

## Větrné elektrárny – mnoho otazníků

Václav Železný\*, *Fakulta strojní ČVUT v Praze*

Větrné elektrárny. Společně s vodní energií patří energie větru mezi ty člověkem nejdéle využívané. Po stovky a tisíce let to byly dokonce jediné dva zdroje energie, jejíž sílu měl člověk k dispozici vedle síly své a hospodářských zvířat. Teprve devatenácté a zejména dvacáté století přineslo radikální změnu a připravilo tyto energie o jejich do té doby dominantní postavení. Vodní energie si díky určitým charakteristickým znakům, mezi něž patří zejména vysoká pohotovost, zachovala určité postavení v oblasti výroby elektrické energie, avšak využívání větrné energie na dlouhá desetiletí prakticky zaniklo. Teprve v posledních letech jsme svědky poměrně výrazné renesance ve využívání větrné energie, a to právě v oblasti výroby elektrické energie. Zejména v některých státech západní Evropy se masivně budují větrné elektrárny. Zároveň jsme však také svědky značných rozporů a vášnivých debat, které tento trend vyvolává. Nemalou část viny na tomto stavu bohužel mají mnohdy až fanatičtí zastánci větrné energie, rekrutující se často z řad různých takzvaně „ekologických“ hnutí. Jejich naprosto nekritické prosazování větrné energie totiž opomíjí nejen ekologické, ale i určité technické a ekonomické obtíže, které jsou s jejím využíváním spojené, a to se musí zákonitě setkávat s negativními reakcemi z řad energetických odborníků. Jak je to tedy s větrnou energií? Je to čistá a laciná energie pro budoucnost, anebo nespolehlivá drahá hračka? Dosavadní zkušenosti jsou zatím spíše rozporuplné a i v Česku větrné elektrárny většinou dosud výrazně zůstaly za projektovými předpoklady.

### TROCHU TEORIE

Získávání energie z větru je teoreticky velmi jednoduché. Proudící vzduch se opírá o lopatky větrné turbíny a předává jim část své pohybové energie. Ta se mění na mechanickou energii v podobě otáčivého pohybu rotoru a následně pak v generátoru na energii elektrickou. Z toho je možné jednoduše stanovit výkon, který lze z větru teoreticky získat, neboť je závislý na pohybové energii proudícího vzduchu. V případě jednotkové plochy tedy platí následující vztah:

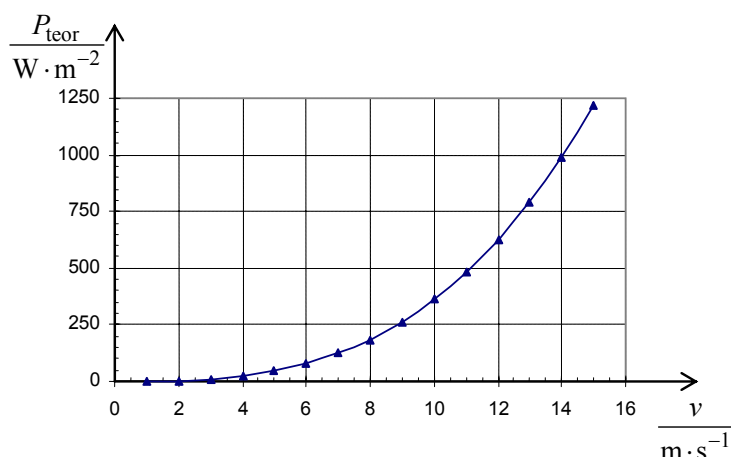
$$P_{\text{teor}} = 0,59 \cdot v \cdot \rho_{\text{vz}} \cdot \frac{v^2}{2} = 0,59 \cdot \rho_{\text{vz}} \cdot \frac{v^3}{2},$$

kde  $v$  je rychlost větru a  $\rho_{\text{vz}}$  je hustota vzduchu.

Hodnota 0,59 je koeficient vyplývající z Betzova zákona. Německý fyzik Albert Betz v roce 1919 odvodil, že na rotoru větrného zařízení nelze z proudícího vzduchu získat veškerou pohybovou energii, ale že lze přeměnit maximálně asi 59 % této energie. Závislost využitelného výkonu na rychlosti větru je znázorněna na grafu 1.

---

\* zelezny@fsid.cvut.cz

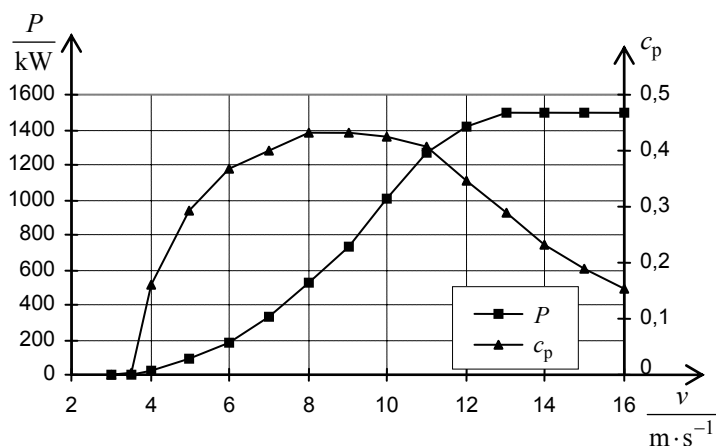


Graf 1 Závislost teoreticky využitelného výkonu ( $P_{\text{teor}}$ ) na rychlosti větru

Pro výkon větrné turbíny s rotorem o průměru  $D$  se však nejčastěji používá následujícího vztahu:

$$P = \rho_{\text{vz}} \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot c_p = 0,125 \cdot \rho_{\text{vz}} \cdot \pi \cdot v^3 \cdot D^2 \cdot c_p,$$

kde  $D$  je průměr rotoru a  $c_p$  představuje součinitel výkonnosti. Ten udává, jaký podíl z energie z proudícího vzduchu se využívá na turbíně. Maximální hodnota součinitele výkonnosti může teoreticky dosáhnout 0,59. Vyšší hodnota není možná, neboť by to odporovalo Betzovu zákonu. Reálné maximální hodnoty součinitele výkonnosti jsou o něco nižší (menší než 0,5). Tento součinitel navíc není konstantní, jak ukazuje křivka v grafu 2, kde je znázorněn jednak průběh tohoto součinitele a také výkonová křivka turbíny REpower MD 70, která pracuje v Nové Vsi v Horách. Je patrné, že se vzrůstající rychlostí větru se součinitel snižuje, neboť listy rotoru se natáčejí tak, aby výkon plynule dosáhl nominální hodnoty a pak se již nezvyšoval. Nižší hodnoty jsou bohužel také u nižších rychlostí, což ještě více snižuje už tak dost malé výkony turbíny při nízkých rychlostech větru.



Graf 2 Výkonová křivka a součinitel výkonnosti větrné turbíny

## PROBLÉMY PŘI VYUŽÍVÁNÍ VĚTRNÉ ENERGIE

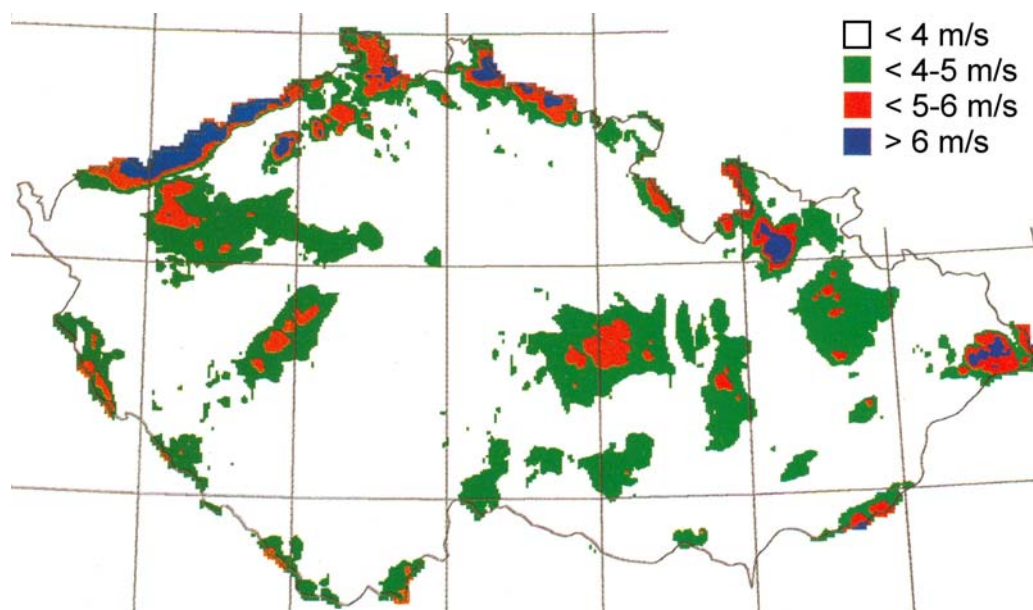
Již v úvodu byl připomenut fakt, že využívání větrné energie s sebou nese určité problémy a obtíže. Protentokrát ponechme stranou otázky týkající se vlivu na životní prostředí, jako je ohrožování ptactva, možné rušivé zvuky a stroboskopické světelné efekty, narušování rázu kra-

jiny atd. Tyto vlivy jsou pouze lokální. Zásadnější problémy se jeví v oblasti technicko-provozní a ekonomické.

### Technicko-provozní problémy

Prvním obecně známým problémem je skutečnost, že vítr patří mezi zdroje, které jako celek sice mají poměrně velký potenciál, ale jeho využitelnost je značně omezena nízkou hustotou výkonu. To znamená, že z jednotky plochy můžeme získat jen malý výkon. Tento nedostatek je dobře patrný z grafu 1, na kterém je v závislosti na rychlosti větru vynesena průběh výkonu, který lze teoreticky získat z  $1 \text{ m}^2$  plochy. Křivka je silně deformována kubickou závislostí na rychlosti větru. Pro nižší rychlosti je tento výkon dokonce menší nežli  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pro vyšší rychlosti blízcí se nominální hodnotě sice tento výkon stoupá k  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , avšak i tato hodnota je stále relativně nízká. Pro získání větších výkonů je proto třeba budovat velká a poměrně drahá zařízení.

Je hezké, že moderní větrná turbína je natolik kvalitní, že pro její spuštění a přifázování do sítě stačí obvykle rychlost větru  $3\text{--}4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , avšak její výkon je v takovém případě velmi malý a se zesilujícím větrem narůstá zpočátku jen pozvolna, jak je vidět na grafu 2. Je patrné, že solidního využití instalovaného výkonu se dosahuje až při rychlosti větru okolo  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) a výše. Pokud se ovšem podíváme na Beaufortovu stupnici síly větru, tak zjistíme, že od  $39 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  je vítr klasifikován stupněm 6, což znamená silný vítr, a to je už dost nepříjemně větrné počasí. V české kotlině je však situace víceméně opačná a pro větrnou energetiku tudíž krajně nepříznivá. Při pohledu na obrázek 1 zobrazující větrnou mapu naší republiky je zřejmé, že většina našeho území má průměrnou rychlost větru menší nežli  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , přičemž tato hodnota se obvykle uvádí jako limitní pro stavbu větrných elektráren a tudíž zde prakticky nemá význam uvažovat o jejich výstavbě. Pouze výrazně menší část našeho území tuto podmínku splňuje, i když ani zde to není s rychlostí větru povětšinou žádná sláva. Vhodné oblasti se tak omezují zejména na výše položené a hřebenové partie hor a vrchovin v nadmořských výškách zpravidla nad 650 metrů nad mořem. Vhodné lokality se nacházejí především v oblastech severních pohraničních hor.



Obrázek 1 Větrná mapa českého území  
 aut: RNDr. Josef Štekl, RNDr. Zbyněk Sokol, UFA-AVČR

Dalším problémem, který spadá do technicko-provozní oblasti, je nestabilita výkonu. Výkon větrných elektráren nejenže je poměrně malý, ale v určitých provozních režimech je díky silné závislosti na rychlosti větru navíc ještě dost nestálý, protože vítr coby přírodní živél je značně proměnlivý. Tento problém se na rozdíl od nedostatečného výkonu může citelněji projevat zejména při takových rychlostech větru, kdy je křivka závislosti výkonu na rychlosti větru nejstrmější. Jako příklad lze použít opět turbínu REpower MD 70. Podle údajů výrobce dává tato turbína při rychlosti  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  výkon 1006 kW. Pokud však rychlost větru poklesne, resp. vzroste o pouhý  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , výkon klesne na 728 kW, resp. stoupne na 1271 kW. Změna činí 543 kW, což představuje 36 % nominálního výkonu. Je zřejmé, že za určitých okolností může i relativně malá změna síly větru způsobit velké změny ve výkonu elektrárny. Při počtu několika málo strojů to vcelku nevádí, ale zcela jiná situace může nastat s případným masivnějším rozvojem větrné energetiky a nárůstem celkového instalovaného výkonu do stovek MW či výše. Výkonové fluktuace jednotlivých strojů či celých farem se sice mohou navzájem kompenzovat, ale rozhodně na to nelze plně spoléhat, protože tomu za nepříznivých okolností může být i naopak. A v takovém případě by už vzniklé výchylky mohly být dost vysoké na to, aby to minimálně v dané lokalitě způsobovalo potíže při regulaci elektrizační soustavy. Elektřinu nelze skladovat, a tak musí být výkon elektráren a spotřeba elektřiny stále přibližně v rovnováze. Stabilní výkon lze však u větrné elektrárny očekávat až při rychlosti větru  $15\text{--}20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . To ovšem odpovídá 7. až 8. stupni Beauforta, což znamená prudký až bouřlivý vítr, který již může působit hmotné škody.

Příkladem může být sousední Německo, kde došlo v uplynulých letech k masivnímu rozvoji větrné energetiky. Instalovaný výkon německých větrných elektráren na konci roku 2004 činil přes 16 500 MW a další stroje jsou ve výstavbě. Právě Německo uvádějí různé aktivisté jako vzor, ale už taktně mlčí o vznikajících problémech. Němečtí energetici se totiž dalšího nárůstu výkonu větrných elektráren počínají obávat, protože jejich nestabilita začíná už při takto velkém instalovaném výkonu ohrožovat stabilitu tamní elektrizační soustavy. Fluktuace výkonu se již mohou pohybovat až v řádu tisíců MW. Ukazuje se, že regulace sítě s dnes již více než 16 tisíci větrnými elektrárnami, jejichž výkon se může nahodile měnit minutu od minuty, je problémem i pro tak technicky vyspělý stát.

Na našem území ještě stojí za zmínku i další dva rizikové faktory, a to je poměrně častý výskyt námraz a blesků. V zahraničí se tyto problémy v takové míře nevyskytují, neboť jsou dány specifickými podmínkami našeho území. Zkušenosti z provozu demonstrační elektrárny Dlouhá Louka v Krušných horách vypovídají o velkém riziku námrazy v období od října do dubna, o čemž svědčí i fakt, že elektrárna byla v období 1994–1997 skoro 11 % času neschopná provozu právě z důvodu námrazy. Toto vysoké riziko je bohužel typické pro většinu vhodných výše položených lokalit obecně. O nebezpečí atmosférické elektřiny pak vypovídá skutečnost, že tato demonstrační elektrárna byla dvakrát přímo zasažena bleskem. Všechny výše uvedené technicko-provozní problémy patrně nejsou či nebudou neřešitelné, ale pokud bude jejich zvládnutí náročnější, tak to bude také znamenat větší náklady na elektřinu vyrobenou ve větrných elektrárnách.

### **Ekonomické problémy**

Zásadní nevýhodou větrných elektráren je relativně vysoká cena jimi vyráběné elektrické energie. Při laickém pohledu se přitom může získávání elektrické energie z větru jevit jako velmi výhodné. Postavíme elektrárnu, vítr je zadarmo a údržba kvalitního dobře fungujícího zařízení by také neměla vyžadovat příliš velké finanční prostředky. Skutečnost je však poněkud odlišná a je třeba se podívat na to, z čeho se skládají celkové náklady na výrobu elektřiny z daného zdroje. Tyto náklady se dělí na fixní a variabilní.

U fixních nákladů tvoří dominantní část prostředky, které bylo nutné vynaložit na vybudování zdroje – investiční náklady. V Evropě se podle dostupných údajů tyto náklady v posledních letech pohybují v průměru lehce nad 1 000 € na 1 kW instalovaného výkonu. U nás mohou jako příklad posloužit dvě elektrárny, které byly spuštěny v předloňském roce. Jejich investiční náklady se však dost liší. Již zmíněná elektrárna REpower v Nové Vsi vychází asi na 33 000 Kč/kW, což vcelku odpovídá evropským cenám. Naproti tomu mediálně asi nejvíce známá elektrárna v Jindřichovicích pod Smrkem, se dvěma větrnými turbínami Enercon E40 o výkonu 600 kW, vychází na více než 51 000 Kč/kW. Není však úkolem tohoto článku pátrat po příčině tohoto rozdílu.

Fixní složka ročních nákladů, která – jak již bylo naznačeno – je tvořena převážně odpisem investic, zůstává víceméně konstantní, nezávisle na produkci elektřiny. Její vliv na výrobní cenu elektřiny tedy silně závisí na ročním objemu výroby, jinak řečeno na ročním využití zdroje. A zde je u větrných elektráren problém. Uvedená výše investičních nákladů je nižší nežli u jaderných bloků a zhruba srovnatelná s moderními fosilními bloky, ale využití větrných elektráren je ve srovnání s nimi výrazně menší. Zatímco dobře fungující jaderná elektrárna běžně pracuje více jak 7 000 hodin ročně a uhelné bloky okolo 5 000 hodin, jsou na tom větrné elektrárny výrazně hůře, neboť jsou závislé na větru. A tak se i ve vybraných lokalitách stává, že elektrárna nepracuje kvůli příliš slabému větru, nebo naopak musí být zastavena kvůli příliš silnému či nárazovitému větru. I při provozu není vítr často dost silný, a tak i když elektrárna pracuje, dává pouze část výkonu. Výsledkem pak pochopitelně je nízké využití instalovaného výkonu a s tím související růst ceny elektřiny, neboť čím méně energie se vyrobí, tím větší díl fixních nákladů připadá na jednu vyrobenou kilowatthodinu.

Nízké využití větrných elektráren je problém obecný, což potvrzují i údaje ze zahraničí. Průměrné využití ve světě se podle dostupných údajů pohybuje okolo 2 300 h/rok, přičemž jednotlivé elektrárny se od sebe mohou výrazně lišit v závislosti na větrnosti lokality. Například v Německu se udává rozmezí 1700–2500 h/rok (*pozn. některé zdroje ovšem uvádějí pouze 1600–2200 h/rok*). Mohou se navíc vyskytnout i extrémní propady. V Severním Porýní-Vestfálsku došlo k situaci, že bylo kvůli nedostatku větru z instalovaných 4 600 MW odebráno v průměru pouze 200 MW výkonu. To by odpovídalo koeficientu využití necelých 5 %, což je méně než 400 h/rok. V následující tabulce je přibližné srovnání různých větrných elektráren a jaderné elektrárny Temelín, která je v současnosti nejnovějším a investičně nejnáročnějším energetickým zařízením v Česku.

Tabulka 1 Srovnání některých parametrů VE s JE Temelín

elektrárna	investiční náklady [Kč/kW]	využití instalovaného výkonu [h/rok]	investiční náklady [Kč/kWh] <sup>1)</sup>
VE Jindřichovice (Enercon E40)	51 000	1 700 <sup>2)</sup>	1,50
VE Nová Ves (REpower MD70)	33 000	2 850 <sup>2)</sup>	0,58
průměrná VE (země EU)	32 000	2 300	0,70
JE Temelín	50 000	5 800 <sup>3)</sup>	0,29

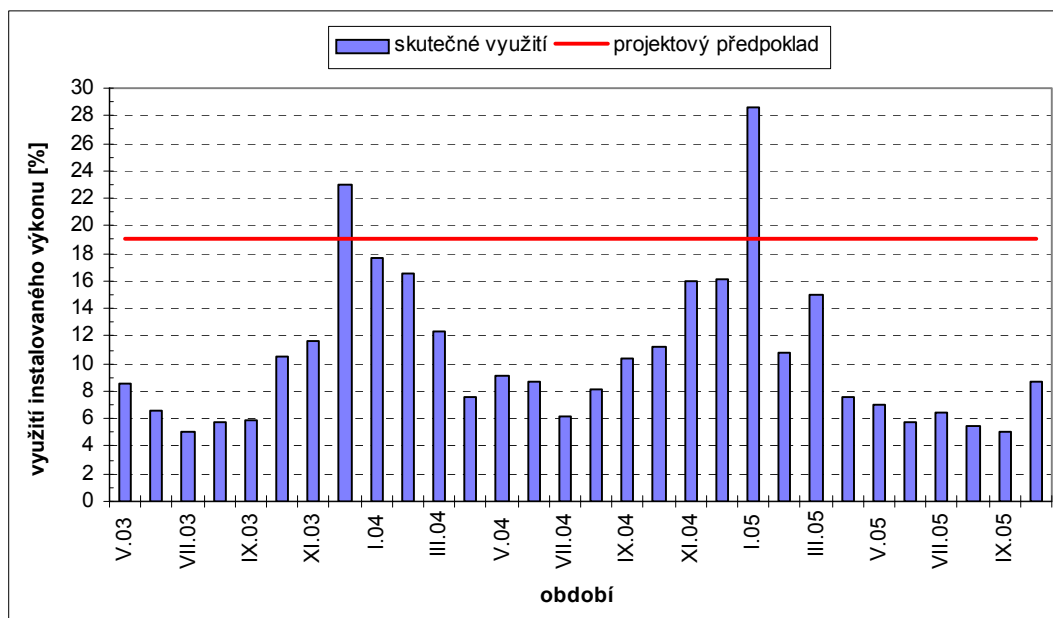
1) Orientační přepočítání investičních nákladů na kWh elektřiny vyrobené za projektovanou dobu životnosti

2) U obou českých projektů jde o předpoklad podle větrnosti lokality

3) Projektový předpoklad. JE běžně dosahují více (např. Dukovany cca 7 500 h/rok)

Tabulka 1 ukazuje, že jak výše investičních nákladů na 1 kW instalovaného výkonu, tak využití elektrárny mají značný vliv na celkovou cenu elektřiny. Oba české projekty jsou zatím

v provozu něco přes dva roky, přičemž je třeba alespoň tři sezón, aby se ukázalo, zda byly předpoklady produkce správné, a také jak se na provozu projeví riziko námraz. Nicméně, na základě údajů o dosavadním provozu elektrárny Jindřichovice znázorněných v grafu 3, lze konstatovat, že tato elektrárna prozatím poněkud zaostává za projektovými předpoklady, kde se počítalo s výrobou okolo 2 000 MWh za rok. To odpovídá zhruba 1 700 hodinám provozu při jmenovitém výkonu ročně (viz tabulka 1), což představuje cca 19 % využití instalovaného výkonu. Na špatných výsledcích za rok 2003 se zcela určitě podepsalo abnormální počasí onoho roku. Provozní výsledky za rok 2004 byly již o něco lepší, avšak ani zde se nepodařilo dosáhnout předpokládaného 19% využití, a to dokonce ani v jediném měsíci. Za celé dosavadní období provozu se tohoto výsledku podařilo dosáhnout pouze ve dvou měsících, a to v prosinci 2003 a v lednu 2005. V lednu 2005 byla výroba rekordní, ale celkově jsou dosavadní výsledky tohoto roku horší nežli v roce 2004. Vzhledem k tomu, že se jedná již o třetí sezónu provozu této elektrárny, je tento trend znepokojivý. Pokud tedy nedojde k výraznému a trvalému zlepšení provozních výsledků, tak byly v projektu uváděné předpoklady zřejmě chybné. Spolehlivé údaje o provozu elektrárny v Nové Vsi se prozatím nepodařilo získat a není tedy možné zhodnotit, jak se daří tomuto projektu.



Graf 3 Dosavadní provozní výsledky VE Jindřichovice pod Smrkem

U variabilních nákladů tvoří dominantní část náklady na údržbu, palivo a další pro provoz nezbytné suroviny. Náklady na palivo či další suroviny u větrných elektráren pochopitelně odpadají a roční náklady na údržbu se u nových strojů obvykle udávají jako 1,5-2 % ceny technologie. To v průměru odpovídá částce kolem 0,25 Kč/kWh. I zde ovšem platí, že čím více energie se vyrobí, tím je částka připadající na 1 kWh menší a naopak. U dobře pracující větrné elektrárny může klesnout i pod 0,20 Kč/kWh, ale u málo využívané naopak výrazně překročit 0,30 Kč/kWh. Větrná energie tedy není ani z provozního hlediska tak úplně zadarmo, jak můžeme někdy slyšet od jejích zastánců. Pro srovnání uveďme, že variabilní náklady u jaderných elektráren se pohybují něco nad 0,20 Kč/kWh, neboť jaderné palivo je dlouhodobě velice laciné, zatímco u uhelných elektráren je tato částka vzhledem k dražšímu palivu asi dvojnásobná.

V celkovém srovnání však zatím vychází cena energie z větru relativně vysoká a prakticky nemůže konkurovat ceně z normálních, ať již uhelných či jaderných elektráren. Pokud bychom vzali v úvahu nízké využití, relativně vysokou investiční náročnost a náklady na údržbu, tak při současných cenách, za které se prodává elektřina do sítě, by se investice do větrné

elektrárny vůbec neměla šanci vyplácet. Jak je tedy možné, že se za této situace větrné elektrárny stavějí a provozují?

Odpověď na výše uvedenou otázku je bohužel prostá. Platíme to jako spotřebitelé elektřiny a někdy i jako daňoví poplatníci. Jako příklad obojího lze použít Jindřichovice. Celková investice činila 62 milionů korun. Z toho ovšem byla 28 milionů nevratná dotace a dalších 25 milionů nízko úročená půjčka od SFŽP. Pouze zbývajících 9 milionů zajišťovala obec. Toto je však jenom jedna z absurdit. Tou další je skutečnost, že rozvodné společnosti musí elektřinu z těchto zdrojů povinně vykupovat za státem nařízenou cenu 3 Kč/kWh, přičemž výkupní cena od normálních výrobců se v průměru pohybuje lehce nad 1 Kč/kWh. Tato absurdita má hned několik rovin. Rozvodná společnost musí platit nesmyslně vysokou cenu za elektřinu, jejíž dodávky jsou přitom přerušované a výkonově nestálé. V současné době se přitom běžně požaduje, aby výrobce byl schopen do určité míry garantovat spolehlivost dodávek, což u větrných elektráren prakticky není možné. Rozvodné společnosti navíc musí tuto z hlediska elektrizační soustavy „nekvalitní“ elektřinu odebírat bez ohledu na to, zda ji zrovna potřebují či nikoliv. To se samozřejmě může projevit na koncové ceně elektřiny pro spotřebitele.

Dotace a povinnost pro rozvodné společnosti vykupovat za garantovanou cenu však nejsou jediná negativa, která mohou ovlivňovat ekonomiku energetiky. Ta další totiž souvisí s již diskutovanou nespolehlivostí větru coby zdroje energie. Elektřinu nelze skladovat, a tak musí v každé elektrizační soustavě být k dispozici určitá rezerva instalovaného výkonu tak, aby bylo možné vždy zajistit dodávky energie v patřičné výši, a to i v případě, že některé zdroje budou v daném okamžiku mimo provoz z technických či jakýchkoliv jiných důvodů. Větrné elektrárny však v tomto případě představují problém, protože se nelze spolehnout, že elektřina z nich bude k dispozici ve chvíli, kdy jí bude skutečně potřeba. Výkon instalovaný ve větrných elektrárnách tedy musí být z velké části jistěn dalšími záložními zdroji, které jej nahradí v případě, že bude v kritické chvíli kvůli nepříznivým povětrnostním podmínkám nedostatečný. Tyto záložní zdroje pak dále ekonomicky zatěžují výrobu elektřiny, neboť je nutné investovat nejen do jejich výstavby, ale také je udržovat v provozuschopném stavu, přičemž jejich využití může být poměrně malé. Je to ovšem nezbytné, neboť jinak mohou nastat problémy se zásobováním elektrickou energií. Jak to může dopadnout, když skutečně nefouká a záložní zdroje nestačí pokrýt poptávku, se předloni v lednu ukázalo v Německu. Nedošlo sice k vážnějším výpadkům v zásobování, ale nedostatek elektřiny vyhnal v některých chvílích její cenu na burze až do vpravdě astronomických výšek. Podobných výkyvů je ovšem lépe se vyvarovat.

### ZÁVĚR

---

Jak je to tedy s větrnými elektrárnami? Na tuto počáteční otázku nelze použít ani jednu z extrémních variant odpovědi. Na straně jedné je třeba uznat, že vývoj větrných elektráren jde stále kupředu. Rostou jejich výkony, účinnost a technická spolehlivost a dochází k určitému poklesu nákladů na jimi produkovanou elektřinu. Na straně druhé ovšem je nutné připomenout, že navzdory tomu vycházejí větrné elektrárny stále ještě výrazně dražší nežli normální zdroje. Povinnost výkupu elektřiny za garantované ceny se neslučuje s pravidly volného trhu a ve větším měřítku by se patrně projevila zdražováním elektřiny. Zřejmě těžko bude kdy možné odstranit nějakým snadným způsobem závislost produkovaného výkonu na vrtošivosti větru a s tím spojené obtíže atd. Podle mínění odborníků lze usuzovat, že větrné elektrárny, zejména pokud bude nadále klesat jejich cena, naleznou v budoucnosti své uplatnění jako doplňkové lokální zdroje elektrické energie. Bylo by ovšem zatím více než nerealistické počítat s nimi jako s náhradou velké uhelné či jaderné energetiky. Takováto ekologie za každou cenu by mohla být hodně drahá.