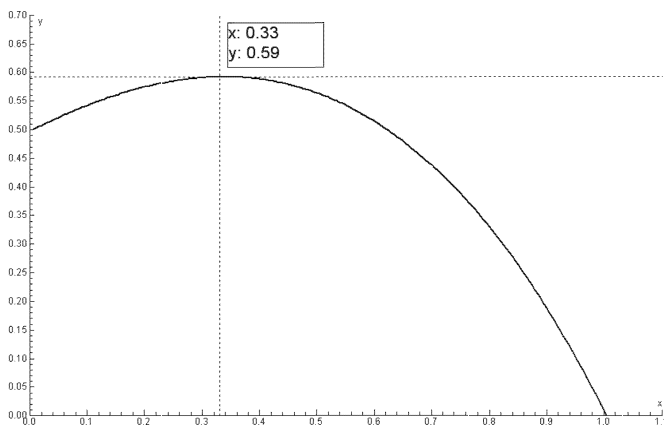
Vzduch na vstupu elektrárny má energii $E_{k1} = \frac{1}{2} \bar{m} v_1^2$ a na výstupu energii $E_{k2} = \frac{1}{2} \bar{m} v_2^2$. Je tedy možné získat energii

$$\Delta E = E_{k1} - E_{k2} = \frac{1}{2} \bar{m} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \varrho S \cdot \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2).$$

Důležité je, jak tato energie závisí na poměru obou rychlostí. Označíme x poměr rychlostí $x = \frac{v_2}{v_1}$ a $y = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$. Úpravami dostáváme

$$\begin{aligned}
 y &= \frac{1}{2}(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{3}(v_1^3 - v_1v_2^2 + v_2v_1^2 - v_2^3) \\
 &= \frac{1}{2}v_1^3 \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 + \frac{v_2}{v_1} - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right] = \frac{1}{2}v_1^3(1 - x^2 + x - x^3).
 \end{aligned}$$

Na obr. 2 je počítačem vytvořený graf závislosti $y = f(x)$, z něhož je patrné, že veličina y dosahuje maxima při hodnotě $x = 0,33$, tedy když rychlost na vstupu zařízení je 3krát větší než na výstupu ($v_2/v_1 = 1/3$).



Obr. 2 K výkladu Betzova vztahu

Provedeme výpočet veličiny y pro tento poměr rychlostí, při němž se maximální část energie větru přemění na rotační energii:

$$y = \frac{1}{2}v_1^3(1 - x^2 + x - x^3) = \frac{1}{2}v_1^3 \left(1 - \frac{1}{9} + \frac{1}{3} - \frac{1}{27} \right) = \frac{16}{27}v_1^3 \doteq 0,59v_1^3$$

Odtud vyplývá, že maximální výkon zařízení využívajícího energii větru je

$$P_{\max} \doteq 0,59 \cdot \frac{1}{2} \rho S v_1^3.$$

Tento vztah se označuje také jako *Betzovo pravidlo*.

Maximální dosažitelná hustota výkonu při rychlosti větru v je s ohledem na Betzovo pravidlo dána vztahem

$$\frac{P_{\max}}{S} \doteq 0,35v^3.$$

Teoretická největší účinnost zařízení využívajících energii proudícího vzduchu je tedy necelých 60 % celkové kinetické energie vzduchu. Ani nejmodernější systémy současných větrných elektráren však této účinnosti nedosahují, poněvadž dochází k dalším ztrátám energie. Jsou to jednak ztráty v mechanickém soustrojí elektrárny, jednak ztráty v elektrických obvodech generátoru a při transformaci výstupního napětí elektrárny. To způsobuje, že větrné elektrárny využívají přibližně jen 30 % až 45 % energie větru.

Například současná největší větrná elektrárna v ČR u obce Pchery [2] má rotor o průměru 100 m a jeho osa je ve výšce 88 m. Startovní rychlost větru je $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, jmenovitá rychlost $12,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a vypínací rychlost $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jmenovitý výkon elektrárny je 3 032 kW. Energie větru při jmenovité rychlosti a hustotě vzduchu $\varrho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ by umožňovala dosáhnout výkon

$$P = \frac{1}{2} \varrho S v^3 \approx 9\,400 \text{ kW}.$$

Vzhledem k jmenovitému výkonu elektrárny je využito přibližně jen 32 % energie větru, což je 55 % maximálně využitelné energie určené Betzovým pravidlem.

Z předcházejícího výkladu je zřejmé, že pro využití energie větru je rozhodující jeho rychlost, která narůstá s výškou nad zemským povrchem. To je dáno zejména vlivem členitosti povrchu, zástavbou, porostem apod. Souhrnně tyto vlastnosti povrchu charakterizujeme jako jeho „drsnost“. Jestliže ve výšce h_1 je rychlost větru v_1 , pak ve výšce h_2 je rychlost větru v_2 a platí vztah

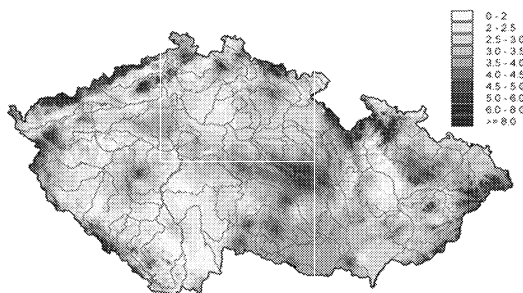
$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^n,$$

kde n je koeficient závislý na kvalitě zemského povrchu. Pro některé druhy povrchu je hodnota tohoto koeficientu následující:

zemský povrch	n
hladký povrch, oceán, písek	0,10
nízký porost nebo neobděláná půda	0,16
vysoký porost nebo nízké rostoucí plodiny	0,18
vysoký les s hustými větvemi, předměstí, malá města	0,30
řádky s vyššími plodinami nebo nízký les	0,20
města, vysoké budovy	0,40

Jestliže je tedy průměrná rychlost větru ve výšce 10 m v dané lokalitě $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pak ve výšce 80 m, kam se umísťují větrné elektrárny větších výkonů, bude při koeficientu 0,20 rychlost $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V lokalitě, kde je ve výšce 10 m rychlost větru $5,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, bude ve výšce 80 m rychlost větru při stejné kvalitě povrchu země $8,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Proto se větrné elektrárny umísťují na vysoké stožáry, které mají výšku i 100 a více metrů. Pro činnost moderních větrných elektráren jsou využitelné větry vanoucí rychlostí $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (startovací rychlost) až $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (odpojovací rychlost). Současné větrné elektrárny dosahují jmenovitý výkon při rychlostech větších než $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



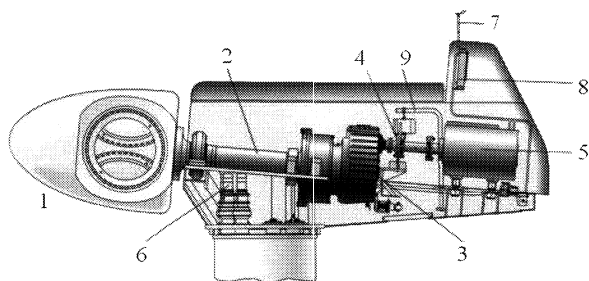
Obr. 3 Větrná mapa ČR

S ohledem na uvedené požadavky je důležité znát lokality, v nichž lze s dostatečnou pravděpodobností očekávat, že vítr dosáhne požadovanou rychlost. Poloha těchto lokalit v České republice je patrná z obr. 3 (viz

[1]). Celoroční průměrná rychlost větru je u nás ve výšce 10 m nad zemí přes $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a ve výšce 30 m je to již $5,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Větrné elektrárny lze budovat v lokalitách s průměrnou rychlostí větru $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a více. To je splněno zpravidla v nadmořských výškách větších než 700 m. Tato pohoří však vesměs leží v chráněných krajinných oblastech, kde není možné větrné elektrárny budovat, takže odpadá až 70 % vhodných lokalit. Příhodnými oblastmi jsou horská pohraniční pásma (např. Krušné hory a Jeseníky) a oblast Českomoravské vrchoviny. Nové technologie a realizace větrných elektráren na stále vyšších stožárech umožňuje jejich výstavbu i v mimohorských lokalitách a v zalesněných oblastech.

Princip větrné elektrárny

Základní části větrné elektrárny jsou patrné z obr. 4. Strojovna elektrárny je v otočné gondole na vrcholu trubkové ocelové věže (tubusu) kuželové konstrukce, v níž je schodiště nebo výtah umožňující obsluhu přístup do strojovny. V patě věže jsou umístěny elektrické rozvaděče a řídicí systémy elektrárny. Rotor s třílistou vrtulí (1) je upevněn na ose (2), která je základní součástí vstupní, pomaloběžné části elektrárny. Frekvence otáčení se může měnit v intervalu 5 až 15 otáček za minutu. Generátor elektrického napětí však pro svoji funkci vyžaduje větší frekvenci otáčení. Proto je mezi pomaloběžnou část a generátor zařazena převodovka (3), která frekvenci otáčení zvětšuje. U moderních větrných elektráren se používají převodovky s plynule měnitelným převodovým poměrem. Jestliže rychlost větru vzroste, změní se automaticky převodový poměr tak, aby se vrtule rotoru mohla otáčet rychleji, ale frekvence otáčení generátoru se nemění. Součástí elektrárny je také brzda (4), která zabráňuje překročení mezních otáček rotoru a při velkých rychlostech větru umožňuje zastavení elektrárny.



Obr. 4 Strojovna větrné elektrárny

Elektrickou část větrné elektrárny tvoří generátor elektrického napětí (5), který může mít různou konstrukci:

1. **Stejnoseměrné generátory** se používají jen pro malé elektrárny a jejich napětí je 12 V až 24 V. Nejsou závislé na elektrické rozvodné síti (tzv. *grid-off*), ale fungují jako autonomní zdroj napětí, který nejčastěji slouží k nabíjení akumulátorů. Napětí 230 V pro napájení běžných spotřebičů se pak získává pomocí polovodičových zařízení, tzv. měničů. Tento typ elektráren je vhodný jako zdroj pro místa, která jsou vzdálená od vedení elektrické sítě. Kombinují se také s fotovoltaickými panely, které rovněž slouží k nabíjení akumulátorů např. v létě, kdy je více slunečných dnů a menší vítr.

2. **Synchronní a asynchronní generátory** se používají ve středních a velkých větrných elektrárnách. Jsou zdrojem střídavého napětí a dodávají energii přímo do rozvodné sítě (tzv. *grid-on*). Asynchronní generátory mají jednodušší konstrukci, která je obdobná jako u asynchronních motorů, např. s kotvou nakrátko. Jestliže se kotva takového stroje točí s frekvencí větší, než je frekvence magnetického točivého pole, rotor točivé pole předbíhá a generátor dodává do sítě elektrickou energii. Synchronní generátor je v podstatě alternátor s obdobnou konstrukcí, jaká se používá v klasických elektrárnách.

Konstrukce generátorů se však neustále zdokonaluje. Na rozdíl od generátorů v klasických elektrárnách se používají k vytváření magnetického pole permanentní magnety. Odpadá stejnosměrný zdroj budicího napětí (budič) a sběrné kroužky, kterými je rotor generátoru propojen s budičem. Generátory jsou obvykle vícepólové, aby se požadované frekvence 50 Hz dosáhlo i při nižší frekvenci otáčení generátoru. Konstantní frekvence otáčení se dosahuje jak nastavením listů vrtule (IPC – *individual pitch control*), tak změnou převodového stupně převodovky (SPG – *super position gear*), popř. systémem brzdění (*brake*). Optimální nastavení úhlu jednotlivých listů vrtule umožňuje maximální využití větrné energie. Regulace nastavení se provádí automaticky elektronickým systémem řízení výkonu. Výstupní napětí generátorů velkých větrných elektráren je 660 V a pro připojení do rozvodné sítě je dále transformováno na napětí 110 kV.

V některých elektrárnách se používají generátory, u nichž magnetické pole vytváří rotující část generátoru přímo spojená s osou vrtule, takže odpadá převodovka. Permanentní magnety (NdFeB) s velkou magnetickou indukcí jsou nalepeny na vnitřním obvodu rotoru a rotor tvoří vnější

část generátoru, která se otáčí kolem statoru. Tím se dosahuje zmenšení rozměrů celé soustavy a jednodušší je údržba. To je významné zejména u převodovky, která obsahuje větší množství oleje a je citlivá na přetížení.

Větrná elektrárna s horizontální osou musí při chodu směřovat proti větru. Proto je důležitou součástí elektrárny soustava zajišťující otáčení celé gondoly se strojovnou elektrárny na vrcholu věže. Natáčení se provádí pomocí servomotorů (6), ovládaných automaticky na základě údajů čidel směru (větrná korouhev) a rychlosti větru (anemometr), které jsou umístěny nad gondolou elektrárny (7). Jestliže čidla zaznamenají změnu směru větru, vyhodnocovací elektronika uvede do činnosti servomotor a strojovna se natočí do požadovaného směru. Natáčení probíhá zvolna, aby hlavní hřídel soustrojí elektrárny nebyla příliš namáhána gyroskopickým momentem rotující vrtule. Dalšími částmi elektrárny jsou systém chlazení generátoru (8) a pomocný jeřáb (9) pro montážní práce.

Aby se dosáhlo větší efektivity ve využití lokality vhodné k umístění větrných elektráren a snížily se náklady na jejich výstavbu, budují se tzv. *větrné farmy*, popř. označované také jako *větrný park*. U nás má největší celkový výkon (42 MW) větrná farma ve střední části Krušných hor v nadmořské výšce 800 m. Tvoří ji 21 větrných elektráren, z nichž každá má výkon 2 MW.

Mnohem větší rozsah má výstavba větrných elektráren ve světě, zejména v USA, kde je větrná energetika na potřebné úrovni rozpracována jak po technické, tak ekonomické i sociologické stránce. Platí to zejména o Kalifornii, kde vznikla řada větrných farem. Jedna z nejznámějších je *Altamont Pass* (San Francisco) s rozlohou 140 km², kde je na 7 300 elektráren různé konstrukce a o menším výkonu (obr. 5). Celkový instalovaný výkon je 750 MW a pokrývá spotřebu 800 000 kalifornských domácností.

V Evropě se rozvinula větrná energetika především v přímořských státech. Např. v Německu bylo v roce 2006 v provozu 18 054 větrných elektráren s celkovým výkonem 19 299 MW. Na dalších místech v rozsahu využití větrné energie jsou Španělsko, Dánsko, Holandsko a Itálie. Perspektivně by větrná energetika v zemích s nejpříhodnějšími podmínkami, tedy v přímořských státech mohla pokrývat 20 % celkové spotřeby elektrické energie.

Využívání větrné energie má svoje pozitiva i negativa. Pozitivní je, že představuje prakticky nevyčerpatelný obnovitelný zdroj energie. Provoz větrné elektrárny není zdrojem žádných emisí, odpadního tepla a nevyžaduje k provozu vodní zdroje. Jednotlivé větrné elektrárny nejsou náročné na rozlohu plochy pro jejich výstavbu, avšak rozsáhlé větrné farmy za-



Obr. 5 Větrná farma Altamont Pass

bírají větší plochu než např. klasické elektrárny. Mohou však vznikat na plochách, které jiné využití nemají. Obecně lze konstatovat, že realizace větrné elektrárny je nákladná a má svoje negativa. Jde o nestabilní zdroj elektrické energie, jehož chod není zcela pravidelný. Jsou však vyvíjeny nové možnosti ukládání elektrické energie z větrných elektráren, což zvyšuje jejich efektivitu. Budování větrných elektráren vyžaduje časově a finančně náročnou přípravu před výstavbou a značné investiční prostředky při realizaci. Ve srovnání s uhelnými nebo jadernými elektrárnami mají větrné elektrárny stále relativně malý výkon, což vyžaduje, aby jich byl budován velký počet.

Nejčastěji je kritizována hlučnost větrných elektráren, která je však u nejnovějších typů podstatně menší, a větrné elektrárny se budují v dostatečné vzdálenosti od obydlí (hlučnost nesmí překročit v místě nejbližší budovy ve dne 50 dB a v noci 40 dB). Problémem je také estetické narušení krajiny, na které nemají lidé jednotný názor. Je to podobné jako skutečnost, že současná krajina je prakticky téměř všude protkána stožáry s dráty elektrického vedení. Často kritizovanou skutečností jsou úhyny ptáků při nárazu na rotující části elektrárny. Je jich však podstatně méně než ptáků, kteří zahynou při nárazu např. na průhledné protihlukové stěny. Další očekávané negativní vlivy, jako je rušení zvíře, např. pasoucího se dobytka, stroboskopický efekt, který vzniká kmitáním stínu rotujících vrtulí při malé výšce slunce nad obzorem, nebo rušení televizního signálu

se u realizovaných větrných elektráren nepotvrdily. Jisté nebezpečí hrozí v zimním období, kdy z rotující vrtule větrné elektrárny může odletovat námraza.

Literatura

[1] <http://www.csve.cz/>

[2] <http://www.vtepchery.cz>

[3] <http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi-z-obnovitelnych-zdroju/vitr.html>

LabQuest – měření v „terénu“

VÁCLAV PAZDERA

Gymnázium, Olomouc, Čajkovského



Obr. 1 LabQuest

LabQuest [1] (obr. 1) je jednoduchý měřicí přístroj pro fyzikální, chemická i biologická měření ve třídě i v přírodě a splňuje nejvyšší nároky kladené v současné době na školní fyzikální měření. Vznikl spojením interfejsu LabPro [1] a počítače do ruky s dotykovou obrazovkou. Může pracovat zcela samostatně, ale lze ho připojit i k počítači přes USB port. Tím se zlepší hlavně grafické možnosti zobrazení naměřených výsledků nebo jejich prezentace dataprojektorem. Firma Vernier [2] nabízí k tomuto přístroji 57 senzorů [3]. Asi tři pětiny z nich jsou fyzikální. Další jsou pak chemické a biologické. Některé z těchto senzorů je možno použít i pro měření v přírodě.

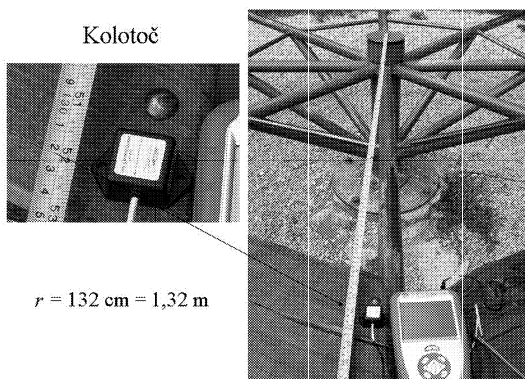
Například barometr, který spojením s LabQuestem vytvoří barograf. Podobně připojením teploměru vzniká **termograf**.

V příspěvku uvedu tři příklady měření v „terénu“ (přírodě).

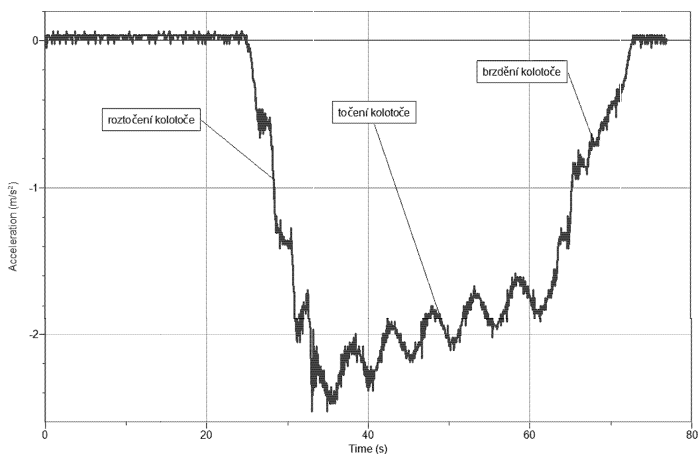
Kolotoč

Spojením akcelerometru s LabQuestem vzniká přístroj pro měření zrychlení při různých pohybech v přírodě. V dopravních prostředcích, pádech, skocích atd. Já jsem vybral ten nejjednodušší – pohyb kolotoče (obr. 2).

Kolotoč jsem roztočil a pak jsem ho nechal asi 30 sekund točit setrvačností a na konec jsem ho zastavil. LabQuest mi při tom změřil dostředivé zrychlení a vykreslil mi graf (obr. 3).



Obr. 2 Na kolotoči je volně položený LabQuest s akcelerometrem a metrem



Obr. 3 Graf závislosti zrychlení na čase

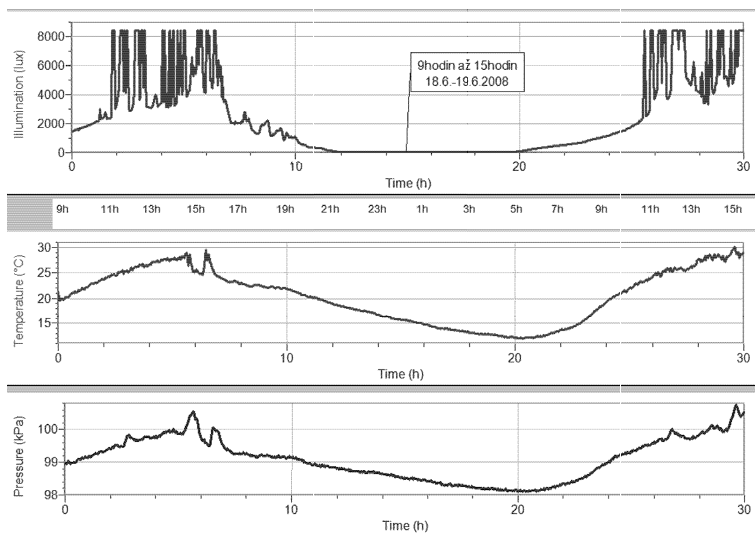
Z obr. 3 je patrné, že i při pohybu bez působení síly, která kolotoč uvedla do pohybu, se zrychlení zmenšuje a pravidelně kolísá. Zřejmě kolotoč se neotáčí přesně ve vodorovné rovině. Z toho je možné přímo na přístroji LabQuest odečíst periodu T otáčení: $T \doteq 4,98$ s. Stejně je ovšem možné změřit T v průběhu pohybu pomocí stopek. Jestliže známe poloměr otáčení r ($r = 1,32$ m, viz obr. 2) a periodu T , můžeme snadno spočítat velikost dostředivého zrychlení:

$$a_d = \frac{4\pi^2 r}{T^2} = \frac{4\pi^2 (1,32 \text{ m})}{(4,98 \text{ s})^2} \doteq 2,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Na obr. 3 je vidět, že se při volném otáčení kolotoče hodnota zrychlení pohybovala od $2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ do $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Barograf a termograf

Spojením barometru a teploměru s LabQuestem vznikají **barograf** a **termograf**. Navíc jsem ještě připojil luxmetr. Dobu měření jsem nastavil na 30 hodin a začátek jsem spustil v 9:00 hod. Naměřené grafy ukazují obr. 4.



Obr. 4 Měření barografem a termografem po dobu 30 hodin

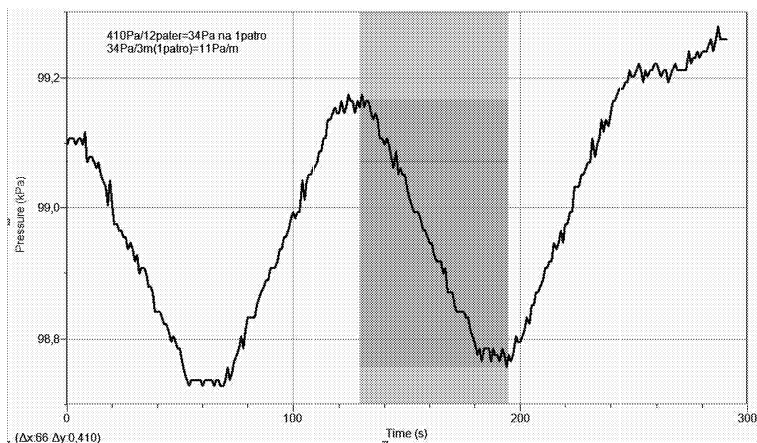
Na obrázku je zajímavá spojitost atmosférického tlaku a teploty v průběhu letního dne. Kolísání osvětlení (od 3 000 luxů do 8 000 luxů) ve dne bylo způsobeno mírnou oblačností, která střídavě zastiňovala Slunce.

Vodojem

Barometru s LabQuestem jsem využil ještě při dalším zajímavém měření. Zkoušel jsem jízdu výtahem ve významné budově v Olomouci – vodojemu (obr. 5). Tato budova je vidět na velkou vzdálenost při příjezdu po dálnici z Brna do Olomouce. Závislost atmosférického tlaku na době znázorňuje obr. 6.

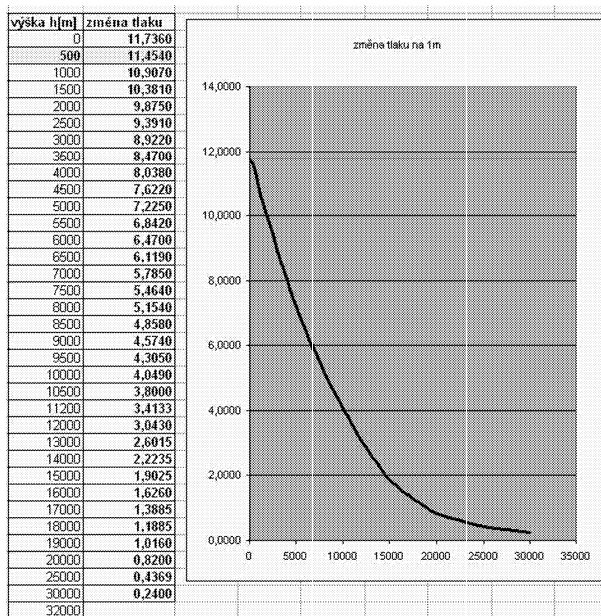


Obr. 5 Vodojem



Obr. 6 Změna atmosférického tlaku při jízdě výtahem

Z grafu můžeme odečíst změnu tlaku, která je asi 11 Pa na jeden metr jízdy výtahem. Tento výsledek si můžeme potvrdit tím, že si v Excelu



Obr. 7 Graf změny tlaku na nadmořské výšce

sestrojíme graf závislosti atmosférického tlaku na nadmořské výšce (z tabulkových hodnot) a tento graf „zderivujeme“. Z obr. 7 je vidět, že tato změna v nadmořské výšce 260 m je něco kolem 11,5 Pa. Což je ve shodě s naměřenou hodnotou.

Závěr

LabQuest je školní přístroj, který se při obdobných fyzikálních experimentech osvědčil a mohu ho všem učitelům fyziky, ale i chemie a biologie doporučit. Příznivá je i cena LabQuestu a jednotlivých senzorů. Zájemcům poskytnu další informace: pvaclav@centrum.cz.

Literatura

- [1] <http://www.vernier.com/mbl/>
- [2] <http://www.vernier.com/>
- [3] <http://www.vernier.com/probes/>