

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh větrné elektrárny

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MATOUŠEK**
Osobní číslo: **E10B0175P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Návrh větrné elektrárny**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Popište princip a typy větrných elektráren.
2. Posuďte výhody a nevýhody větrných elektráren.
3. Navrhněte v konkrétní lokalitě malou větrnou elektrárnu pro rodinný dům či menší hospodářský objekt.
4. Vyhodnoťte návrh z energetického a ekonomického hlediska.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **HALLENGA, Uwe: Malá větrná elektrárna - návod ke stavbě, 1. vyd. Ostrava, HEL, 1998, 63 s., ISBN 80-86167-00-3**
2. **www.csve.cz**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Raková**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na větrné elektrárny. V první části práce je souhrn informací o typech a principu. Ve druhé části je srovnání výhod a nevýhod u jednotlivých typů větrných elektráren a třetí část obsahuje samotný návrh větrné elektrárny pro rodinný dům. Posledním bodem bakalářské práce je zhodnocení návrhu z hlediska energetického a ekonomického.

Klíčová slova

Vítr, větrný motor, rotor, větrné elektrárny, elektrická energie

Project of Wind Power Station

Abstract

The thesis is focused on wind power. The first part is a summary of information about the types and principle. The second part is a comparison of the advantages and disadvantages of the different types of wind turbines and the third part contains the entire design of wind turbine for house. The last point of the thesis is to evaluate the proposal in terms of energy and economic.

Keywords

Wind, windmill motor, rotor, wind power station, electrical energy

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 bakalářské práce.

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

V Plzni dne 28.5.2013

Martin Matoušek

.....

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Lence Rakové za odborné vedení práce a cenné rady, které nepochybně vedly k dokončení této práce.

Dále bych rád poděkoval rodině za podporu při studiu a Ing. Jířímu Soukupovi za věcné připomínky k práci.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 PRINCIP A TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	11
1.1 VZNIK VĚTRU.....	11
1.2 PRINCIP ČINNOSTI.....	12
1.3 VÝKON A KONSTRUKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	13
1.4 TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	17
1.4.1 Rozdělení podle osy otáčení.....	17
1.4.2 Rozdělení podle aerodynamického principu.....	19
1.4.3 Rozdělení podle výkonu.....	23
1.4.4 Rozdělení podle typu generátoru.....	25
2 POSOUZENÍ VÝHOD A NEVÝHOD VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN.....	26
2.1 HLUK VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	26
2.2 VLIV NA KRAJINNÝ RÁZ.....	28
2.3 VLIV NA PŘENOSOVOU SÍŤ.....	29
2.4 OHROŽENÍ PTÁKŮ A PLAŠENÍ ZVĚŘE.....	29
2.5 STROBOSKOPICKÝ EFEKT.....	30
3 NÁVRH VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY.....	31
3.1 URČENÍ LOKALITY.....	31
3.2 URČENÍ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	32
3.3 VÝPOČET VĚTRNÉHO MOTORU.....	33
4 ZHODNOCENÍ NÁVRHU Z ENERGETICKÉHO A EKONOMICKÉHO HLEDISKA.....	39
4.1 ENERGETICKÉ ZHODNOCENÍ.....	39
4.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	40
4.2.1 Postup ekonomického vyhodnocení.....	41
ZÁVĚR.....	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	45
SEZNAM PŘÍLOH.....	47
PŘÍLOHY.....	48

Seznam symbolů a zkratk

E_k	Kinetická energie [J]
m	Hmota [kg]
v	Rychlost [$m.s^{-1}$]
ρ	Hustota vzduchu [$kg.m^{-3}$]
A	Plocha [m^2]
P_v	Výkon vzdušného proudu [W]
C_p	Výkonový součinitel [-]
n_j	Jmenovité otáčky [min^{-1}]
P_T	Výkon vzdušného proudu [$W.m^{-2}$]
E	Energie [$W.m^{-2}$]
E_{TR}	Energie vzdušného proudu [$kWh.m^{-2}$]
P_j	Jmenovitý výkon [W]
n_j	Jmenovité otáčky [min^{-1}]
λ_0	Rychloběžnost [-]
u_R	Obvodová rychlost [$m.s^{-1}$]
n_j	Jmenovité otáčky [min^{-1}]
π	Ludolfovo číslo 3,14 [-]

Úvod

Alternativní zdroje energie jsou zejména v posledním desetiletí tématem, kterým se zabývají nejen energetici a ekologicky smýšlející jedinci či skupiny. Jedná se také o oblast, jež je vrcholným zájmem politických uskupení a lobbistů stojících za silnými investory.

Správná myšlenka využívat alternativní zdroje pracující na principech přeměny energie nevyčerpatelných zdrojů energie, tj slunce, větru, vody či biomasy je nyní zastřena spíše myšlenkou, jak využít silných dotačních titulů k vlastnímu obohacení než k rozvoji alternativní energie jako takové. I přes tento nepřilíš uspokojivý stav, který širokou veřejnost proti alternativním zdrojům energie popouzí, je nutné klást důraz na jejich rozvoj a zvyšování účinnosti ze zřejmých důvodů – stále se zmenšujících zásob fosilních paliv a vzrůstajícímu tlaku zájmových skupin na uzavírání jaderných elektráren.

Využívání výše uvedených zdrojů má v historii lidstva nezastupitelnou pozici. Slunce dodávalo tepelnou energii planetě Zemi od vzniku Sluneční soustavy a umožnilo vznik života v podobě, jak jej známe dnes. Biomasu k výrobě energie začalo lidstvo využívat od doby, kdy ovládlo tajemství ohně. Vodu či vítr od dob dávného starověku k pohonu mlýnů, pil nebo obdobných zařízení vyžadující více energie, než bylo v tehdejší době možné dodat lidskou silou či za pomoci domestikovaných zvířat. Vzhledem k těmto skutečnostem jsem si zvolil téma bakalářské práce zaměřené na výrobu elektrické energie z větrných elektráren, neboť jsem přesvědčen, že je nutné věnovat alternativním zdrojům energie vysokou pozornost a to z hlediska jejich využití smysluplným způsobem, tedy například pro zabezpečení dodávek energie na těžko přístupná místa vzdálená od běžné infrastruktury.

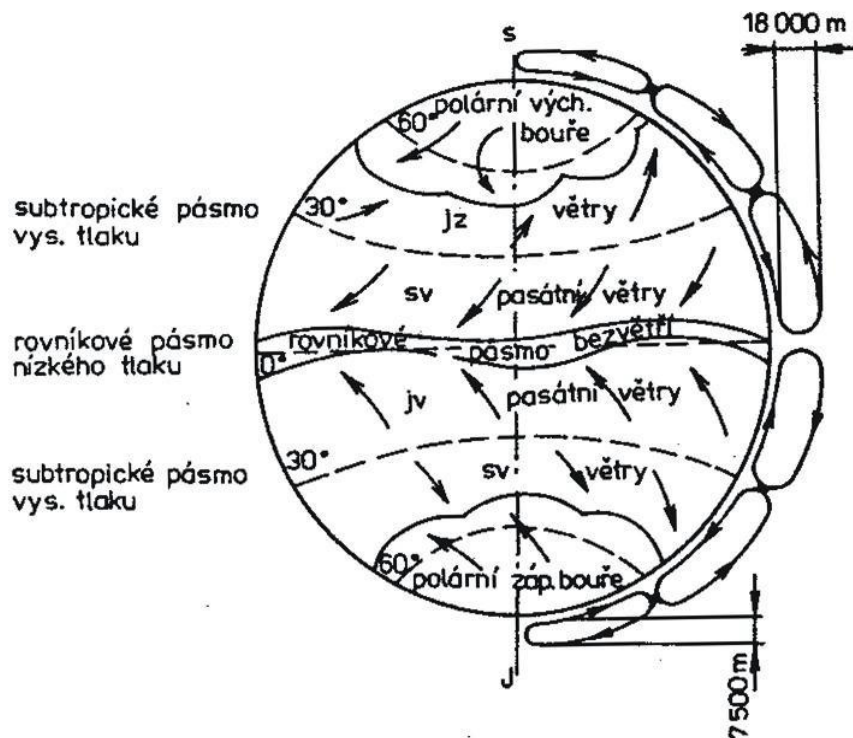
Ve své práci jsem se věnoval větrné energii od principu vzniku a přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou až k popisu jednotlivých typů větrných elektráren a shrnutí jejich výhod a nevýhod. Cílem práce je návrh větrné elektrárny určené k zabezpečení dodávek elektrické energie pro rekreační, celoročně obývaný objekt v Krušných horách. Tento návrh je hodnocen nejen z hlediska energetického, ale rovněž z hlediska ekonomického.

1 PRINCIP A TYPY VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Tato kapitola pojednává o základních principech a typech větrných elektráren. Rovněž je nastíněn vznik větru, který je pro větrnou elektrárnu nepostradatelný a je popsána konstrukce a složení větrné elektrárny z hlediska jednotlivých typů větrných motorů, jejich dělení a použití.

1.1 Vznik větru

Vítr je nedílnou součástí větrné elektrárny. Ke správné činnosti a účinnosti potřebuje větrná elektrárna odpovídající proudění větru. Za vznikem větru stojí Slunce, které nerovnoměrně zahřívá zemský povrch. Ohřátý vzduch stoupá vzhůru a na jeho místo se tlačí vzduch studený. Důležitým faktorem je tlak. Vzduch se snaží vyrovnávat rozdíly tlaku a přechází z místa vyššího tlaku do míst nižšího tlaku. Udržení větrné elektrárny v rovnoměrném chodu je velmi těžké vlivem proměnné intenzity a směru proudění. [1]



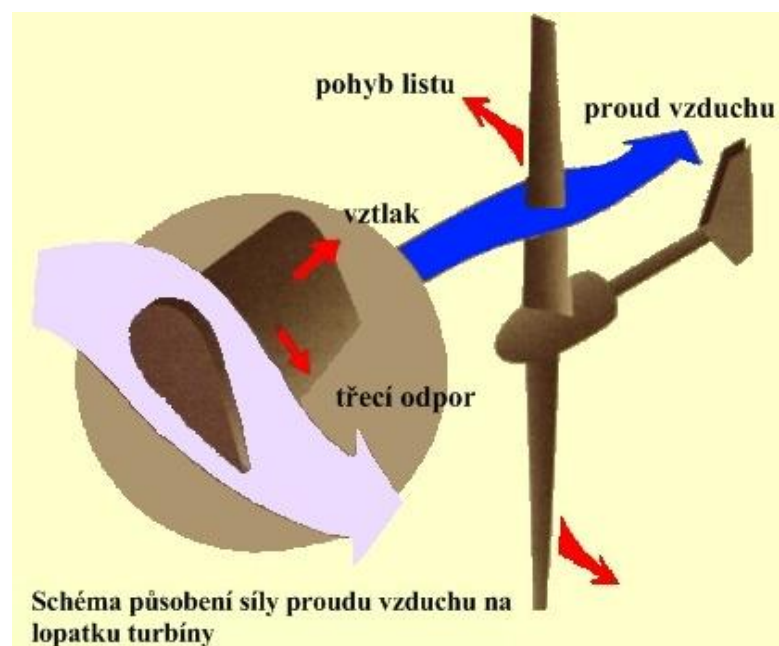
Obr. 1.1 Schéma hlavních směrů větru na Zemi [1]

1.2 Princip činnosti

Větrná elektrárna pracuje na jednoduchém principu. Využívá aerodynamických sil větru, které působí na rotorové listy. Větrná turbína umístěná na stožáru mění kinetickou energii větru na rotační mechanickou energii, čímž je uváděna do pohybu. Rotor obsahuje rotorové listy, které jsou speciálně tvarovány. Jejich plocha, klade odpor procházejícímu větru, čímž je uváděna do pohybu. Rotor je uvnitř gondoly spojen přes převodovku a hřídel s generátorem elektrického proudu. Vyrobená elektrická energie je před distribucí transformována pomocí střídačů a usměrňovačů. Okamžitý výkon větrné elektrárny závisí na rychlosti proudění větru a především na proměnlivosti proudění, které má vliv na stabilitu množství vyráběné elektrické energie a tím i na provoz v elektrizační soustavě.

U větrných elektráren je zapotřebí ke správnému rozběhu proudění větru o rychlosti v rozmezí 4-6 m.s⁻¹. Většina větších elektráren dosahuje maximálního výkonu do rychlosti větru do 20 m.s⁻¹. Nicméně rychlost větru nemůže být moc velká. Silné poryvy větru v rychlostech nad 25 m.s⁻¹ by mohly elektrárnu silně mechanicky poničit.

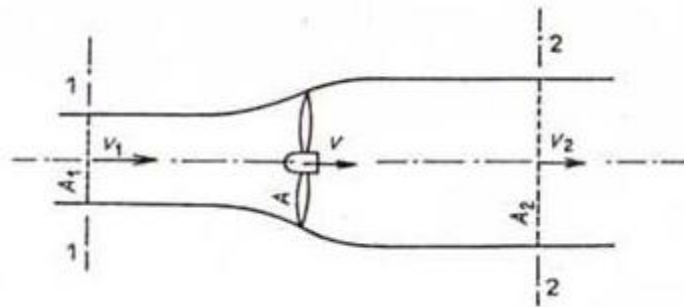
Mechanickému poškození zabraňují mechanické brzdy. Impuls k zastavení rotoru může vycházet od snímače otáček rotoru či snímače rychlosti větru. Tyto údaje jsou vyhodnocovány počítačem, který kontroluje i řadu dalších důležitých údajů. Samotná mechanická brzda je umístěna většinou za převodovkou na straně generátoru a je schopna zabrzdit rotor za jakýchkoliv podmínek. [2]



Obr. 1.2 Princip větrné elektrárny [3]

1.3 Výkon a konstrukce větrné elektrárny

Výkon větrné elektrárny přímo souvisí s výkonem větru. Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, mezi největší problémy u větrných elektráren se řadí nestálost proudění větru a tím i kolísavost výkonu. Na obrázku (Obr. 1.3) je znázorněn proud vzduchu, který protéká idealizovaným větrným motorem. Zanedbává se míšení proudu a ve vodorovném směru je proud omezen dvěma kontrolními plochami 1 a 2, v nichž rychlost v_1 a v_2 protéká průřezy A_1 a A_2 .



Obr. 1.3 Schématické znázornění proudu vzduchu protékajícího vrtulí [1]

Kinetickou energii pohybujícího se vzduchu lze vyjádřit známým vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2[J] \quad (1.1)$$

kde v je rychlost vzduchu a m hmota, která se dá vyjádřit pomocí objemu a hustoty vzduchu ρ

$$m = \rho V = \rho A s \quad (1.2)$$

kde A je plocha, kterou daný objem protéká a veličina s je dráha, kterou urazí vzduch.

Dosazením do rovnice pro kinetickou energii větru pak následně vyplývá:

$$E_k = \frac{1}{2}\rho V v^2 \quad (1.3)$$

Objem lze vyjádřit také jako součin plochy a průměru rotoru d :

$$V = A \cdot d \quad (1.4)$$

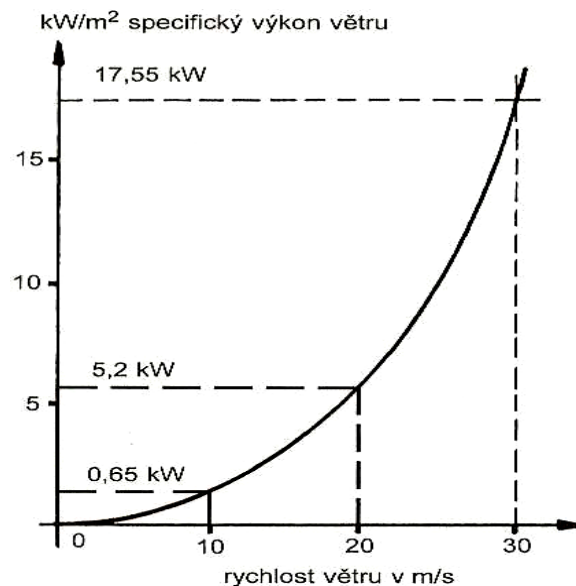
$$v = \frac{d}{t} \rightarrow V = A \cdot v \cdot t \quad (1.5)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (1.6)$$

Výsledný výkon vzdušného proudu vzduchu, znázorňuje vztah:

$$P_v = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3 [W] \quad (1.7)$$

kde ρ je hustota vzduchu ($1,293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), A udává plochu rotoru [m^2], rychlost proudění vzduchu je v^3 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

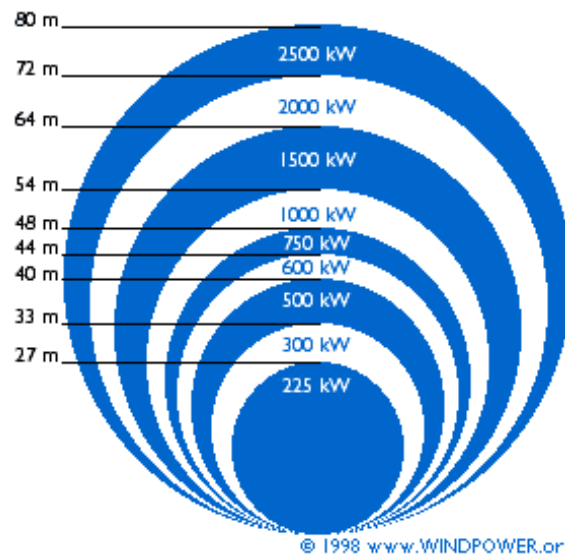


.Obr. 1.4 Výkon pohybujícího se vzduchu vztahovaný na plochu 1 m^2 , kterou vzduch prochází. Výkon větru stoupá se 3. mocninou rychlosti větru.[3]

Obdobný vzorec jako (1.1) platí i pro celkový výkon větrné elektrárny jen s tím, že musíme započítat výkonový součinitel c_p . Platí tedy:

$$P = \frac{\rho}{2} A v^3 c_p [W] \quad (1.8)$$

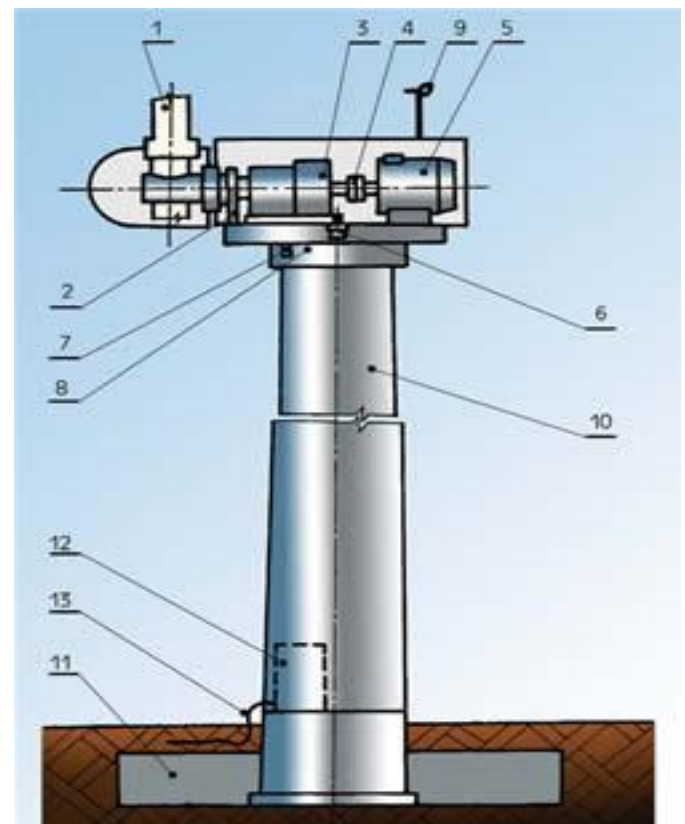
Výkonový součinitel je důležitým parametrem pro návrh větrné elektrárny a je popsán v hlavní části této práce. Výkon větrné elektrárny je závislý na druhé mocnině průměru rotoru. Tato skutečnost, vede k výstavbě co nejvyšších elektráren s velkým průměrem rotoru. Velikost rotoru má zásadní vliv na výkon větrné elektrárny jak je patrné z obrázku 1.5.



Obr. 1.5 Závislost jmenovitého výkonu VTE na průměru rotoru [4]

Základní části VTE:

1. rotor s rotorovou hlavicí
2. brzda rotoru
3. planetová převodovka
4. spojka
5. generátor
6. servo - pohon natáčení strojovny
7. brzda točny strojovny
8. ložisko točny strojovny
9. čidla rychlosti a směru větru
10. několikařílná věž elektrárny
11. betonový armovaný základ elektrárny
12. elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
13. elektrická přípojka



Obr. 1.6 Schéma větrné elektrárny [5]

- 1) **rotor s rotorovou hlavicí** – rotor je tvořen obvykle třemi lopatkami. Průměr rotoru je přibližně 50 – 80m.

- 2) **brzda rotoru** – je nezbytnou součástí VTE. Brzda rotoru slouží k zastavení otáčení rotoru při velkých rychlostech větru. Brzda má několikrát větší moment síly než samotný rotor. Může být ovládána několika způsoby (mechanicky, elektricky, hydraulicky). Rozlišují se systémy s pevnou vrtulí a systémy s nastavitelnou vrtulí.
- 3) **převodovka** – bývá v různém velikostním provedení. Záleží na výkonu VTE. Jedná se o velmi namáhanou součástku, protože se rotor netočí stálými otáčkami. Pracují v rozmezí teplot od -45 do $+45$ °C. Jsou navrhovány s vysokým koeficientem bezpečnosti. Důležitým prvkem je také požadavek na co nejmenší hluk.
- 5) **generátor** - slouží k přeměně mechanické energie větru na elektrickou energii. Jako generátory se používají buď asynchronní generátor, nebo synchronní generátor s budícím vinutím na rotoru. Tento typ generátoru se nahrazuje synchronním generátorem s permanentními magnety u rychloběžných alternátorů.
- 6) **stožár** – je hlavní část nosného systému VTE. Používají se ocelové příhradové konstrukce, samostatný tubus velkého průměru nebo se také vyrábí z betonu. Stožáry rozlišujeme podle toho, jakou mají vlastní frekvenci (tuhé, středně tuhé a měkké). Výška stožáru se pohybuje v rozmezí od 40 do 110m.



Obr. 1.7 Porovnání několika možných velikostí a typů větrných elektráren [6]

1.4 Typy větrných elektráren

Větrné elektrárny se rozdělují dle:

- osy otáčení,
- aerodynamického principu,
- výkonu,
- typu generátoru.

1.4.1 Rozdělení podle osy otáčení

Větrné motory, které mají vodorovnou osu otáčení a pracují na vztlakovém principu jsou nejvíce používané.

Na základě rychlosti se rozlišují:

- klasické větrné mlýny,
- pomaloběžné větrné motory,
- rychloběžné větrné motory.

Klasické větrné mlýny našly své největší uplatnění v Nizozemsku a zemích na pobřeží Atlantského oceánu, ale také na pobřeží Středozemního moře. V České republice se rovněž využívaly a několik se jich dochovalo dodnes.

Rotor větrného mlýna byl zpravidla čtyřlístý a jeho princip spočíval v tom že, rotor byl nastavován proti větru takovým způsobem, že se s jeho uložením natáčela střecha nebo celá horní část budovy. Regulace výkonu se řídila svinováním plachet, které obsahovala dřevěná kostra lopatek. Klasické větrné mlýny zprvu nesloužily k výrobě elektrické energie, nýbrž k přeměně síly větru na mechanickou práci. [1]



Obr. 1.8 Klasický větrný mlýn [3]

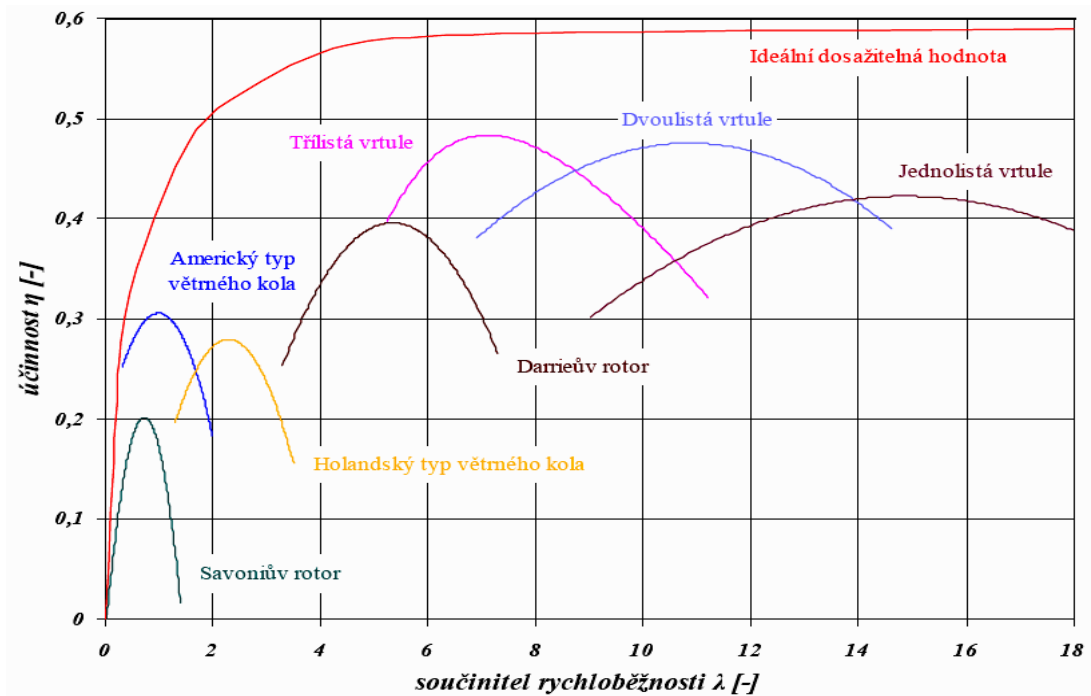
Pomaloběžné větrné motory se poprvé objevily v USA v roce 1870. Základním využitím těchto motorů byl pohon vodních čerpadel pro farmy, či napájení dobytka. Tento typ motorů je také často označován jako *westernové kolo*.

Velkým počtem křídel, lopatek a zejména jejich velkou plochou dosahuje westernové kolo jen nízkých otáček, ale velmi vysokého rozběhového momentu. Lopatky jsou tvarovány velmi jednoduchým způsobem z ohnutých plechů. Při příznivých podmínkách je schopno toto větrné kolo využít energie větru v rozmezí 20-30 %. Pro výrobu elektrické energie se tento typ nehodí, zejména proto, že elektrické generátory požadují pro optimální provoz otáčky od 800-3000 ot/min. Nevýhodou tohoto typu, je jeho enormní hmotnost, daná velkým průměrem rotoru. Tím dochází k velkému mechanickému namáhání. [1]



Obr. 1.9 Westernové kolo na čerpání vody [3]

Rychloběžné větrné motory se vyznačují nejčastěji dvou nebo třílistou vrtulí s pevnými nebo natáčecími listy. Rotorové listy jsou velmi kvalitně zpracovány a mají výborný aerodynamický profil, který se mění po celé délce listu tak, aby byla dosažena co největší účinnost. Výhodou těchto motorů je oproti westernovému kolu nízká hmotnost. U moderních větrných elektráren i výkonu 50 až 100 kW se pohybuje měrná hmotnost rotoru od 5 do 7 kg na 1 m² plochy rotoru. Nevýhodou rychloběžných motorů je špatný rozběh při nízkých hodnotách rychlosti větru. Rozbíhají se při rychlosti 5 m.s⁻¹. Tento typ motorů, nachází použití převážně k výrobě elektrické energie nebo k pohonu kompresorů či jiných pracovních strojů. [1]



Obr. 1.10 Součinitel účinnosti různých větrných kol jako funkce rychloběžnosti [7]

1.4.2 Rozdělení podle aerodynamického principu

Rozdělení podle aerodynamického principu patří k nejdůležitějším, neboť toto rozdělení má zásadní vliv na účinnost VTE. Existují dva základní aerodynamické principy (odporový a vztlakový).

Odporový princip

Větrné motory, které pracují na odporovém principu, patří k nejstarším. Konstrukčním provedením se mohou odlišovat a mít svislou i vodorovnou osu otáčení. Jak název vypovídá, základní funkci zde plní odpor. Vítr se opírá do nastavené plochy (listů rotoru), která mu klade aerodynamický odpor a vzniká síla, která roztáčí listy rotoru. Ovšem může nastat problém, že se plocha otočí a musíme ji vrátit na původní pozici, aby mohla opět plnit svou funkci. Tomuto můžeme předejít tak, že plocha má takový tvar, aby při různých směrech pohybu, měla jiný odpor. Na tomto principu pracuje rotor *Savonius* se svislou osou otáčení. Tento typ rotoru se příliš nepoužívá, protože u nich dochází k většímu mechanickému namáhání, které snižuje životnost. Nejčastěji se tento typ rotoru používá k čerpání vody nebo k výrobě stejnosměrného proudu. [1]

Výhody rotoru Savonius

- Nezávislost na směru větru
- Využití širokého rozmezí rychlosti větru ($2 - 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
- Vysoká odolnost vůči bouřím

Nevýhody rotoru Savonius

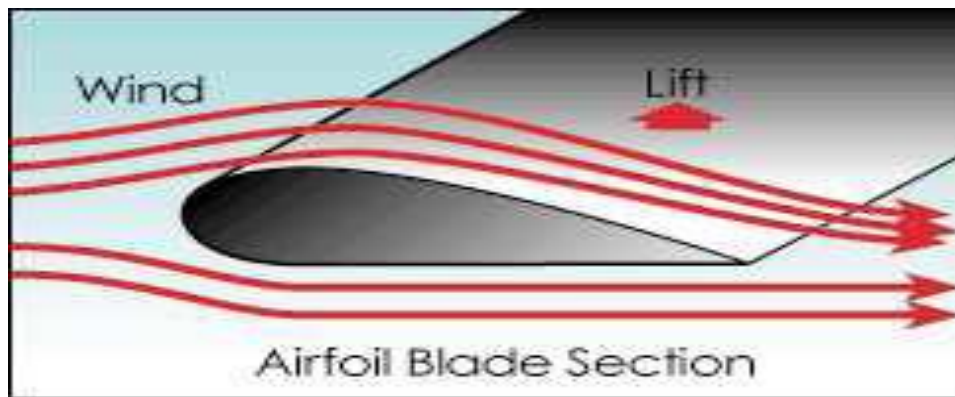
- Malá účinnost (20 %)
- Malá rychloběžnost => nízké otáčky
- Rotor je umístěn nízko nad zemí



Obr. 1.11 Savonius rotor [5]

Vztlakový princip

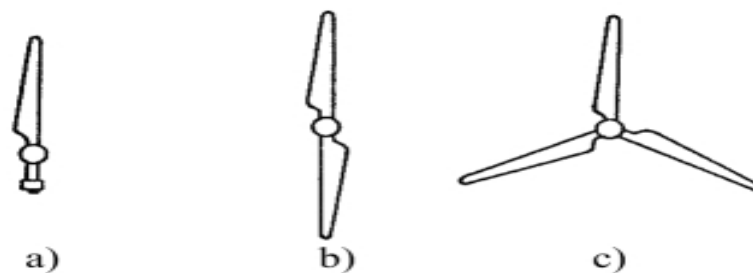
U vztlakového principu velmi záleží na provedení a aerodynamice lopatek. List rotoru je nastaven větru svou spodní hranou, na kterou vítr naráží. Větší objem vzduchu však prochází přes horní hranu, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 1.11). Tím dojde k urychlení větrného proudu na horní straně křídla a k podtlaku, který vyvolá vztlakovou sílu a křídlo je taženo dopředu vzniklým podtlakem. Vyvolaná vztlaková síla je přibližně dvakrát větší než odporová. Působením obou těchto sil, které jsou na sebe kolmé, vzniká výsledná síla, která pohání listy vrtule.



Obr. 1.12 Obtékání vzduchu kolem lopatek VTE [5]

Mezi větrné motory pracující na vzlakovém principu patří vrtule a větrná kola s vodorovnou osou otáčení, které jsou orientovány svoji rovinou otáčení kolmo ke směru větru. Vrtule se vyskytují nejčastěji v třílistém provedení. Existují však i jednolísté vrtule s protizávažím. (Obr. 1.13).

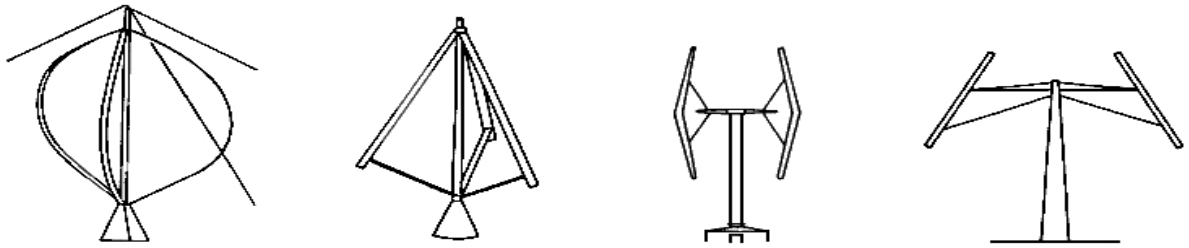
U některých rotorů jsou vrtulové listy kolem své podélné osy natáčivé. Umožňují tak snadnější rozběh rotoru, lepší regulaci otáček, aerodynamického brzdění a případně snížení odporu vrtule při zastaveném rotoru. [1]



Obr. 1.13 Uspořádání vrtulí větrných motorů, a) jednolístá, b) dvoulístá, c) třílístá [1]

Vzlakový princip nemusí využívat pouze turbíny s podélnou osou otáčení. Zástupcem ve skupině rotorů se svislou osou otáčení je rotor Darrieův. Tento typ rotoru má 2 až 4 listy, které mají aerodynamický profil. Listy jsou tvarovány způsobem, aby byly co nejméně mechanicky namáhány.

Dosahuje účinnosti 38%, ale pro své velké mechanické namáhání se v praxi příliš neosvědčil. Další nevýhodou je malá výška nad zemí, tudíž pracuje s menší rychlostí větru. Avšak není vždy schopen se uvést do pohybu sám, což je jeho hlavní nevýhodou. Proto se jeho rozběh zajišťuje jiným typem rotoru, nejčastěji Savoniovým. [1]



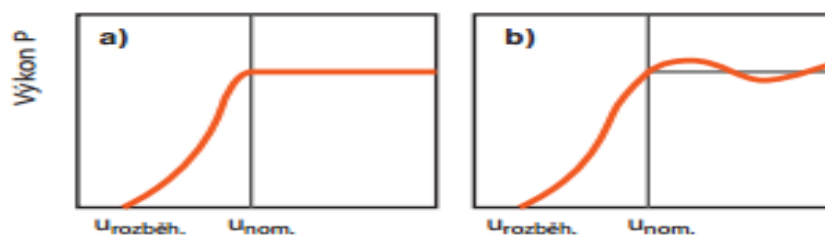
Obr. 1.14 Různá provedení Darrieova rotoru [1]

Regulace větrných elektráren

Vzhledem k proměnlivé rychlosti větru je důležité chránit větrné motory proti překročení maximálních bezpečných otáček. Regulace se podle provedení rotorů rozděluje na dvě skupiny regulačních principů.

V prvním případě se jedná o rotory, které mají pevné nenatáčivé lopatky. Tento druh regulace se nazývá STALL. Druhý způsob regulace se využívá u rotorů s natáčivými lopatkami a označuje se jako regulace PITCH.

Regulace STALL při normálním chodu brání vzájemnému natočení rotoru z optimální polohy pružina nebo jiný mechanismus. Při velké rychlosti větru musí být vyvolána značná síla, která překoná sílu pružiny nebo jiného mechanismu, například na principu závaží a způsobí vychýlení rotoru z roviny kolmé na směr větru. Regulační sílu lze vyvolat pomocí postranní desky, která je umístěna vedle rotoru svoji plochou proti větru.



Obr. 1.15 Charakteristické výkonové křivky při regulaci výkonu „pitch“ a), „stall“ b) [8]

Regulace PITCH zajišťuje chod větrné elektrárny při konstantních nebo málo proměnných otáčkách v relativně širokém rozsahu rychlostí větru, aniž by se výrazně měnila účinnost. Principem je nastavování vrtulových listů při zastaveném rotoru tzv. „do praporu“, náběžnou hranou proti směru větru tak, aby proudícímu větru kladly minimální odpor a nevznikala síla, která by roztáčela rotor. [1]

1.4.3 Rozdělení podle výkonu

Větrné elektrárny dle výkonu se dělí na:

- Malé
- Střední
- Velké

Větrné elektrárny								
Malé			Střední			Velká		
Vrtule		Výkon do kW	Vrtule		Výkon do kW	Vrtule		Výkon do kW
Průměr (m)	Plocha		Průměr	Plocha		Průměr	Plocha	
≤ 8	≤ 50	10	16,5 – 22	200,1 - 400	130	45,1 - 64	1600,1 - 3200	1500
8,1 - 11	50,1 - 100	25	22,1 - 32	400,1 - 800	310	64,1 - 90	3200,1 - 6400	3100
11,1 - 16	100,1 - 200	60	32,1 - 45	800,1 - 1600	750	90,1 - 128	6400,1 - 12800	6400

Tab. 1.1 Kategorizace větrných elektráren [8]

Větrná mikroelektrárna

Větrná mikroelektrárna, někdy označovaná jako mikrozdroj se používá nejčastěji jako doplňkový zdroj elektrické energie u malých rekreačních objektů či rodinných domů. Časté použití nachází také jako osvětlení reklamních panelů.

Mají širokou škálu rozmezí výkonů. Ty nejmenší mikrozdroje mají výkon několik stovek Wattů. Naproti tomu jsou i takové, které mají výkon přibližně do 1 až 5 kW. Takovéto zdroje již mohou poskytovat plnohodnotný přínos elektrické energie pro větší hospodářská stavení. Při dostatečném proudění větru se elektrická energie ukládá do akumulátorů a v případě nedostatku se energie z akumulátorů využívá na pokrytí aktuálního zatížení. Konstrukce mikroelektrárny není složitá. Rotor má většinou tři listy, ve strojovně je uložen stejnosměrný generátor. Natáčení ve směru větru obstarává kormidlo neboli ocas větrné elektrárny. Hlavní nevýhodou tohoto zdroje energie jsou vysoké pořizovací náklady. [8]



Obr. 1.16 Větrná mikroelektrárna [5]

Malá větrná elektrárna

Ve skupině malých větrných elektráren, nacházíme větrné motory do výkonu 60 kW. Průměr rotoru je do 16 metrů. Jsou schopny poskytovat takové výkony, které poměrně spolehlivě pokryjí spotřebu elektrické energie u rodinného domu. Generátor je obvykle synchronní, buzený permanentními magnety. Výstupní napětí je 24 V nebo klasických 230 V. Výrobci udávají široké spektrum těchto elektráren a proto je nezbytné spočítat si spotřebu elektrické energie a podle toho zvolit typ elektrárny. Například vyrobená 1 kW postačí na čerpání vody ze studně a její rozvod do kohoutků v objektu. [8]

Střední a velké větrná elektrárna

Tento typ elektráren, je určen k dodávce elektrické energie do sítě. Dosahují výkonu od 300 do 3000 kW. Elektrárny velkých výkonů nemůžou pracovat jako autonomní zdroj energie. Důvodem je generované napětí 660 V a vyšší. Obvykle mají asynchronní nebo synchronní generátor, který dodává střídavý proud. Velké elektrárny mají konstantní otáčky, které se regulují natáčením listů a převodem převodovky, který se mění.

Střední elektrárny mohou mít proměnné otáčky v závislosti na okamžité rychlosti větru. Mají horizontální směr otáčení a výšku stožáru až 80 metrů. Dnes už se staví elektrárny, které jsou svou velikostí stožáru a průměrem rotoru i přes 100 metrů. Důvod takovýchto staveb je zřejmý. Využívají se vhodné lokality, kterých je omezený počet a proto je důležité využít co nejvíce potenciál daných lokalit vhodným uspořádáním jednotlivých elektráren. V závislosti na převládajícím či nepřevládajícím směru větru v dané lokalitě se používá řazení větrných elektráren do řady „cik-cak“ nebo do rovnostranného trojúhelníku. [8]



Obr. 1.17 Farma větrných elektráren u Znojma [9]

1.4.4 Rozdělení podle typu generátoru

Stejnoseměrné generátory

Používají se u malých větrných elektráren. Jejich konstrukci tvoří rotor a stator, přičemž na pólech statoru je uloženo budící vinutí. Rotor obsahuje drážky, v nichž je uloženo vinutí kotvy. Její cívky jsou spojeny s komutátorem. Vyrábějí se jako dvoupólové, tudíž hodnota jejich otáček je 3000 ot/min. Výstupní napětí je 12 nebo 24 V. Stejnoseměrné generátory dodávají stejnosměrný proud a tudíž mohou být spojeny s bateriemi. Vzhledem ke svému provedení se nehodí na nepřetržitý celoroční provoz z důvodu opotřebování uhlíkových kartáčů.

Synchronní generátory

Synchronní generátor (alternátor) se vyrábí v provedení jednofázovém či trojfázovém. Dále se rozlišují na synchronní generátor s vyniklými póly a na synchronní stroj s hladkým rotorem. Konstrukci generátoru tvoří jako u každého točivého stroje stator a rotor. Rotor se otáčí stále stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Ve statoru jsou uloženy indukční cívky, které jsou posunuty o 120° . V rotoru vzniká točivé magnetické pole, které se následně indukuje ve statorovém vinutí. Ze statoru je pak následně odváděn trojfázový proud vyrobený generátorem. Hodnota napětí je dána budícím proudem a otáčkami rotoru. Hlavní nevýhoda synchronního generátoru je, že z klidu nejsou schopny se sami rozběhnout.

Asynchronní generátor

Asynchronní generátory ve větrných elektrárnách se vyrábějí jako čtyřpólové, které mají ve spojení se sítí o kmitočtu 50 Hz synchronní otáčky 1500 ot/min. Další variantou je provedení šestipólové, které mají synchronní otáčky 1000 ot/min. Asynchronní generátor používá ve svých větrných elektrárnách největší světový výrobce větrných elektráren firma VESTAS.



Obr. 1.18 Synchronní generátor větrné elektrárny o výkonu 2MW [10]

2 Posouzení výhod a nevýhod větrných elektráren

Větrná elektrárna jako jeden ze zdrojů elektrické energie má své přednosti, ale také nedostatky. Obnovitelné zdroje, do kterých patří VTE jsou známy tím, že neprodukují při výrobě žádné škodlivé emise, které znečišťují ovzduší. Tento fakt je jejich devízou proti jiným druhům elektráren, zejména klasickým uhelným spalující hnědé uhlí. Vlivem odsíření se škodlivé látky značně snížily, ale CO₂ naopak narostlo. Největší nevýhodou větrné elektrárny je závislost na proudění větru. V tomto ohledu jsou tepelné elektrárny stabilnějším zdrojem elektrické energie, mnohdy i za cenu citelného znečištění ovzduší. Je nutné neopomenout jistý dopad větrných elektráren na životní prostředí při jejich výrobě a následné ekologické likvidaci po uplynutí doby životnosti.

2.1 Hluk větrné elektrárny

Hluk z větrných elektráren je nezpochybnitelný fakt. Měřením bylo zjištěno, že hluk, který vzniká otáčením rotoru VTE se pohybuje na rozmezí 35 až 40 dB ve vzdálenosti 500 metrů. Pro lepší představu tato úroveň hluku je přibližně stejná jako hladina hluku v obývacím pokoji. Už při výstavbě elektrárny jsou vypracovávány podrobné hlukové emise. Normy navíc udávají limity, které se musí dodržovat a nesmí být překročeny. Dovolená hladina hluku v místě nejbližší budovy je přes den na úrovni 50 dB (6 až 22 hodin) a v noci se tato hodnota snižuje na 40 dB. Tyto hodnoty pochází ze zákona č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací. Snižování hluku byla hlavní prioritou konstruktérů. Zaměřili se na efektivnější výrobu listů a tvar rotoru. Tato úprava radikálně zmenšila aerodynamický hluk VTE. Dříve vyráběné elektrárny měly s hlukem značné problémy, protože nebyly tak kvalitně technologicky zpracovány jako ty dnešní.

Agentura ochrany přírody a krajiny uvádí, že les vzdálený 200 m při rychlosti větru 6 až 7 m.s⁻¹ vydává stejné množství hluku jako větrná elektrárna ve stejné vzdálenosti. Větrné elektrárny se dnes staví v dostatečné vzdálenosti od obydlí, ve vzdálenosti přibližně 700 až 1200 m.

Větrná elektrárna produkuje dva druhy hluků:

- mechanický hluk,
- aerodynamický hluk.

Mechanický hluk je zvuk o kmitočtu 50 Hz (nízkofrekvenční) a je závislý na výkonu větrné elektrárny. Znamená to tedy, že intenzita mechanického zvuku je ovlivnitelná nastavením určitého výkonu generátoru, který se dá regulovat. Tento hluk však u moderních větrníků můžeme zanedbat, protože zvuk stroje je převážně odstíněn konstrukcí stroje. [11]



Obr. 2.1 Stupnice slyšitelných zvuků [11]

Aerodynamický hluk je zvuk v rozmezí kmitočtu 16 až 100 Hz. Tento druh zvuku se vytváří obtékáním proudu vzduchu podél otáčejících listů rotoru a při průletu listů kolem věže elektrárny. Velikost neboli intenzita tohoto zvuku je závislá na kvalitě a konstrukčních parametrech listů rotoru, rychlosti otáčení rotoru a na dalších specifických podmínkách. Specifickou podmínkou rozumíme např. (déšť, sníh, nízká oblačnost).

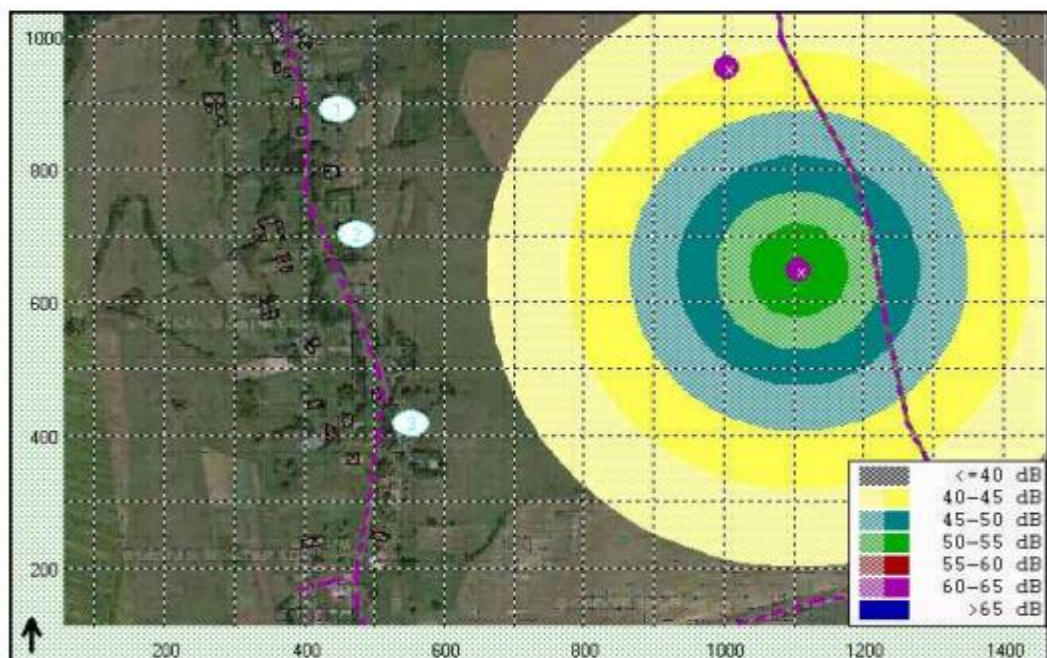
Infrazvuk představuje postupné podélné vlnění v pružném prostředí, kdy je frekvence pod pásmem slyšitelnosti (pod 20 Hz).

Povolený hygienický limit infrazvuku není přesně stanoven, ale doporučená hodnota je 90 dB. V přírodě je infrazvuk produkován bouřkami, vodopády či větrnými turbulencemi na střeších budov. V životním prostředí tvoří zdroje infrazvuku např. letadla, auta a jiné

pracovní stroje. [11]

V České republice byla prováděna měření infrazvuku u větrných elektráren s výsledkem uspokojivým. Větrníky zvyšují hodnotu infrazvuku přibližně o 2 dB. Tato hodnota je velice nízká a proto nemůže mít v žádném případě vliv na obyvatelstvo.

„Infrazvuk při činnosti větrných elektráren prakticky nevzniká, při podrobné analýze mohou být hladiny mírně zvýšené, ale jeho vliv na lidské zdraví je zanedbatelný, říká Ing. Aleš Jirásk z Národní referenční laboratoře pro měření a posuzování hluku v komunálním prostředí.“ [12]



Obr. 2.2 Ekvivalentní hladiny zvuku [13]

2.2 Vliv na krajinný ráz

Větrné elektrárny mají určitý dopad na vzhled krajiny. Naproti tomu je to jen subjektivní názor člověka. Krajina se měnila celá staletí lidskou činností a proto výstavba větrných elektráren či jiných dominant dotváří dnešní krajinu. Elektrárny nepochybně mění vzhled krajiny, ale rozhodně krajinu neničí. Tuto teorii podporuje i to, že dosud nebyla vytvořena žádná odborná studie na tuto problematiku. Při nových výstavbách větrných farem se již v projekční fázi přísně posuzuje v rámci ohled na životní prostředí (EIA).

Důležitým faktorem při výstavbě je výběr vhodné lokality. V České republice takovýchto lokalit s dostatečnými parametry na výstavbu příliš není. Některým lidem tento fakt vadí a domnívají se, že pohled na větrníky není hezký. Jiní ho považují za elegantní a zajímavý.

Ve srovnání s jiným obnovitelným zdrojem např. fotovoltaickou elektrárnou zabírají daleko menší rozlohu. Větrná elektrárna pokrývá svou velikostí malé území a proto je dnes běžné, že se ostatní půda kolem elektrárny využívá pro pastvu dobytka či jiné účely. [11]



Obr. 2.3 Větrná elektrárna a pastva dobytka [11]

2.3 Vliv na přenosovou síť

Nevýhodou větrné elektrárny je nestálost výroby energie a tím pádem i kolísavost výkonu. Množství dodávané elektřiny musí být kryté z jiných zdrojů. Například v Dánsku, je větrná energie zastoupena asi 20 % celkové vyráběné elektrické energie, přičemž s regulací proměnné větrné energie nemají problém.

Problém by nastal v tom případě, kdyby byl velký počet větrníků instalován v nějaké oblasti, kde by nebyla poptávka po energii. Kdyby takový případ nastal ve velmi větrném období, musela by se vyrobená elektrická energie transportovat na velké vzdálenosti a to zatěžuje přenosové sítě. Jednou z možností řešení je například posílení elektrického vedení. Výhodou je, že vítr fouká nejvíce v zimním období, kdy spotřeba elektrické energie je největší. [10]

2.4 Ohrožení ptáků a plašení zvířat

Často se o větrných elektrárnách mluví jako o zabijácích zvířat. Pokud jsou vhodně umístěné a dobře naplánované, neměly by představovat pro ptactvo a ostatní zvířata vážnější nebezpečí. Na toto téma bylo zpracováno několik vědeckých studií, které se zaměřily na vliv větrných elektráren na ptactvo a zvířata.

Otáčející se lopatky rotoru představují pro ptáky určité riziko, ne však velké. Větrná turbína je pro ně dobře viditelná překážka, kterou oblétají. Větší nebezpečí rizika je za tmy

nebo za snížených viditelných podmínek (mlha). Případný střet s rotorem však nemusí být fatální.

Královská společnost na ochranu ptactva provedla speciální měření na větrných farmách ve Walesu. Výsledek měření dokazoval, že na každých deset tisíc ptáků, kteří proletí skrz větrnou farmu, dojde k jedné smrtelné kolizi.

Problém nastane, pokud jsou VTE nevhodně umístěné. K většímu uhynutí ptáků došlo v kalifornském větrném parku Altamont Pass, kdy byly elektrárny nevhodně rozmístěny. Proto se výstavby nepovolují v přírodních rezervacích nebo v místě velkého soustředění ptáku napříč tahovými cestami. [11]

2.5 Stroboskopický efekt

Stroboskopický efekt neboli otáčející stín nastává tehdy, pokud je větrná elektrárna umístěna v blízkosti obydlí nebo dopravních infrastruktur a slunce je v pozici za větrnou elektrárnou. Stroboskopický efekt je připodobňován k jízdě autem nebo vlakem v aleji stromů. U větrných elektráren není tento efekt tak markantní, protože se rotor otáčí mnohem pomaleji.

Při plánování projektů se započítává nejvyšší doba, po kterou tento jev dané lokalitě hrozí (pokud by stále svítilo slunce, nikdy se nevyskytovaly mraky a rotor by byl neustále kolmo k pozorovateli a vrhal by tedy nejvyšší možný stín) a skutečná doba působení podle meteorologických podmínek. Celkově se jedná o pět až šest hodin v součtu za celý rok. Navíc elektrárna je schopná zastavit provoz v případě, kdy hrozí vrhání stínů na domy.

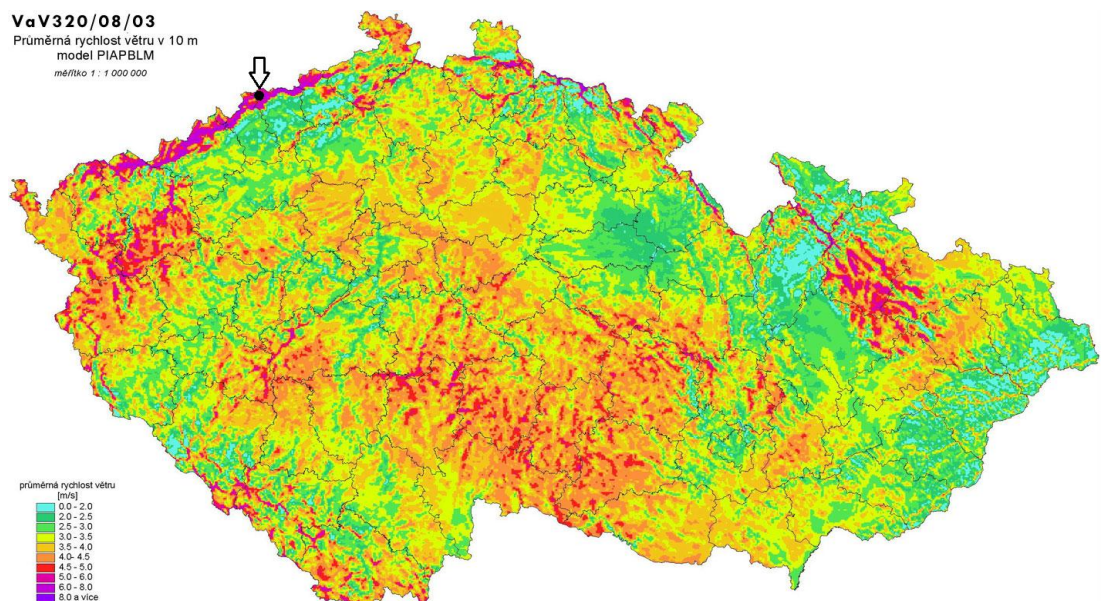
Starší větrné elektrárny, které neměly listy rotoru konstruovány jako ty dnešní, odrážely sluneční paprsky a způsobovaly tzv. diskoefekt. Diskoefekt dnes nepředstavuje větší problém. Celé elektrárny se začaly natírat tmavou obvykle šedou barvou, která tento jev potlačuje. [11]

3 Návrh větrné elektrárny

V této kapitole bude navržena vhodná větrná elektrárna jako zdroj elektrické energie pro chatu, či podobné rekreační zařízení. Návrh bude počítat s trvalým využíváním objektu.

3.1 Určení lokality

Výběr lokality by měl probíhat na základě jejího předběžného hodnocení, zejména větrných podmínek, stálosti proudění větru a hlavně rychlosti větru. Průměrné rychlosti větru na území České republiky poskytuje větrná mapa (Obr. 3.1). Větrná mapa udává předběžnou informaci o tom, kde by bylo vhodné postavit větrnou elektrárnu.

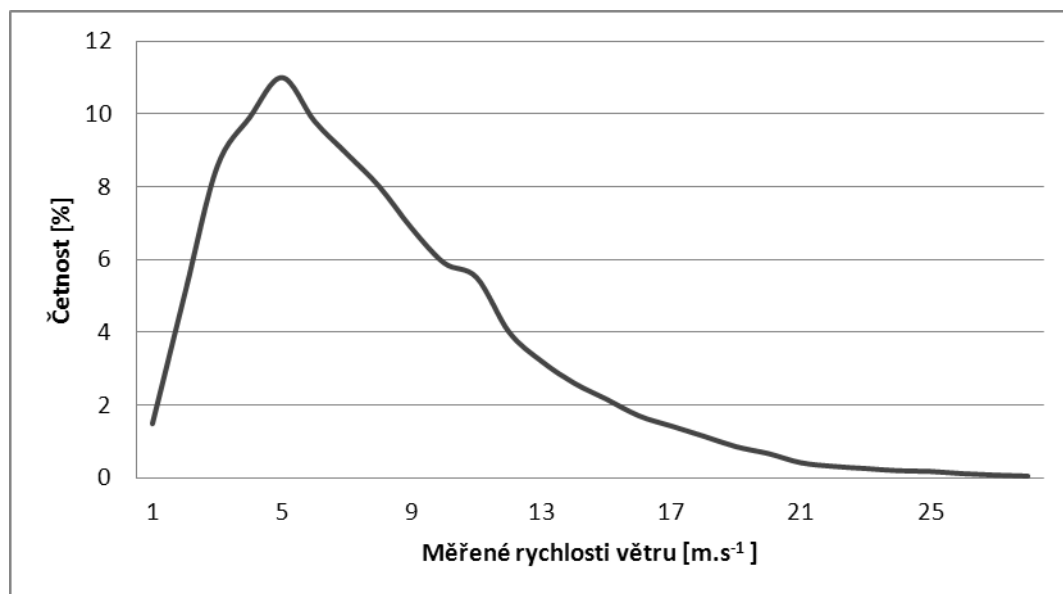


Obr. 3.1 Větrná mapa ČR [14]

Z větrné mapy je patrné, že nejvhodnějšími oblastmi pro výstavbu větrné elektrárny jsou pohoří. Tedy Krušné hory, Krkonoše, Orlické hory, Jeseníky, Jizerské hory či oblast Šumavy. Pokud by byl návrh situován do některé z těchto oblastí, provádělo by se v dané lokalitě celoroční nebo alespoň půlroční měření rychlosti větru a poté bychom vyhodnotili graf četnosti větru.

Pro tento návrh bude použita lokalita v Krušných horách na hraničním území s Německem a s četností rychlosti větru dle tabulky z knihy V. Rychetníka (Příloha 1), za předpokladu, že průměrná rychlost větru bude $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Upřesnění vybrané lokality znázorňuje černé kolečko na mapě se souřadnicemi GPS $50^\circ 41' 28.4569879'' \text{ N}$ a $13^\circ 34' 5.2148438'' \text{ E}$.

Z tabulky četnosti větru je vynesena distribuční charakteristika (Obr. 3.2). Tato charakteristika znázorňuje četnost rychlosti větru v dané lokalitě. Pro každou rychlost větru je přiřazen podíl z celkové roční výroby v procentech.



Obr. 3.2 Distribuční charakteristika četností rychlostí větru pro průměrnou rychlost 7 m.s^{-1}

3.2 Určení spotřeby elektrické energie

Navrhovaná větrná elektrárna bude využívána celoročně, a proto návrh počítá se spotřebiči, které se běžně vyskytují v rekreačních zařízeních. Navrhovaná elektrárna bude pokrývat spotřebu elektrické energie na osvětlení a zatížení spotřebičů, které jsou shrnuty společně s celkovou spotřebou elektrické energie za den v tabulce 3.1. Údaje v tabulce jsou pouze orientační.

Trvalé využívání objektu			
Spotřebič	Příkon [W]	Doba provozu [h]	Spotřeba za den [kWh]
Chladnička + mrazicí box 94 l	110	20	2,2
Rychlovarná konvice	950	0,3	0,285
Televizor	170	3	0,51
Notebook	30	4	0,12
DVD přehrávač	25	3	0,075
Mikrovlná trouba	1150	0,25	0,29
Pračka (ELECTROLUX EWT 105410 W)	2300	0,3	0,69
Světelná zdroje 15 kusů (úsporné)	26	5	0,13
Ostatní (nabíječka na mobil, atd.)	350	0,9	0,32
Součet	5111		4,62

Tab. 3.1 Příkony spotřebičů a jejich denní spotřeba v kWh

Z tabulky 3.1 je patrné, že spotřebovaná elektrická energie za den činí 4,62 kWh. Jelikož je objekt využíván celoročně, celková elektrická energie spotřebovaná za rok (365 dní) bude 1 686,3 kWh.

3.3 Výpočet větrného motoru

Pro výpočet a následný návrh větrného motoru, je potřeba určit jak velký teoretický výkon vzdušného proudu P_T bude působit na 1m^2 plochy kolmé ke směru větru. Přičemž jsou zanedbány rychlosti nižší než 4 m.s^{-1} , z hlediska faktu, že většina větrných elektráren se rozbíhá při rychlosti 4 m.s^{-1} a vyšší.

Výkon vzdušného proudu P_T určíme ze vztahu:

$$P_T = \frac{\rho}{2} v^3 [\text{W.m}^{-2}] \quad (3.1)$$

kde v^3 je rychlost větru a veličina ρ udává hustotu vzduchu ($1,2\text{ kg.m}^{-3}$).

Celkovou energii E lze vypočítat jako součin teoretického výkonu vzdušného proudu P_T a doby trvání tohoto výkonu t_p .

$$E = P_T \cdot t_p [\text{W.m}^{-2}] \quad (3.2)$$

Po sečtení energií při jednotlivých rychlostech proudění větru, je ji přepočítána na celkovou teoretickou energii vzdušného proudu za rok.

$$E_{TR} = \frac{\Sigma E \cdot 8760}{100} [\text{kWh.m}^{-2}] \quad (3.3)$$

kde číslo 8760 představuje počet hodin za celý rok. Výpočty jsou shrnuty v přehledné tabulce v příloze (Příloha 2).

Z výsledků, které jsou v dané tabulce, je patrné, že v uvažované lokalitě lze teoreticky získat 4 533,112 kWh elektrické energie za 1 rok. Z předchozích výpočtů je známá přibližná spotřeba rekreačního objektu za celý rok $E_{\text{POTŘ}} = 1\ 686,3\text{ kWh}$. Pro určení vhodné větrné turbíny je nutné stanovit výkonový součinitel C_P . Výkonový součinitel vyjadřuje účinnost přeměny energie z větru na energii elektrickou.

$$C_p = \frac{E_{potř}}{E_{TR}} = \frac{1686,6}{4533,112} = 0,37 \quad (3.4)$$

Pro pokrytí spotřeby elektrické energie v uvažovaném rekreačním objektu, je třeba využít rotor o ploše $A = 1 \text{ m}^2$ s výkonovým součinitelem 0,37.

Typ rotoru	C_{pOPT}	λ_{OPT}	λ_{MAX}
Mnoholopátkový (americký)	0,35	1,1	2
Třílístý	0,18 – 0,39	2,5 – 6	
Dvoulístý	0,20 – 0,48	6 – 10	
Savonius, dělený	0,23	0,85	1,8
Darrieus třílístý	0,362	4,66	6,76
Darrieus jednolístý	0,236	6,1	10
Miskový kříž	0,0195	0,14	0,31

Tab. 3.2 Výkonový součinitel některých typů větrných motorů

Vzhledem k tomu, že výkonový koeficient vyšel 0,37, lze vybírat mezi třílístým a dvoulístým rotorem. Avšak mnoholopátkový (americký) rotor je svou hodnotou výkonového koeficientu také blízko. Do návrhu byl vybrán třílístý rotor, protože jeho rozběhové vlastnosti jsou oproti dvoulístému lepší.

Po zvolení vhodného typu rotoru lze vypočítat jeho jmenovitý výkon, který je získán ze vztahu:

$$P_j = \frac{\rho}{2} C_p A v^3 = \frac{\rho}{2} C_p \pi r^2 v^3 [W] \quad (3.5)$$

kde ρ je hustota vzduchu ($1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a velikost plochy rotoru je $A = \pi \cdot r^2 [\text{m}^2]$.

Velikost výkonového součinitele je pro jistotu zvolena nižší tj 0,25. Průměr rotoru je 2 m. Dosazením těchto hodnot do vztahu (3.5) se získá informace o tom, kolik je možné teoreticky za 1 rok získat energie při daných parametrech rotoru. Výsledky jsou shrnuty v příloze (Příloha 3).

Z výsledků je patrné, že roční výroba E_R je dvojnásobná než energie spotřebovaná. Vzhledem k tomu, že vyrobená elektrická energie výrazně převyšuje energii spotřebovanou, rozdíl postačí na krytí různých ztrát, které vznikají, při akumulaci energie do baterií apod. Přebytečnou vyrobenou energii je pak možné například prodávat do sítě. Druhá varianta je zmenšení velikosti rotoru, tím klesne velikost vyráběné elektrické energie.

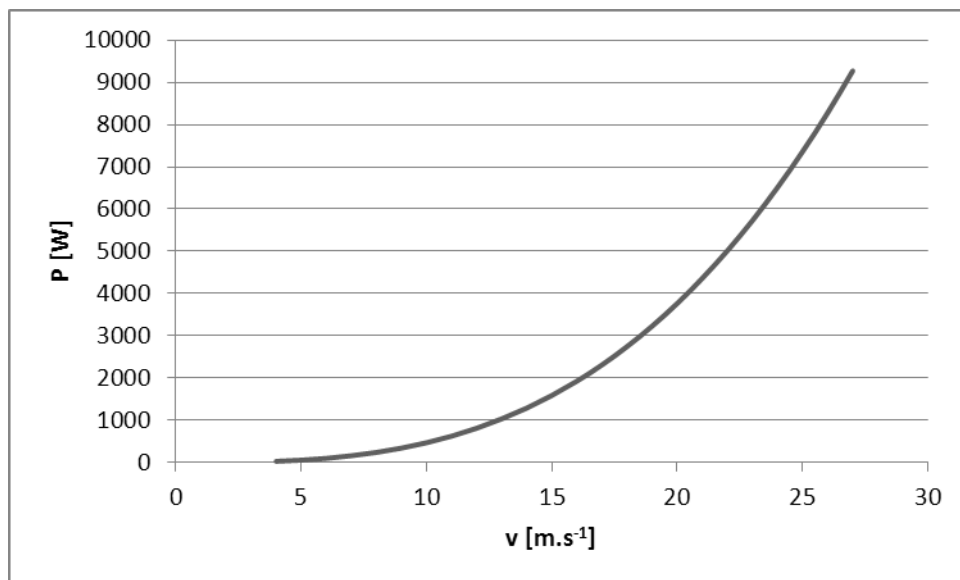
Dalším důležitým údajem, který je třeba pro posouzení celkové koncepce větrného motoru, jsou jeho otáčky při jmenovitém výkonu, který odpovídá rychlosti větru předpokládané při návrhu. Podstatný je rovněž výpočet obvodové rychlosti konců lopatek. Pro dosažení do vzorce je důležité zvolit rychloběžnost λ_0 . U třílistého rotoru se rychloběžnost pohybuje v rozmezí 2,5 – 6. Rotory menší velikosti, mívají rychloběžnost vyšší, proto je zvolena hodnota $\lambda_0 = 5$.

$$n_j = \frac{60\lambda_0 v_j}{2\pi R} = \frac{60 \cdot 5 \cdot 7}{2\pi \cdot 1} = 334,39 \text{ min}^{-1} \quad (3.6)$$

Z výpočtu vyplývá, že jmenovité otáčky rotoru jsou $334,39 \text{ min}^{-1}$. Posledním výpočtem je určení obvodové rychlosti konců lopatek.

$$\lambda_0 = \frac{u_R}{v} \Rightarrow u_R = \lambda_0 \cdot v = 5 \cdot 7 = 35 \text{ m.s}^{-1} \quad (3.7)$$

Na základě výsledků z tabulky (Příloha 3) lze sestavit závislost výkonu na rychlosti větru.



Obr. 3.3 Závislost výkonu na rychlosti větru pro návrh VTE

Z výsledného grafu závislosti výkonu na rychlosti větru určíme jmenovitý výkon. Při rychlosti 7 m.s^{-1} dosahuje VTE jmenovitého výkonu přibližně 200 W. Všechny vypočítané hodnoty navrhované větrné elektrárny jsou shrnuty v tabulce 3.3.

Jmenovitý výkon [W]	200
Při rychlosti větru [m.s^{-1}]	7
Rozběhová rychlost větru [m.s^{-1}]	4
Průměr rotoru [cm]	200
Počet listů	3
Obvodová rychlost konců lopatek [m.s^{-1}]	35
Výkonový součinitel	0,25
Rychloběžnost	5
Otáčky rotoru [min^{-1}]	334,39

Tab. 3.3. Parametry navrženého rotoru

Takto navržená větrná elektrárna by stačila na pokrytí spotřeby elektrické energie pro rekreační zařízení za předpokladu, že budou příznivé větrné podmínky. Avšak elektrárna je schopna vyrobit množství energie takové, že i při nepříznivých podmínkách by rekreační zařízení s pomocí akumulčních baterií překlenulo určitou dobu bez dodávky z větrné elektrárny.

Navrhovanou elektrárnu lze srovnat s nabídkami firem, které na trhu nabízejí právě tyto produkty. Následující dva typy větrných elektráren budou srovnány s teoretickým návrhem v kapitole 4.1.

Technická data	Black Wind Generator 600
Průměr rotoru	1,6 m
Napětí	12,24 V DC
Nominální výkon	600 W (při 11 m.s ⁻¹)
Generátor	Třífázový s permanentním magnetem
Cena s 21 % DPH	30 523 Kč

Tab. 3.4 Technická data modelu Black Wind Generator 600 [15]



Obr. 3.4 Větrná elektrárna model Black Wind Generator 600 12 / 24 V [15]

Technická data	Whisper 100
Průměr rotoru	2,1 m
Napětí	12,24,36,48 V DC
Nominální výkon	900 W (při 12,5 m.s ⁻¹)
Potencionální energie	100 kWh / měsíc při středním či silném větru
Cena s 21 % DPH	68 183 Kč

Tab. 3.5 Technická data modelu WHISPER 100 [16]



Obr. 3.5 Model VTE WHISPER 100 [16]

4 Zhodnocení návrhu z energetického a ekonomického hlediska

Navržená větrná elektrárna bude porovnána se dvěma typy elektráren, které mají podobné konstrukční parametry z hlediska energetického a ekonomického. Pro porovnání slouží modely BLACK WIND GENERATOR 600 a WHISPER 100.

4.1 Energetické zhodnocení

Větrná energie je odlišný typ zdroje elektrické energie od ostatních zdrojů proměnlivosti výroby, která se nedá ovlivnit. U většiny ostatních zdrojů je možné regulovat množství výroby a popřípadě ji přizpůsobit poptávce, u větrné energie je vyráběný výkon dán rychlostí proudění vzduchu a hlavně jeho stálostí. Celkově platí, že elektřina je téměř neskladovatelná a platí, že množství vyrobené elektrické energie se musí rovnat energii spotřebované pro zachování energetické bilance. Tento fakt je velice důležitý, protože pokud vítr nebude foukat, je nutné čerpat energii z jiných či záložních zdrojů.

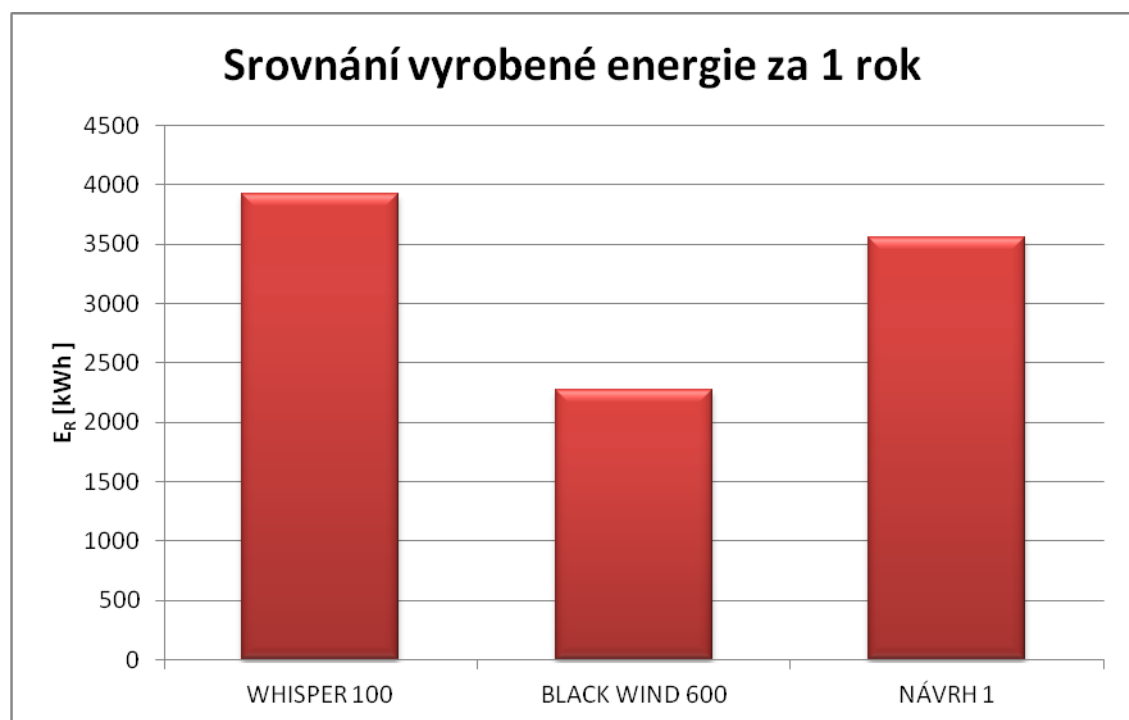
V kapitole 3 byla navržena malá větrná elektrárna, která svými parametry při příznivých podmínkách plně zabezpečí spotřebu elektrické energie v menším hospodářském stavení či rodinném domě. Ročně je elektrárna schopna vyrobit přibližně 3 558,5 kWh při průměrné rychlosti větru $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dle tabulky (Tab. 3.1) je denní spotřeba elektrické energie 4,62 kWh a roční 1 686,3 kWh. Z výsledku je patrné, že elektrárna je schopna vyrobit přibližně dvakrát více energie, než je potřeba. To ovšem platí při velmi dobrých podmínkách. Pokud by nastalo období méně větrné, nebo bezvětří, hodnota vyrobené energie by se velmi snížila a pro majitele nemovitosti by to mohlo znamenat velký problém, pokud by byl odkázán pouze na dodávku z větrné elektrárny.

Výsledný návrh byl porovnán se skutečnými elektrárnami, které se svými parametry podobají samotnému návrhu a je možné si je koupit. Pro srovnání byly vybrány modely Black Wind Generator 600 a Whisper 100. Pro oba dva typy byla spočtena roční vyrobená energie při průměrné rychlosti $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ stejně jako u návrhu z kapitoly 3.

Z vypočtených hodnot shrnutých v příloze (Příloha 4) vyrobí za rok malá větrná elektrárna Black Wind Generator 600 přibližně 2 277,44 kWh elektrické energie. Druhý

uvažovaný typ tj. malá větrná elektrárna Whisper 100 se svou hodnotou vyrobené energie 3 923,24 kWh podobá návrhu z kapitoly 3. Podrobnější údaje jsou v příloze (Příloha 5). Obě varianty jsou porovnány společně s požadovaným návrhem (vypočteným v kapitole 3) v grafu (Obr. 4.1).

Jak je z obrázku (Obr. 4.1) patrné, nejvíce energie je schopna vyrobit elektrárna Whisper 100, která má však vysoké pořizovací náklady. Pro potenciálního majitele nemovitosti je důležitým údajem doba návratnosti, která je spočtena v kapitole 4.2. Konečná volba vhodného typu elektrárny závisí na mnoha faktorech mimo jiné i na schválení možnosti dodávky nadbytečné vyráběné elektrické energie do veřejné distribuční sítě jejím provozovatelem.



Obr. 4.1. Podíl roční teoreticky vyrobené energie tří typů větrných elektráren

4.2 Ekonomické zhodnocení

Výroba elektrické energie z větru je asi třikrát dražší v porovnání s uhelnými nebo jadernými elektrárnami. Stát proto podporuje všechny obnovitelné zdroje zvýhodněnými výkupními cenami, aby se do nich vyplatilo investovat. Do ceny uhlé a jaderné elektrárny nejsou započítány další náklady např. v podobě emisních povolenek, znečištění životního prostředí, poškozování lidského zdraví. [12]

Elektřina vyrobená větrnou elektrárnou rychle klesá s novými technologiemi. Náklady na výrobu 1 kWh se za posledních dvacet let snížily na méně než pětinu. A tento trend stále

pokračuje. Často je větrným elektrárnám vytýkáno, že stavba a konstrukce, spotřebuje tolik energie, že takové množství nedokáže vyrobit ani za několik let. Měřením bylo zjištěno, že pokud je větrná elektrárna dobře umístěna, tak energetická návratnost tj. (doba, za kterou elektrárna vyrobí tolik energie, kolik bylo potřeba na její výrobu), se podle typu stroje pohybuje od tří do šesti měsíců. [12]

4.2.1 Postup ekonomického vyhodnocení

Výpočet aktualizované hodnoty vynaložených investic, tj. zhodnocení ekonomické efektivity daných investic, lze provést na základě ekonomických kritérií. Tato kritéria se dělí na:

- Kritérium aktualizovaného zisku neboli tzv. čistá současná hodnota (NPV),
- Kritérium aktualizovaných nákladů,
- Kritérium vnitřní úrokové míry neboli tzv. vnitřní výnosové procento (IRR).

Nejčastější parametr využívaný pro ekonomické vyhodnocení je doba návratnosti. Skutečná doba návratnosti zahrnuje diskontní sazbu. Pro hrubý odhad ekonomické efektivity vynaložených investic je však postačující výpočet prosté doby návratnosti investic T_s , který se uplatňuje u menších projektů (4.2.1).

$$T_s = \frac{IN}{CF} \quad (4.2.1)$$

kde CF vyjadřuje roční přínos projektu (zisk 1. roku realizace návrhu) a IN počáteční investici.

Všechny tři uvažované větrné elektrárny jsou schopny vyrobit za 1 rok více energie, než je samotná spotřeba rekreačního objektu. Z toho důvodu je možné přebytečnou energii dodávat do veřejné elektrické sítě za předpokladu, že provozovatel rozvodné sítě tuto možnost schválí. Přebytek elektrické energie vyrobené větrnými elektrárnami je důležitým faktem pro potencionálního majitele objektu. Pokud by přebytečnou energii prodával do rozvodné sítě, výrazně by se zkrátila doba návratnosti počáteční investice za předpokladu, že budou příznivé větrné podmínky.

Výkupní cena elektřiny vyrobené větrnou elektrárnou v roce 2013 je 2,12 Kč / kWh.

Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR*							
Zdroj	Cena 2007 CZK/kWh	Cena 2008 CZK/kWh	Cena 2009 CZK/kWh	Cena 2010 CZK/kWh	Cena 2011 CZK/kWh	Cena 2012 CZK/kWh	Cena 2013 CZK/kWh
Fotovoltaika**	13,46	13,46	12,79	12,15	5,5	6,16	2,83
VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	2,46	2,46	2,34	2,23	2,23	2,23	2,12
Malé vodní elektrárny	2,39	2,6	2,70	3,00	3,00	3,19	3,23
Biomasa	3,37	4,21	4,49	4,58	4,58	4,58	3,73
Bioplyn z BPS	3,04	3,9	4,12	4,12	4,12	4,12	3,55

Obr. 4.2.1 Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR [4]

Jak je patrné z tabulky (4.2.2) nejvíce energie a tím i finančních prostředků je schopna vyprodukovat elektrárna Whisper 100. Po pokrytí základní spotřeby rekreačního domku, která činí 1686,3 kWh / rok vyrobí navíc 2 237,10 kWh / rok.

	UVAŽOVANÉ VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY		
	BLACK WIND GENERATOR	WHISPER 100	NÁVRH 1
Množství vyrobené el. energie [kWh / rok]	2 277,40	3 923,40	3 558,50
Přebytek vyrobené el.energie [kWh / rok]	591,1	2 237,10	1 872,20
Výkupní cena v roce 2013 [Kč / kWh bez DPH]	2,12	2,12	2,12
Příjmy v roce 2013 [Kč bez DPH]	1 253,13	4 742,70	3 969,06

Tab. 4.2.2 Předpokládané příjmy v roce 2013

Pro přibližné ekonomické zhodnocení postačí spočítat prostou dobu návratnosti T_s ze vztahu 4.2.1.

Pro příklad lze použít typ Whisper 100

$$T_s = \frac{IN}{CF} = \frac{68183}{4742,7} = 14,4 \text{ let} \quad 4.2.2$$

Dle výsledků z tabulky (4.2.2) je zřejmé, že zbylé dvě elektrárny nemůžou návratností investice konkurovat výše vypočtené elektrárně. U druhého typu elektrárny je doba návratnosti přibližně 24,4 let. Dále je třeba zmínit, že hodnota 14,4 let je velmi idealizovaná, jelikož se počítá s tím, že elektrárna bude v provozu neustále a za velmi příznivých podmínek, nicméně je tento typ elektrárny z hlediska ekonomického i energetického nejvýhodnější.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se věnoval popisu přeměny kinetické energie větru na energii elektrickou prostřednictvím větrných elektráren. Dále jsem provedl rozdělení větrných elektráren podle principu, na němž pracují, podle jejich osy otáčení, výkonu a také podle typu generátoru.

Jedním z nejdůležitějších bodů práce bylo zhodnocení výhod a nevýhod větrných elektráren. Zde jako největší nevýhodu uvádím negativní vliv větrných elektráren na přenosovou síť a nestabilitu dodávek energie a to z důvodu nestálosti povětrnostních podmínek. Tato nevýhoda je zásadní a je nejvíce omezujícím vlivem pro plošné rozšíření větrných elektráren jako významného energetického zdroje. Z dalších nevýhod bych vyzdvihl jejich hlučnost, která neumožňuje instalaci větrných elektráren v bezprostřední blízkosti lidských sídel, případně vliv na krajinný ráz, který je ovšem značně subjektivní záležitostí.

Významnou výhodou větrných elektráren (a dalších alternativních zdrojů energie obecně) je jejich nezávislost na dodávkách ubývajících fosilních paliv, která jsou v současné době používána jako primární zdroj elektrické a tepelné energie pro lidské potřeby. Výhodou je také možnost jejich instalace v místech nevybavených dostatečnou energetickou infrastrukturou (ostrovní provoz).

Hlavním bodem mé práce bylo navržení větrné elektrárny pro rekreační objekt určený k celoročnímu užívání. Vzhledem k větrné mapě České republiky jsem pro umístění objektu zvolil lokalitu Krušných hor v oblasti hranic s Německem, kde je roční průměrná rychlost větru na úrovni přibližně $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tato rychlost větru již umožňuje volit vítr jako energetický zdroj schopný pokrýt energetické potřeby kalkulovaného objektu.

Pro objekt jsem shrnul užívané spotřebiče včetně jejich příkonu a odhadované denní doby užívání. Následně jsem provedl výpočty a zvolil vhodný typ rotoru. Z výsledků je patrné, že je možné i celoročně užívaný objekt energeticky uspokojit prostřednictvím větrné elektrárny. Vše je samozřejmě kalkulováno na průměrnou rychlost větru, který je jako přírodní živel značně nestálý, proto je nutné zajistit pro objekt náhradní energetický zdroj pro případ bezvětří, či významného poklesu rychlosti větru. Jednou z možností jsou akumulátorové články, které jsou nabíjeny v případě přebytku výkonu a dodávají energii v případě nedostatečné rychlosti větru nebo poruchy elektrárny.

Posledním bodem práce bylo zhodnocení instalace větrné elektrárny z energetického a ekonomického hlediska. Pro ekonomické zhodnocení jsem zvolil jako parametr dobu návratnosti investice. Při započtení dodávek přebytečné elektrické energie zpět do rozvodné

sítě je prostá doba návratnosti téměř 14,5 roku a to pouze za předpokladu bezporuchovosti elektrárny, příznivých povětrnostních podmínek a konstantní výkupní ceny elektrické energie z větrných elektráren.

Uvažovaná větrná elektrárna může být s úspěchem použita jako hlavní energetický zdroj pro objekt, nicméně nelze se na ni zcela spolehnout. Je nutné zajistit vykrytí výpadků spojených s nestabilitou dodávek instalací akumulátorů, diesel agregátu nebo připojením do rozvodné sítě umožňuje-li to stávající energetická infrastruktura.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RYCHETNÍK, V., JANOUŠEK, J., PAVELKA, J. *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd., Vydavatelství ČVUT, Praha 1997, 199 stran, ISBN 80-01-01563-7
- [2] VOJÁČEK, Antonín. Automatizace. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006102901>
- [3] HALLENGA, Uwe. *Malá větrná elektrárna: návod ke stavbě s konstrukčními výkresy*. 2. přepr. a rozš. vyd. Ostrava,: HEL, 2006, 95 s. ISBN 80-861-6727-5.
- [4] CSVE. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/velikost-vetrne-elektrarny-a-jeji-vyvoj/110>
- [5] EkoWATT: Větrná energie. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.ekowatt.cz/uspory/vetrna-energie.shtml>
- [6] Skupina ČEZ. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/04/prednosti_3.htm
- [7] FOLTÝN, Petr. *Návrh malé větrné elektrárny se Savoniovým rotorem: Design of small Wind Turbine System With Savonius Rotor*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]
- [8] Skupina ČEZ: Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice. In: [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/obnovitelne_zdoje_energie_a_moznost_i_jejich_vyuziti_pro_cr.pdf. In: [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:
- [9] Bonifarita ws: Větrné elektrárny. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.bonifarita.cz/obnovitelne-zdroje-energie.html>
- [10] CSVE. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/Generator-vetrne-elektrarny/329>
- [11] Pro-větrníky.cz: Žádný strach z infrazvuku. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.pro-vetrniky.cz/cs/fakta-o-vetrnych-elektrarnach/fakta-o-infrazvuku.html>
- [12] Hnutí DUHA: Větrné elektrárny: mýty a fakta. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://www.calla.cz/data/energetika/vitr/vitr.pdf>
- [13] LAPČÍK, Vladimír. *Posuzování vlivů větrných elektráren na životní prostředí v České republice*. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2008/n3/15lapcik.pdf>

- [14] ŠKORPÍK, Jiří. *Využití energie větru*. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z:
<http://www.transformacni-technologie.cz/vyuziti-energie-vetru.html>
- [15] Solar Economic. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
<http://www.solareconomic.cz/solarec/eshop/18-1-Vetrne-elektrarny/0/5/360-Mala-vetrna-elektrarna-Black-Wind-Generator-600-12-24-V>
- [16] Ohrej.se: Whisper 100. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
<http://www.ohrej.se/whisper-100-eanPH102463-skupTA00000101.php>

Seznam příloh

- Příloha 1 Četnost rychlostí větru pro průměrnou rychlost $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Příloha 2 Teoreticky předpokládaná výroba elektrické energie za 1 rok
- Příloha 3 Výsledné hodnoty návrhu větrné elektrárny
- Příloha 4 Výsledné hodnoty pro větrnou elektrárnu Black Wind Generator 600
- Příloha 5 Výsledné hodnoty pro větrnou elektrárnu Whisper 100
- Příloha 6 Stupnice síly větru podle Beauforta [3]
- Příloha 7 Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR v Kč / kWh [4]
- Příloha 8 Instalovaný výkon a výroba energie ve větrných elektrárnách v ČR v letech 2004 – 2013
- Příloha 9 Výkonová charakteristika větrné elektrárny s výkonem 500 kW [9]

Přílohy

Příloha 1 - Četnost rychlostí větru pro průměrnou rychlost 7 m.s^{-1}

Měřené rychlosti větru [m.s^{-1}]	Průměrná rychlost větru [m.s^{-1}]
	7
Do 0,5	1,48
1	5,06
2	8,55
3	9,9
4	11
5	9,8
6	8,9
7	8
8	6,85
9	5,9
10	5,5
11	4
12	3,2
13	2,6
14	2,16
15	1,7
16	1,42
17	1,14
18	0,85
19	0,66
20	0,41
21	0,31
22	0,25
23	0,19
24	0,17
25	0,11
26	0,07
27	0,04

Příloha 2 - Teoreticky předpokládaná výroba elektrické energie za 1 rok

Měřené rychlosti větru [m.s ⁻¹]	Průměrná rychlost větru [m.s ⁻¹]	P _T [W.m ⁻²]	E [W.m ⁻²]
	7		
Do 0,5	1,48	-	-
1	5,06	-	-
2	8,55	-	-
3	9,9	-	-
4	11	38,40	422,40
5	9,8	75,00	735,00
6	8,9	129,60	1153,44
7	8	205,80	1646,40
8	6,85	307,20	2104,32
9	5,9	437,40	2580,66
10	5,5	600,00	3300,00
11	4	798,60	3194,40
12	3,2	1036,80	3317,76
13	2,6	1318,20	3427,32
14	2,16	1646,40	3556,22
15	1,7	2025,00	3442,50
16	1,42	2457,60	3489,79
17	1,14	2947,80	3360,49
18	0,85	3499,20	2974,32
19	0,66	4115,40	2716,16
20	0,41	4800,00	1968,00
21	0,31	5556,60	1722,55
22	0,25	6388,80	1597,20
23	0,19	7300,20	1387,04
24	0,17	8294,40	1410,05
25	0,11	9375,00	1031,25
26	0,07	10545,60	738,19
27	0,04	11809,80	472,39
		ΣE [W.m⁻²]	51747,86
		E_{TR} [kWh.m⁻²]	4533,11

Příloha 3 - Výsledné hodnoty návrhu větrné elektrárny

Měřené rychlosti větru [m.s ⁻¹]	Průměrná rychlost větru [m.s ⁻¹]	P [W]	E [W]
	7		
Do 0,5	1,48	-	-
1	5,06	-	-
2	8,55	-	-
3	9,9	-	-
4	11	30,14	331,58
5	9,8	58,88	576,98
6	8,9	101,74	905,45
7	8	161,55	1292,42
8	6,85	241,15	1651,89
9	5,9	343,36	2025,82
10	5,5	471,00	2590,50
11	4	626,90	2507,60
12	3,2	813,89	2604,44
13	2,6	1034,79	2690,45
14	2,16	1292,42	2791,64
15	1,7	1589,63	2702,36
16	1,42	1929,22	2739,49
17	1,14	2314,02	2637,99
18	0,85	2746,87	2334,84
19	0,66	3230,59	2132,19
20	0,41	3768,00	1544,88
21	0,31	4361,93	1352,20
22	0,25	5015,21	1253,80
23	0,19	5730,66	1088,82
24	0,17	6511,10	1106,89
25	0,11	7359,38	809,53
26	0,07	8278,30	579,48
27	0,04	9270,69	370,83
		ΣE [W]	40622,07
		E_R [kWh]	3558,49

Příloha 4 – Výsledné hodnoty pro větrnou elektrárnu Black Wind Generator 600

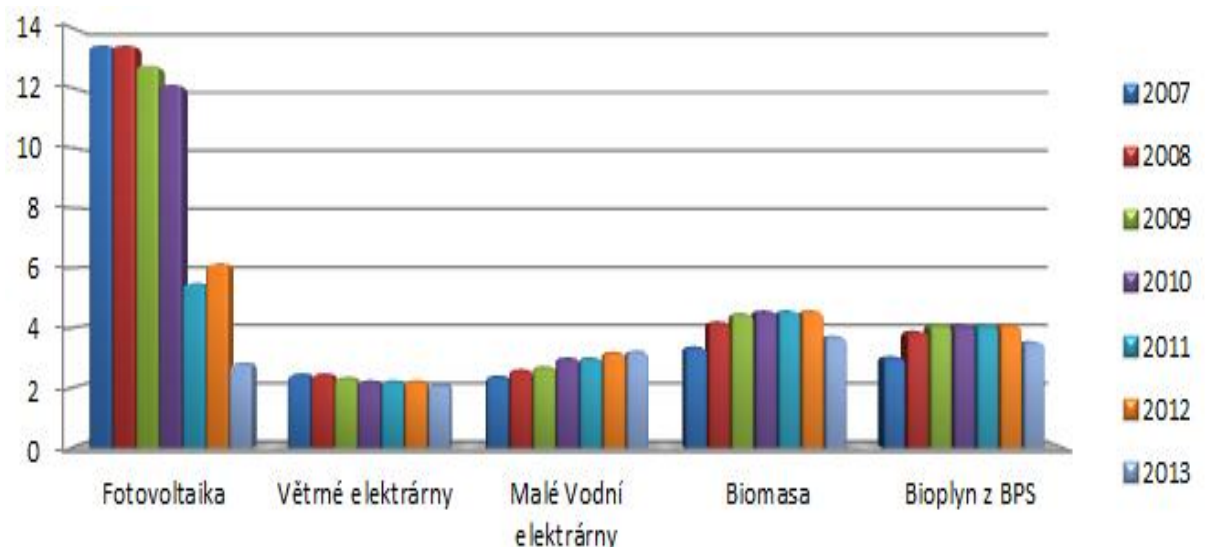
Měřené rychlosti větru [m.s ⁻¹]	Průměrná rychlost větru [m.s ⁻¹]	P [W]	E [W]
	7		
Do 0,5	1,48	-	-
1	5,06	-	-
2	8,55	-	-
3	9,9	-	-
4	11	19,29	212,21
5	9,8	37,68	369,26
6	8,9	65,11	579,49
7	8	103,39	827,15
8	6,85	154,34	1057,21
9	5,9	219,75	1296,52
10	5,5	301,44	1657,92
11	4	401,22	1604,87
12	3,2	520,89	1666,84
13	2,6	662,26	1721,89
14	2,16	827,15	1786,65
15	1,7	1017,36	1729,51
16	1,42	1234,70	1753,27
17	1,14	1480,97	1688,31
18	0,85	1758,00	1494,30
19	0,66	2067,58	1364,60
20	0,41	2411,52	988,72
21	0,31	2791,64	865,41
22	0,25	3209,73	802,43
23	0,19	3667,62	696,85
24	0,17	4167,11	708,41
25	0,11	4710,00	518,10
26	0,07	5298,11	370,87
27	0,04	5933,24	237,33
		ΣE [W]	25998,12
		E_R [kWh]	2277,44

Příloha 5 – Výsledné hodnoty pro větrnou elektrárnu Whisper 100

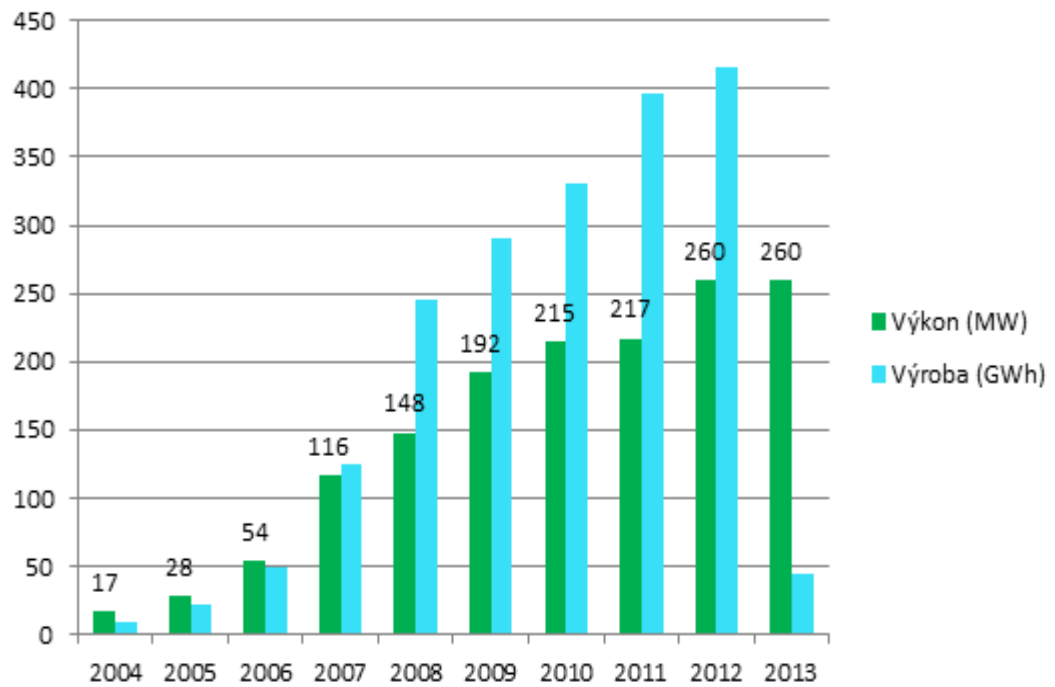
Měřené rychlosti větru [m.s ⁻¹]	Průměrná rychlost větru [m.s ⁻¹]	P [W]	E [W]
	7		
Do 0,5	1,48	-	-
1	5,06	-	-
2	8,55	-	-
3	9,9	-	-
4	11	33,23	365,57
5	9,8	64,91	636,11
6	8,9	112,16	998,26
7	8	178,11	1424,90
8	6,85	265,87	1821,21
9	5,9	378,55	2233,46
10	5,5	519,28	2856,03
11	4	691,16	2764,63
12	3,2	897,31	2871,40
13	2,6	1140,85	2966,27
14	2,16	1424,90	3077,78
15	1,7	1752,56	2979,35
16	1,42	2126,96	3020,28
17	1,14	2551,21	2908,38
18	0,85	3028,43	2574,16
19	0,66	3561,72	2350,74
20	0,41	4154,22	1703,23
21	0,31	4809,03	1490,80
22	0,25	5529,27	1382,32
23	0,19	6318,05	1200,43
24	0,17	7178,49	1220,34
25	0,11	8113,71	892,51
26	0,07	9126,82	638,88
27	0,04	10220,94	408,84
		ΣE [W]	44785,84
		E_R [kWh]	3923,24

Příloha 6 – Stupnice síly větru podle Beauforta [3]

Síla větru	Rychlost v m/s	Označení	Viditelné působení
0	0 – 0,2	bezvětrí	Kouř stoupá kolmo vzhůru
1	0,3 – 1,5	vánek	Pohyb kouře ukazuje směr větru
2	1,6 – 3,3	slabý vítr	Listí stromů šelestí
2	3,4 – 5,4	mírný vítr	Listy a větvičky stromů v trvalém pohybu
4	5,5 – 7,9	dostí čerstvý vítr	Zdvihá se prach a kousky papíru
5	8,0 – 10,7	čerstvý vítr	Malé stromy se začínají ohýbat
6	10,8 – 13,8	silný vítr	Vítr pohybuje silnými větvemi
7	13,9 – 17,1	prudký vítr	Vítr pohybuje celými stromy
8	17,2 – 20,7	bouřlivý vítr	Vítr láme větve
9	20,8 – 24,4	vichřice	Menší škody na stavbách
10	24,5 – 28,4	silná vichřice	Vyvrací stromy
11	28,5 – 32,6	mohutná vichřice	Ničivé účinky velkých rozměrů
12	32,7 – 36,9	orkán	Zpustošení obrovského rozsahu

**Příloha 7 – Srovnání výkupních cen elektrické energie z obnovitelných zdrojů v ČR
v Kč / kWh [4]**

Příloha 8 - Instalovaný výkon a výroba energie ve větrných elektrárnách v ČR v letech 2004 – 2013



Příloha 9 – Výkonová charakteristika větrné elektrárny s výkonem 500 kW [9]

