

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vývoj větrných elektráren

**vedoucí práce: Ing. Milan Bělík, Ph.D.
autor: Jan Kořínek**

2012

Anotace

Tato bakalářská práce se zaměřuje na historický a technický vývoj větrných elektráren a uvádí základní způsoby využití energie větru, které slouží k pohonu jednotlivých druhů větrných motorů. Dalším cílem práce je podat poměrně ucelený přehled o rozvoji a současném stavu větrné energetiky. První část textu se zabývá historickým vývojem větrných elektráren a také vývojem jejich technických parametrů. Druhá část práce se zabývá vznikem, rychlostí a výkonem větru. Třetí část popisuje typy větrných motorů a jejich využití. Ve čtvrté části práce je popsán rozvoj a výstavba větrných elektráren.

Klíčová slova

Větrné elektrárny, energie větru, větrné motory, obnovitelné zdroje energie, větrný park, energetika

Abstract

This bachelor work is focused on the historical and technical development of wind turbines and provides the basic ways of using wind energy that is used to drive the individual types of wind motors. Another goal is to give a rather complete overview of the development and current status of wind energy. The first part deals with the historical development of wind turbines and also development of their technical parameters. The second part deals with the creation, speed and performance of wind. The third part describes the types of wind motors and their use. In the fourth part of the thesis is described the development and construction of wind turbines.

Key words

Wind turbines, wind energy, wind motors, renewable energy, wind farm, energetics

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 30.5.2012

Jan Kořínek

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanovi Bělíkovi, Ph.D. za cenné připomínky, odborné rady, poskytnutý čas a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval rodině a všem přátelům a známým za podporu během studia.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| OBSAH | 7 |
| ÚVOD | 8 |
| SEZNAM SYMBOLŮ | 9 |
| 1 HISTORICKÝ VÝVOJ | 11 |
| 1.1 VYUŽÍVÁNÍ ENERGIE VĚTRU | 11 |
| 1.2 PRVNÍ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNÝ | 12 |
| 1.3 RŮST VÝKONU VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN | 14 |
| 2 VZNIK VĚTRU | 17 |
| 2.1 RYCHLOST VĚTRU | 18 |
| 2.1.1 <i>Vliv terénu a výšky na rychlost větru</i> | 21 |
| 2.2 VÝKON A ENERGIE VĚTRU | 22 |
| 3 VĚTRNÉ MOTORY | 23 |
| 3.1 ZÁKLADNÍ DRUHY VĚTRNÝCH MOTORŮ | 23 |
| 3.1.1 <i>Větrné motory pracující na odporovém principu</i> | 23 |
| 3.1.2 <i>Větrné motory pracující na vztlakovém principu</i> | 23 |
| 3.2 TEORIE VĚTRNÝCH MOTORŮ | 29 |
| 3.3 VYUŽITÍ VĚTRNÝCH MOTORŮ | 33 |
| 3.3.1 <i>Moderní větrné elektrárny</i> | 34 |
| 4 ROZVOJ VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN | 36 |
| 4.1 VÝSTAVBA VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN | 40 |
| ZÁVĚR | 43 |
| POUŽITÁ LITERATURA | 44 |
| OBRÁZKY – POUŽITÉ ZDROJE | 45 |

Úvod

Dnešní lidstvo potřebuje ke své spokojené existenci ohromné množství elektrické energie. Elektrická energie se v přírodě ve využitelné podobě nevyskytuje, takže si ji lidé musí různými způsoby vytvářet. Základem pro vytváření elektrické energie je přeměna jiné formy energie, která je v přírodě dostupná. K tomuto účelu jsou stále využívána převážně fosilní paliva, a to zejména uhlí, ropa a zemní plyn. Protože však energetická spotřeba lidstva roste závratným tempem, jsou zásoby energie uložené ve fosilních palivech vyčerpitelné v řádu několika desetiletí, což představuje zanedbatelný časový úsek vzhledem k existenci člověka. Hrozící vyčerpání zásob fosilních paliv naráží na problematiku trvale udržitelného rozvoje a nutí lidstvo hledat další zdroje energie. Jako perspektivní se dnes jeví i obnovitelné zdroje energie.

Obnovitelný zdroj energie je schopen poskytovat energii hypoteticky tisíce let. Obnovitelné zdroje energie na planetě Zemi mají svůj původ zejména v energii slunečního záření, které vzniká termojadernou reakcí v nitru Slunce. Za další zdroje můžeme považovat teplo zemského jádra nebo setrvačnost soustavy, která je představována Měsícem a Zemí. Na Zemi pak dochází k jevům, jejichž energie se využívá přímo, nebo je přeměňována na jinou formu energie. Mezi významné obnovitelné zdroje energie patří zejména sluneční energie, vodní energie, přílivová energie, geotermální energie, energie biomasy a energie větrná.

Ačkoliv je energetický potenciál obnovitelných zdrojů ohromný, jeho využití je někdy obtížné a často je třeba zastavět velká prostranství zařízeními sloužícími k využívání tohoto potenciálu, což přináší obvykle velké počáteční investice. Výhodou obnovitelných zdrojů energie je však skutečnost, že nic nestojí a přesto nás obklopují na mnoha místech. Důležitým hlediskem je i energetická politika Evropské unie, která prosazuje maximální možné využití obnovitelných zdrojů, což přináší nemalé finanční prostředky do této oblasti. V posledních letech získává stále významnější zastoupení v celkovém objemu elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů také energie větru.

Seznam symbolů

| | |
|---|--|
| v_s [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Průměrná rychlost větru |
| $f(x)$ | Distribuční charakteristika rychlostí větru (funkce) |
| $F(x)$ | Distribuční charakteristika rychlostí větru (integrální tvar funkce) |
| a [-] | Koeficient rozptylu |
| b [-] | Tvarový součinitel |
| x [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Rychlost větru |
| v_{10} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Rychlost větru ve výšce 10m |
| y [-] | Výškový korekční součinitel |
| v_p [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Přepočtená rychlost větru |
| E [J] | Energie pohybu vzduchu |
| v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Rychlost proudícího vzduchu |
| m [kg] | Vzdušná hmota |
| V [m^3] | Objem vzduchu |
| ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] | Hustota vzduchu |
| P_v [W] | Výkon přenášený proudícím vzduchem |
| S [m^2] | Průtočná plocha |
| p_b [Pa] | Barometrický tlak |
| T [K] | Termodynamická teplota vzduchu |
| λ [-] | Rychlostní součinitel |
| z [-] | Počet lopatek |
| A_1 [m^2] | Kontrolní plocha 1 |
| A_2 [m^2] | Kontrolní plocha 2 |
| v_1 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Rychlost proudícího vzduchu skrz plochu 1 |
| v_2 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] | Rychlost proudícího vzduchu skrz plochu 2 |
| A [m^2] | Plocha vrtule |
| F_a [N] | Axiální síla působící na rotor |
| P [W] | Výkon rotoru |
| ΔE_k [J] | Změna pohybové energie proudu vzduchu |
| t [s] | čas |
| η_i [-] | Ideální (Betzova) účinnost |
| F [N] | Síla působící na profil křídla |
| F_y [N] | Vztlaková složka síly |
| F_x [N] | Odporová složka síly |
| c_y [-] | Aerodynamický součinitel vztlaku |
| c_x [-] | Aerodynamický součinitel odporu |

| | |
|----------------------------|---|
| A_k [m ²] | Plocha křídla |
| v_0 [m·s ⁻¹] | Rychlost nenarušeného proudu vzduchu |
| EIA | Vyhodnocení vlivů na životní prostředí (studie) |

1 Historický vývoj

1.1 Využívání energie větru

Využívání větrné energie sahá do daleké minulosti. Například kresby plavidel s plachtou plujících po řece Nil jsou staré více než 5000 let a babylonský král Hammurabi měl v plánu zavlažovat roviny Mezopotámie s využitím větrné energie již v 17. století před naším letopočtem. První zmínky o větrných mlýnech s vertikální osou pochází z Persie a z Číny a jsou staré přibližně 2200 let. Nejstarší zmínka o motoru s vodorovnou osou pochází z Egypta z 3. století před Kristem. Větrné mlýny se rozšířily během 11. století našeho letopočtu nejprve na Středním východě a během 13. století začaly pronikat do Evropy. Nejdříve se objevily v Itálii, Francii a na Pyrenejském poloostrově, později ve Velké Británii, v Německu a Holandsku. Holandsko začalo větrné motory využívat k odvodňování mokřin, ale i k mletí obilí a k pohonu pil. Dokonce i na území České republiky se dosud nachází klasické staré větrné mlýny nebo jejich zbytky. Klasické větrné mlýny, které můžeme považovat za předchůdce větrných elektráren, tedy nesloužily k výrobě elektrické energie, ale sloužily k přeměně energie větru na mechanickou práci. [1]

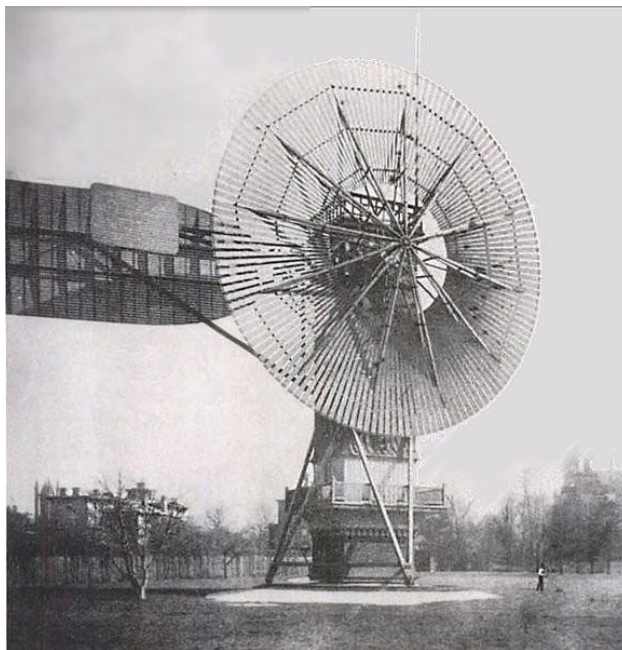


Obr. 1.1 Typické větrné mlýny, Nizozemí, Kinderdijk

Pozdější rozvoj prvních malých spalovacích motorů a především rozšíření parního stroje, jehož vynalezení v roce 1765 se dnes obvykle připisuje Jamesi Wattovi, znamenaly pro větrné motory úpadek. Přesto však na některých místech stále docházelo k vývoji větrných motorů. [1, 6]

1.2 První větrné elektrárny

Vytvoření první větrné elektrárny je dnes připisováno dvěma nezávislým badatelům z rozdílných kontinentů. Podle záznamů skutečně první větrnou elektrárnu postavil Američan Charles F. Brush v Clevelandu. Tento muž sestrojil na přelomu let 1887 a 1888 první automatickou větrnou turbínu, která byla napojena na generátor elektrického proudu. Rotor větrného motoru o průměru 17m složený ze 144 lopatek z cedrového dřeva poháněl stejnosměrný generátor, který dosahoval při 500 otáčkách za minutu výkonu 12kW. [7, 8]



Obr. 1.2 První větrná elektrárna sestavená Charlesem F. Brushem v Clevelandu

V Evropě jako první zkonstruoval roku 1891 větrnou elektrárnu profesor lidové univerzity Poul la Cour v obci Askov v Dánsku. Tato větrná elektrárna se podobala klasickému větrnému mlýnu. Měla čtyři až šest křídel, která byla tvořena plachtami napnutými na rámové konstrukci. [7]

Podnět k rozvoji lokálních zařízení využívajících energii větru přišel s nedostatkem energetických surovin v období první světové války. V roce 1919 patentoval inženýr Povel

Vindig z Dánska první moderní větrnou elektrárnu, jejíž rotor pracoval na aerodynamickém principu. Na konci dvacátých let dvacátého století byly v Dánsku poměrně rozšířeny menší větrné elektrárny, které se uplatňovaly zejména v místech, kde neexistovalo připojení k elektrické síti. Významným objektem byl ve své době větrný motor postavený u Jalty na Krymu roku 1931 s výkonem 100kW a především větrný motor Smith – Putnam se synchronním generátorem o výkonu 1250kW využívaný od roku 1941 do roku 1945 na území státu Vermont v USA. Dvoulístý rotor vyrobený ze železa měl 55m v průměru a vážil 16t. Byl umístěn na 40m vysoké železné konstrukci. Větrný motor Smith – Putnam přesáhl jako první větrný motor na světě hranici 1MW výkonu. [1, 7, 8, 9, 10]

Roku 1957 postavil dánský inženýr Johannes Juul větrnou elektrárnu na střídavý proud zvanou Gedserský mlýn. Strojovna elektrárny byla umístěna na 24m vysokém betonovém sloupu. Elektrárna tohoto typu, která již pracovala s třílístým rotorem o průměru 24m a dosahovala výkonu 200kW, byla základem ke konstrukci opravdu moderních zařízení. [7, 8, 11]

Šedesátá léta dvacátého století přinesla znatelný útlum všech projektů větrných motorů. To ovlivňovala zejména nízká cena kapalných i jiných paliv a energii vyrobená pomocí větrných elektráren byla značně dražší než energie z tepelných elektráren. Obrat nastal s vzestupem cen paliv během sedmdesátých let. Další podnět k využívání větrných motorů přinesla zvýšená snaha o ochranu životního prostředí a vědomí omezeného množství fosilních zdrojů paliv. [1]

V letech 1975 až 1977 postavili v dánském městečku Tvind studenti a učitelé místní školy větrnou elektrárnu, která znamenala další velký pokrok ve vývoji. Strojovna s vrtulí se třemi 27m dlouhými lopatkami byla umístěna na betonové věži vysoké 53m. Tato elektrárna s maximálním výkonem 900kW a s roční produkcí až 1000MWh do dubna roku 2010 vyprodukovala 18 186 000 kWh elektrické práce. [7, 12]



Obr. 1.3 Větrná elektrárna postavená učiteli a studenty, Tvind, Dánsko

1.3 Růst výkonu větrných elektráren

Během 80. let minulého století docházelo k postupnému navyšování výkonů sériově vyráběných elektráren, takže okolo roku 1990 dosahovaly výkony stovek kilowattů a na konci devadesátých let dvacátého století bylo dosahováno hranice megawattu. Vyskytovaly se samozřejmě i experimenty, které svými výsledky překonávaly obvyklou komerční produkci a testovaly možnosti těchto zařízení, které jsou omezeny vlastnostmi konstrukčních materiálů a přírodními a technickými limity. [7]

Důležitým experimentálním projektem byla větrná elektrárna s výkonem 3MW postavená v roce 1981 u obce Maglarp na jihu Švédska. Byla nazvána WTS-3 (Wind Turbine System 3). Strojovna s hmotností 171t byla umístěna na ocelovou věž vysokou 77m. Rotor elektrárny o průměru 78m byl tvořen dvěma listy, přičemž jeden list měl hmotnost 14t. Tato větrná elektrárna vyprodukovala ročně až 8GWh elektrické práce. Její provoz skončil roku 1992. [7, 11]

Výrazným mimoevropským experimentálním projektem byla větrná elektrárna Éole s vertikální osou a výkonem 4MW postavená v Kanadě. Její rotor typu Darrieus má průměr

64m a je vysoký 96m. Tato větrná elektrárna byla provozována v letech 1988 až 1993. [13]



Obr. 1.4 Éole, největší větrná elektrárna se svislým rotorem, oblast Cap-Chat, Quebec, Kanada

Na konci dvacátého století také komerčně provozované větrné elektrárny překročily výkon 1MW na jediném stožáru. Největší zařízení tohoto typu stojí v Německu. V tomto ohledu vyniká větrná elektrárna E – 126 od firmy ENERCON se jmenovitým výkonem 7,5MW a průměrem rotoru 127m a celkovou výškou 135m. [7, 14]



Obr. 1.5 Větrná turbína E – 126, poblíž Emden, Německo

Tab. 1.6 Vývoj větrných zařízení

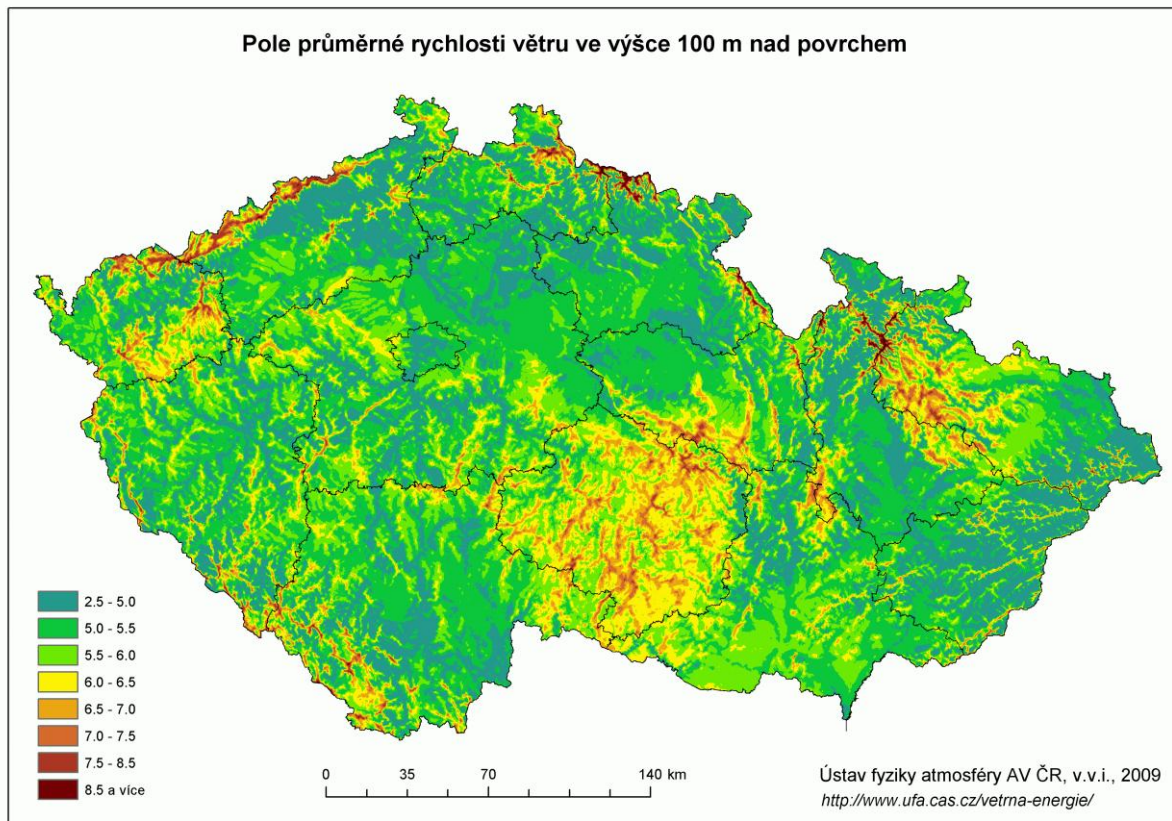
| rok | typ | jmenovitý výkon [kW] | průměr rotoru [m] |
|--------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|
| 16. až 19. století | holandský větrný mlýn | až 30 | až 25 |
| 1888 | první větrná elektrárna | 12 | 17 |
| 1931 | D - 30 (Jalta - Krym) | 100 | 30 |
| 1941 | Smith - Putnam | 1250 | 55 |
| 1950 | Gedserský mlýn | 200 | 27 |
| 1975 | Tvindkraft | 960 | 54 |
| 1981 | WTS-3 (Maglarp) | 3000 | 78 |

Tab. 1.7 Vývoj komerčních větrných elektráren od německé firmy ENERCON [14, 15]

| rok | typ | jmenovitý výkon [kW] | průměr rotoru [m] |
|------|---------|----------------------|-------------------|
| 1984 | E-15/16 | 55 | 15 nebo 16 |
| 1988 | E-17 | 80 | 17 |
| 1988 | E-32 | 300 | 32 |
| 1993 | E-40 | 500 | 40 |
| 1995 | E-66 | 1500 | 66 |
| 2005 | E-112 | 6000 | 114 |

V současné době je problematika využívání obnovitelných zdrojů energie stále značně aktuální. To způsobuje, že v mnoha zemích se rozvíjí výroba větrných motorů, které mají za úkol nejčastěji výrobu elektřiny. Tento trend je patrný v zemích s rozvinutým průmyslem a především s vhodnými povětrnostními podmínkami. Z evropského prostředí se toto týká zemí, které leží na pobřeží Severního moře, popřípadě severního pobřeží Atlantického oceánu. Jedná se zejména o Dánsko, Nizozemí, Německo, Francii, Velkou Británii a Španělsko. V přímořských oblastech těchto zemí vanou pravidelné a poměrně silné větry až 80% dní v roce. Z amerického kontinentu jsou důležitými zeměmi z hlediska využívání energie větru především Kanada a USA, kde vhodné větrné podmínky panují v oblastech severního pobřeží Atlantického oceánu, Tichého oceánu a Severního ledového oceánu, nebo také Mexiko, Argentina či Brazílie. Z dalších zemí ve světě je zájem o využívání větrné energie zejména v Číně, Indii, Austrálii a v Rusku. [1]

V České republice nalezneme příhodné větrné podmínky zejména v horských oblastech a na vrchovinách. Vhodné lokality pro výstavbu větrných elektráren z hlediska rychlosti větru zobrazuje větrná mapa České republiky (obr. 1.8), která byla vytvořena pracovníky Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR. [1]



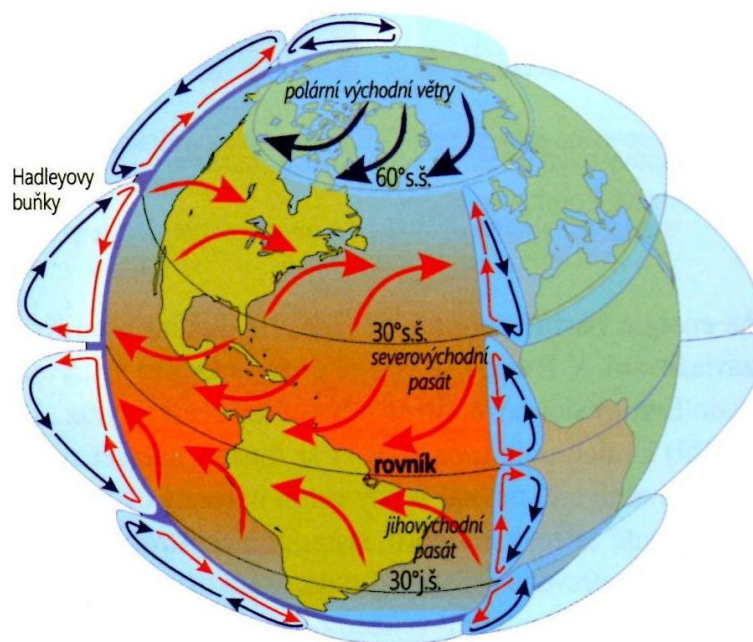
Obr. 1.8 Větrná mapa České republiky

2 Vznik větru

Větrem nazýváme nepravidelné, převážně vodorovné proudění vzduchu. Vznik větru je zapříčiněn působením Slunce. Slunce totiž vyzařuje ohromné množství energie a Země část této vyzařované energie přijímá. Přibližně 2% dopadající sluneční energie jsou přeměňovány na proudění vzduchu. Mezi množstvím sluneční energie dopadajícím na rovník a na póly je ovšem velký rozdíl. Tato nerovnováha je příčinou ohromného transportu energie od rovníku směrem k pólům. [2]

Přenos tohoto tepla je uskutečněn zejména přesouváním vzduchu. Vznikají cirkulační buňky, kterým se říká Hadleyovy cirkulační buňky (obr. 2.1). Dále je proudění vzduchu odkláněno rotací Země, což je příčinou vzniku do značné míry rovnoměrných větrných

proudů. Kromě globálního proudění působí i místní vlivy. K těm patří zejména působení oblastí tlakové níže a tlakové výše, které způsobují stáčení větru. [3]



Obr. 2.1 Globální cirkulace větru a vznik větru

V přímořských oblastech navíc působí chladný mořský vánek, který proudí od moře na pevninu, a pobřežní vánek, který proudí z pevniny k moři. Zářením Slunce je během dne zahřívána pevnina a vzduch, který se nad ní rozprostírá, se dokáže ohřát výrazně víc než vzduch, který se rozprostírá nad mořskými vodami. Teplejší vzduch nad pevninou stoupá a na jeho místo vane chladný vzduch od moře. Během noci se tento cyklus otočí, protože pevnina chladne rychleji než moře. V horských oblastech můžeme pozorovat proudění katabatických větrů. Chladnější vzduch zde vane během noci směrem do údolí. [3]

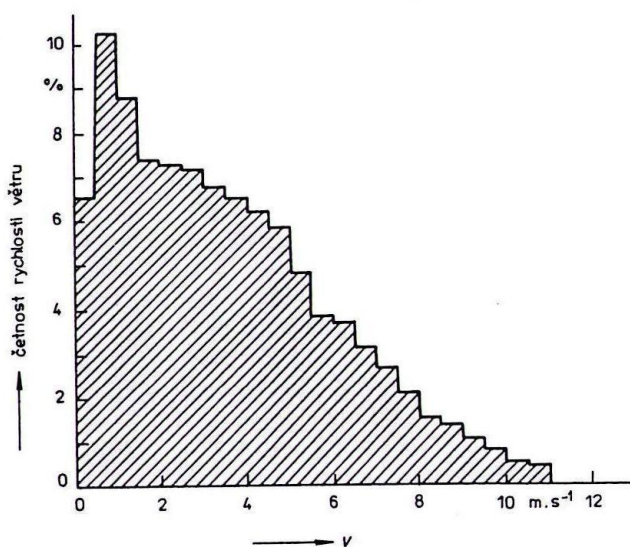
2.1 Rychlost větru

Podstatným kritériem pro využívání energie větru je jeho směr, ale nejdůležitějším kritériem je jeho rychlost. Rychlost je totiž nejdůležitější pro celkový i pro využitelný výkon větru. K měření rychlosti a směru větru se využívají meteorologické stanice. Pro hodnocení síly větru byla zavedena Beaufortova stupnice (tab. 2.2). Tato stupnice nosí jméno britského kontraadmirála sira Francise Beauforta. [1]

Tab. 2.2 Beaufortova stupnice [1]

| Rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] od do | Stupeň Beauforta | Označení síly větru | Projev v přírodě |
|--|---------------------|------------------------|---|
| 0 až 0,2 | 0 | bezvětrí | kouř stoupá kolmo |
| 0,3 až 1,5 | 1 | vánek | kouř stoupá podle větru |
| 1,6 až 3,3 | 2 | slabý vítr | vítr je cítit na tváři, šelest listí |
| 3,4 až 5,4 | 3 | mírný vítr | pohyb větviček stromů, čeří hladinu vody |
| 5,5 až 7,9 | 4 | dost čerstvý vítr | zvedá prach a papíry, napíná praporek |
| 8,0 až 10,7 | 5 | čerstvý vítr | napíná větší prapory, tvoří menší vlny |
| 10,8 až 13,8 | 6 | silný vítr | pohybuje větvemi, tvoří vlny na vodě |
| 13,9 až 17,1 | 7 | prudký vítr | pohybuje středními stromy, nesnadná chůze |
| 17,2 až 20,7 | 8 | bouřlivý vítr | láme větve stromů, pohybuje silnějšími stromy |
| 20,8 až 24,4 | 9 | vichřice | škody na střechách, ulamuje menší stromy |
| 24,5 až 28,4 | 10 | silná vichřice | vyvrací stromy, působí škody na obydlích |
| 28,5 až 32,6 | 11 | mohutná vichřice | velké škody na domech, poráží chodce |
| 32,7 a více | 12 | orkán | ničivé účinky |

Rychlost větru je ovšem nerovnoměrná a mění se v rozmezí vteřin, proto je obvykle popisována průměrnou rychlostí v_s [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] během jednoho roku. Průměrná rychlost větru však poskytuje pouze informativní charakter, proto je třeba ji doplnit o rozdělení četnosti rychlostí větru. Četnost rychlostí větru lze vhodně popsat pomocí sloupcového grafu. Na vodorovnou osu vynášíme rychlost větru ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, nebo $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), na svislou osu poměrnou délku úseku času, po kterou vane vítr uvedenou rychlostí. [1]



Obr. 2.3 Příklad grafu četnosti rychlostí větru

Upravením rozdělení četnosti rychlostí větru dostaneme místo sloupcového diagramu funkci. Pro stanovení této funkce, označované jako distribuční charakteristika rychlostí větru, se často používá Weibullovo rozdělení:

$$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad (2.4)$$

Integrální tvar funkce:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{a}\right)^b\right] \quad (2.5)$$

Součinitel a nazýváme koeficient rozptylu. Hodnota koeficientu rozptylu udává polohu maxima funkce. Pro průměrnou rychlost větru platí přibližně:

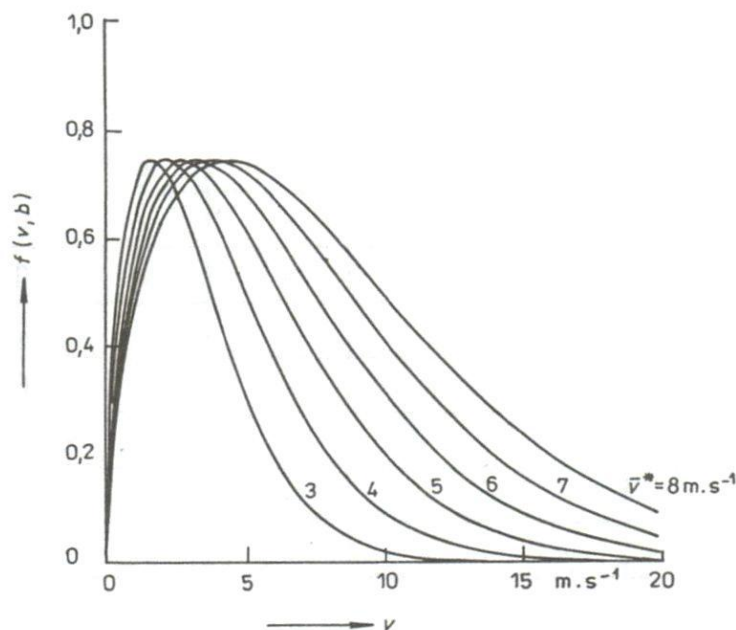
$$v_s = 0,88 \cdot a \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.6)$$

Součinitel b se nazývá tvarový součinitel. Jeho hodnota se pohybuje přibližně v rozmezí od 1,5 do 3,0.

Proměnná x (má charakter náhodné veličiny) je zde rychlost větru.

Získaná distribuční charakteristika poskytuje informaci o celkové energii vzduchu, která protéká sledovanou plochou. Tato energie je závislá na průměrné rychlosti větru a výrazně závislá na hodnotě tvarového činitele b . Čím více je distribuční charakteristika plochá, tím větší množství energie prochází sledovanou plochou. [2]

Jako využitelné pro správnou činnost větrných motorů jsou považovány nejčastěji větry s rychlostí přibližně od 4 do 24 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Toto rozmezí rychlostí se liší podle typu větrného motoru, jeho výkonu a druhu jeho regulace. [2]



Obr. 2.7 Ukázka distribučních funkcí pro Weibullovo rozdělení při průměrné rychlosti větru 3 až 8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tvarový součinitel $b = 1,5$

Pro správný provoz větrných motorů je třeba řešit průměrnou rychlost větru a tedy i distribuční charakteristiky pro jednotlivé měsíce roku. To souvisí s využitím větrných motorů, které je například pro zemědělské účely (čerpání vody) spíše sezónní záležitostí. Vyšších hodnot na území České republiky dosahuje rychlost větru obecně v zimních měsících. [1]

2.1.1 Vliv terénu a výšky na rychlost větru

Rychlost větru je ovlivněna také nadmořskou výškou a tvarem zemského povrchu, přičemž obecně platí, že směrem k povrchu rychlost větru klesá. Závislost rychlosti na výšce je v rovinném terénu celkem jednoduchá, neboť ji ovlivňuje pouze drsnost povrchu krajiny. Rychlost větru v_{10} měřená ve výšce 10m je podle potřeby dále přepočítávána. K tomu nám slouží výškový korekční součinitel y a platí vztah:

$$v_p = y \cdot v_{10} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (2.8)$$

Hodnota v_p je tedy rychlost větru přepočtená pro výšku nad zemí a typ povrchu.

Tab. 2.9 Tabulka hodnot výškového korekčního součinitele y [2]

| Korekční součinitel y | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| Výška nad zemí [m] | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Hladký povrch | 1,00 | 1,10 | 1,17 | 1,21 | 1,25 |
| Hrubý povrch | 1,00 | 1,39 | 1,69 | 1,95 | 2,17 |

Dalším činitelem, který má vliv na rychlost větru, jsou překážky v terénu. Tyto překážky, mezi které patří například jednotlivé stromy nebo budovy, především výrazně zpomalují rychlost větru a mají vliv na směr jeho proudění. Vhodnými místy pro výstavbu větrných elektráren jsou oblasti s vyšší nadmořskou výškou. Zejména se jedná o horské průsmyky, které jsou kolmo natočeny ke směru větru. [1, 2]

2.2 Výkon a energie větru

Energii pohybu vzduchu popisuje známý vztah:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{J}] \quad (2.10)$$

přičemž v je rychlost proudícího vzduchu a m je vzdušná hmota, pro kterou platí:

$$m = \rho \cdot V \quad [\text{kg}] \quad (2.11)$$

kde V je objem vzduchu a ρ je hustota vzduchu.

Po dosazení a úpravě dostáváme vztah, který popisuje výkon přenášený proudícím vzduchem:

$$P_v = \frac{1}{2}m \cdot v^2 = \frac{1}{2}S \cdot \rho \cdot v \cdot v^2 \quad [\text{W}] \quad (2.12)$$

$$P_v = \frac{1}{2}S \cdot \rho \cdot v^3 \quad [\text{W}] \quad (2.13)$$

Ze vztahu je zřejmé, že výkon proudícího vzduchu je přímo úměrný velikosti průtočné plochy S [m^2], hustotě vzduchu ρ [kg/m^3] a třetí mocnině rychlosti proudícího vzduchu v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]. Hustota vzduchu je ovlivněna barometrickým tlakem p_b [Pa] a termodynamickou teplotou vzduchu T [K]. [1, 2]

3 Větrné motory

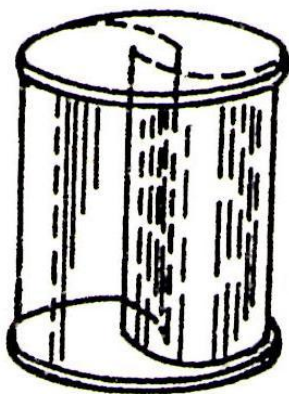
3.1 Základní druhy větrných motorů

Větrné motory je možné rozlišovat podle několika kritérií. Nejdůležitějším kritériem dělení je aerodynamický princip, protože ten je pro chod větrného motoru nejpodstatnější. S ohledem na aerodynamický princip rozlišujeme odporové a vztlkové větrné motory. [4]

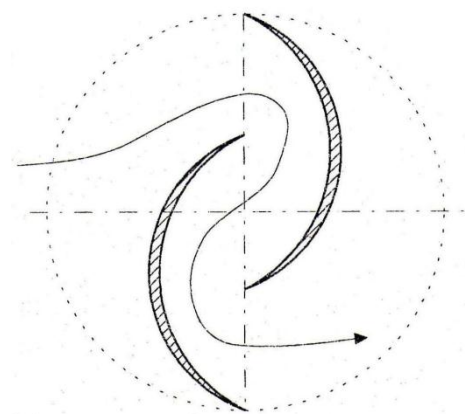
3.1.1 Větrné motory pracující na odporovém principu

Odporové větrné motory existují v provedení se svislou i s vodorovnou osou otáčení a historicky patří k nejstarším. Jejich konstrukce může být poměrně rozmanitá, přičemž princip zůstává stejný. Motor klade svou plochou aerodynamický odpor, což způsobuje zpomalování větru. Síla větru působící na nastavenou plochu motoru je převáděna nejčastěji na otáčivý pohyb. [4]

Nejnámějším příkladem větrného motoru pracujícím na odporovém principu je tzv. Savoniův rotor. Byl vyvinut Sigurdem J. Savoniusem z Finska roku 1924. Savoniův rotor tvoří obvykle dvě svislé lopatky a ke vzniku točivého momentu rotoru dochází vlivem působení rozdílných aerodynamických sil. Použitelný je však pouze v oblastech menších výkonů a dosahuje účinnosti přibližně 20%. [4, 16]



Obr. 3.1 Savoniův rotor, celkový pohled

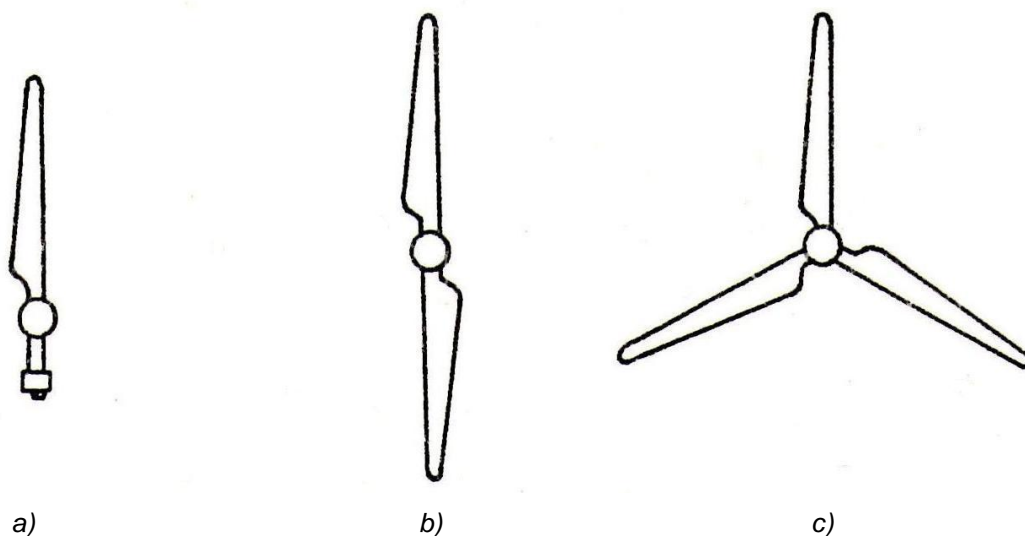


Obr. 3.2 Savoniův rotor, příčný řez

3.1.2 Větrné motory pracující na vztlkovém principu

Vztlkové větrné motory jsou obvykle zařízení s vodorovnou osou, přičemž rotační rovina (vrtule) je natočena kolmo na směr větru. Nejčastěji se používá vrtule v třílistém či

dvoulístém konstrukčním řešení, vzácněji se můžeme setkat i s jednolístou vrtulí disponující protizávažím. Moderní rotory mají v některých případech schopnost své listy podle potřeby natáčet, což usnadňuje rozběh rotoru z klidu, dovoluje vhodnou regulaci otáček a také umožňuje rotoru klást proudícímu větru menší odpor při zabrzdění. [4]



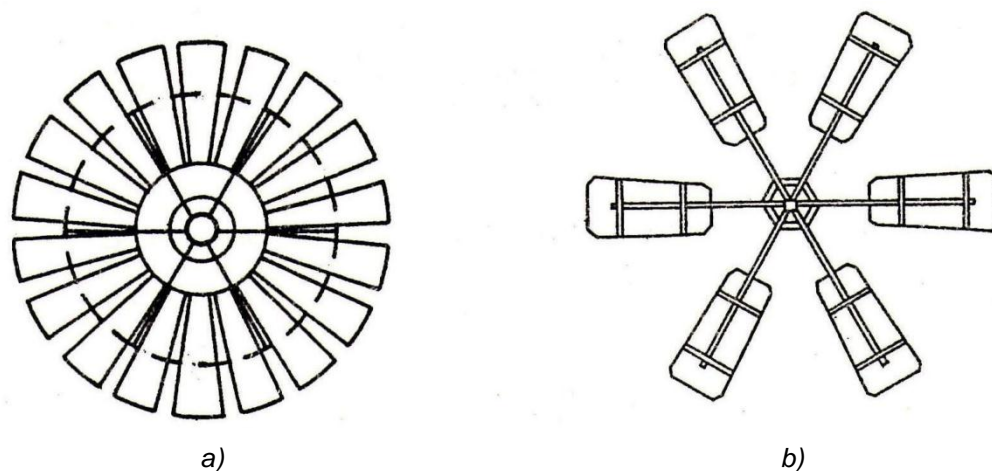
Obr. 3.3 Vrtule s vodorovnou osou: a) jednolístá vrtule s protizávažím
b) dvoulístá vrtule
c) třílístá vrtule

Podle rychlosti otáčení větrného motoru rozlišujeme tato zařízení na pomaluběžná, středně rychloběžná a rychloběžná. Rychloběžnost větrných motorů je určena rychlostním součinitelem λ a počtem lopatek z . Rychlostní součinitel λ je podíl obvodové rychlosti rotoru a rychlosti proudění větru. [2]

Tab. 3.4 Rychloběžnost větrných motorů [2]

| Typ větrných motorů | součinitel λ | počet lopatek z |
|---------------------|----------------------|-------------------|
| pomaluběžné | < 1,5 | 6 až 40 |
| středně rychloběžné | 1,5 až 3,5 | 4 až 6 |
| rychloběžné | > 3,5 | 1 až 3 |

Větrná kola mají nejčastěji plechové lopatky. Počet lopatek (maximálně několik desítek) souvisí s velikostí větrného kola a s frekvencí otáčení. Větrná kola s větším počtem lopatek mají obecně nižší rychlost otáčení, ale snadněji dosahují rozběhu a také se rozbíhají s větším momentem síly. Tyto pomaluběžné větrné motory (obr. 3.5) se začaly vyskytovat v Americe koncem 17.století. Sloužily zejména na farmách k pohonu čerpadel vody. [2, 4]

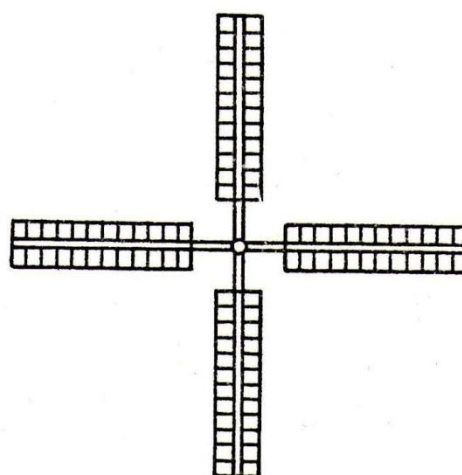


Obr. 3.5 Větrná kola s vodorovnou osou:

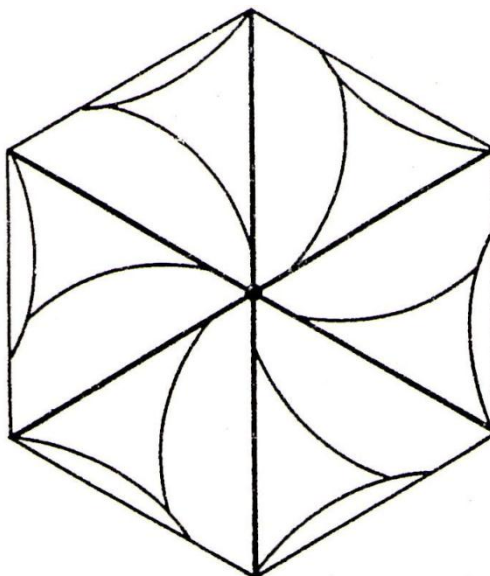
a) Větrné kolo, tzv. Americký větrný motor

b) Moderní rotor větrného čerpadla

V dřívějších dobách (12. až 19. století) se používaly ze dřeva vyrobené rotory, které sloužily k pohonu typických větrných mlýnů (obr 3.6). Obvykle čtyři dřevěné lopatky na rotoru bylo možné podle aktuální potřeby zakrývat plachtami a regulovat tak výkon větrného motoru. Nastavování rotoru do vhodného směru se realizovalo natáčením střechy či vrchní části budovy. [4, 10]

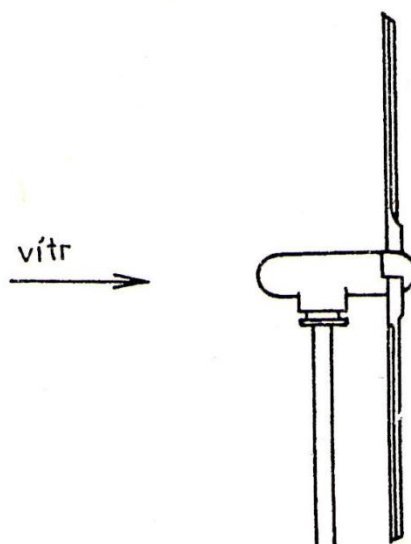


Obr. 3.6 Dřevěný rotor typického větrného mlýna používaného v Evropě

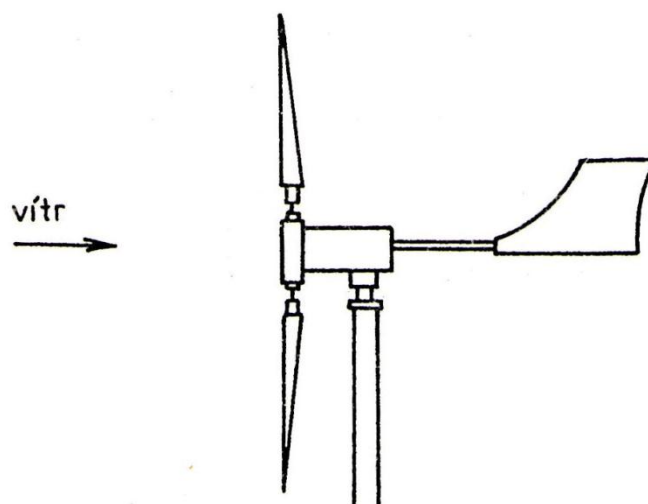


Obr. 3.7 Tento typ větrného rotoru tvořeného ráhny, lany a plachtami se používal v oblastech kolem Středozemního moře

K orientaci osy větrného rotoru do směru větru dochází automaticky, pokud se rovina vrtule nachází za osou natočení gondoly rotoru ve směru proudění větru. Tuto reakci větrného rotoru vidíme na obrázku (obr. 3.8). Pokud je rotor umístěn před stožárem ve směru větru od osy natočení gondoly rotoru, je třeba, aby gondola disponovala zařízením pro orientaci (obr. 3.9). Pro správnou orientaci větších větrných motorů jsou využívána doplňková zařízení a natáčení je zde prováděno natáčecími motory. [4]

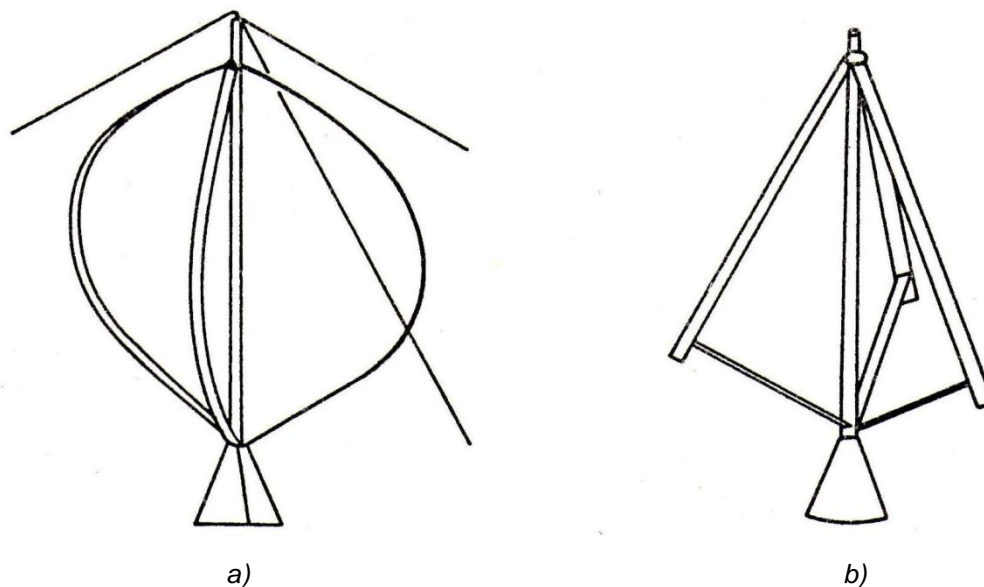


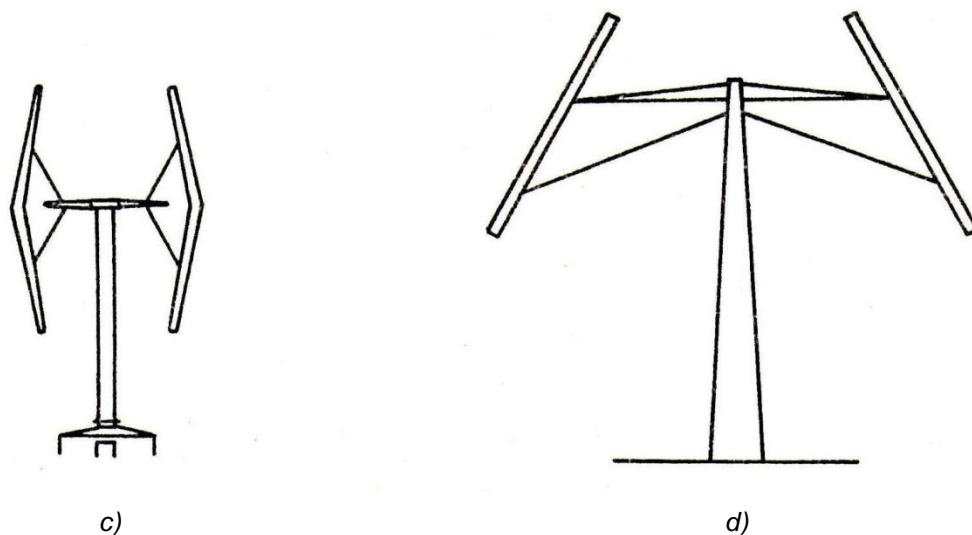
Obr. 3.8 Natočení osy rotoru ve směru větru (vrtule za osou natáčení)



Obr. 3.9 Natočení osy rotoru ve směru větru (vrtule před osou natáčení)

Další důležitou skupinou větrných motorů pracujících na vztlakovém principu jsou motory s vertikální osou. Tento typ patentoval roku 1931 inženýr Darrieus z Francie. Rotor motorů s vertikální osou má obvykle dva, tři nebo také čtyři listy. Hlavní předností větrných motorů tohoto typu je zejména nezávislost na směru proudění větru. Výhodné jsou větrné motory s vertikální osou také z hlediska nižších nákladů na výrobu rotorových listů, jednoduchosti konstrukce věže nebo umístění generátoru. Nevýhodou tohoto typu větrných motorů je zejména skutečnost, že se obecně nedokáží rozběhnout samostatně, což však lze napravit použitím speciálního druhu rotoru nebo startovacího zařízení. Mezi další nevýhody ve srovnání s větrnými motory s vodorovnou osou patří nižší otáčky rotoru, nižší účinnost a obtížnější regulace. [2,4]

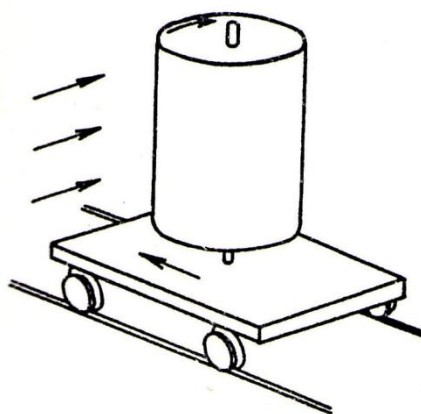




Obr. 3.10 Větrné motory s vertikální osou:

- a) Rotor se zakřivenými lopatkami ve tvaru Φ
- b) Rotor ve tvaru trojúhelníku
- c) Rotor ve tvaru H
- d) Rotor s prizmatickými listy

Dalším zařízením pracujícím na vztakovém principu jsou zvláštní vozíky, na kterých je umístěn otáčivý válec se svislou osou. Tyto po kolejkách se pohybující vozíky pracují s Magnusovým efektem. Magnusův efekt je stav, kdy otáčející se válec umístěný v homogenním proudu tekutiny způsobí ve svém okolí zakřivení proudnic. Vztaková síla, která na válci při správném podílu rychlosti otáčení válce a rychlosti proudění tekutiny vzniká, dosahuje výrazně vyšší hodnoty než síla vznikající na aerodynamických profilech. Náklady na stavbu takovýchto vozíků, které by byly spojeny s generátory a navíc umístěny na kolejovou dráhu, jsou ovšem výrazně vyšší než náklady na obvyklý větrný motor. [1]

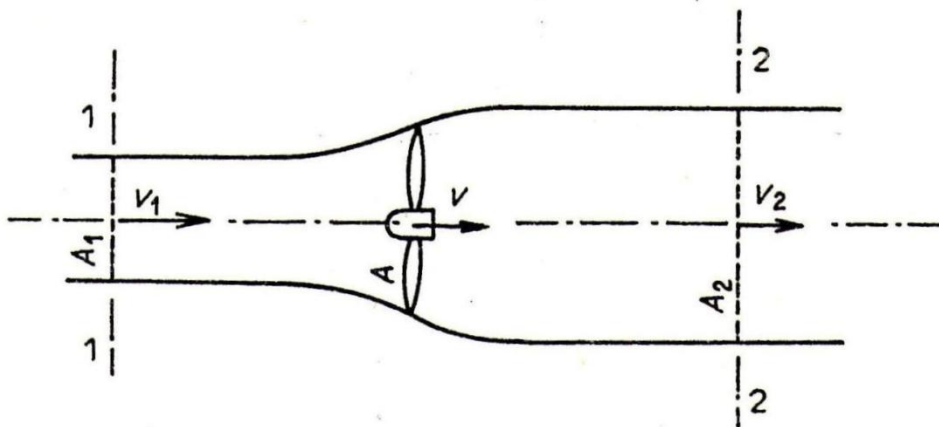


Obr. 3.11 Vozík s otáčivým válcem využívající Magnusův efekt

3.2 Teorie větrných motorů

Větrné motory přetváří část kinetické energie proudícího větru na mechanickou práci představovanou nejčastěji rotačním pohybem. Větrné motory jsou schopné odebírat část kinetické energie větru procházejícího jejich průtočnou plochou, čímž proudění vzduchu zpomalují. Není tedy možné, aby byla využita všechna energie proudění vzduchu. V takovém případě by se proudění vzduchu muselo zbrzdit do té míry, až by se úplně zastavilo. K tomuto zjištění dospěl roku 1920 fyzik Karl Betz z Německa. Maximální získatelný výkon je tedy z větru možné využít, pokud rychlost proudění větru je zpomalena na jednu třetinu původní hodnoty. Toto nám udává Betzův koeficient, jehož hodnota je $16/27$, respektive $59,3\%$. Význam Betzova koeficientu spočívá v tom, že poskytuje údaj o maximální účinnosti větrné turbíny. Moderní větrné motory s vertikální osou pracující na vztlakovém principu jsou schopné při ideálních podmínkách využívat až 50% výkonu větru. [3]

Pro znázornění proudu vzduchu protékajícího větrným motorem s idealizovaným chováním poslouží následující obrázek (obr. 3.12). Proud vzduchu vymezují dvě kontrolní plochy A_1 a A_2 , ve kterých proudění dosahuje rychlostí v_1 a v_2 . V průtočné ploše A , která je představována vrtulí, dosahuje rychlost proudícího vzduchu hodnoty v .



Obr. 3.12 Proud vzduchu při průchodu větrným motorem s idealizovaným chováním

V uvedeném prostoru platí rovnice kontinuity:

$$v_1 A_1 = v A = v_2 A_2 \quad (3.13)$$

Na rotor působící axiální síla:

$$F_a = \rho A v (v_1 - v_2) \quad [\text{N}] \quad (3.14)$$

Odvozený výkon:

$$P = F_a v = \rho A v^2 (v_1 - v_2) \quad [\text{W}] \quad (3.15)$$

Výkon určený ze změny pohybové energie proudu vzduchu za čas:

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2) \quad [\text{W}] \quad (3.16)$$

Dále víme:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.17)$$

Po úpravě je axiální síla působící na rotor rovna:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \quad [\text{N}] \quad (3.18)$$

Po úpravě je výkon rotoru:

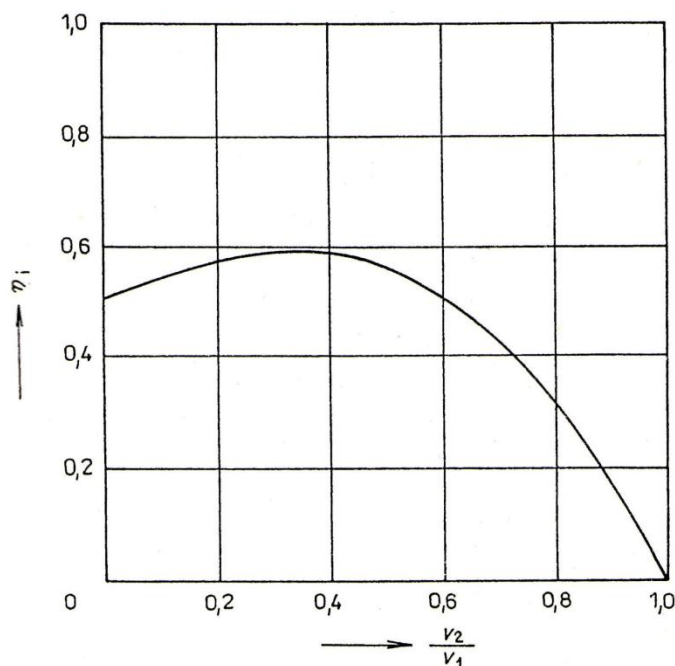
$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2) \quad [\text{W}] \quad (3.19)$$

Podílem výkonu rotoru a výkonu větru získáváme ideální účinnost η_i :

$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)}{2v_1^3} \quad (3.20)$$

Účinnost se pro různé poměry rychlostí v_2 a v_1 mění. Nejvyšší dosažitelná účinnost nastává

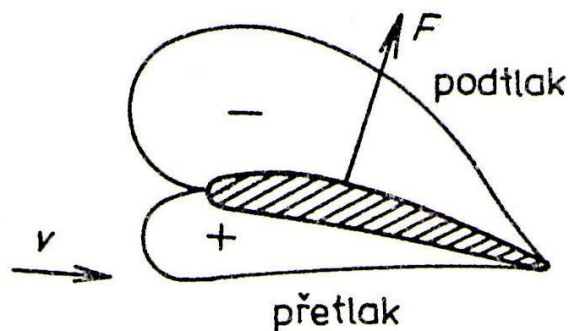
při $v_2 / v_1 = 1/3$ a nazýváme ji Betzova účinnost. [4]



Obr. 3.21 Závislost Betzovy účinnosti na poměru rychlostí v_2 a v_1

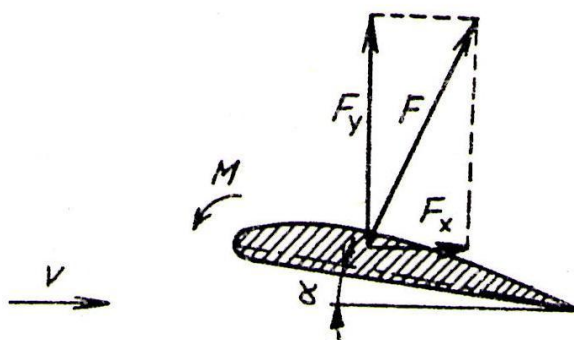
Získání této ideální účinnosti ovšem předpokládá použití ideálního větrného rotoru pracujícího na vztlakovém principu s nekonečným počtem ideálních lopatek a také zanedbání tření. Pro větrné rotory pracující na odporovém principu je nejvyšší ideální účinnost rovna jedné třetině. [4]

Elementární částí pro činnost větrného motoru, který funguje na základě vztlakového principu, je lopatka či list. Tyto díly je možné považovat za rotující křídlo a zásadní pro jejich funkci je geometrie profilu a rovněž umístění v proudu vzduchu. Umístění profilu listu či lopatky na rotoru musí být provedeno takovým způsobem, aby profil byl nastaven směrem k větru spodní stranou. Pokud je splněno správné umístění profilu křídla, dochází ke zhušťování proudnic a zvyšování rychlosti proudění vzduchu nad horní stranou a snižování rychlosti proudění vzduchu pod spodní stranou profilu. Z Bernoulliho zákona víme, že v místech s vyšší rychlostí proudění vzduchu je nižší statický tlak a v místech s nižší rychlostí proudění vzduchu naopak statický tlak vyšší. Vzniklý podtlak na horní straně profilu způsobuje vznik síly až dvojnásobné, než jakou vytváří přetlak na spodní straně (obr. 3.22). [4]



Obr. 3.22 Znáromění rozložení tlaku na profilu křídla

Vlivem tlaků působí na profil křídla síla F , která je tvořena dvěma složkami (obr. 3.23).



Obr. 3.23 Rozložení sil na profilu křídla

Vztlková složka F_y je kolmá ke směru zatím neovlivněného vzdušného proudění a odporová složka F_x působí ve směru vzdušného proudění. K popsání těchto složek slouží aerodynamický součinitel vztlaku c_y a aerodynamický součinitel odporu c_x . Hodnoty těchto součinitelů závisí na geometrii použitého profilu a nastavení úhlu profilu. [4]

$$F_y = \frac{1}{2} \rho \cdot c_y \cdot A_k \cdot v_0^2 \quad [\text{N}] \quad (3.24)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \cdot c_x \cdot A_k \cdot v_0^2 \quad [\text{N}] \quad (3.25)$$

Příčemž ρ je hustota vzduchu
 v_0 je rychlost nenarušeného proudu vzduchu
 A_k je plocha křídla

Celková síla, která působí na křídlo je rovna:

$$F = \sqrt{(F_x^2 + F_y^2)} \quad [\text{N}] \quad (3.26)$$

3.3 Využití větrných motorů

Větrné motory mají široké pole využití. Nejčastěji jsou používány k těmto účelům:

A) Čerpání vody

K čerpání vody se ve světě běžně využívají větrné motory. Slouží pro zavlažovací účely, pro čerpání vody z řek a studní, mohou být používány i při odvodňování a vysoušení půdy nebo pro její odsolování. Větrné motory jsou schopné přečerpávat samozřejmě i jiné kapaliny. Nacházejí uplatnění například v chladících soustavách a při výrobě ledu, při pohonu tepelných čerpadel nebo pro stlačování vzduchu. [1]

B) Mechanický pohon

Využívání větrných motorů pro různé mechanické pohony se uplatňovalo zejména v dřívějších dobách. Tehdejší větrné mlýny sloužily především k mletí obilí a pohánění pil. V dnešní době se stále častěji můžeme setkat s využitím větrných motorů při ohřevu vody. [1]

C) Produkce elektrické energie

Větrné motory se nejčastěji používají k výrobě elektrické energie. Jsou schopné pohánět generátory se jmenovitým výkonem několika wattů i několika megawattů. Podle výkonu rozlišujeme větrné elektrárny na malé, střední, velké. Oblast využití menších větrných elektráren je například nabíjení akumulátorů a napájení domácích spotřebičů. Často pracují v ostrovním režimu. Větší větrné elektrárny jsou téměř výhradně připojovány na rozvodnou síť. [1]

Tab. 3.27 Rozdělení větrných elektráren podle jmenovitého výkonu [17]

| Zařazení větrné elektrárny | Jmenovitý výkon [kW] |
|----------------------------|----------------------|
| malá | do 40 |
| střední | od 40 do 500 |
| velká | od 500 |

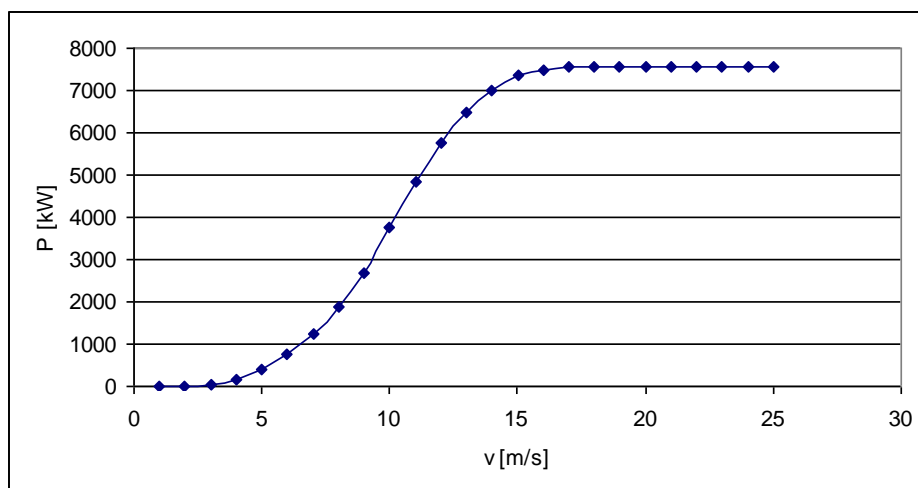
3.3.1 Moderní větrné elektrárny

Větrná zařízení o nejmenších výkonech slouží nejčastěji k výrobě stejnosměrného elektrického proudu. Uplatňují se často v přímořských oblastech na člunech a lodích pro nabíjení soustav baterií a akumulátorů, pro napájení vysílaček a signalizačních zařízení. [3]

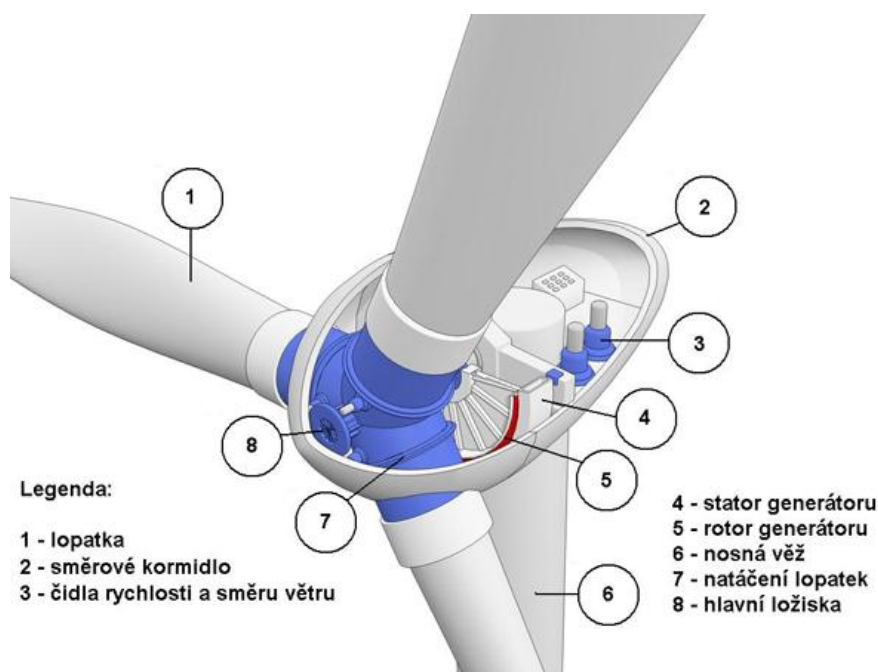
Větrné elektrárny s většími výkony zaznamenaly v posledních letech značný technický pokrok. V dnešní době jsou provozovány především s rychloběžnými větrnými motory s vodorovnou osou. Některé rotory jsou stále konstruovány i s pevnými listy, ale u velkých větrných elektráren je obvyklejší provedení s natáčecími listy. Nastavování větrného rotoru do vhodného směru vzhledem k větru zajišťují hydraulické či elektrické motory. Řízení provozu větrné elektrárny zajišťuje centrální řídicí jednotka, která ve spolupráci s meteorologickou stanicí vyhodnocuje povětrnostní podmínky a rozhoduje o natáčení vrtulových listů i celého větrného rotoru. [1, 3]

Větrné elektrárny pracují se synchronními i asynchronními trojfázovými generátory. Na generátor může být točivý moment vznikající na větrném rotoru přenášen přes převodovku nebo přímo. Rozvojem výkonové elektroniky a zdokonalením používaných konstrukčních materiálů v posledních letech bylo dosaženo lepšího využití nabízeného potenciálu kinetické energie větru. [1, 3]

Dnešní větrné elektrárny jsou schopné přizpůsobovat se rozdílným rychlostem větru. Rychlosti přibližně od $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ obvykle už stačí k rozběhu větrné elektrárny. Optimální výkon větrné elektrárny dosahují s rychlostmi kolem $13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Při vyšších rychlostech dochází k regulaci natáčením vrtulových listů a výkon se již nezvyšuje. Pokud rychlost větru dosáhne značně vysokých hodnot 25 až $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, řídicí systém natočí rotor do bezpečné polohy a celé zařízení je zastaveno. [3]



Graf 3.28 Výkonová charakteristika větrné elektrárny E – 126 [14]



Obr. 3.29 Pohled do strojovny větrné elektrárny moderního typu

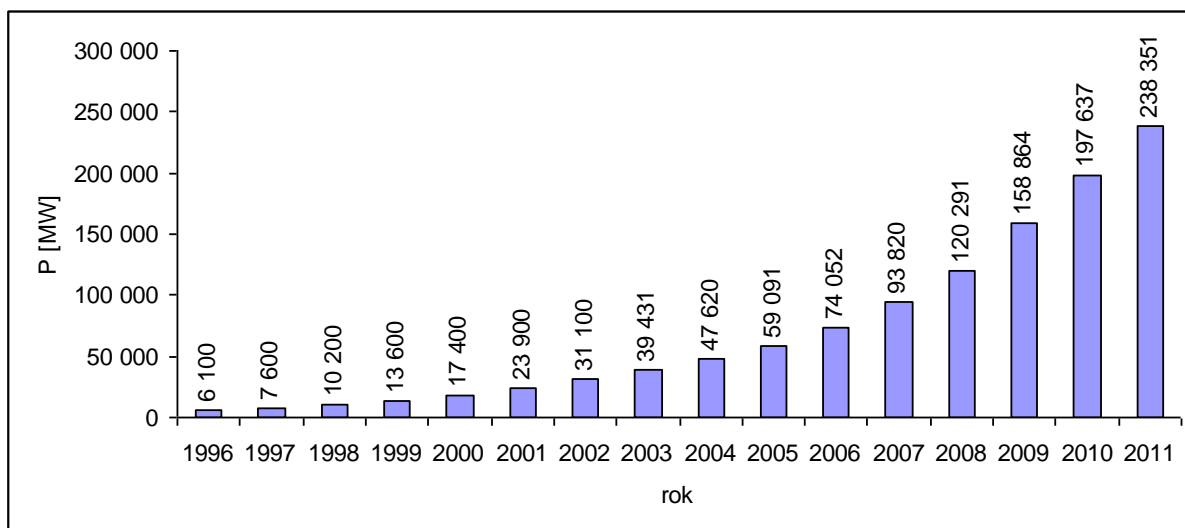
Na obrázku 3.29 vidíme schematický pohled do strojovny větrné elektrárny s bezpřevodkovou koncepcí od firmy ENERCON. Přímé spojení rotorové hlavy s generátorem zabraňuje ztrátám energie způsobených třením v převodovce. Relativně pomalý chod dílů zaručuje pouze nepatrné opotřebení materiálu, což zaručuje dlouhou životnost. Tato větrná elektrárna pracuje se synchronním generátorem s vysokým počtem pólů bez přímého připojení na síť. Výstupní napětí je nejprve usměrněno v usměrňovači a pak přivedeno na třífázový střídač. Upravené napětí je pak přivedeno na síť. Použitím těchto měničů je dosaženo vysoké variability otáček rotoru. [14]

4 Rozvoj větrných elektráren

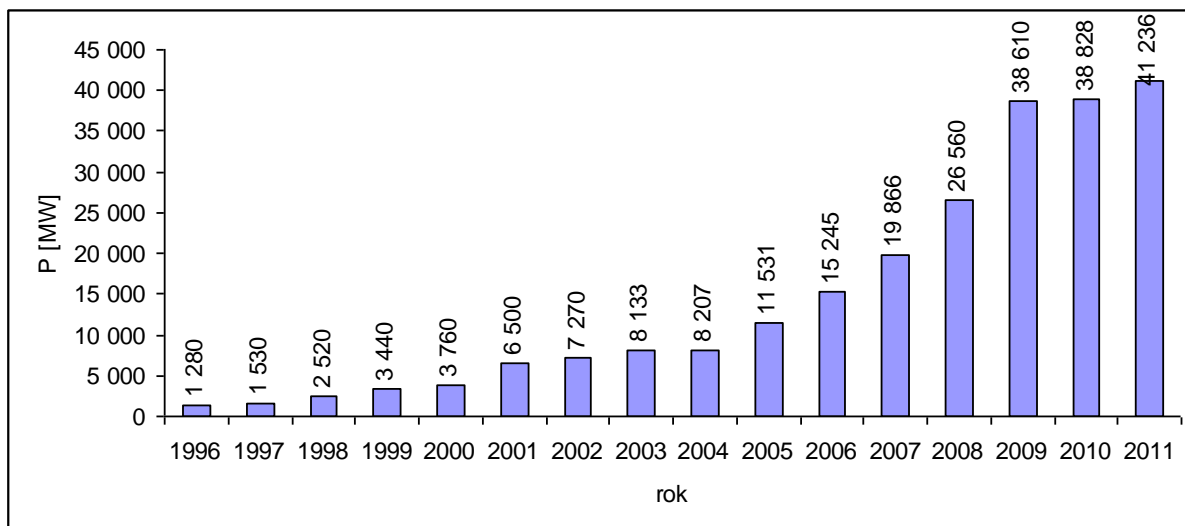
Zatímco prudký rozvoj větrné energetiky v 90. letech probíhal jen v nemnoha zemích (zejména Dánsko, Německo, USA), v dnešní době investuje do rozvoje větrné energetiky stále více států z celého světa. V některých vhodných oblastech tak může větrná energie už soupeřit s fosilními zdroji energie. Za ukazatel rozvoje celosvětové větrné energetiky můžeme považovat instalovaný výkon větrných elektráren v jednotlivých státech. Instalovaný výkon větrných elektráren v posledních letech stále stoupá a je pravděpodobné, že tempo růstu se bude zvyšovat. [3]

Údaje ze statistik pro rok 2011 ve světě: [20]

- Celkový instalovaný výkon větrných elektráren na světě dosáhl hodnoty 238 351 MW.
- Během roku 2011 bylo instalováno ve světě 41 236 MW výkonu větrných elektráren. To znamená meziroční vzestup o 20,9%.
- Největší podíl na celkovém instalovaném výkonu ve světě má Čína, která vykázala také největší meziroční nárůst instalovaného výkonu. Druhé místo z hlediska celkového instalovaného výkonu patří Spojeným státům americkým a třetí místo Německu.



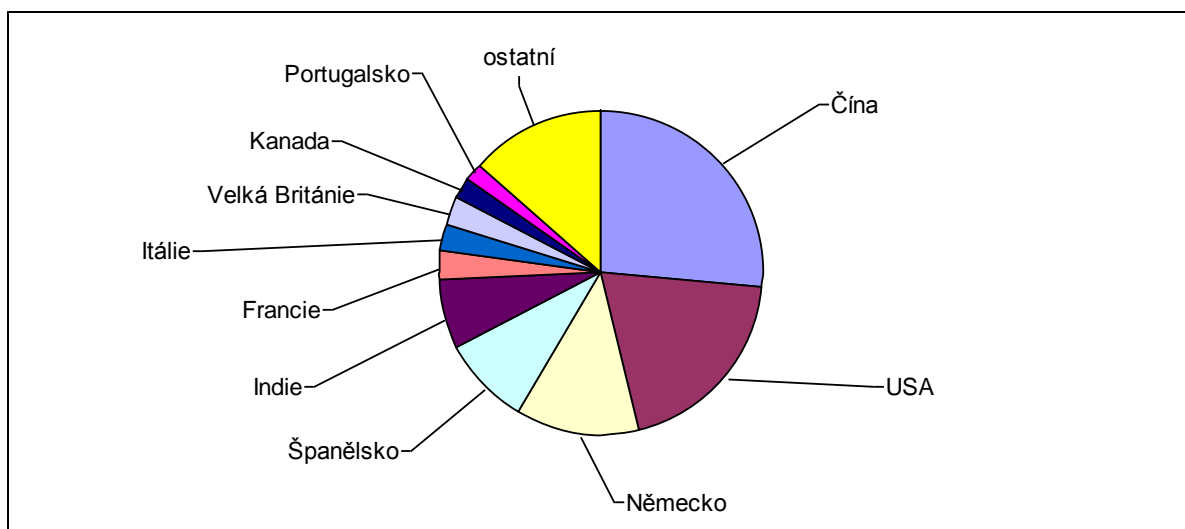
Graf 4.1 Celkový instalovaný výkon větrných elektráren na světě v letech 1996 – 2011 [20]



Graf 4.2 Roční přírůstek instalovaného výkonu větrných elektráren na světě v letech 1996 – 2011 [20]

Tab. 4.3 Celkový instalovaný výkon v jednotlivých státech světa pro rok 2011 [20]

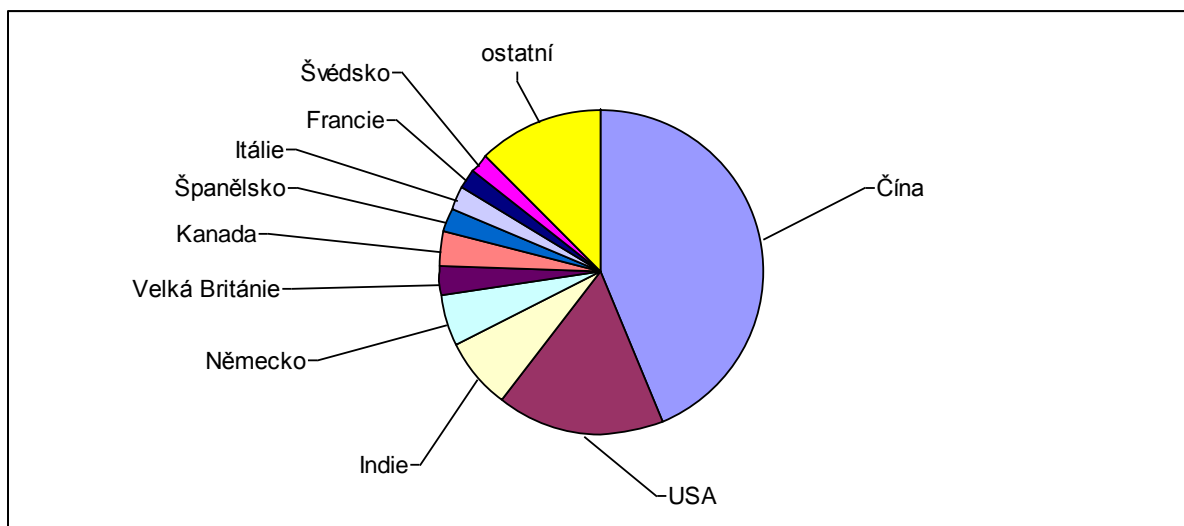
| Stát | instalovaný výkon [MW] | % |
|----------------|------------------------|------|
| Čína | 62 733 | 26,3 |
| USA | 46 919 | 19,7 |
| Německo | 29 060 | 12,2 |
| Španělsko | 21 674 | 9,1 |
| Indie | 16 084 | 6,7 |
| Francie | 6 800 | 2,9 |
| Itálie | 6 747 | 2,8 |
| Velká Británie | 6 540 | 2,7 |
| Kanada | 5 265 | 2,2 |
| Portugalsko | 4 083 | 1,7 |
| ostatní | 32 446 | 13,6 |



Graf 4.4 Podíl států světa na celkovém instalovaném výkonu větrných elektráren pro rok 2011 [20]

Tab. 4.5 Nově instalovaný výkon v jednotlivých státech světa pro rok 2011 [20]

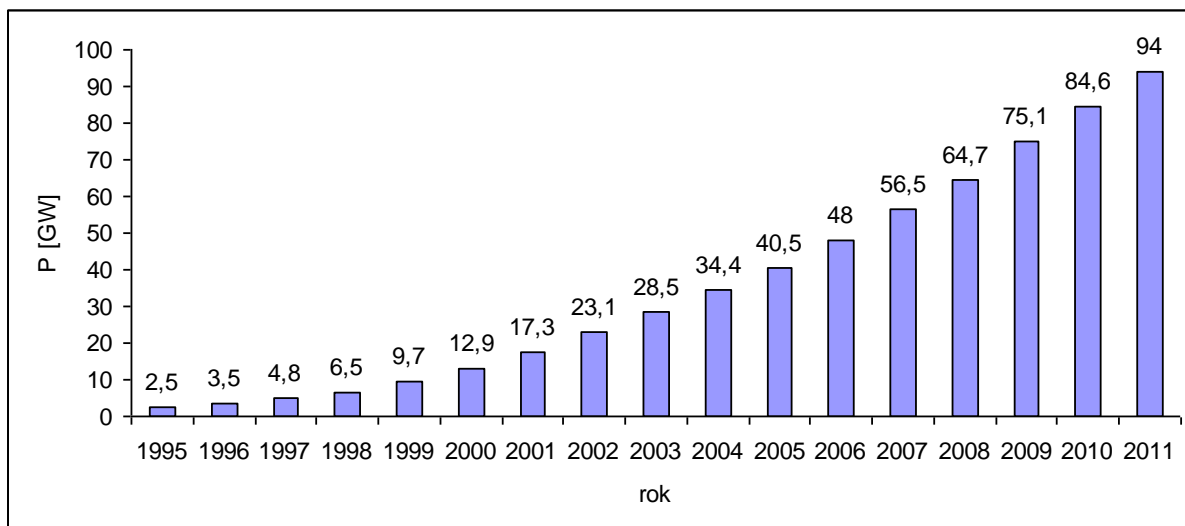
| Stát | instalovaný výkon [MW] | % |
|----------------|------------------------|------|
| Čína | 18 000 | 44 |
| USA | 6 810 | 17 |
| Indie | 3 019 | 7 |
| Německo | 2 086 | 5 |
| Velká Británie | 1 293 | 3,1 |
| Kanada | 1 267 | 3,1 |
| Španělsko | 1 050 | 2,5 |
| Itálie | 950 | 2,3 |
| Francie | 830 | 2 |
| Švédsko | 763 | 1,9 |
| ostatní | 5 168 | 12,5 |



Graf 4.6 Podíl jednotlivých států světa na nově instalovaném výkonu větrných elektráren pro rok 2011 [20]

Údaje ze statistik pro rok 2011 v EU: [21]

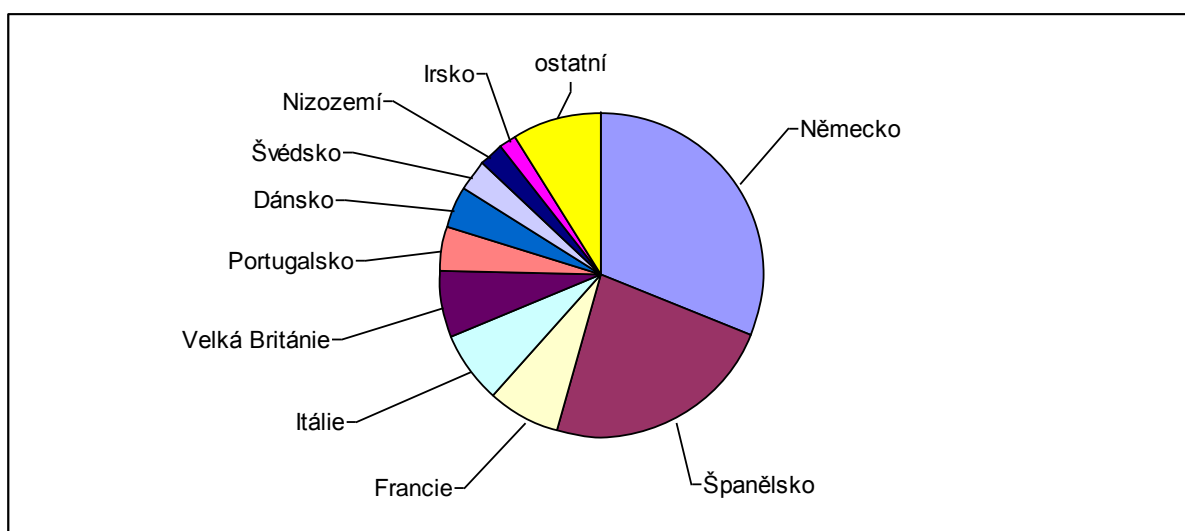
- Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v EU dosáhl hodnoty 93 957MW.
- Během roku 2011 bylo instalováno v EU přibližně 9,5GW výkonu větrných elektráren. To znamená meziroční vzestup o 11%.
- Největší podíl na celkovém instalovaném výkonu v EU má Německo. Druhé místo z hlediska celkového instalovaného výkonu patří Španělsku a třetí místo Francii.



Graf 4.7 Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v EU v letech 1995 – 2011 [21]

Tab. 4.8 Celkový instalovaný výkon v jednotlivých státech EU pro rok 2011 [21]

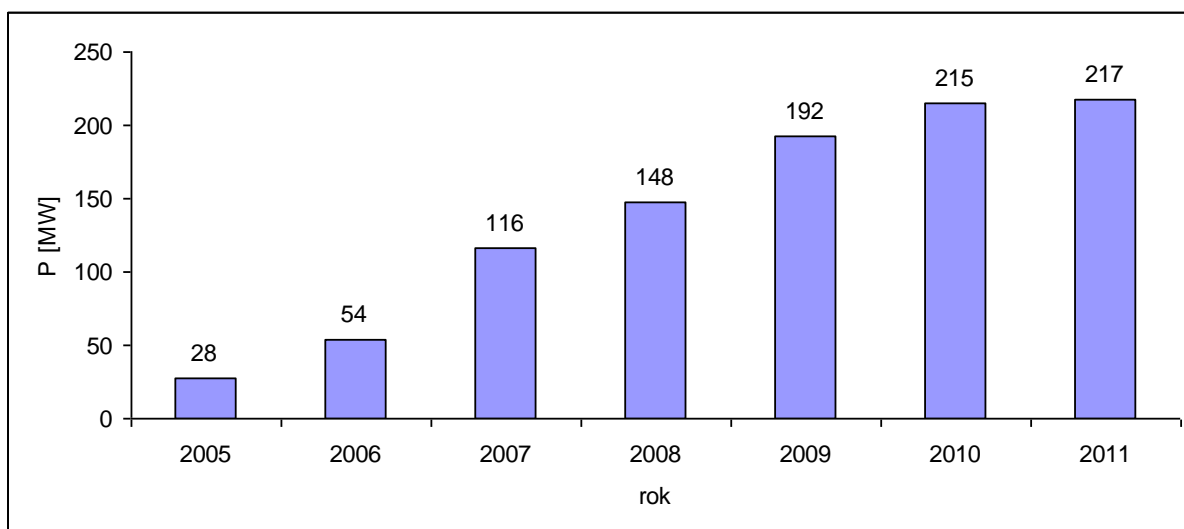
| Stát | instalovaný výkon [GW] | % |
|----------------|------------------------|----|
| Německo | 29,1 | 31 |
| Španělsko | 21,7 | 23 |
| Francie | 6,8 | 7 |
| Itálie | 6,7 | 7 |
| Velká Británie | 6,5 | 7 |
| Portugalsko | 4,1 | 4 |
| Dánsko | 3,9 | 4 |
| Švédsko | 2,9 | 3 |
| Nizozemí | 2,3 | 3 |
| Irsko | 1,6 | 2 |
| ostatní | 8,3 | 9 |



Graf 4.9 Podíl jednotlivých států na celkovém instalovaném výkonu v EU pro rok 2011 [21]

Údaje ze statistik pro rok 2011 v ČR: [22]

- Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v ČR dosáhl hodnoty 217MW.
- Celková produkce elektrické práce větrných elektráren za rok 2011 dosáhla 397GWh. To odpovídá přibližně spotřebě 113 000 domácností.



Graf 4.10 Celkový instalovaný výkon větrných elektráren v ČR v letech 2005 – 2011 [22]

4.1 Výstavba větrných elektráren

Výstavba větrné elektrárny je poměrně složitý proces, který musí být po všech stránkách kvalitně naplánován, aby vzniklá větrná elektrárna byla rentabilní. Klíčovým úkolem pro výstavbu je zejména výběr vhodné lokality. Z tohoto hlediska je nevhodné provádět výstavbu větrných elektráren v místech s nedostatečnou rychlostí větru. Je třeba si uvědomit, že náklady na výstavbu větrné elektrárny dosahují značných hodnot a nevhodný výběr lokality velmi pravděpodobně způsobí výrazně nižší produkci elektrické energie, což nepříznivě ovlivní rentabilitu celého projektu. [5]

Větrné elektrárny nelze stavět v těsné blízkosti obcí a v chráněných oblastech. Pro plánování stavby je třeba znát:

- parametry větru pro zvolenou lokalitu
- překážky zabraňující proudění vzduchu ve zvolené lokalitě (budovy, stromy, apod.)
- nadmořskou výšku lokality
- místní meteorologické jevy (např. námrazy)

- geologické podmínky lokality
- dostupnost lokality (přístupové cesty, možnosti připojení k elektrickému vedení)

Před samotným zahájením stavby je nutné získat souhlas obce, na jejímž katastru má elektrárna stát. Dále je třeba předložit vyhodnocení o vlivu na životní prostředí (studie EIA). [3, 18]

Pokud to podmínky dovolí, je účelné stavět větrné elektrárny ve větších uskupeních, které nazýváme větrné parky nebo větrné farmy. Větrný park musí tvořit minimálně tři větrné elektrárny, může být ale i značně rozlehlější. Zásadní výhody větrných parků oproti jednotlivým stavbám větrných elektráren spočívají v celkově menších nákladech. Plánování, stavba i následná údržba zařízení mohou být prováděny výrazně efektivněji. [3]

Nepříznivým jevem u větrných parků je skutečnost, že jednotlivá zařízení si navzájem stíní. Pokud stojí příliš u sebe, odebírají si vzájemně větrné proudy a výkon jednotlivých zařízení dosahuje nižších hodnot. I přes dodržování stanovených rozestupů mezi jednotlivými zařízeními tak vznikají ztráty. [3]

První značně rozsáhlé větrné parky na pevnině (onshore wind parks) začaly vznikat v osmdesátých letech dvacátého století na území USA v Kalifornii. Jedná se o větrné parky v Altamont Pass (instalovaný výkon 576MW), Tehachapi Pass (instalovaný výkon 705MW), San Geronio Pass (instalovaný výkon 615MW) a pozdější Alta Wind Energy Center (instalovaný výkon 1020MW). V dnešní době je v Kalifornii instalováno 4 287MW výkonu větrných elektráren. [19]

Trendem ve výstavbě větrných elektráren jsou mořské větrné parky (offshore wind parks). Za zakladatele této technologie je považováno především Dánsko. Důvodem pro stavbu větrných elektráren na moři jsou obvykle velmi vhodné povětrnostní podmínky a v některých případech také nedostatek vhodných lokalit na pevnině. Náklady na stavbu větrných parků na moři jsou až dvojnásobné oproti nákladům na stavbu pevninského větrného parku a zároveň jejich údržba je komplikovanější a nákladnější. Hlavní výhodou mořských větrných parků je obvykle vyšší výkon na jednotku. [3]



Obr. 4.11 Mořský větrný park London Array

Závěr

Větrné elektrárny patří v současné době mezi nejdynamičtěji se rozvíjející obnovitelné zdroje energie. Nejen v evropských zemích se větrná energetika stává poměrně významným průmyslovým odvětvím, ve kterém působí tisíce lidí. Rozvoj větrné energetiky ve světě obecně závisí především na úrovni větrného potenciálu dané lokality, ale stále také na finanční podpoře garantované zákonem.

Stupeň technického vývoje dnešních větrných elektráren je na značně vysoké úrovni. Jejich jmenovitý výkon se pohybuje v oblasti až několika jednotek megawattů a průměr rotoru i výška sloupu větrné elektrárny dosahují několika desítek metrů. Další růst velikosti a tedy i výkonu větrných elektráren by ze současného pohledu znamenal neúměrný nárůst nákladů na jejich stavbu i další zvýšení nároků na materiál celého zařízení a rozhodujícím faktorem vývoje nadále zůstává především cena vyrobené elektřiny. Směr vývoje větrných elektráren tedy bude pravděpodobně spočívat spíše ve zvyšování efektivnosti, snižování provozních nákladů a umístování větrných farem na moře.

Charakter výroby elektrické energie pomocí větrných elektráren je třeba z hlediska potřeb elektrizační soustavy považovat za značně nepřizpůsobivý, protože vyráběný výkon závisí silně na rychlosti větru, která je nestálá. To vede k nesnadnému začleňování větrných elektráren do elektrizační soustavy. Výstavba většího počtu větrných elektráren tak přináší dodatečné náklady související s problematikou připojování větrných elektráren a také s rozšiřováním a posilováním elektrických sítí.

Použitá literatura

- [1] RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7.
- [2] KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Strojní fakulta, 1998, 96 s. ISBN 80-707-8445-8.
- [3] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [4] RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1.
- [5] ŠKORPIL, Jan, Jiřina MERTLOVÁ a Bedřich WILLMANN. *Obnovitelné zdroje a jejich začleňování do energetických systémů: publikace ke grantovému projektu GAČR 102/06/0132*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 50 s. ISBN 978-80-7043-733-9.
- [6] Parní stroj. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_stroj#cite_ref-0
- [7] KOČ, Břetislav. Z historie větrných elektráren. *ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2012, roč. 2005, č. 12 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26559
- [8] RAGHEB, M. *HISTORICAL WIND GENERATORS MACHINES* [online]. [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Historical%20Wind%20Generators%20Machines.pdf>
- [9] Smith-Putnam wind turbine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Smith-Putnam_wind_turbine
- [10] Wind turbine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
- [11] European State Projects 1975 - 1995. *Winds Of Change* [online]. [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.windsofchange.dk/WOC-eurstat.php>
- [12] *TVINDKRAFT* [online]. [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.tvindkraft.dk/eng/default.asp>
- [13] History of Wind Power at Hydro-Québec. *Hydro-Québec* [online]. 1996 - 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.hydroquebec.com/learning/eolienne/historique-eolien-hydro-quebec.html>
- [14] *ENERCON* [online]. 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.enercon.de/de-de/>
- [15] Enercon - Turbines range. *The Wind Power* [online]. 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://www.thewindpower.net/manufacture_range_en_3_enercon.php
- [16] Savonius-Rotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-29]. Dostupné z:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Savonius-Rotor>
- [17] Větrné elektrárny. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů* [online]. [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/vitr.htm#TOP>
- [18] Energie větru. *Energetický poradce PRE* [online]. 2008 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.energetickyporadce.cz/obnovitelne-zdroje/energie-vetru.html>
- [19] Wind power in California. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_California
- [20] Větrné elektrárny ve světě. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/vetrne-elektrarny-ve-svete/283>
- [21] Větrné elektrárny v Evropě. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/vetrne-elektrarny-v-evrope/282>
- [22] Větrné elektrárny v ČR. *Česká společnost pro větrnou energii* [online]. 2012 [cit. 2012-05-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/cz/clanky/statistika/281>

Obrázky – použité zdroje

Obr. 1.1 Typické větrné mlýny, Nizozemí, Kinderdijk – převzato:

<http://www.citypictures.net/r-windmills-234-windmills-kinderdijk-netherlands-3026.htm>

Obr. 1.2 První větrná elektrárna sestavená Charlesem F. Brushem v Clevelandu – převzato:

http://www.classcreator.com/Lyndhurst-OH-Brush-1970/class_custom4.cfm

Obr. 1.3 Větrná elektrárna postavená učiteli a studenty, Tvind, Dánsko – převzato:

http://www.wind-turbine-models.com/daten/fotos/org/turbine-Tvind_Prototype_283.jpg

Obr. 1.4 Éole, největší větrná elektrárna se svislým rotorem, oblast Cap-Chat, Quebec, Kanada – převzato:

<http://www.smokestackphotos.com/History/Industrial/i-kXMqBSM/0/L/DSC0576-L.jpg>

Obr. 1.5 Větrná turbína E – 126, poblíž Emden, Německo – převzato:

http://www.enercon.de/p/images/ENC_OF_E126_7500_390px.jpg

Obr. 1.8 Větrná mapa České republiky – převzato:

http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/img/vetrna_mapa.gif

Obr. 2.1 Globální cirkulace větru a vznik větru – převzato z: QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3250-3. (oscanováno a vygenerováno)

Obr. 2.3 Příklad grafu četností rychlostí větru – převzato z: RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7. (oscanováno a vygenerováno)

Obr. 2.7 Ukázka distribučních funkcí pro Weibullovo rozdělení při průměrné rychlosti větru 3 až 8 m·s⁻¹ a tvarový součinitel b = 1,5 – převzato z: RYCHETNÍK, Václav, Jiří PAVELKA a Josef JANOUŠEK. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 199 s. ISBN 80-010-1563-7. (oscanováno a vygenerováno)

- Obr. 3.1 Savoniův rotor, celkový pohled – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.2 Savoniův rotor, příčný řez – převzato z: KAMINSKÝ, Jaroslav a Mojmír VRTEK. *Obnovitelné zdroje energie*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Strojní fakulta, 1998, 96 s. ISBN 80-707-8445-8. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.3 Vrtule s vodorovnou osou – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.5 Větrná kola s vodorovnou osou – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.6 Dřevěný rotor typického větrného mlýnu používaného v Evropě – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.7 Tento typ větrného rotoru tvořeného ráhny, lany a plachtami se používal v oblastech kolem Středozemního moře – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.8 Natočení osy rotoru ve směru větru (vrtule za osou natáčení) – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.9 Natočení osy rotoru ve směru větru (vrtule před osou natáčení) – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.10 Větrné motory s vertikální osou – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.11 Vozík s otáčivým válcem využívající Magnusův efekt – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.12 Proud vzduchu při průchodu větrným motorem s idealizovaným chováním – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.21 Závislost Betzovy účinnosti na poměru rychlostí v_2 a v_1 – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.22 Znázornění rozložení tlaku na profilu křídla – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)
- Obr. 3.23 Rozložení sil na profilu křídla – převzato z: RYCHETNÍK, Václav. *Větrné motory*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1995, 61 s. ISBN 80-707-8281-1. (oscanováno a vygenerováno)

Obr. 3.29 Pohled do strojovny větrné elektrárny moderního typu – převzato:
http://www.energetickyporadce.cz/data/sharedfiles/Ilustracni-obrazky/obnovitelne-zdroje/vitr/popis_vetrne_elektrarny.jpg

Obr. 4.11 Mořský větrný park London Array – převzato:
http://www.landscapeinstitute.org/news/images/uploads/main_image/London_Array1.jpg