

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Technologické celky a systémy moderních
větrných elektráren**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Kára, CSc.

Autor práce: Jan Taimr

PRAHA 2010

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: technická
Katedra: mechaniky a strojnictví	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Taimr**

Studijní obor: Obchod a podnikání s technikou

Název práce: Technologické celky a systémy moderních větrných elektráren

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Popsat konstrukci větrných elektráren. Generátory větrných elektráren, převodovkové a bezpřevodovkové provedení. Konstrukce stožárů, natáčení gondol. Provedení stožárů. Konstrukce a tvarování vrtulí.

Osnova práce:

1. Úvod, význam energetického využití větru, význam větrných elektráren.
2. Historický vývoj konstrukce větrných motorů pro energetické účely v zahraničí a ČR.
3. Zjištění konstrukčních prvků, technologických celků a systémů moderních větrných elektráren.
4. Charakteristika větrných elektráren vhodných pro podmínky ČR.
5. Diskuse a závěry.

Metodika práce:

V souladu s podrobnou osnovou bakalářské práce a s přihlédnutím k obsahu zadaného tématu studie:

- popsat význam energetického využití větru, význam větrných elektráren,
- provést rozbor historického vývoje konstrukce větrných motorů pro energetické účely v zahraničí a ČR,
- zaměřit se zejména na zjištění konstrukčních prvků, technologických celků a systémů moderních větrných elektráren,
- popsat konstrukční a výkonové parametry větrných elektráren vhodných pro podmínky ČR.

Rozsah práce: 30 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

Koč, B.: *Šance pro vítr*. Brno: Ekocentrum, 1996.

Koč, B., Hošek, J.: *Současné větrné elektrárny v ČR*. EKO - ekologie a společnost, 2003, ročník XIV, č. 3.

Rychetník, V.: *Využití větrné energie*. SNTL Praha, 1994.

Kára, J., Adamovský, R.: *Obnovitelné zdroje energie*. MZe ČR, 1993.

Rychetník, V., Janoušek, J., Pavelka, J.: *Větrné motory a elektrárny*. Praha: Vydavatelství ČVUT Praha, 1997, 370 s.

Crome, H.: *Technika využití energie větru*. Ostrava: Nakladatelství HEL, 2002, 144 s.


Janoška, M.: *Větrné mlýny v Čechách, na Moravě a ve Slezku*. Praha: Nakladatelství Libri, 2003, 179 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Kára, CSc.


Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2008

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2010




prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

vedoucí katedry


prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 19. 1. 2009

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Káry, CSc. a použil jen pramenů uvedených v seznamu literatury.

Jan Taimr

Děkuji Ing. Jaroslavu Károvi, CSc., Ing. Miraslovu Mimrovi, MBA, Ph.D., Kristýně Jirákové, Janu Drápalovi, své rodině a všem ostatním, kteří mi poskytli potřebné informace nebo jinou pomoc při vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt: Cílem této bakalářské práce je ukázat obecný pohled na větrnou energetiku a problematiku s ní spjatou. Vzhledem k rozsahu práce a počtu odvětví, jichž se větrné elektrárny dotýkají, však nebylo možné odbočit do všech věcných, ale i zajímavých oblastí. První kapitola uvádí práci do obecné části spolu s důvody instalací větrných elektráren. Následující kapitoly projdou historií od větrných mlýnů k prvním větrným elektrárnám k výrobě energie s uvedením důležitých souvislostí. Pozastaví se u současného majoritního typu a probere jednotlivé části elektrárny současně s uvedením principů jednotlivých technologií. V práci jsou zmíněny podmínky, s nimiž musí plánování i výstavba počítat a uvedeny jsou také poslední velké projekty v České republice. Závěr je věnován statistikám, prognózám, zajímavostem a ekonomickému zhodnocení plánovaných investic do větrné energetiky.

Klíčová slova: Větrná elektrárna, obnovitelný zdroj, vztlakový princip

Technological entirety and systems of modern wind turbines

Abstract: The aim of this bachelor thesis is to show general view of wind power and the problems connected with it. Considering to range of thesis and number of branches, which are very close to this theme, wasn't possible to cover all pragmatic, but also interesting areas. First chapter presents work in its global form together with reasons of wind turbine installation. Following chapters passes through the history from the first windmills, to the first wind turbines for making energy with presenting important circumstances. Explains contemporary major type of wind turbines and describes individual parts of powerhouses with introduction the principles of individual technology. In thesis are also mentioned the conditions, with which must be counted in the planning and constructing and presented are latest big projects in Czech Republic as well. The end is dedicated to statistics, prognosis, interests and appraisal of economical investigation to wind energetic.

Key words: Wind turbine, renewable resource, buoyancy principle

1	Úvod	1
2	Význam využití větru a větrných elektráren	3
2.1	Vítr a jeho vznik.....	3
2.2	Měření veličin větru pro energetické účely	5
2.3	Energie a teoretický výkon větru	8
2.4	Význam větrných elektráren.....	9
3	Historický vývoj konstrukce větrných motorů	11
3.1	Historie ve světě po 19. století	11
3.2	Historie v Českých zemích po válečné mezidobí	13
3.3	Úpadek a nástup větrných motorů od 20. století do současnosti	16
3.4	Ukázky typů větrných motorů	17
4	Konstrukční prvky, technologické celky a systémy moderních větrných elektráren	20
4.1	Rotor vztlkového principu	20
4.1.1	Regulace otáček rotoru	23
4.2	Gondola.....	25
4.2.1	Strojovna s převodovkou.....	25
4.2.2	Strojovna bez převodovky	27
4.2.3	Generátory větrných elektráren.....	29
4.2.4	Natáčení gondoly	32
4.3	Stožár větrné elektrárny	33
4.4	Základ elektrárny.....	35
5	Charakteristika větrných elektráren vhodných pro podmínky České republiky	37
5.1	Větrné parky ČR.....	40
5.2	Problémy větrných elektráren.....	42
6	Závěr	43
7	Použitá literatura.....	46
8	Seznam obrázků.....	51
9	Seznam Tabulek.....	52

1 Úvod

Slunce, voda a vítr. Elementy přírody, bez nichž by život na Zemi nemohl existovat, ale zároveň živly, s nimiž se od počátku existence života potýkají celé populace rostlin, živočichů a lidí. Každoročně si již obyvatelé České republiky zvykli na vylití vod z řek kvůli povodním, stejně tak jako Australané na požáry sužující jejich lesy, nebo obyvatelé středozemí Spojených států na ničivá tornáda. Nikdo jistě nepochybuje, že tyto živly skrývají obrovskou energii. Tedy energii, s níž se lidstvo naučilo žít, ale i zacházet jako se zdrojem, který může využít ve svůj prospěch. Pokud se přidá ke třem výše jmenovaným ještě tzv. bio hospodářství, lze mluvit o čtyřech základních obnovitelných zdrojích, z nichž je možné (v porovnání s neobnovitelnými zdroji) čerpat téměř neomezeně. Jsou to také zdroje, jejichž využití nemá tak negativní vliv na životní prostředí, které se v posledních letech stává čím dál citlivějším tématem a je těžké se s ním v různých odvětvích neseťkat.

Nejstarším používaným obnovitelným zdrojem (jak u nás, tak ve světě) pro výrobu elektrické energie je voda, kde gravitace, spád a tím průtok vody rozhýbe vodní turbínu. Ta za pomoci hřídele a generátoru převede mechanickou energii vody na energii elektrickou. Ze Slunce lze získat elektřinu fotovoltaickým článkem, který je ve velkém počtu integrován na solární panel, pomocí něž si jeho vlastníci za slunečných dnů mohou dopřát např. teplou vodu, aniž by nahřívali ohříváče vody z veřejné elektrické sítě zatížené paušálem. Energetickým biohospodářstvím je míněno spalování biomasy a bioodpadu, využití kapalných biopaliv a bioplynu. Posledním prvkem z vyjmenovaných obnovitelných zdrojů je vítr, jakožto hybatel rotoru větrné elektrárny, ať již na střeše domu osobního uživatele nebo jako zdroj elektrické energie pro celou obec.

I když vlády v rozvinutých zemích v posledních letech začaly podporovat tuto tzv. zelenou energii, stále je jen nepatrnou částí celého koloběhu výroby a spotřeby. Příkladem mohou být čísla z roku 2008, kdy v České republice podíl energie vyrobené z obnovitelných zdrojů byl pouhá 4 procenta z energie celkově vyrobené.

Na následující tabulce lze zjistit, v jakém odvětví energetiky obnovitelných zdrojů se v tuzemsku vyrobilo nejvíce elektrické energie v roce 2008.

Tab. 1 Výroba elektřiny v roce 2008 z obnovitelných zdrojů (ČR)

Výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů (2008)	Výroba (MWh)
Malé vodní elektrárny (do 1 MW)	492 281
Střední elektrárny (1 - 10 MW)	474 603
Vodní elektrárny (nad 10 MW)	1 057 451
Biomasa	1 231 210
Bioplyn	213 632
Biologicky rozložitelná část komunálního odpadu	11 684
Větrné elektrárny	244 661
Fotovoltaické systémy	12 937
Celková výroba z obnovitelných zdrojů	3 738 459

Zdroj: [6] (upraveno autorem)

Jak již bylo naznačeno, předmětem této bakalářské práce je problematika větru, respektive větrných elektráren, jejich konstrukčních prvků, technologických celků a systémů současnosti. Popsány jsou větrné motory s přihlédnutím k historii, hlavní část je zaměřena na současný nejčtenější typ s vysvětlením základních principů a uvedení výkonových parametrů. Práce je koncipována tak, že od obecného přechází k podrobnému s postupným vysvětlením a příklady z praxe. Protože se téma bakalářské práce dotýká mnoha odvětví z okruhu meteorologie, techniky, elektroniky, fyziky a chemie, stavebnictví nebo životního prostředí, není možné vzhledem k doporučené velikosti, která je z tohoto důvodu o málo překročena, obsáhnout vše podstatné a zajímavé a dokreslit tak komplexní pohled.

2 Význam využití větru a větrných elektráren

Již na počátku našeho letopočtu vědělo lidstvo, jaký má význam pro člověka všudypřítomný zdroj energie — vítr v oblasti techniky pohonu. Z této doby jsou totiž první záznamy o větrných mlýnech v oblastech Persie, kde se vyskytovaly větrné motory se svislou osou rotace. Tyto stavby jsou obecně považovány za jedny z nejstarších technických zařízení, v nichž člověk používal přírodního zdroje k ulehčení vlastní práce [13]. Vznik proudění větru se přitom v té době připisoval božstvu, což svými důkazy vyvrátil až nástup meteorologie.

2.1 Vítr a jeho vznik

Vítr jako pohon rotorů větrných elektráren je definován mnoha způsoby. Obecně lze tvrdit, že hlavními činiteli pro vznik větru je existence tlakové výše a níže, teplotních rozdílů uvnitř atmosféry, slunečního záření a rotace Zeměkoule kolem své osy.

Podle Rychetníka [4] je vítr pohyb vzduchu způsobený rozdíly atmosférického tlaku, které jsou samy důsledkem různých teplot a jim odpovídajících různých hustot vzduchu. Proudění vzduchu z míst vyššího tlaku vzduchu do míst nižšího tlaku vzduchu a tím i rychlost větru závisí na velikosti tohoto rozdílu. Vzhledem k tomu, že Zeměkoule rotuje kolem své osy, působí na vzduchovou vrstvu ještě další síly. Skutečná rychlost větru, její velikost a směr, je pak výslednice těchto rychlostí způsobených rozdílnými tlaky a rotací zemského povrchu, který vzduch s sebou unáší.

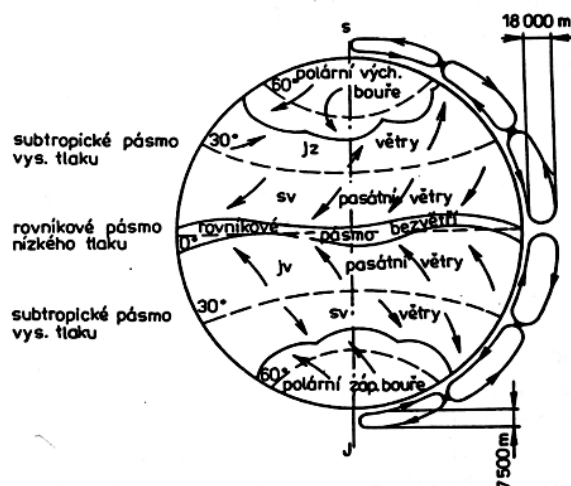
Obr. 1 Schéma proudění vzduchu mezi tlakovou výší (V) a tlakovou níží (N)



Zdroj: [4]

Brož [1] pojmem vítr označuje přibližně jen horizontální složku pohybu vzduchu, vyvolaného krátkodobou transformací sluneční energie na teplo a rotací Země. Pohyb vzdušné masy je pak bržděn třením při zemském povrchu a naopak při poledníkovém proudění na něj působí Coriolisova urychlující síla.

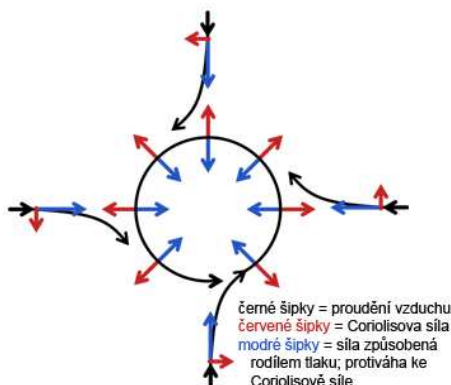
Obr. 2 Schéma hlavních směrů větru na zeměkouli



Zdroj: [4]

Tato síla se obecně vysvětluje jako síla působící na těleso pohybující se v rotující soustavě [41], což má za následek stáčení trajektorie tělesa proti směru otáčení soustavy — zde (přeneseno do větrného respektive meteorologického odvětví) má Coriolisova síla, působící kolmo na proudění vzduchu, za následek jak stočení, tak i urychlení proudění vzduchu prostupujícího z tlakové výše do tlakové níže.

Obr. 3 Schéma Coriolisovy urychlující síly



Zdroj: [41]

Lze také tvrdit, že část slunečního záření, které projde atmosférou, Země vstřebá jako zdroj energie např. pro rostliny. Část se spotřebuje ve změně skupenství z vody na páru a velká část se odrazí zpět do prostoru. Při těchto procesech (společně s otáčením Zeměkoule kolem své osy a k otáčení vzhledem ke Slunci) dopadají paprsky Slunce pod různým úhlem. Přidá-li se k tomu ještě nestejněměrná odrazivost různých povrchů, je potom výsledkem jeho nestejněměrné prohřívání, což vede k proudění vzduchu, jímž se vyrovnává tlakový spád mezi různými místy nad povrchem. Takto, lehce parafrázovanou, uvádí svojí obecnější verzi definice vzniku proudění vzduchu Koč [3].

2.2 Měření veličin větru pro energetické účely

Pro energetické využití větru je směr proudění vzduchu jedna ze dvou základních veličin ovlivňujících konečnou efektivnost větrné elektrárny, tou rozhodující je rychlost. Charakter rychlosti a směru větru se při zemském povrchu radikálně mění vlivem reliéfu Země a dalších faktorů, které jsou popsány v kapitole 5. Měření směru a rychlosti větru se běžně provádí v meteorologických stanicích několikrát denně po několika hodinových intervalech (buď po třech nebo po sedmi hodinách) a jsou vázány na určité standardy. Například standardní výška pro měření se provádí v 10 nebo 100 metrech nad zemským povrchem, a pokud ji nelze dodržet, je naměřená rychlost s výškou vzrůstající na tuto výšku přepočítána.

Přístroje, které se ve většině používají k měření rychlosti a směru jsou:

- Miskové anemometry na měření rychlosti větru. Jejich rotor s horizontální osou rotace je založen na odporovém principu, má obvykle tři ramena, na jejichž koncích jsou lopatky ve tvaru misky. Rotor předává točivý moment hřídeli, která je připojena na dynamo. Velikost vyrobeného proudu v dynamu je pak převedena na napětí, které odpovídá určité rychlosti větru. Jiný způsob převodu spočívá v počítání otáček kříže s miskami a tento údaj se opět převede na napětí a odpovídající rychlost [4].

Obr. 4 Elektronický miskový anemometr



Zdroj: [32] (upraveno autorem)

- Směrovky větru na měření směru větru, které mají též horizontální osu rotace vzdálenou od plochy těžiště tak, že při proudění vzduchu kladou větru nejmenší odpor a natáčí se k němu čelem (částí bez chvostu).

Obr. 5 Směrovka větru



Zdroj: [32] (upraveno autorem)

Směr větru se označuje ve stupních nebo pomocí světových stran. 360° je vítr severní (N — North), 180° jižní (S — South), 270° západní (W — West) a 90° východní (E — East); přičemž název nebo číslo stupně vyjadřuje světovou stranu, od níž vítr vane. Severní vítr tedy znamená proudění od severu k jihu a obdobně vítr jihozápadní znamená proudění od jihozápadu na severovýchod. Rozlišovací schopnost u orientace pomocí světových stran se zpravidla používá na $22,5^\circ$, čemuž odpovídá vítr např. WNW neboli $272,5^\circ \cong 273^\circ$.

Rychlost větru se měří v metrech za sekundu (m/s), pro lepší představu se může přepočítávat na kilometry za hodinu (km/h). Na základě rychlosti proudění, a tím i síly působící na předměty v okolí člověka (na souši i na moři), sestavil

na počátku 19. století Francis Beaufort stupnici, v níž definoval intervaly rychlostí větru. K nim přiřadil odpovídající názvy a viditelné projevy v okolí proudění, díky čemuž může člověk lidským okem bez použití přístrojů částečně určit, o jaký typ větru se jedná. Dodnes se názvosloví ze stupnice, která se postupem času upravovala, používá v meteorologii a v britském námořnictvu je používána povinně v souvislosti se zapisováním do lodních deníků. Normovaná výška pro určení stupně větru je 10 metrů nad zemským povrchem.

Tab. 2 Beaufortova stupnice rychlosti větru

Stupeň	Označení větru a příznaky	Rychlost [m/s]
0	Bezvětrí: kouř stoupá kolmo	0 -1
1	Vánek: pohyb kouře	1-2
2	Větrík: šelest listů	2-4
3	Slabý vítr: pohyb větviček	4-6
4	Mírný vítr: zvedá se prach	6-8
5	Čerstvý vítr: ohýbají se keře	8-10
6	Silný vítr: ohýbají se větší větve	10-12
7	Prudký vítr: ohýbá stromy	12-14
8	Bouřlivý vítr: ulamuje větve	14-17
9	Vichřice: láme slabší stromy, strhává tašky	17-20
10	Silná vichřice: vyvrací stromy, strhává střechy	20-24
11	Mohutná vichřice: působí rozsáhlé škody	24-30
12	Orkán: ničivé účinky	přes 30

Zdroj: [3] (upraveno autorem)

S ničivou silou vyvolanou rychlostí větru 12. stupně se Česká republika setkala 18. a 19. ledna roku 2007 v souvislosti s orkánem pojmenovaný Kyrill. Nejvyšších rychlostí dosahoval na hřebenech Krušných a Lužických hor, maximální naměřená rychlost byla odečtena v Krkonoších na Sněžce, kde se hodnota vyšplhala na 60 m/s (216 km/h). Souvislosti s vyšší rychlostí větru na hřebenech hor je uvedena v kapitole 5.

2.3 Energie a teoretický výkon větru

Základní vztah pro zjištění výkonu větru vychází ze vzorce pohybové energie

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

kde v je rychlost vzduchu a m hmotu. Hmotu lze vyjádřit pomocí objemu V a hustoty vzduchu ρ

$$m = \rho * V = \rho * A * s, \quad (2)$$

kde A je plocha, kterou daný objekt protéká a stojící kolmo k proudění větru; s je dráha, kterou urazí pohybující se vzduch.

Výkon protékající jednotkovou plochou vychází ze vztahu

$$P_v = \frac{E}{A * t} = \frac{1}{2}\rho * \frac{A * s}{A * t} * v^2, \quad (3)$$

kde lze tvrdit, že $\frac{s}{t} = v$ neboli po dosazení je konečný jednotkový výkon

$$P_v = \frac{1}{2}\rho * v^3. \quad (4)$$

Ze vztahu jednotkového výkonu vyplývá, že výkon protékající jednotkovou plochou 1m^2 je přímo úměrný hustotě vzduchu a třetí mocnině rychlosti větru. Je-li rychlost dosazována v m/s , hustota vzduchu v kg/m^3 , potom výkon vychází v jednotkách W/m^2 , což znamená počet wattů průchozích plochou 1m^2 [4]. Hlavním činitelem výkonu větrných elektráren je tedy rychlost proudění vzduchu odebraná určitou plochou. To má význam také pro velikost rotoru a celkový výkon elektrárny (viz kapitola 5).

2.4 Význam větrných elektráren

Z předešlých stránek lze vyzorovat, že vítr jako alternativní zdroj energie činí z větrných elektráren technologické stavby s velkým potenciálem výroby elektrické energie, vycházející též ze stále většího počtu instalací po celém světě. Popularita je spojena nejen s trendy současnosti, tedy výrobou tzv. zelené energie, ale také s výhodami, jenž elektrárny s sebou přinášejí zařazením do provozu.

Ať už se názory na globální oteplování různí, značná část vědců zasvěcených v této problematice dává za pravdu tvrzení, že člověk se negativně podílí na změně klimatu produkcí skleníkových plynů, jakožto nositeli skleníkového efektu. Tento jev má za následek setrvání infračerveného záření odraženého od povrchu Země, které by mělo projít zpět do vesmírného prostoru, leč vlivem skleníkových plynů a jejich absorpčních schopností pro infračervené spektrum setrvává v atmosféře Země [24]. „Uzamknuté“ záření poté ovlivňuje atmosféru zvýšením teploty, čímž dochází ke globálnímu oteplování, jehož následky jsou člověku v dnešní době známy. Spalováním fosilních paliv v uhelných (tepelných) elektrárnách uniká do ovzduší oxid uhličitý (CO_2), který se řadí mezi skleníkové plyny vypouštěných do ovzduší člověkem více než 50 % zastoupením (v roce 2006 v ČR dokonce 86 %) [36].

Obr. 6 Schéma skleníkového jevu v atmosféře Zeměkoule



Zdroj: [48]

Spolu s vypouštěním zmíněného CO_2 se do ovzduší vlivem spalování vypouští oxid siřičitý (SO_2) v závislosti na kvalitě vytěženého uhlí. Při průchodu atmosférou reaguje SO_2 s vodní párou (přírodní skleníkový plyn), která se vrací na zem ve formě kyselých dešťů a ovlivňuje tak kvalitu půdy [24].

Těžbou uhlí člověk čerpá ze země surovinu, jenž vznikala miliony let (prvohory a druhohory), a která je po vyčerpání neobnovitelná. V místech povrchových ložisek uhlí vznikají lomy, které mají zásadní dopad na vzhled okolní krajiny, kdy je po vytěžení nutná nákladná rekultivace krajiny.

Jaderná energetika s sebou nese těžbu též vyčerpateľného zdroje — uranu, i když v daleko menším množství než v prvním případě, zato o mnoho víc nebezpečným. Exploze jaderného reaktoru a uvolnění radioaktivního mraku při černobylské havárii z roku 1986 se snad již opakovat nebude v žádné z elektráren tohoto typu, díky přísné kontrole a současným bezpečnostním opatřením. Avšak rizika spjatá s provozováním této výroby energie jsou v porovnání s ostatní výrobou nesrovnatelná, nemluvě o problému ukládání radioaktivního odpadu s výhledem do budoucna.

Dle výše zmíněného je proto význam větrných elektráren zřejmý. Spočívá ve splnění následujících úloh:

- Ulevit životnímu prostředí při výrobě elektrické energie snížením vypouštění emisí do ovzduší a devastací krajiny.
- Snížit až anulovat rizika a dopady spojené s výrobou elektrické energie.
- Částečně se odpoutat od neobnovitelných zdrojů s určitým přechodem k spotřebě energie, na níž se obnovitelné zdroje podílejí větším zastoupením.

3 Historický vývoj konstrukce větrných motorů

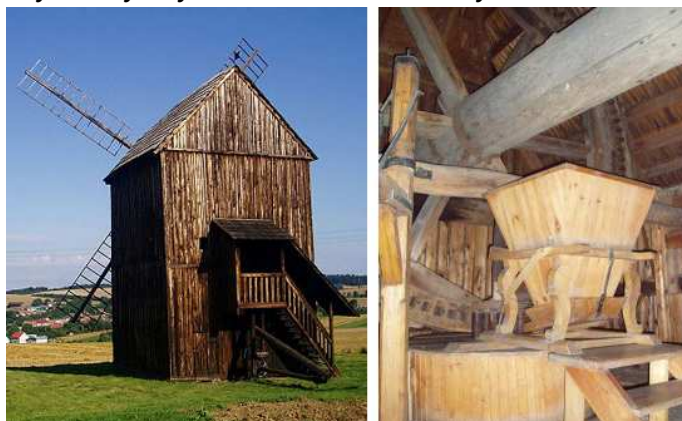
3.1 Historie ve světě po 19. století

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, první prameny o větrných mlýnech jako prvních technologických stavbách na využití větrné energie, pocházejí z oblasti Persie a jsou asi 2 200 let staré. Byly konstruovány stejně jako motory v Číně, tedy se svislou osou rotace. O prvním větrném motoru s vodorovnou osou rotace je nejstarší zmínka ze 3. století před Kristem, který byl sestaven v Egyptě, a ve svých spisech se o nich zmiňuje i Herón z Alexandrie v 1. století našeho letopočtu [4],

Četnější výstavba větrných mlýnů se začala provádět o mnoho let později ve středověku v průběhu 11. století na Středním východě. Ve 13. století se začaly rozšiřovat i do Evropy — nejdříve do Itálie, Francie, Španělska a Portugalska, později i do Velké Británie, Nizozemska a Německa. Objevení větrných motorů v Evropě je spojováno s návratem křižáků z jejich výprav [4], [39]. Z této doby pocházejí dva typy větrných mlýnů od sebe odlišných způsobem natáčení proti větru:

- Sloupový větrný mlýn se proti větru natáčí vnějším zařízením tzv. ocasem, což je trámec zakotvený zdola v podlaze 1. patra mlýna. Samotné otáčení bylo prováděno pomocí vodorovných nebo svislých rumpálů a na ně navíjených lan či řetězů. Mlýn je čtvercového nebo obdélníkového půdorysu umístěný uprostřed na většinou dubovém sloupu tak, aby se celá stavba mohla otáčet. Sloup dosahoval výšky 1. patra mlýnu, kde byl upraven na kruhový průřez, poté v druhém patře uložen do ložiska vytvořeného v hlavním nosném trámu, na němž byla celá stavba zavěšená [3].

Obr. 7 Sloupový větrný mlýn u obce Velké Těšany na Kroměřížsku



Zdroj: [29] (upraveno autorem)

- Holandský větrný mlýn se proti větru natáčí (na rozdíl od sloupcového) pouze střešní částí s křídly umístěné na kolejnici, díky níž lze touto částí pohybovat buď z vnitřku nebo z vnějšku mlýna. Spodní částí nelze otáčet, jelikož je zpravidla postavena z cihel nebo kamene, díky čemuž mohla být stavba masivnějšího typu.

Obr. 8 Holandský větrný mlýn v Moravském Kuželově



Zdroj: [5] (upraveno autorem)

Ve 14. století zaujalo Nizozemsko výsadní pozici ve využívání větrných motorů za účelem odvodnění mokřin a jezírek v ústí Rýna a začátkem 17. století byl vysušen první polder. Využití větrných motorů zde však nekončilo jen u čerpání vody, používaly se např. na výrobu oleje, papíru, jako pohon pil nebo klasicky na mletí obilí, což mělo za následek, že v polovině 19. století zde pracovalo okolo 9 000 větrných motorů, většinou o výkonu desítek kW [4].

V polovině 19. století došlo také při osidlování západního pobřeží USA k rozvoji využití větrných motorů. Zde byly převážně používány k čerpání vody (pro napájení dobytka a další potřeby farmářů) pomocí vícelopátkového rotoru, který se poté stal jakýmsi symbolem divokého západu. Rotor byl umístěn na vrcholu dřevěné (později ocelové) věže. Postupem času se od čerpání přešlo i na výrobu elektřiny.

Obr. 9 Větrné čerpadlo amerického, vícelopátkového typu



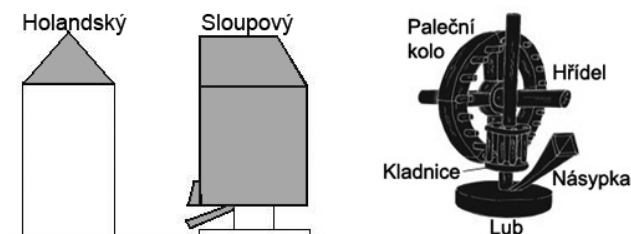
Zdroj: neznámý (upraveno autorem)

I když větrným konvertorům USA vévodil od 19. století tento typ, nejstarší dochovaný záznam o větrném mlýnu pochází již ze 17. století z New Yorku, kdy je na dobové rytině jasně vyobrazen křížový rotor s křídly klasického větrného mlýna. S největší pravděpodobností byl mlýn holandského typu, jelikož původní název New Yorku (osídlený Holanďany) byl New Amsterdam [3].

3.2 Historie v Českých zemích po válečné mezidobí

První zmínky o větrném mlýnu na území Čech pochází z konce 13. století v souvislosti s pražským klášterem na Strahově, kde měl být vybudován premonstráty roku 1277. O čtyři roky později ho měla dle záznamu strhnout vichřice, ale téhož roku měl být vystavěn znovu [35]. Konstrukce není zapsána, ale soudě podle dochovaných obrázků a také podle odhadů historiků, kteří počátek staveb větrných mlýnů holandského typu v Českých zemích odhadují okolo 18. století, lze vytušit původ konstrukce v sloupovém větrném mlýnu.

Obr. 10 Otočné části větrných mlýnů a jejich mlecí mechanismus



Zdroj: [3], [35] (upraveno autorem)

I když ve své době byly větrné mlýny oproti vodním mlýnům, které měly prakticky identický mlecí mechanismus, co do počtu téměř raritou (na jeden větrný mlýn připadalo 170 mlýnů vodních), v České republice se díky historickým průzkumům zjistilo na 900 lokalit, kde se větrné mlýny nacházely. Předpokládá se, že v době rozmachu (17. a 18. století) na větší polovině těchto lokalit stály větrné mlýny sloupového typu, které kvůli větší náchylnosti k opotřebení z míst postupně vymizely. Holandský typ díky pozdějšímu vybudování a také díky zděné válcovité či kuželovité základně, budované od 3 do 10 metrů, lépe odolal erozím spojených s časem. Většina dochovaných větrných mlýnů je proto převážně holandského typu z 18. a počátku 19. století [5].

Za vyzdvžení stojí ty mlýny ČR, které se jistým způsobem liší od ostatních:

- Větrný mlýn v Třebíči, vynikal svou ojedinělou činností vůči ostatním tím, že mlel kůru pro kožedělný průmysl (koželužny), v Třebíči se koželužny udržely dodnes. V současnosti je mlýn nevyužíván [5].

Obr. 11 Větrný mlýn v Třebíči



Zdroj: [5]

- Větrný mlýn v Příčovech u Sedlčan se pyšní jedním z největších obvodových zdí Evropě z 15. století, i když ve zpustlém stavu. Vnější průměr stavby je přes 14 metrů [5].

Obr. 12 Ruiny větrného mlýnu v Příčovech



Zdroj: [20]

- Větrný mlýn u Ruprechtova je opravdovou raritou v celé Evropě. Po havárii křídel způsobené vichřicí, byla místo jejich rekonstrukce na střeche postavena Halladayova turbína o průměru 10 metrů, která je jakýmsi mezičlánkem mezi klasickými lopatkami a pozdějšími čerpadly [3].

Obr. 13 Větrný mlýn v Ruprechtově



Zdroj: [21]

V období mezi světovými válkami se v České republice značně rozšířila vícelopatková větrná čerpadla díky továrně Antonína Kunze, jehož výrobek byl poprvé představen na výstavišti v Holešovicích v roce 1891. Čerpadlo nebylo určeno pro ranče a zastávky Pacifické dráhy jako v USA, ale pro statky, zahradnictví

a rozvody pitné vody. Větrné pohony čerpadel byly založeny na principu Halladayovy větrné turbíny a větrného rotoru amerického typu [3]. Kunzova větrná čerpadla se vyráběla ve velikostech o průměru rotoru od 3 do 10 metrů přičemž výkonnost každého typu čerpadla vzrůstala s jeho průměrem.

3.3 Úpadek a nástup větrných motorů od 20. století do současnosti

S nástupem vynálezu a rozšířením parního stroje v 18 a 19. století, jenž následně vytlačil spalovací motor, souvisí i úpadek větrných motorů v širším užití. Malé větrné motory ztratily svůj význam s rozšiřující se elektrizací a také kvůli větší pracovní pohotovosti spalovacího motoru při nízkých cenách kapalných paliv v 60. letech 20. století [4]. Přidá-li se k uvedenému ještě počátek spalování fosilních paliv tepelnými elektrárnami a objevy (spojené s následným zavedením do praxe) v oblasti jaderné energetiky je zjevné, že moc prostoru pro technologický vývoj větrná energetika nedostávala. Lze však najít i výjimky, kde vývoj pokračoval.

Příkladem může být větrný motor postavený v SSSR u Jalty v roce 1931 o výkonu 100 kW nebo anglický větrný motor postavený podle návrhu Francouze Andreaua. Ten byl zajímavý tím, že duté, na konci otevřené lopatky rotoru pracovaly jako radiální (odstředivý) kompresor. Největší větrný motor Smith-Puntnam, provozovaný v letech 1941 až 1945, byl instalován ve státě Vermont. Motor dosahoval výkonu 1 250 kW. Průměr rotoru byl 53,5 metrů, ale jeho provoz skončil havárií — utržením jedné z rotorových lopatek. Vývoj větrných motorů pokračoval rovněž v Dánsku, Francii a v Německu, kde stojí za zmínku velmi dobře propracovaný větrný motor o výkonu 100 kW, který lehkými rotorovými listy ze skelného laminátu, ale i jinak velmi odlehčenou konstrukcí, patřil k nejúspěšnějším a vysoce spolehlivým jednotkám na světě. Provozován byl v letech 1957 až 1968 [4].

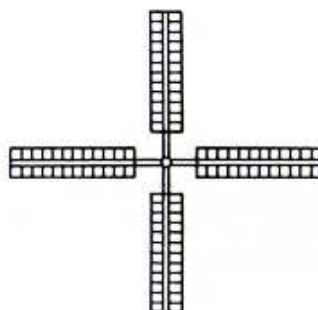
V již zmíněných 60. letech 20. století dochází k výraznému útlumu všech projektů větrných motorů, kvůli nízké ceně kapalných paliv. Počáteční impuls k využití větrných motorů a obnovitelných zdrojů obecně na Evropském kontinentu se datuje na počátek 80. let dvacátého století, kdy se v Dánsku začaly stavět první větrné parky jako reakce na energetickou (ropnou) krizi v roce 1973. Organizace

států vyvážejících ropu (OPEC) tehdy v reakci na válečný konflikt omezila vývoz této suroviny, čímž stoupla její cena za jeden rok až čtyřnásobně. Pod tlakem prudkého zvýšení cen si státy (jimž byla ropa exportována) uvědomovaly omezenost energetických zdrojů a začaly ověřovat možnosti obnovitelných zdrojů pro využití v širším měřítku [39]. Stavba elektráren na sebe nenechala dlouho čekat a již v roce 1991 bylo v tomto odvětví průkopnickém Dánsku postaveno 3 200 větrných elektráren o celkovém výkonu 410 MW. První příčku v instalovaném výkonu postupně převzalo Německo, když k 31.12. 2004 bylo postaveno 16 543 větrných elektráren s celkovým výkonem 16 629 MW, což stačilo k pokrytí 5,9% spotřeby elektrické energie celého Německa v té době. V České republice došlo v letech 1990 až 1995 k rozvoji využívání větrné energie v moderním měřítku, kdy bylo vybudováno 24 větrných elektráren s výkonem větším nebo rovným 50 kW, poté následoval pokles, způsobený demontáží 5 zařízení, poruchou řady stanic a nevýhodnou výkupní cenou energie, trvající do roku 2002 [33]. V současnosti se energetika větru dostala celosvětově do prudkého rozmachu.

3.4 Ukázky typů větrných motorů

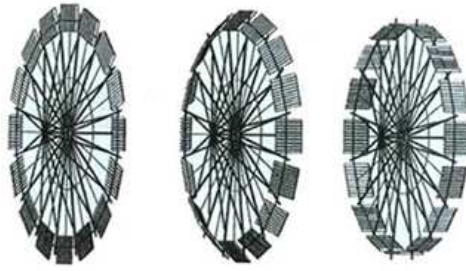
Účelem této uzavírající podkapitoly v historii větrných motorů je ukázat konstrukční tvary rotorů s postupným vývojem v čase a letným popisem těch, které nezaujímají v současnosti většinové postavení. Důležité souvislosti vztahující se k nejnovějším typům rotorů jsou uvedeny v následující kapitole.

Obr. 14 Typický rotor větrného mlýna



Zdroj: [4]

Obr. 15 Výkonové fáze Halladayovy větrné turbíny



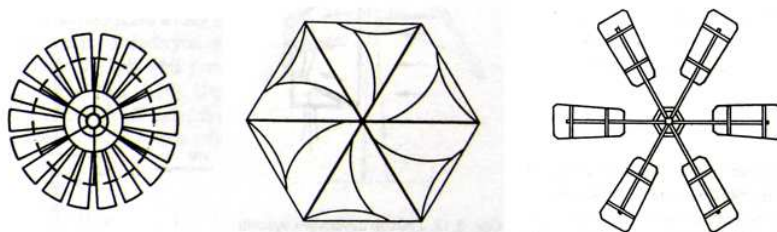
Zdroj: [21]

Obr. 16 Největší typ Kunzova čerpadla s názvem Samson z dobového letáku



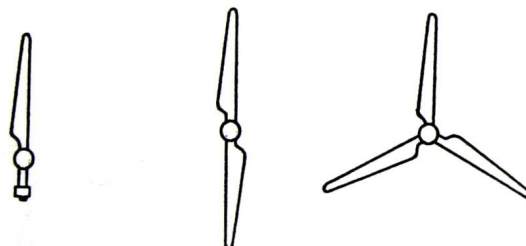
Zdroj: [22]

Obr. 17 Typy rotorů pro větrná čerpadla (zleva: americký, krétský, současný)



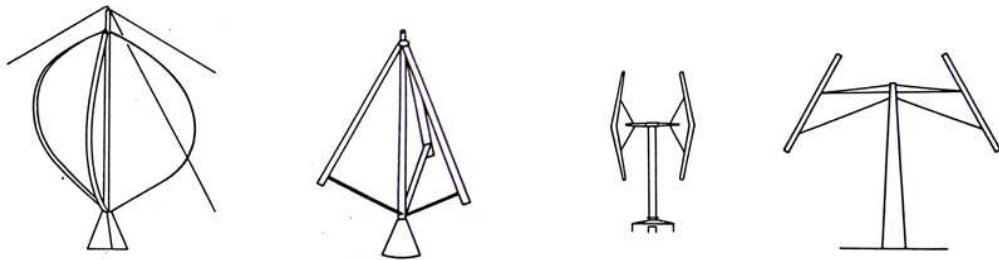
Zdroj: [4]

Obr. 18 Obvyklá schémata uspořádání listů větrných elektráren (3. zleva je nejčtenější)



Zdroj: [4]

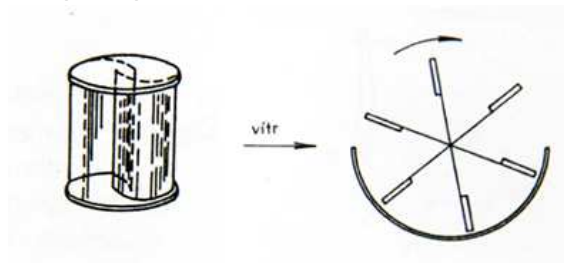
Obr. 19 Různé uspořádání rotorů se svisle orientovanou osou rotace



Zdroj: [4]

Všechny doposud uvedené typy rotorů jsou vztlakového principu s vodorovnou osou rotace, kromě obr. 20, kde jsou zobrazeny rotory se svislou osou rotace. Rotor do tvaru písmene Φ je patentovaným vynálezem Francouze G. J. Darrieuse, proto se lze setkat s názvem rotor typu Darrieus [4]. Změna osy rotace přinesla těmto elektrárnám výhody v podobě absence složitého natáčecího mechanismu a jednoduché údržby generátoru. Nevýhody pak, že se nacházejí v těsné blízkosti země, tím jsou náchylné na dynamické rázy, rychleji se opotřebovávají, zabírají větší plochu a nikdy nebudou mít tak velkou účinnost (tím i výkonnost) jako vodorovně orientované osy rotorů. Souvislosti jsou vysvětleny v dalších kapitolách.

Obr. 20 Rotory odporového principu



Zdroj: [4]

Druhým principem větrných rotorů je princip odporový. Jeho funkční plocha se svislou osou rotace má takový tvar, aby byl její odpor různý při různých směrech pohybu [4]. Tohoto principu využívá např. anemometr z kapitoly 2.2. Rotor na obrázku výše vynalezl finský inženýr S. J. Savonius (rotor typu Savonius) a obdobně ho lze naléznout ve vodních elektrárnách menšího typu.

4 Konstrukční prvky, technologické celky a systémy moderních větrných elektráren

V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé části a principy větrné elektrárny se zaměřením na jeden hlavní typ, který se svým početním zastoupením v současnosti nejvíce vyskytuje jak v České republice, tak i ve světě nejen díky svojí největší dosažitelné účinnosti.

Obecně lze větrné elektrárny dělit dle několika hledisek:

- Podle velikosti vyrobeného výkonu na malé, střední a velké.
- Podle osy rotace na horizontální a vertikální.
- Podle rychloběžnosti na pomaloběžné, středně rychloběžné a rychloběžné.
- Podle použitého principu rotoru na vztlakový a odporový.

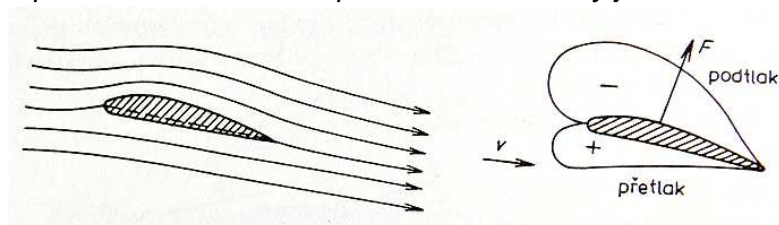
Přičemž již zmíněný nejčtenější typ je schopen vyrobit výkon větší než 20 kW, čímž se řadí mezi velké větrné elektrárny [16], konstruován je s horizontální osou rotace, která se otáčí rychloběžně (poměr rychlosti proudění neovlivněného větru ku obvodové rychlosti rotoru) na vztlakovém principu.

4.1 Rotor vztlakového principu

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Základní princip spočívá v tom, že zpomalují proud vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou, a tím odnímají část jeho energie [4]. Přeměna kinetické energie začíná právě na rotoru respektive na jeho pracovních plochách — lopatkách (listech vrtule), které jsou konstruovány podle zákonů aerodynamiky podobně jako křídla letadel. Profil lopatky má zaoblenou náběžnou a ostřejší odtokovou hranu,

mezi nimiž se plynule mění tloušťka profilu. Přímá spojnice náběžné a odtkové hrany se nazývá tětíva. Při správném nastavení je profil listu vrtule proudem vzduchu obtékán tak, že nad horní stranou se zhušťují proudnice a narůstá rychlost proudění, zatímco na spodní straně profilu rychlost klesá. V místech s větší rychlostí statický tlak klesá a naopak v místech, kde je rychlost menší, statický tlak stoupá, přičemž síla vyvolaná podtlakem na horní straně profilu je obvykle dvojnásobná než síla v přetlakové spodní části. To má velký vliv při vlastním návrhu lopatek — čistota a kvalita provedení horní strany profilu má na jeho výsledné vlastnosti výrazně větší vliv [4].

Obr. 21 Obtékání proudu vzduchu kolem profilu a vzniklé tlaky jeho vlivem



Zdroj: [4]

Působením tlaku na povrchu profilu vzniká síla F , která se dělí na vztlakovou složku F_y a odporovou složku ještě neovlivněného proudu vzduchu F_x , vyvolující točivý moment v místě závislém na délce tětivy [4].

Výsledná síla působící na lopatku

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} . \quad (5)$$

Vztlaková síla bude tím větší, čím větší bude poměr vztlakové a odporové složky sil.

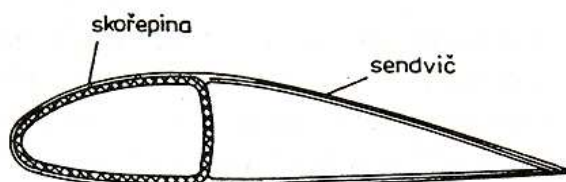
Jelikož listy vrtule nemohou nikdy vítr úplně zastavit, nemůže nikdy rotor využít celou energii obsaženou ve větru (viz vzorec 4), z čehož vychází maximální možná dosažitelná účinnost rotoru, která je při ideálních podmínkách rovna poměru výkonu rotoru ku teoretickému výkonu větru. Tato účinnost se také nazývá Betzova ideální účinnost a je rovna číslu 0,5926, čemuž odpovídá tvrzení, že při proudění

větru určitou rychlostí, a tím i určitého teoretického výkonu, je možné rotorem (respektive lopatkami) teoreticky maximálně odebrat přibližně 60 %. Je však jasné, že ideální podmínky, jako je např. potlačení mísení turbulentních proudů nebo lopatky ideálně projektované pro určitou rychlost není možné splnit, a tak reálná maximální účinnost rotoru se pohybuje okolo 45 % zpravidla však ještě o něco méně.

Počet lopatek zasazených do odlitku hlavy vrtule (náboje) se v současné době u moderních velkých větrných elektráren téměř výhradně vyskytuje v trojlístém provedení jako výsledek vývoje od monopterů s protizávažím přes dvoulopatkové provedení. Dvoulístá vrtule sice dosahuje větší rychloběžnosti, a tím i většího výkonu, ale třílísté provedení méně namáhá rotor vlivem gyroskopických momentů a dynamických sil, neboť kompenzuje rozdílnou rychlost v nejnižším a nejvyšším bodě rotoru. Měření prokázalo, že v průběhu dvou vteřin se rychlost větru mění až o 30 % a rozdílnost rychlostí větru v nejnižším a nejvyšším bodě je až 60 % [4].

Obvodové rychlosti lopatek rotorů o průměru 30 až 50 (někdy i 90 a více) metrů se při výrobě elektřiny pohybují obvodovou rychlostí i nad 80 m/s. Celkový jmenovitý výkon je obvykle do 2 MW nebo 3 MW, výjimkou je největší větrná elektrárna v Německu s výkonem 5 MW. Chod lopatek nesmí ohrozit vnější vlivy nejčastěji spojené s počasím (teplotní rozdíly v letních a zimních měsících, námrazy atd.). Na náročnou výrobu lopatek je tedy kladen velký důraz. Samotné výrobě předchází návrh listu, jehož vlastnosti (povrch a tvar) odpovídají typu elektrárny, pracovnímu využití a podmínkám v okolí elektrárny. Následná volba profilu ovlivňuje celkovou účinnost elektrárny — ztráty způsobené špatným návrhem nebo výběrem profilu lopatky se projeví nejdramatičtěji (tím víc, čím větší je výkonnost elektrárny).

Obr. 22 Ukázka řešení vrtulového listu



Zdroj: [4]

Zatímco pomaloběžnému čerpadlu postačí jako lopatky prohnuté plechy při slušné účinnosti, rychloběžná větrná elektrárna pro výrobu energie je při výběru materiálu a tvaru náročnější, jelikož list musí vyhovět jak mechanickému a fyzikálnímu namáhání (nejvíce vztlak a odpor), tak zpracování povrchu i následným zkouškám v aerodynamických tunelech. Materiály jako dřevo, plast, hliník, kompozity nebo dokonce kombinaci dřeva jako kostry lopatky a plátna jako povrchu lze použít pro pomaloběžné rotory. Pro rychloběžné je nejpoužívanější sklolaminát s epoxidovou pryskyřicí občas zpevněnou uhlíkem.

Do budoucna by se někteří výrobci vrtulí chtěli odprostit od přírodu zatěžující výroby sklolaminátů a přesunout se k výrobě kompozitů. Velcí výrobci větrných elektráren si profily navrhují sami (nebo jsou spojeny se sesterskými firmami), což má za následek vývoj technologie — firma Vestas přešla s modelem V90 od skelného laminátu k uhlíkovým vláknům spolu s novým tvarem lopatek, což snížilo hmotnost a aerodynamický odpor povrchu. Ve výsledku je 44 metrů dlouhá lopatka modelu V90 lehčí než lopatka modelu V80, která je kratší o 5 metrů. Firma ENERCON naopak přišla s lopatkami, které eliminují hluk tím, že úplný konec lopatky je zahnutý do pravého úhlu proti proudícímu větru [25], [15].

4.1.1 Regulace otáček rotoru

Regulace otáček rotoru se provádí pomocí dvou principů v závislosti na tom, jak jsou listy na ose otáčení upevněny – buďto pevně nebo jsou schopny se otáčet okolo své podélné osy [3].

Listy pevně uložené v náboji rotoru regulují otáčky (tím i účinnost respektive výkon) rotoru aerodynamickými brzdami, principem nazývaný „STALL“ nebo vzájemnou kombinací. Regulace „STALL“ (pasivní regulace) je založena na vhodně navrženém listu, který při překročení určité rychlosti během otáčení rotoru začne na podtlakové straně listu odtrhávat ideální tvar proudnice (vlivem změny úhlu náběhu poměrem obvodové rychlosti a rychlosti větru), čímž klesají vztlakové vlastnosti listu a otáčky rotoru se již dále nezvyšují, popřípadě mírně klesnou. Aerodynamická brzda se nejčastěji umísťuje na konec lopatek, kde má největší účinnost, v podobě

otočných destiček zachovávající tvar profilu při normálním běhu elektrárny. Po překročení určité hraniční rychlosti rotoru se vlivem odstředivé síly nebo vlivem elektronického impulsu z regulačního systému, destičky na koncích lopatek otočí o 90° , čímž způsobí maximální brzdny účinek vlivem aerodynamického odporu, narušující aerodynamické vlastnosti listu [4]. Regulace „STALL“ se používá u větrných elektráren s málo proměnlivými otáčkami, ale většinou i tyto rotory bývají vybaveny aerodynamickou brzdou. Výhodou kombinací těchto regulací je konstrukčně jednodušší uložení listů, čímž odpadá i finančně náročné zařízení k jejich natáčení a energetická úspora, tedy jednodušší i levnější výroba. Nevýhodou pak malý pracovní interval při rozdílných rychlostech větru nebo namáhání rotoru a brzd při zastaveném rotoru v podmínkách, kdy činnost není možná.

Listy, které nejsou uloženy pevně v náboji rotoru, regulují jeho účinnost velmi kvalitně právě natáčením celých listů kolem podélné osy. Tento princip, který se nazývá „PITCH“ (aktivní regulace), zajišťuje chod větrného motoru při konstantních nebo málo proměnných otáčkách ve velkém rozsahu rychlostí větru, aniž by se výrazně měnila jeho účinnost. Zmíněné vlastnosti lze provádět pomocí dvou způsobů natáčení, jež lze poznat na první pohled při nečinném režimu elektrárny. První z nich funguje na natáčení listu v rozmezí asi 120° , neboli ze stavu nulového vztlaku, kdy je tětíva listu téměř rovnoběžná se základy elektrárny, do polohy maximálního vztlaku, kdy tětíva svírá úhel téměř 90° ve směru hodinových ručiček. Druhý princip využívá přibližně jen třetinový rozsah natáčení úhlu než způsob první, přičemž první pozice je rozběhová, druhá maximálního vztlaku, třetí pozice přesáhne úhel 90° a tím začnou působit vztlakové síly opačného směru — rotor se začne zpomalovat [4]. Výhodou prvního principu je téměř nulové namáhání rotoru při nečinném stavu vhodné pro elektrárny v extrémních podmínkách, nevýhodou pak větší nároky a spotřeba energie regulačního mechanismu. Výhodou druhého principu je naopak úspora energie a menší nárok na mechanismus, naopak nevýhodou je namáhání rotoru při brzdícím režimu stejně tak jako v nečinnosti elektrárny.

4.2 Gondola

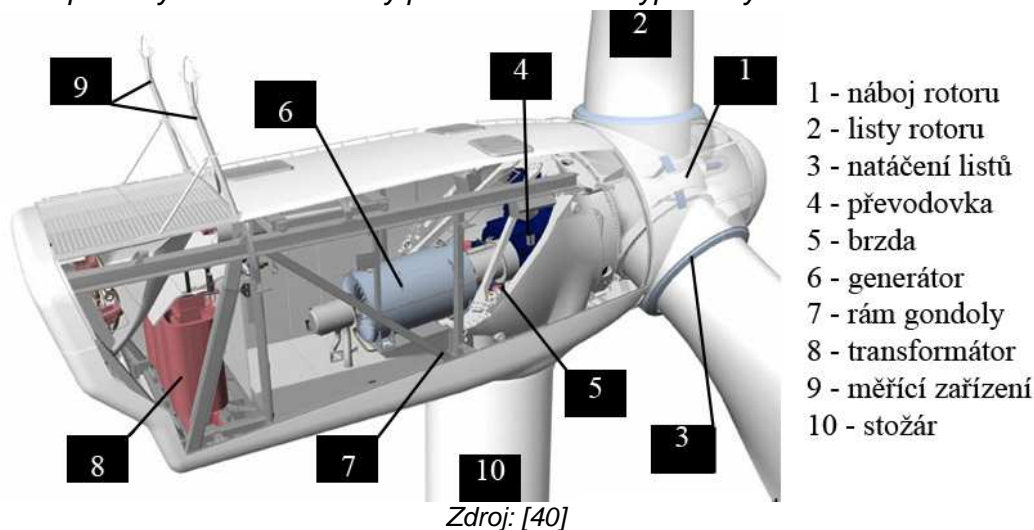
Gondola tvoří ústřední konstrukční díl větrného konvertoru [2]. Je to otočná technologická část větrné elektrárny za rotorem, kde se v poslední fázi generátorem přemění mechanická energie přenášená hřídelem rotoru na elektrickou energii. V gondole, která je zajištěna na sloupu (stožáru), je umístěna strojovna řízená povely, jež vysílají počítačové jednotky v závislosti na obdržení informací ze snímačů. Celý chod elektrárny řídí centrální řídicí jednotka, která zpracovává data z podpůrných počítačových jednotek, z měřících přístrojů umístěných na gondole pro měření rychlosti a směru větru (popsány v kapitole 2.2), teploty vzduchu a teploty v různých částech elektrárny, oscilace věže, nebo jiné údaje na otáčivých částech strojovny a k tomu vydává odpovídající povely. Příkladem může být natočení lopatek při silnějším větru, natočení celé gondoly do optimální polohy největší účinnosti, omezení výstupního výkonu, vyřazení celé elektrárny z provozu při extrémních podmínkách, nebo zapnutí vyhřívání lopatek, aby nedošlo ke vzniku námrazy, která je zvláště nebezpečná v případech, kdy je větrná elektrárna umístěna blízko míst s výskytem lidí. Pracovní stroje a funkční orgány strojovny se v zásadě liší podle toho, jak je koncipována elektrárna. Zda je založená na převodkovém nebo bezpřevodkovém provedení. V současné době jsou vyráběny a užívány oba dva typy elektráren se svými klady i zápory.

4.2.1 Strojovna s převodkovou

Převodkový systém větrných elektráren je koncipován na převodu rychlostí z hřídele hnaného rotorem, který má nízký počet otáček na vysoký počet otáček generátoru pomocí převodových poměrů v převodovce. Jelikož generátor pracuje s konstantními nebo téměř konstantními otáčkami v závislosti na tom, o jaký typ generátoru se jedná (asynchronní nebo synchronní), musí převodovka takovou rychlost zajistit v průběhu změny rychlostí větru při výrobě elektrické energie. Tvar gondoly je obvykle kvádrovitý se zaoblenými hranami a prvky aerodynamiky. Nevýhodou těchto typů je větší hlučnost provozu, potřeba olejového hospodářství, větší mechanické namáhání elektrárny, náklady spojené s údržbou. Výhodou pak

menší požadavky na elektrické stroje (možnost využití levnějších typů generátorů při výborné účinnosti), díky nezkruslenému, prakticky sinusovému průběhu signálu odpadá potřebná filtrace signálu.

Obr. 23 Komponenty větrné elektrárny převodkového typu firmy Vestas



Brzda se umísťuje buďto rovnou na pomaloběžný hřídel hnaný rotorem, ale nejčastěji za převodovku na rychloběžný hřídel generátoru. Brzdy jsou většinou kotoučové (třecí) ovládané mechanicky, elektricky nebo hydraulicky a mají za úkol regulovat chod elektrárny, zajistit rotor v klidovém stavu, nebo zastavit rotor při příliš velkých rychlostech větru, a tak elektrárnu ochránit před havárií [3], [4]. Elektrické a hydraulické principy pracují tak, aby při ztrátě napětí nebo tlaku v soustavě, ale i při poruše čidel, byl rotor zabrzděn, a musí také umožňovat zabrzdění větrného motoru obsluhou. Ve všech ostatních případech příkazy k vykonání zabrzdění vydává řídicí jednotka.

Na převodovku jsou kladeny velké nároky, zejména na její nízkou hmotnost, dlouhou životnost a malou velikost s přihlédnutím na finanční náklady. Těmto požadavkům vyhověly planetové převodovky skládající se z centrálního kola, unašečů a korunového kola. Jelikož jde o převod do rychla, tak pomaloběžná hřídel z rotoru pohání v převodovce největší korunové kolo a za pomoci unašečů a menšího centrální kola (v porovnání s korunovým) se určitým převodovým poměrem (např. 1:100) převede z rotorového hřídele točivý moment na generátor. Otáčky hřídele rotoru jsou totiž příliš pomalé s ohledem na potřebné otáčky

generátoru (např. u čtyřpólového je to 1500 ot/min) [4], při nichž generátor dosahuje jmenovitého (nejvyššího) výkonu. Používá se buď jednostupňová planetová převodovka, vícestupňová planetová převodovka (spojením více jednostupňových) nebo kombinace planetového převodu s převodovkou čelní se šikmými zuby.

Ložiska hřídele patří k nejdůležitějším a nejvíce namáhaným strojním dílům zařízení. Musí zachycovat tíhové i axiální síly od zátěže a mimo to by měly dlouho vydržet, neboť při výměně se celý rotor musí spustit na zem a rozebrat [2]. Ložiska na strojích jsou většinou válečková, na hřídeli pak dvouřadá soudečková ložiska nebo ložiska umožňující částečné vychýlení o několik stupňů navržená tak, aby tlumila vibrace a namáhání, přenášela tíhu rotoru na kostru gondoly, a musí obstát i v otázkách životnosti. Speciálně navržená kruhová (prstencová) ložiska pro natáčení lopatek a celé gondoly od firmy SKF slibují vysokou účinnost i životnost vlivem speciální povrchové úpravy proti korozi, ochraně proti vibracím v klidovém stavu elektrárny, patentovaného utěsnění, které zabraňuje úniku maziva a v neposlední řadě zaručují velkou únosnost [28].

Transformátor se nachází buď přímo v elektrárně, nebo v jeho těsné blízkosti a slouží k převádění elektřiny vyrobené generátorem o nízkém napětí, na vysoké napětí distribuční sítě [34].

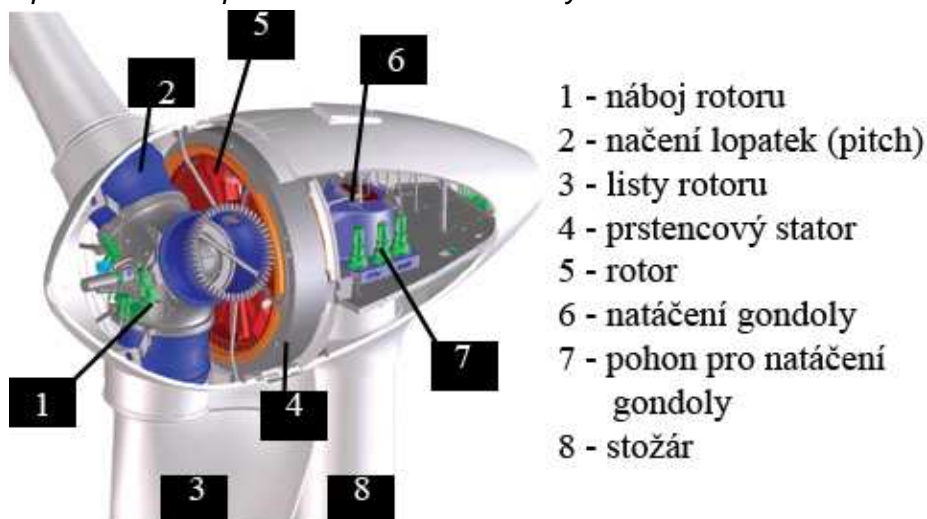
Pro tento typ elektráren se používají oba typy generátorů (viz kapitola 4.2.3).

4.2.2 Strojovna bez převodovky

Hlavní rozdíl bezpřevodkového provedení je patrný okamžitě při pohledu na elektrárnu tohoto typu. Absencí převodovky a implementací prstencového vícepólového synchronního generátoru spojeného přímo s rotorem se ušetřilo místo, takže prostory gondoly končí těsně za stožárem větrné elektrárny. Výrobci větrných elektráren s bezpřevodkovým systémem se zaměřili na problém s hlukem elektráren a problémem častějších údržeb, oprav nebo poruch. Převodovka je právě zdrojem těchto problémů — nutno mazat olejem a průběžně kontrolovat, převody jsou zdrojem hluku a ztrát, stroj je náchylnější k poruchám. Výrobci také zaručují

delší životnosti elektrárny díky úbytku rotačních částí v gonodle spolu s menšími rychlostmi otáčení, a tím i menšímu namáhání elektrárny celkově. Firma ENERCON na svých webových stránkách uvádí: Systémy větrných konvertorů ENERCON je založen na jednoduchém principu — méně rotačních komponentů odpovídá snížení mechanického namáhání a současně zvýšení technické životnosti zařízení. Údržba a servisní náklady jsou nižší (méně opotřebitelných dílů, žádné mazání oleji atd.), čímž jsou sníženy provozní náklady celé elektrárny [15]. Výhody jsou tedy zřejmé. Nevýhoda vyplývá z absence mechanických částí, což odpovídá větším nárokům kladených na elektrické části stroje, na nutnost regulace a úpravy výsledného signálu, který bývá zkreslený vyšší harmonickou a musí se fázovat před odesláním do sítě.

Obr. 24 Bezpřevodovkové provedení větrné elektrárny ENERCON E-82



Zdroj: [14] (upraveno autorem)

V těchto strojovnách se užívá generátor synchronního typu, ložiska i brzdy stejných principů jako u strojoven převodovkového typu a transformátor se nachází buďto v tubusu nebo vně u paty elektrárny. Kryty gondol v obou případech jsou vyráběny z plastů vyztužených skelným vláknem a chrání vnitřní zařízení před nežádoucími vlivy (vítr, prach, mráz, déšť, sníh, slunce) [34].

4.2.3 Generátory větrných elektráren

Generátor elektrického proudu přeměňuje mechanickou energii rotoru na energii elektrickou. Nejefektivnějšího využití generátoru se dosáhne, budou-li na něj přenášeny rychlosti odpovídající jeho jmenovitým otáčkám. Ve větrných elektrárnách jsou používány tři typy:

- Stejnosměrné generátory — vyrábějí stejnosměrný proud k napájení akumulátorů, čerpání nebo ohřevu vody atp. Používá se jen u malých větrných elektráren.
- Synchronní generátory — jeho otáčivá rychlost je konstantní. Je schopen pracovat s velkým rozsahem větru. Používají se jak u převodkových tak u bezpřevodkových elektráren středních a velkých typů. Je schopen pracovat jako záložní zdroj.
- Asynchronní generátory — jeho otáčivá rychlost je skoro konstantní. Nevyžadují složitý připojovací proces k síti. Používají se u převodkových elektráren. Jsou schopny pracovat jako motor.

Asynchronní a synchronní generátory, jakožto generátory vhodné pro použití ve velkých větrných elektrárnách, vyrábějí elektrickou energii ve formě střídavého napětí a proudu. Jejich funkce je založena na využití čtyř zákonů elektrotechniky:

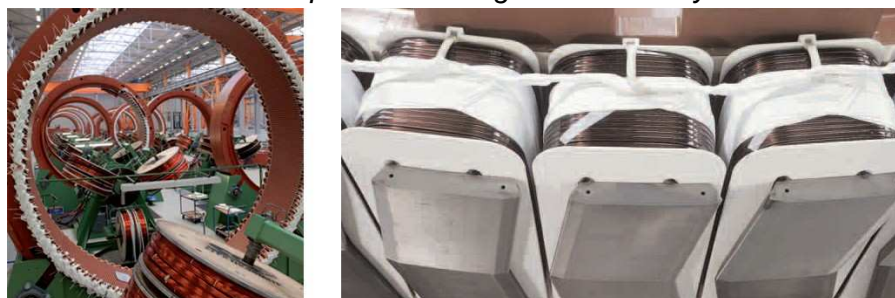
- 1) Elektrický proud I protékající vodičem, vytváří v jeho okolí magnetické pole o intenzitě H . Magnetický účinek se v elektrických obvodech zvětšuje tím, že se z vodiče vytvoří cívka o N závitů, čímž vytváří magnetomotorické napětí $F_M = N \cdot I$
- 2) Magnetomotorické napětí F_M vytváří v magnetickém obvodu o magnetickém odporu R_M magnetický tok Φ o velikosti $\Phi = F_M / R_M$

- 3) Změna magnetického toku v čase indukuje do cívky s N závitů napětí u o okamžité velikosti $u = N(d\Phi / dt)$
- 4) Na vodiči o délce l , umístěném v magnetickém poli o indukci B , jímž protéká proud I působí síla o velikosti $F = B \cdot l \cdot I$ [4].

Synchronní generátor je tvořen statorem a rotorem, na nichž je navinuto pracovní a budící vinutí. Budícím vinutím se do generátoru přivede stejnosměrný proud, což vyvolá v souvislosti s výše uvedenými zákonitostmi magnetické pole nehybné vzhledem k rotoru, který je otáčen mechanickou silou a naopak ke statoru se pohybující. Toto pohyblivé magnetické pole indukuje do pracovního vinutí pootočené vůči sobě o 120° , tři střídavá napětí spolu vytvářející trojfázové napětí. Ze statoru je posléze odváděn trojfázový proud vyráběný generátorem. Velikost napětí generátoru závisí na otáčkách a budícím proudu [19]. Stator i rotor je vyroben ze železa jakožto dobře vodivý materiál pro magnetický tok a mezi sebou je oddělen vzduchovou mezerou představující magnetický odpor. Pracovní vinutí může být umístěno jak na statoru tak rotoru a budící vinutí na opačné straně [4].

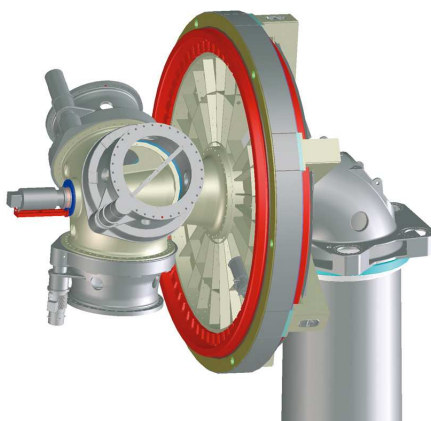
Firma ENERCON používá ve svých bezpřevodovkových větrných elektrárnách tzv. prstencový vícepólový synchronní generátor, který vyrábí ve vlastním provozu. Pracovní vinutí je umístěno ve statoru, budící vinutí na rotujícím prstenci rotoru, který vytváří pohyblivé magnetické pole. Vinutí statoru je vyrobeno z mědi, vinuto do svazků zásadně ručně a následně izolováno lakem. Firma dále uvádí, že tvar a pozice budícího vinutí má také zásadní vliv na celkový hluk generátoru při výrobě elektrické energie [15].

Obr. 25 Statorové a rotorové vinutí prstencového generátoru firmy ENERCON



Zdroj: [15] (upraveno autorem)

Obr. 26 Prstencový synchronní generátor ENERCON



Zdroj: [15] (upraveno autorem)

Asynchronní generátor při chodu nemá stejné otáčky pohyblivého magnetického pole jako otáčky rotoru, vlivem prostorového uspořádání statorového vinutí. V jednotlivých fázích vinutí se průchodem proudu začne vytvářet točivé magnetické pole, které se otáčí konstantními (synchronními) otáčkami, vůči němuž se asynchronně otáčí rotorová klec. V rotoru se indukují napětí a proud. Jelikož se vůči sobě otáčivé magnetické pole a rotor neotáčí ve všech případech stejně, mohou nastat tři stavy chodu:

- Generátor — pokud jsou synchronní otáčky menší než otáčky rotoru.
- Motor — pokud jsou synchronní otáčky větší než otáčky rotoru.
- Brzda — pokud jsou otáčky rotoru menší než 0.

Z těchto faktů plyne, že asynchronní generátor může fungovat i jako motor při rozběhu větrné elektrárny (obecně jsou asynchronní stroje používanější jako motory než jako generátory). Pro svojí jednoduchost, nízkou cenu a snadné připojení k elektrické rozvodné síti je v současné době nejvíce využívaným typem generátoru ve větrných konvertorech.

Obr. 27 Asynchronní čtyřpólový generátor ve strojovně firmy Vestas

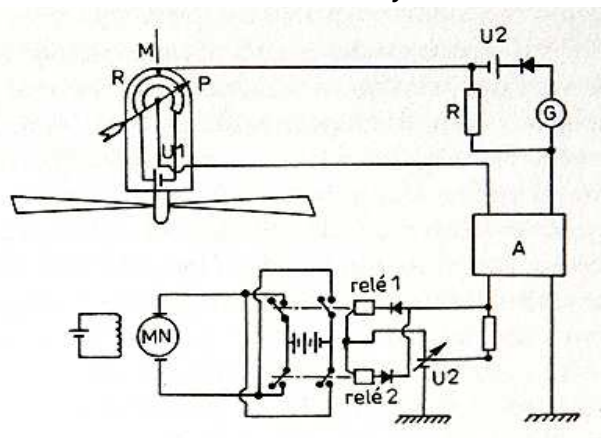


Zdroj: [26] (upraveno autorem)

4.2.4 Natáčení gondoly

Z odvození aerodynamických poměrů na vrtulovém listu rotoru vyplývá, že podmínka pro dosažení maximální účinnosti přeměny energie větru na mechanickou práci je orientace rotoru do směru větru [4]. Orientace ve směru větru je jednodušší z hlediska elektroniky a natáčecích částí, ale rázové proudy a tím i gyroskopické momenty by u takto orientovaných rotorů měly za následek rychlé opotřebování nebo dokonce zničení celého zařízení. Způsobů jak docílit natáčení gondoly proti větru k dosažení uvedených vlastností je mnoho. Jeden z příkladů je uveden na následujícím obrázku.

Obr. 28 Příklad zapojení elektrické orientační soustavy



Zdroj: [4]

Natáčení gondoly uskutečňuje motor MN, který je ovládán tachodynamem G a směrovkou spojenou s raménkem kruhového potenciometru. Napětí U_1 , které je úměrné velikosti odporu z potenciometru (mezi body M a P) se zavádí na zesilovač A . Výstupní napětí ze zesilovače A ovládá servoelektrický systém, který natáčí gondolu tak, aby napětí mezi M a P kleslo na nulu. Do vstupu zesilovače také přichází obvod G , U_2 , R . Ten zajišťuje odklonění elektrárny při vysokých otáčkách z roviny kolmé na směr proudění větru, a tak zamezuje zvětšování otáček rotoru Tachodynamo G a udává napětí úměrné otáčkám rotoru. Toto napětí se usměrňuje tak, aby působilo proti napětí U_2 . Pokud je napětí tachodynamu menší (usměrňovač udrží zábranu), rezistorem R neprotéká žádný proud a na vstupu zesilovače se tedy neobjeví žádné napětí. Natočení gondoly v tomto momentě závisí pouze na směru větru. Pokud však napětí z tachodynamu bude větší než napětí U_2 , projeví se na vstupu zesilovače regulační napětí, jenž odkloní gondolu ze směru větru tak, aby se dále otáčky rotoru dále nezvyšovaly. Natáčení elektrárny se provede jen při změně větru větším než je 10° [4].

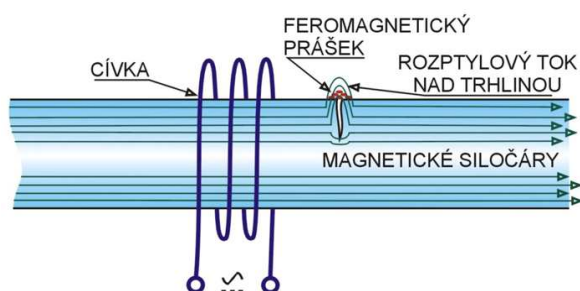
4.3 Stožár větrné elektrárny

Stožár je část elektrárny mezi gondolou a základem elektrárny, z jehož výšky se odvíjí i výsledný výkon elektrárny. Obecně platí, že celkový výkon elektrárny roste s třetí mocninou rychlosti větru a rychlost proudění stoupá s výškou vzdálenosti od zemského povrchu. Dalo by se tedy konstatovat, že čím větší stožár bude, tím víc bude efektivnější provoz větrné elektrárny. V praxi se však musí brát zřetel na konstrukční hlediska, ale obecně platí, že čím má elektrárna větší výkon, tím větší stožár musí být. Výška elektrárny se měří k náboji rotoru a v současnosti dosahují výšky okolo 100 metrů v závislosti na technologii stožáru [15].

Dnešní stožáry jsou vyráběny ve většině případů z ocelových plechů a následně tvářené za studena do kuželovitého tvaru (na konci svařovány) v továrnách po jednotlivých částech. Po dokončení první fáze výroby jsou stožáry testovány zkouškami pro odhalování nežádoucích elementů uvnitř i vně konstrukční oceli, které by mohly poškodit strukturu materiálu a v konečném důsledku i celou větrnou elektrárnu. Ultrazvuková zkouška odhaluje vnitřní vady s větší účinností než

magnetická zkouška, ale ta kontroluje i vady povrchové jako praskliny, trhliny a póry. Poslední optická zkouška zhodnocuje kvalitu povrchu výrobku a je-li vše v pořádku, přechází se k nástřiku ochranných protikorozních barev a laků [9].

Obr. 29 Princip magnetické zkoušky a nástřik stožáru



Zdroj: [9] (upraveno autorem)

Následně jsou všechny části dopraveny tahači na místo výstavby elektrárny, kde jsou od základu na sebe připevňovány např. pomocí L-přírub uvnitř stožáru. Díky L-přírubám není spoj při mechanickém působení větru na stožár namáhán přímo, ale je mimo zónu tohoto stresu, která se přenesse nad přírubu a navíc spoj uvnitř dodává celé elektrárně lepší estetický vzhled [15]. Odpadá tak v některých případech složité svařování na místě stavby (větrné elektrárny již teď stojí na horských hřebenech nebo na moři), čímž samotná stavba stožáru významně šetří čas.

V Evropě je tento typ stožáru nejvíce rozšířen, ale najdou se i případy moderních větrných elektráren konstruovaných na příhradových stožárech, které si nejvíce oblíbily větrné parky na americkém kontinentu převzetím z již zmíněných větrných čerpadel. V současnosti se čím dál více v Evropě využívá tzv. prefabrikovaný betonový stožár, což je obdoba ocelových stožárů, ale místo dílů z oceli se v továrně připravují betonové prstence s ocelovými výztužemi, které se na místě sestaví.

4.4 Základ elektrárny

Základy větrných elektráren budované na souši jsou vyrobeny z železobetonu kruhového, čtvercového nebo šestibokého půdorysu. Úkolem základu je přenášet celou tíhu větrného zařízení do půdního podloží tak, aby neutrpělo škody nadměrným sesedáním a stlačením podloží, zlomem podkladu, posunutím nebo převrnutím. Zátěže jsou do podloží přenášeny převážně vodorovnými plochami základu. Má-li podloží malou nosnost, musí se plocha základu zvětšit natolik, aby nebyla překročena maximální přípustná hodnota tlaku na půdní podloží. Přípustné tlaky jsou dány normou a mění se v závislosti na jejich hloubce vetknutí, šířce základu a typu podloží [2]. Nesoudržná podloží (písek, štěrk) mají obecně při stejných podmínkách menší přípustné tlaky než podloží soudržná (jíl, slín). Základ musí odpovídat i podnebí v místě výskytu elektrárny — např. v německých horách jsou základy vytvořeny z nepromrzající směsi.

Obr. 30 Armování s bedněním před litím a konečný, vytvrdnutý základ

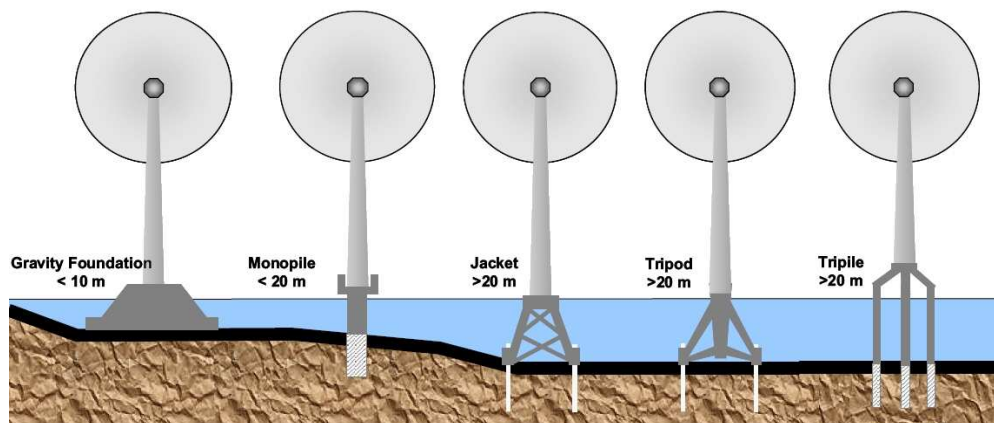


Zdroj: [11] (upraveno autorem)

Při popisu postupu celkové konstrukce základu je uváděn příklad stavby větrné elektrárny Vestas s výkonem 2 MW, stožářem 105 m a základem čtvercového půdorysu. Prvním úkolem je příprava podmínek pro stavbu základů, jako vykopání země do určité hloubky (1,8 m) a šířky (15,9 m) spolu s upravením podloží pro základ a vybetonováním tenké vrstvy (asi 1 cm). Do středu se následně umístí vodorovně, s tolerancí chyby 2 mm ocelový kruh (kotvicí prstenec s průměrem 4 metry) a provede se armování po okraj kotvicího prstence. Celý armovaný základ

s bedněním se poté zalije asi 50 m^3 betonu, přičemž otvory pro kabeláž jsou již předem umístěny do potrubí uvnitř fundamentu. Beton se musí dostatečně ztuhnout hlavně v okolí kotvicího prstence, aby se dostalo odpovídající kvality základu, provádí se betonáží naráz. Po vytvrdnutí betonu se plochy zahrnou půdou [11].

Obr. 31 Příklady možných zakotvení větrných elektráren u mořských instalací

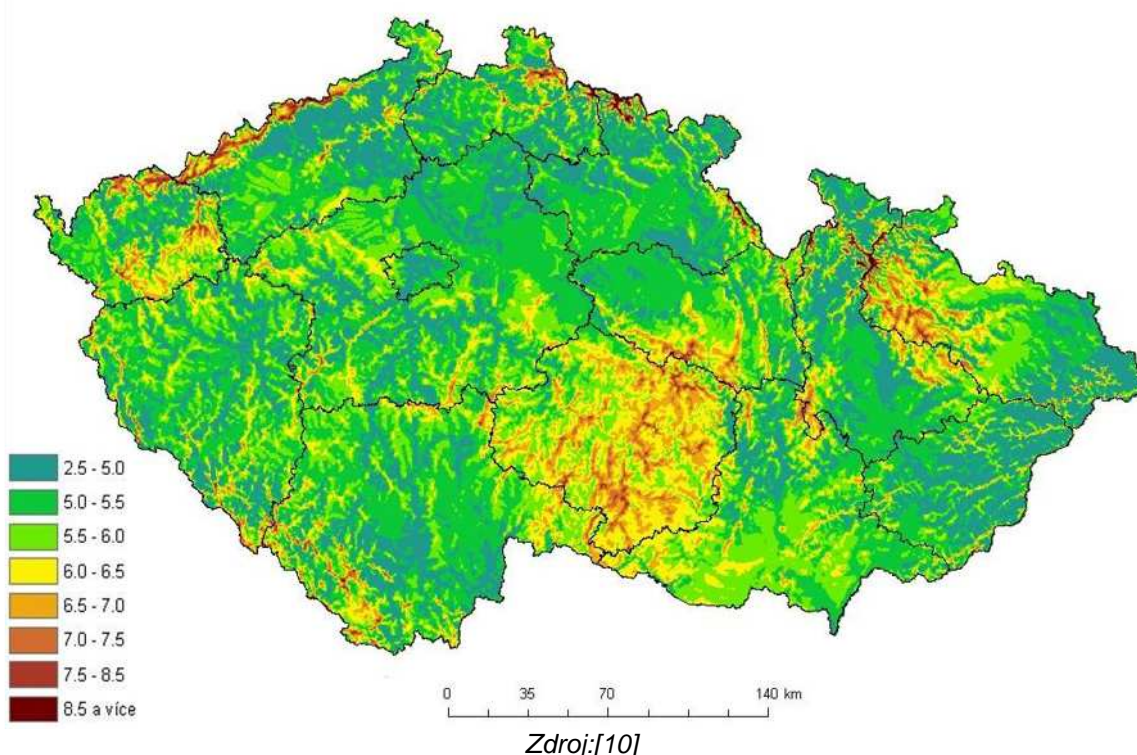


Zdroj: [11]

5 Charakteristika větrných elektráren vhodných pro podmínky České republiky

Největší potenciál pro výstavbu větrných elektráren mají země s přístupem k pobřežní moři a oceánům díky stálému proudění větru. Přestože Česká republika tuto výhodu postrádá, neznamena to, že se nemůže zařadit mezi země, které neustále zvyšují podíl vyrobené energie z obnovitelných zdrojů. Charakter větrných elektráren vychází z tuzemských vlastností terénu a meteorologických vlivů, přičemž primárním kritériem jsou povětrnostní podmínky respektive rychlost větru. Za jeden rok se průměrné hodnoty rychlostí větru měřených v m/s po území ČR zanáší do tzv. větrné mapy.

Obr. 32 Větrná mapa České republiky za rok 2009 (měřeno ve výšce 100 m nad povrchem)



Větrná mapa zobrazuje rychlosti větru nad 2,5 m/s, což je spodní hranice rychlosti větru, při níž se současné větrné elektrárny dodávající elektřinu do sítě rozbíhají. Jelikož dochází v současnosti ke stálému zvětšování výkonu elektráren, čímž se zvětšuje i hranice rozbíhací rychlosti, uvažovat o menších rychlostech v souvislosti s velkými větrnými elektrárnami nemá smysl. Rychlosti větru

jsou měřeny přibližně 200 meteorologickými stanicemi, přístroji způsobem popsáním v kapitole 2.2. Tato mapa je hrubým podkladem k detailnějšímu průzkumu místa vhodného pro následnou výstavbu elektrárny, o níž se začíná přemýšlet při rychlostech nad 6 m/s.

Je obecně známo, že rychlost větru vzrůstá spolu se vzrůstající výškou nad zemským povrchem i s narůstající nadmořskou výškou, ale závisí také na ročním období (převaha větrných dnů v zimě) a na reliéfu (struktuře) povrchu. Drsnost jako jedna z vlastností povrchu nejvíce ovlivňující rychlost proudění je rozdělena kvůli výpočtům rychlostí větru v určité výšce do šesti tříd. Tyto výpočty se provádějí při průzkumu okolí.

Tab. 3 Rozdělení charakteru povrchu podle drsnosti

a = Hladký povrch (vodní hladina, písek)
b = louka s nízkým travnatým porostem nebo oranice
c = vysoká tráva, nízké obilné porosty
d = porosty vysokých kulturních plodin, nízké lesy
e = lesy s mnoha stromy
f = vesnice a malá města

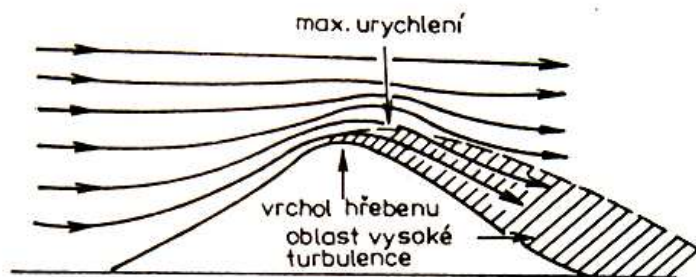
Zdroj: [4] (upraveno autorem)

Se vzrůstající drsností povrchů vznikají problémy s umístěním elektrárny, protože snižuje rychlost větru, mění jeho směr a zapřičiňuje vznik turbulentního proudění. Drsnost povrchu je také schopna ovlivnit proudění až do výšky 600 metrů a snížit rychlost i o 40 %. Nepravidelné proudění větru namáhá celou elektrárnu, čímž se snižuje její životnost. Tento problém se tedy neřeší zvýšením stožáru, ale většinou odsunutím elektrárny od rušivých vlivů.

Z hlediska umístění větrných elektráren jsou výhodné svahy na návětrné straně umístěné těsně pod vrcholem. U samotných kopců, ale i horských hřebenů orientovaných ve směru převládajícího větru, to mohou být i boční svahy. U těchto případů dochází k urychlování proudění naopak při povrchu. Zvláště významným místem pro umístění jsou horské průsmyky a sedla, kde dochází k urychlení větru jak přetékáním větru přes svah, tak i k urychlení proudění od okolních vrcholů [4]. Nejvýhodnější oblasti pro větrnou energetiku v ČR se nachází v Krušných horách,

Krkonoších a v Hrubém Jeseníku popř. na nejvyšších hřebenech Beskyd, ojediněle i v dalších pohořích jako Jizerské hory nebo okolí Šumavy. Poměrně výhodné plochy jsou také v oblasti Žďárských vrchů, horního Posázaví a Českomoravské vrchoviny [33]. Současně jsou ale ve většině těchto oblastí vyhlášeny národní parky a další chráněné oblasti, kde je stavba větrných elektráren zakázána.

Obr. 33 Urychlování větru na hřebenech



Zdroj: [4]

Z výše uvedeného, z větrné mapy a z vlivů spojených s inverzním počasím vyplývá, že umístění větrné elektrárny do údolí je značně nevýhodné a dělá se jen ve výjimečných případech [4]. Elektrárny umístěné na rovině v nižších polohách jsou co do četnosti v ČR méně obvyklé (četnější spíše v zahraničí — Německo), ale pokud je zaručeno odpovídající stálé laminární proudění, pak je to lokalita vhodná pro výstavbu.

Celkový výkon P elektrárny poté závisí na hustotě vzduchu ρ (závislé na nadmořské výšce) na výkonovém součiniteli c_p všech strojů a zařízení podílejících se na výrobě, na ploše A , kterou obsáhnou rotující listy, ale především na rychlosti větru v , s níž výkon stoupá v třetí mocnině [2], [4].

$$P = c_p * \frac{\rho}{2} * A * v^3, \quad (6)$$

Charakteristika větrných elektráren vhodných pro podmínky ČR je demonstrována na posledních velkých projektech při výstavbě větrných parků na území ČR, respektive na jejich parametrech.

5.1 Větrné parky ČR

Větrné parky jsou trendem posledních let a v budoucnu se od něj jen tak neupustí. Větší efektivnost výroby, využití místa, stejně jako určitá nezávislost na neobnovitelných zdrojích v místech provozu nebo úspora nákladů spojených s dopravou a výstavbou, byly jedny z výhod, proč se větrné elektrárny začali koncentrovat do skupin. Od projektu ke stavbě se v těchto případech přechází v řádu let. Schválený projekt musí projít procesem EIA (posuzování vlivu záměru na životní prostředí), musí se zanést změny do územních plánů, je nutné vybudovat trafostanici, kabeláže, infrastruktury apod. Při rozvoji větrné energetiky si Česká republika na první park musela počkat 15 let až do roku 2007, kdy byl první z nich postaven kousek od hranice s Německem v Krušných horách.

Větrný park Kryštofovy Hamry je položen ve výšce 800 až 900 metrů nad mořem ve třech blízkých lokalitách (Podmileská výšina, Dolina, Rusová) a svým počtem 21 větrných elektráren je největší v ČR. Všechny větrné elektrárny jsou typu ENERCON E-82 (nastíněné v kapitole 4.2.2), jejichž investorem, majitelem a provozovatelem je německá firma Ecoeneg s.r.o.

Tab. 4 Parametry větrné elektrárny ENERCON E-82

Rotor		Stožár	
Počet lopatek :	3	Výška náboje:	78 až 108 m
Průměr:	82 m		
Pracovní plocha:	5 281 m ²	Provozní rychlost	
Provozní otáčky:	6 až 19,5 ot/min	Zapínací rychlost:	2 m/s
Regulace výkonu:	pitch	Jmenovitá rychlost:	12 m/s
		Vypínací rychlost:	28 až 34 m/s
Generátor			
Typ:	Synchronní prstencový		
Jmenovitý výkon:	2 000 kW	Ložiska	
Provozní údaje:	50 Hz, 400 V	typ:	dvojřadá válečková
Připojení k síti			
Typ:	stejnoseměrná spojka se střídačem		
Transformátor:	Ztráty nakrátko 16 kW, naprázdno 2,35 kW		
Max. příspěvek k I_{zkrat} :	4 000 A		

Zdroj: [14] (upraveno autorem)

Každá elektrárna je založena na již popsaném bezpřevodkovém provozu s prstencovým vícepolovým synchronním generátorem s výškou stožáru od 78 do 108 metrů v závislosti na poloze. Při osmiměsíčním testovacím provozu, kdy větrný park prověřila první zatěžkávací zkouška v podobě vichřice Emma, se ukládala data z provozu větrného parku pro vyhodnocení činnosti. Mimo jiné se zjistilo, že 3,6 % času nedodává park žádný výkon. 59 % času dodává 20 % instalovaného výkonu a méně. 82 % času dodává 50 % instalovaného výkonu a méně [37].

Větrný park Horní Loděnice — Lipina (dvě vesnice nedaleko Olomouce) byl uveden do provozu v červnu minulého roku. I když počtem svých větrných elektráren nemůže konkurovat prvně zmíněnému parku v Kryštofových hamrech, jde o druhý největší park v České republice a o největší dosud vybudovaný na Moravě. Jedná se o 9 větrných elektráren převodkového typu firmy Vestas s označením V90 (viz kapitola 4.2.1) každá o jmenovitém výkonu 2 MW má následující parametry:

Tab. 5 Parametry větrné elektrárny Vestas V90

Rotor		Stožár	
Počet rotorových listů:	3	Výška náboje:	105 m
Průměr:	90 m		
Pracovní plocha:	6362 m ²	Provozní údaje	
Jmenovité otáčky:	14,9 ot/min	Rychlost větru zapínací:	3 m/s
Provozní interval:	8,2 až 17,3 ot/min	Jmenovitá rychlost větru:	10,5 m/s
Regulace výkonu:	pitch	Rychlost větru vypínací:	25 m/s
Generátor		Hmotnost	
Typ:	Asynchronní	Stožár:	231 t
Jmenovitý výkon:	2 000 kW	Strojovna:	68 t
Provozní údaje:	50 Hz/60 Hz, 690 V	Rotor:	36 t
		Celková:	335 t
Převodovka			
Typ:	Planetová / čelní		

Zdroj: [25] (upraveno autorem).

Na internetových stránkách větrného parku v Horní Loděnici je uvedeno, že v tomto roce ke dni 1.3. 2010 bylo již vyrobeno 4 218,05 MWh a za celkovou dobu provozu 19 610,15 MWh, čemuž odpovídá stejná číselná hodnota uspořené CO_2 v tunách.

V České republice je instalováno okolo 130 funkčních větrných elektráren a žádná z nich nemá jmenovitý výkon větší než 2 MW, přičemž majoritní dodavatelé zařízení (co do výkonnosti) jsou zmíněni dánští Vestas a němečtí ENERCON. Do budoucna se dá očekávat růst této kapacity, otázkou ale zůstává do jakého bodu. Z uvedených výsledků z větrného parku v Kryštofových hamrech je již znát lehká předimenzovanost elektráren na tomto, z hlediska povětrnostních podmínek velmi dobrém místě. Bude tedy jen na investorech, zda si vyberou větší využitelnost elektráren nebo větší výrobu energie při silném větru za předpokladu, že většinu pracovní doby bude elektrárna pracovat v méně než polovičním využití. Pravděpodobnější je první případ.

5.2 Problémy větrných elektráren

Obecné problémy vnímané veřejností ve spojitosti s větrnou energií se vztahují na pár problémů, které jsou z hlediska objektivního pohledu většinou irelevantní, některé jsou otázkou subjektivního pocitu a některé jsou evidentní. K obecným problémům patří hluk elektráren, stroboskopický efekt, zabíjení ptactva, dopad na krajinný ráz nebo ústup turistiky v místech instalace. Hluk větrné elektrárny odpovídá hluku šumějícího lesa při slabém větru. Stroboskopický efekt vznikající rotováním vrtule je relevantní (pokud je vůbec subjektem vnímán) při instalaci elektrárny v těsné blízkosti obydlí lidí. Dopad na krajinu je věc názoru — mnoho lidí se shoduje na tom, že na hřebenech by elektrárny stát neměly, v jiném případě jim tedy elektrárny nevadí. Poté jsou tu zastánci, jimž elektrárny nevadí nikde a totální odpůrci, jimž stavba elektráren naopak vadí téměř všude. Technickým problémovým faktem je závislost elektrárny na proudění větru, čímž v případě absence vznikají odstávky energie a posledním problémem současnosti je připojování elektráren na distribuční síť v souvislosti s rázovými špičkami a následným nadměrným zatěžováním sítě. Tento problém by měly vyřešit technicky lepší filtrace signálu, nebo síť méně náchylné na rázová zatížení.

6 Závěr

Větrnou energii využívá lidstvo od počátku mechanizované práce, po současnost, jako zdroj energie volně dostupný, jako zdroj, který nic nestojí a podle předpokladů vycházejících ze statistik a z trendů společnosti, bude lidstvo v rozvinutých a rozvojových zemích využívat tento zdroj stále více. Z nejnovějších zdrojů společnosti EWEA lze vyčíst, že v letech 2007 až 2008 se v USA zvýšil instalovaný výkon větrných elektráren téměř o 50 % z 16,8 na 25,1 GW, čímž v té době přebraly světový primát Německu. Rozvojová Čína, která přislíbila omezení vypouštění skleníkových plynů zvětšením výroby energie z obnovitelných zdrojů v téže letech, navýšila instalovaný výkon o více než 100 % z 5,9 GW na 12,2 GW. V případě Číny se dá očekávat ještě rapidnější nárůst v příštích letech [17].

Současné prvenství v instalovaném výkonu v Evropě drží již zmíněné Německo, které má ke konci roku 2009 instalováno 25,7 GW jmenovitého výkonu. Následuje Španělsko s 19,1 GW, Itálie s 4,8 MW a Francie s Velkou Británií jako poslední země s instalovaným výkonem nad hranici 4 GW. Za uplynulý rok 2009 bylo v Evropě celkově instalováno 10,2 GW (největším dílem přispělo Španělsko), čemuž odpovídá 23% nárůst od roku 2008 a jasné prvenství ve zvyšování procentuálního zastoupení v instalovaném výkonu ze všech dostupných technologií (včetně neobnovitelných zdrojů) a také investici o celkové výši 13 miliard eur [18].

Česká republika navýšila za minulý rok instalovaný výkon téměř o 30 % ze 150 MW na 192 MW a již teď je schválený projekt na výstavbu větrného parku blízko města Stříbro. 13 větrných elektráren jmenovitého výkonu 2 až 3 MW bude umístěno v nadmořské výšce 400 až 500 metrů s očekávanou roční výrobou 58 500 MWh, což odpovídá spotřebě asi 20 000 domácností [8]. Investorem parku je skupina ČEZ jakožto největší výrobce elektrické energie v tuzemsku, který přislíbil investovat 5,5 miliardy korun mezi léty 2008 až 2012 do výroby energie pomocí obnovitelných zdrojů pro dosažení 8% podílu (do roku 2020 pak 13%) obnovitelných zdrojů na celkově vyrobené elektrické energii (hodnota na konci roku 2009 byla 5 %). Z toho 4 miliardy investuje do větrné energie [27], [12]. V současné době se

skupina ČEZ skloňuje v souvislosti s Rumunskou vesnicí Fântânele, kde již v těchto dnech stojí několik desítek větrných elektráren jako část budoucího největšího větrného parku v Evropě. V roce 2008 odkoupila pobočka ČEZu v Rumunsku od rumunsko-americké společnosti vypracovaný projekt na území u pobřeží Černého moře, kde se pohybuje průměrná rychlost větru okolo 7 m/s. Vybudovaná rozvodná síť, zimní teploty okolo -5° C a téměř žádný odpor od místních obyvatel, udělaly z tohoto místa téměř modelovou předlohu pro vybudování 240 větrných elektráren o jmenovitém výkonu 2,5 MW, což ve výsledku udává celkovou výkonovou kapacitu větrného parku 600 MW. Větrný park dokončený nejpozději v zimě roku 2011 bude ČEZ stát 1,1 miliard eur, a i když dobu finanční návratnosti ČEZ tají, je velice pravděpodobné, že se tato investice vyplatí v relativně krátké době. [23].

Návratnost investic větrných elektráren se odvíjí od státních dotací, ale nejvíce od výkupních cen elektřiny. Zásadní změnu do režimu určování výkupních cen elektřiny v České republice přinesl zákon č. 180/2005 Sb., který ukládá provozovatelům regionálních distribučních soustav a provozovateli přenosové soustavy povinnost veškerou elektřinu z obnovitelných zdrojů vykupovat. Výrobce elektřiny z obnovitelných zdrojů má právo si vybrat, zda svoji elektřinu nabídne k výkupu za pevnou cenu nebo zda za ni bude požadovat tzv. zelený bonus. Zeleným bonusem se rozumí finanční částka navyšující tržní cenu elektřiny a je hrazena provozovatelem regionální distribuční soustavy nebo přenosové soustavy, při rozhodnutí výrobce jí volně prodávat určeným spotřebitelům. Zohledňuje zlepšení životního prostředí využitím obnovitelných zdrojů [27].

Tab. 6 Výkupní ceny a zelené bonusy v roce 2009

Zdroj	Výkupní ceny elektřiny [Kč/kWh]	Zelené bonusy [Kč/kWh]
Malá vodní elektrárna	2,7	1,3
Spalování biomasy (O1)	4,49	2,95
Větrná elektrárna	2,34	1,63
Fotovoltaická elektrárna (do 30 kW)	12,89	11,91

Zdroj: [8] (upraveno autorem)

Elektrárnám spuštěným v roce 2010 se výkupní ceny elektřiny sníží o 5 %, stávajícím větrným elektrárnám se naopak výkupní ceny zvýší o 2% spolu s navýšením zeleného bonusu. Vodním elektrárnám spuštěným v roce 2010 se výkupní cena zvýší o 11%, stávajícím pak o 2 %. Biomasa povýší o 2 % a největší regulace nejspíš potká fotovoltaické elektrárny, po schválení zákona o regulaci větší než 5 % za jeden rok [31]. Fotovoltaika se v tuzemsku dostala do prudkého rozmachu vzhledem k nejpříznivějším cenám výkupu energie za kWh a tím doby návratnosti investice do 5 let. Je s tím spojeno však mnoho problémů.

Doba návratnosti investic do větrných elektráren se s neustálým snižováním výkupních cen pro nově postavené větrné elektrárny kvůli regulaci ERU (Energetický regulační úřad) zvětšuje. Obecně záleží na tom, kdy jednotkové náklady budou menší než jednotkové výnosy — tehdy začne být projekt pro investory rentabilní. V současných podmínkách tento bod zvratu nastává za déle než 15 let (dříve koncem 15 roku). Pokud se ale přihlédne k životnosti větrných elektráren, která činí 25 let, zůstává pro investory (nejen z ekonomického pohledu) výstavba větrné elektrárny stále zajímavou investicí, hlavně pak ve větších měřítkách.

Je jen na lidstvu jakou si vybere cestu — zda bude omezovat výrobu z čistých zdrojů, kvůli nepopíraným problémům spojených s touto výrobou nebo přizpůsobí podmínky k tomu, aby se tyto problémy eliminovaly. Ať tak, či onak, stavba větrných elektráren bude pokračovat i přes stálé požadavky a podmínky spojené s výstavbou. Jen v České republice je potenciál pro budoucí instalaci asi 2 500 MW a dnešní využití činí zmíněných 192 MW. Ostatní země světa jsou na tom s nevyužitým potenciálem obdobně. Vzhledem k tomu, že se spíše tíhne k podpoře zelené energie (i přes časté regulace) a také vzhledem k tomu, že větrné elektrárny jsou nejrychleji rostoucím odvětvím v Evropské unii, činí to z větrné energetiky a větrných elektráren technologii a technologické stavby budoucnosti.

7 Použitá literatura

- [1] BROŽ, Karel; ŠOUREK, Bořivoj. *Alternativní zdroje energie*. Vyd. 1. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2003. 213 s. ISBN 80-01-02802-X
- [2] CROME, Horst. *Technika využití energie větru : Svépomocná stavba větrných zařízení*. Vyd. 1. Ostrava : Nakladatelství HEL, 2002. 144 s. ISBN 80-86167-19-4
- [3] KOČ, Břetislav. *Šance pro vítr*. Vyd. 1. Brno : Nakladatelství EkoCentrum Brno, 1996. 95 s. ISBN 80-901668-8-1.
- [4] RYCHETNÍK, Václav ; PAVELKA, Jiří; JANOUŠEK, Josef . *Větrné motory a elektrárny*. Vyd. 1. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [5] APTISMEDIA. *Větrné mlýny v Čechách, na Moravě a ve Slezku* [online]. Datum neuvedeno [cit. 2010-04-01]. Vetrnemlyny.unas.cz. Dostupné z WWW: <<http://vetrnemlyny.unas.cz/index2.htm>>.
- [6] BIOM. *Oznámení o vyhodnocení podílu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů za rok 2008* [online]. 2009-06-09 [cit. 2010-04-02]. Boim.cz. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/novinky/oznameni-o-vyhodnoceni-podilu-vyroby-elekriny-z-obnovitelnych-zdroju-za-rok-2008>>.
- [7] BŘEZINA, Ladislav. *Představení záměru výstavby větrných elektráren v okolí města Stříbro* [online]. 2008-19-3 [cit. 2010-03-31]. Cez.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/file/verejna-prezentace-strebro.pdf>>.
- [8] CERMAN, Jiří. *Obnovitelné zdroje: Výkup a zelené bonusy klesnou o 5 %* [online]. 2008-01-12, 2008 [cit. 2010-04-02]. Nazeleno.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/solarni-energie/obnovitelne-zdroje-vykup-a-zelene-bonusy-klesnou-o-5.aspx>>. ISSN 1803-4160.
- [9] ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii. *Ocelový tubusový stožár*. [online]. 2010-08-01 [cit. 2010-02-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.csve.cz/cz/clanky/ocelovy-tubusovy-stozar/229>>.

- [10] ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii. *Tabulka aktuálních instalací k 31. 12. 2009* [online]. 2010-10-01 [cit. 2010-02-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.csve.cz/clanky/detail/120>>
- [11] ČSVE: Česká společnost pro větrnou energii. *Základy větrných elektráren*. [online]. 2010-04-01 [cit. 2010-02-04]. Dostupný z WWW: <http://www.csve.cz/cz/clanky/zaklady-vetrnych-elektraren/224>
- [12] ČT24. *Obnovitelné zdroje získaly podporu ve vládě* [online]. 2009-16-11, 2009-16-11 [cit. 2010-03-31]. ČT24. Dostupné z WWW: <<http://www.ct24.cz/ekonomika/72751-obnovitelne-zdroje-ziskaly-podporu-ve-vlade/>>.
- [13] DOUBEK, Jan. *Historie větrných mlýnů sahá až do daleké minulosti* [online]. 2009 [cit. 2010-03-31]. Dostupné z WWW: <<http://realit.cz/clanek/historie-vetrnych-mlynu-saha-az-do-daleke-minulosti>>.
- [14] ENERCON. *E-82 : Wind turbine* [online]. 2009 [cit. 2010-04-02]. Enercon.de. Dostupné z WWW: <http://www.enercon.de/en/_home.htm>.
- [15] ENERCON. *ENERCON wind turbines : Technology & services* [online]. Aurich : 2009 [cit. 2010-04-02]. Enercon.de. Dostupné z WWW: <[http://www.enercon.de/www/en/broschueren.nsf/vwwebAnzeige/EF467F8AE23F96D4C12571940023E1BF/\\$FILE/ENE_Techno+Service_eng_010409.pdf](http://www.enercon.de/www/en/broschueren.nsf/vwwebAnzeige/EF467F8AE23F96D4C12571940023E1BF/$FILE/ENE_Techno+Service_eng_010409.pdf)>.
- [16] ENERCON. *Energie větru* [online]. nevedeno [cit. 2010-04-01]. Enercon.cz. Dostupné z WWW: <http://www.enercon.cz/index.php/component/content/article/20-energie-/62-energie-vtru>
- [17] EWEA. *GWEC Press Release : tables and statististics 2008* [online]. 2009 [cit. 2010-04-01]. Ewea.org. Dostupné z WWW: <http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/press_releases/2009/GWEC_Press_Release_-_tables_and_statistics_2008.pdf>.
- [18]] EWEA. *Wind in power : 2009 European statistics* [online]. 2010 [cit. 2010-04-01]. Ewea.org. Dostupné z WWW: <http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/genera

I_stats_2009.pdf>.

- [19] GILAR, Jiří. *Generátory* [online]. 2006-25-9 [cit. 2010-04-01]. Skolspec.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.skolspec.cz/dokumenty/gilar/III.rocnik/generatory.pdf>>.
- [20] HALADA, Andrej . *Kochej se v Otíkově* [online]. 2009-30-10 [cit. 2010-04-02]. Rexlex.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.reflex.cz/clanek/stary-reflex-reflex-cz-kolem-cesty/35266/kochej-se-v-otikove.html>>.
- [21] KLUB ČESKÝCH TURISTŮ. *Obrazový atlas : technických památek, architektury a turistických zajímavostí v ČR* [online]. 2008 [cit. 2010-04-02]. Eurobeds.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.eurobeds.cz/ebold/index.php?kat=2&id=5&jazyk=cz&kraj=11&dalsi=oblasti&oblast=73>>.
- [22] KOČ, Břetislav. *Vítr: od zlého pána k dobrému sluhovi : Vítr čerpá vodu* [online]. 2008-4-12 [cit. 2010-04-02]. Osel.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.osel.cz/index.php?clanek=4122>>.
- [23] KUBÁTOVÁ, Zuzana. *ČEZ staví obří větrnou farmu* [online]. 2009-17-9, 2009-17-9 [cit. 2010-04-01]. Hn-ihned.cz. Dostupné z WWW: <<http://hn.ihned.cz/c1-38338420-cez-stavi-obri-vetrnou-farmu>>.
- [24] KURC, Ladislav. *Skleníkový efekt – nepříjemné pravdy* [online]. 2007-25-10 [cit. 2010-03-31]. Jitrnizeme.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.jitrnizeme.cz/view.php?navezclanku=sklenikovy-efekt-neprijemne-pravdy&cislocclanku=2007101548>>.
- [25] KV Venti. *Vestas V90 — Horní Částkov* [online]. 2009, 2009-31-12 [cit. 2010-04-02]. Vetrnaelektrarna.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.vetrnaelektrarna.cz/HCastkovV90.html>>.
- [26] KV Venti. *Větrné elektrárny v lokalitě Pavlov : Virtuální prohlídka* [online]. 2009, 2009-31-12 [cit. 2010-04-02] Vetrnaelektrarna.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.vetrnaelektrarna.cz/Virtual/virtual/index.html>>

- [27] MĚŠŤÁNEK, Ivo. *Investice Skupiny ČEZ do obnovitelných zdrojů do roku 2012 přesáhnou 5,5 miliardy korun* [online]. 2008-15-4 [cit. 2010-03-31]. Cez.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/1879.html>>.
- [28] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Nová ložiska a mazací systém pro větrné elektrárny* [online]. 2006-22-11 [cit. 2010-04-01]. Mmspektrum.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nova-loziska-a-mazaci-system-pro-vetrne-elektrarny>>.
- [29] OBEC BAŘICE — VELKÉ TĚŠANY. *Typy na výlety : Větrný mlýn* [online]. 2007 [cit. 2010-04-02]. Barice-velketesany.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.barice-velketesany.cz/o-obcich/historie-tesany-mlyn.php?ctj=tip>>.
- [30] SDURŽENÍ EPS ČR. *Redukování klimatických změn pomocí EPS izolace* [online]. Datum neuvedeno [cit. 2010-04-02]. Sdruzeni-zps.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.sdruzeni-zps.cz/index2.php?obsah=zivot/klima&menu=04>>.
- [31] SRDEČNÝ, Karel. *Výkupní ceny z obnovitelných zdrojů pro rok 2010* [online]. 2009-11-11 [cit. 2010-04-02]. Ekowatt.cz . Dostupné z WWW: <<http://www.ekowatt.cz/cz/novinky/vykupni-ceny-z-obnovitelnych-zdroju-pro-rok-2010>>.
- [32] SÝKORA, Jan. *Přístroje pro měření rychlosti* [online]. 2009 [cit. 2010-04-02]. Meteo-sykora.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.meteo-sykora.cz/>>.
- [33] ŠTEKL, Josef; HOŠEK, Jiří. *Vítr, obnovitelná energie* [online]. 2005 [cit. 2010-04-05]. Vesmir.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.vesmir.cz/clanek/vitr-obnovitelna-energie>>.
- [34] TIŠNOVSKÁ, Věra; BUREŠ, Leo. *Informace o oznámení záměru : Větrný park Horní Loděnice* [online]. 2004-6-11 [cit. 2010-04-01]. Tomcat.cenia.cz. Dostupné z WWW: <http://tomcat.cenia.cz/eia/detail.jsp?view=eia_cr&id=OLK113>.
- [35] TOMIČ, Ladislav. *Vodní a větrné mlýny ve středověku v Čechách* [online]. Datum neuvedeno [cit. 2010-04-01]. Curiavitkov.cz. Dostupné z WWW: <<http://curiavitkov.cz/clanek11.html>>.

- [36] TRČÁLEK, Karel . *Skleníkové plyny: Oxid uhličitý (CO2) není jediný „hříšník“* [online]. 2009-20-05 [cit. 2010-03-31]. Nazeleno.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/nazelenoplus/sklenikove-plyny-oxid-uhlicity-co2-neni-jediny-hrisnik.aspx>>.
- [37] VELEK, Vladimír. *První zkušenosti z provozu větrného parku 21 x 2 MW Kryštofovy Hamry* [online]. 2008-4-11 [cit. 2010-04-01]. Litovany.ic.cz. Dostupné z WWW: <http://litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_07_08.pdf>.
- [38] VESELÝ, Petr. *Halladayova turbína* [online]. Brno : 2005-29-12 [cit. 2010-04-02]. Povevtrnik.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.povevtrnik.cz/rs/view.php?cislocclanku=2005122905>>.
- [39] VOLEK, Stanislav. *Ropná krize v roce 1973* [online]. 2002-08-11 [cit. 2010-03-31]. Dostupné z WWW: <<http://www.penize.cz/15178-ropna-krize-v-roce-1973>>.
- [40] WIND ENERGY MARKET. *Vestas V90 - 3.0 MW* [online]. 2009 [cit. 2010-04-13]. Wind-energy-market.cz. Dostupné z WWW: <<http://www.wind-energy-market.com/en/big-plants/details/details/bp/vestas-v90-30-mw-6/>>.
- [41] WIKIPEDIA : THE FREE ENCYKLOPEDIA. *Coriolisova síla* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , 2010-04-02 [cit. 2010-04-02]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Coriolisova_s%C3%ADla>.

8 Seznam obrázků

- Obr. 1 Schéma proudění vzduchu mezi tlakovou výší (V) a tlakovou níží (N)
- Obr. 2 Schéma hlavních směrů větru na zeměkouli
- Obr. 3 Schéma Coriolisovy urychlující síly
- Obr. 4 Elektronický miskový anemometr
- Obr. 5 Směrovka větru
- Obr. 6 Schéma skleníkového jevu v atmosféře Zeměkoule
- Obr. 7 Sloupový větrný mlýn u obce Velké Těšany na Kroměřížsku
- Obr. 8 Holandský větrný mlýn v Moravském Kuželově
- Obr. 9 Větrné čerpadlo amerického, vícelopátkového typu
- Obr. 10 Otočné části větrných mlýnů a jejich mlecí mechanismus
- Obr. 11 Větrný mlýn v Třebíči
- Obr. 12 Ruiny větrného mlýnu v Příčovech
- Obr. 13 Větrný mlýn v Ruprechtově
- Obr. 14 Typický rotor větrného mlýna
- Obr. 15 Výkonové fáze Halladayovy větrné turbíny
- Obr. 16 Největší typ Kunzova čerpadla s názvem Samson z dobového letáku
- Obr. 17 Typy rotorů pro větrná čerpadla (zleva: americký, krétský, současný)
- Obr. 18 Obvyklá schémata uspořádání listů větrných elektráren (3. zleva je nejčtenější)
- Obr. 19 Různé uspořádání rotorů se svisle orientovanou osou rotace
- Obr. 20 Rotory odporového principu
- Obr. 21 Obtékání proudu vzduchu kolem profilu a vzniklé tlaky jeho vlivem
- Obr. 22 Ukázka řešení vrtulového listu
- Obr. 23 Komponenty větrné elektrárny převodkového typu firmy Vestas
- Obr. 24 Bezpřevodkové provedení větrné elektrárny ENERCON E-82
- Obr. 25 Statorové a rotorové vynutí prstencového generátoru firmy ENERCON
- Obr. 26 Prstencový synchronní generátor ENERCON
- Obr. 27 Asynchronní čtyřpólový generátor ve strojovně firmy Vestas
- Obr. 28 Příklad zapojení elektrické orientační soustavy
- Obr. 29 Princip magnetické zkoušky a nástřik stožáru
- Obr. 30 Armování s bedněním před litím a konečný, vytvrdnutý základ
- Obr. 31 Příklady možných zakotvení větrných elektráren u mořských instalací
- Obr. 32 Větrná mapa České republiky za rok 2009 (měřeno ve výšce 100 m nad povrchem)
- Obr. 33 Urychlování větru na hřebenech

9 Seznam Tabulek

Tab. 1 Výroba elektřiny v roce 2008 z obnovitelných zdrojů (ČR)

Tab. 2 Beaufortova stupnice rychlosti větru

Tab. 3 Rozdělení charakteru povrchu podle drsnosti

Tab. 4 Parametry větrné elektrárny ENERCON E-82

Tab. 5 Parametry větrné elektrárny Vestas V90

Tab. 6 Výkupní ceny a zelené bonusy v roce 2009