

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERECI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

**LABORATOŘ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ, VĚTRNÁ
ENERGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ANOTACE

Jméno autora:	Richard Slepíčka
Název práce:	Laboratoř obnovitelných zdrojů, větrná energie
Školní rok vyhotovení:	2012/2013
Obor:	2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
Vedoucí Diplomové práce:	Ing. Petr Novotný CSc.
Zaměření:	Tepelná technika
Využití:	Obnovitelné zdroje energie, energie větru

Klíčová slova: Větrná energie

Počet stran: 77

Počet obrázků: 45

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá větrnou energií, popisuje obecně jednotlivé druhy soustav, jejich parametry a vzájemné propojení s ohledem na optimální provoz systému jako celku. Zabývá se hlavně konkrétním návrhem laboratoře větrné elektrárny v areálu školy.

Annotation:

The diploma thesis describes wind power, separate components of systems and their parameters are mentioned there. The interconnection of components is proposed with regard to optimal operation of whole system. It concerns mainly concrete solution of wind power laboratory on university area.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Laboratoř obnovitelných zdrojů, větrná energie“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Novotného CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu na konci mé diplomové práce.

V Liberci dne 9. 12. 2013

Richard Slepíčka

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl zejména poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Novotnému CSc. za jeho podporu a mnoho cenných rad při vedení diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem zaměstnancům školy, své rodině a přátelům za podporu při studiu.

OBSAH

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERECI.....	1
FAKULTA STROJNÍ.....	1
KATEDRA ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ.....	1
DIPLOMOVÁ PRÁCE	1
PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ.....	4
1 Úvod větrné energie.....	10
1.1 Historie větrné energie.....	10
1.2 Vznik větru.....	11
1.2.1 Vhodnost lokality.....	13
1.3 Větrné motory.....	17
1.3.1 Větrné motory pracující na odporovém principu.....	17
1.3.2 Větrné motory pracující na vztakovém principu	17
1.3.3 Pomaloběžné.....	18
1.3.4 Rychloběžné větrné motory	18
2 Výkon větru - teorie.....	18
2.1 Výpočet reálného výkonu.....	19
2.2 Rychloběžnost, součinitel výkonu.....	20
2.2.1 Definice součinitele výkonnosti	20
2.3 Otáčky rotoru.....	21
2.4 Účinnost větrných turbín.....	21
2.5 Využitelnost energie větru a odvození Betzova zákona.....	21
2.6 Výpočet výroby elektřiny.....	24
2.7 Výkonová křivka větrných elektráren.....	26
2.8 Další okolnosti ovlivňující výrobu energie.....	28
3 Typy větrných elektráren	28
3.1 Lopatkové kolo.....	29

3.2	Americká vícelopatková turbína	29
3.3	Holandský mlýn	29
3.4	Savoniův rotor	30
3.5	Darrieův rotor	32
3.6	Rychloběžná vrtule	33
3.7	Simeti	33
4	Blade Tip Power Systém.....	33
5	Větrné motory	34
5.1	Větrné motory pracující na odporovém principu	34
5.2	Větrné motory pracující na vztakovém principu	35
5.3	Pomaloběžné	35
5.4	Rychloběžné větrné motory	35
5.5	Orientace větrných motorů	35
6	Beaufortova stupnice síly větru	36
7	Větrné elektrárny	37
7.1	Možnosti využití větrné elektrárny	38
7.2	Základní rozdělení větrných elektráren	38
7.3	Mikroelektrárna	38
7.4	Rozdělení větrných elektráren podle velikosti	39
7.4.1	Malé elektrárny	40
7.4.2	Středně velké elektrárny	41
7.4.3	Velké elektrárny.....	41
8	Konstrukce velké větrné elektrárny	41
8.1	Rotor	41
8.2	Převodovka	42
8.3	Spojka	42
8.4	Generátor	43
8.4.1	Asynchronní generátory.....	43

8.4.2	Synchronní generátory	43
8.5	Systém natáčení strojovny a listů u elektráren s rychloběžnou vrtulí	43
8.6	Brzdňý systém	43
9	Řízení větrné elektrárny	44
9.1	Řídicí systém	44
9.2	Bezpečnostní systém	44
9.3	Regulace	45
9.3.1	Regulace Pasive stall	45
9.3.2	Regulace Pitch – natočení listů	45
9.3.3	Regulace active stall	45
9.4	Hlavní části strojovny rotoru velké elektrárny s rychloběžnou vrtulí	46
9.5	Stožáry větrných elektráren	48
9.5.1	Vliv větrné elektrárny a životní prostředí	49
9.5.2	Narušení vzhledu krajiny	49
9.5.3	Hluk	50
9.5.4	Stroboskopický efekt	52
9.5.5	Rušení zvíře a vliv na ptactvo	52
10	Návrh rotoru	53
10.1	Lopatky rotoru - tvar	53
10.2	Lopatky rotoru - výběr profilu	54
10.3	Alternátor s permanentními magnety	55
10.4	Zabezpečení proti nepřízní počasí	55
10.5	Vytočení boční deskou	55
10.6	Využití pružiny	55
10.7	Regulace elektronická	56
10.8	Stožár	56
11	Konstrukční řešení	57
11.1	Rotorová část	57
11.2	Nosná část	57
11.3	Ukázka návrhu Savoniova motoru	58

11.3.1	Uložení rotoru	58
11.3.2	Stožár	59
11.3.3	Výkon.....	59
11.4	Výpočet rotoru	59
12	Výpočet.....	60
13	Návrh laboratoře	61
13.1	Návrh umístění rotoru větrné elektrárny a anemometru	61
13.2	Elektro část	62
13.2.1	Měření výroby elektrické energie	63
13.2.2	Předpoklad elektro veličin a dopočet.....	64
13.3	Jednotlivé komponenty laboratoře a jejich popis	66
13.3.1	Měřicí karta.....	67
13.3.2	Měření intenzity větru.....	68
13.4	Výstup z počítače	69
13.5	Výpočet návratnosti investice	69
13.6	Rozpočet finančních nákladů	70
13.7	Technické řešení upevnění elektrárny	71
ZÁVĚR		72
POUŽITÁ LITERATURA.....		74
SEZNAM PŘÍLOH.....		78

Vymezení cílů diplomové práce s doporučenými metodami vypracování

Tato diplomová práce seznamuje s energií větru v návaznosti se základními typy větrných motorů: Savoniův motor, Americká turbína, Holandský mlýn, rychloběžná vrtule, Darrieova turbína, Blade Tip Power System. Teoretické výpočty těchto motorů a jejich účinnost. Zabývá se také odhadem výroby elektrické energie v dané lokalitě. Popisuje samotné části, z kterých se skládají větrné elektrárny od mikro až k velkým větrným elektrárnám a uvádí vliv na ekologii.

Hlavním cílem autora této práce je navrhnout v praktické části technické řešení laboratoře, odhad nákladů, a provádí základní výpočty pro fungování budoucí laboratoře na budově ústavu.

1 Úvod větrné energie

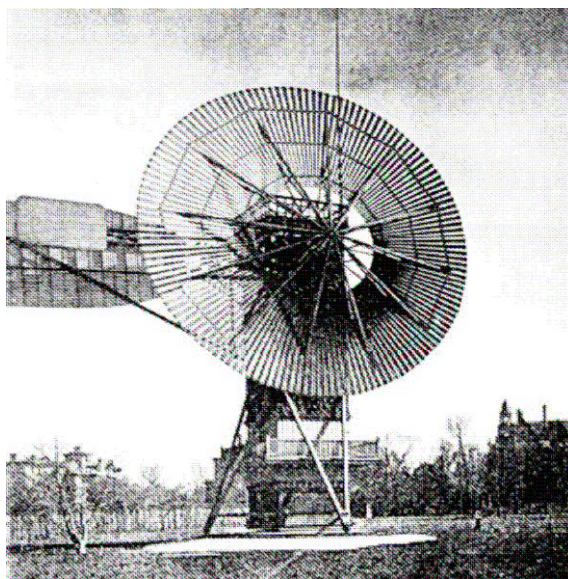
Větrná energie je označení pro oblast technologie zabývající se využitím větru jako zdroje energie. Nejobvyklejším využitím jsou dnes větrné elektrárny, které využívají síly větru k roztočení větrné turbíny, ke které je připojen elektrický generátor. Teoreticky získatelný výkon je přímo úměrný třetí mocnině rychlosti proudící vzdušné hmoty. Protože rychlost větru značně kolísá, nedosahují větrné elektrárny po většinu doby nominálních hodnot generovaného výkonu.

1.1 Historie větrné energie

Je tomu již tisíce let kdy lidé využívali nevyčerpatelnou větrnou energii. První zmínky o využívání větrné energie pocházejí ze staré Číny dlouho před naším letopočtem. Objevují se také kresby staré více než 5000 let znázorňující plavidla s plachtou na Nilu. Nejstarší zmínka o větrném motoru s vodorovnou osou rotace je z 3. století př. n. l. sestavená v Egyptě.

Ve středověku se větrné motory, převážně v podobě větrných mlýnů, rozšířily na Středním východě a ve 13. století se objevují i v Evropě. Na území ČR je doložen r. 1277 větrný mlýn na zahradě Strahovského kláštera v Praze. Ve 14. století zaujalo vedoucí pozici ve využívání větrných motorů Holandsko za účelem odvodňování mokřin a jezírek. Větrná zařízení na výrobu elektrické energie jsou známa od konce 18. století, jejich vývoji předcházely větrné mlýny a větrná čerpadla.

První větrnou elektrárnu na světě zhotovil Američan Charles F. Brush (viz obr. 1), který na přelomu let 1887 –1888 sestavil první automatickou větrnou turbínu, napojenou na generátor elektrického proudu[1]. Rotor elektrárny měl průměr 17m a skládal se ze 144 paprskovitě uspořádaných lopatek z cedrového dřeva. Elektrárna byla technologicky i výkonem dokonalejší než elektrárna v dánském Askově postavená o tři roky později.

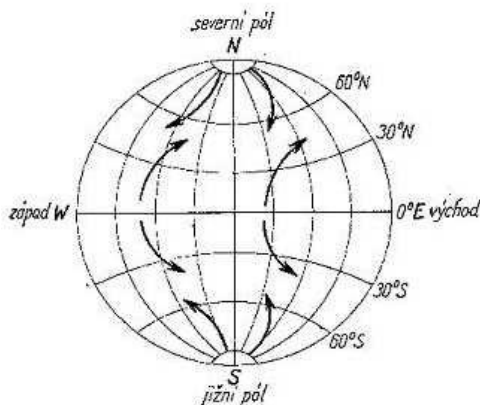


obr. 1 - Větrná elektrárna zkonstruovaná Ch. F. Brushem [1].

1.2 Vznik větru

Větrná energie vzniká jako důsledek dopadající sluneční energie. Vítr je proudění vzduchu, které vzniká tlakovými rozdíly mezi různě zahřátými oblastmi vzduchu v zemské atmosféře. Pokud není uvedeno jinak, rozumí se (i v odborné literatuře) pod pojmem vítr pouze horizontální složka proudění vzduchu.

Pohyb vzduchu je podmíněn tlakem vzduchu a rozdíly v tlaku jsou dány různými tepelnými kapacitami zemského povrchu. Při nepohybující se Zemi by vzduch proudil po spádnicích, tedy kolmo na izobary ve směru nižšího tlaku. Protože se Země otáčí viz konstantní úhlovou rychlostí (obr. 2), začínají působit další síly na směr proudění vzduchu.



obr. 2 - Stáčení větru vlivem zemské rotace zdroj obrázku [4].

První je tzv. Coriolisova síla, která způsobí, že částice vzduchu se na severní polokouli vítr stáčí vpravo, na jižní zase vlevo. Účinek síly se zvyšuje úměrně s rychlostí přemísťujícího se vzduchu. Dále závisí na zeměpisné šířce. Při stejné rychlosti nejsilněji působí na pólech a na rovníku klesá k nule. V blízkosti rovníku se jeho směr mění vlivem rotace.

Dále se uplatňuje odstředivá síla, které odchyľuje pohybující se částice ven od středu křivky. Tento účinek síly je velký při velkých zakřiveních drah pohybu. Při pohybu vzduchu u zemského povrchu vzniká tření, které působí proti pohybu předcházejících sil. Směr pohybu částic do výše 1000 m není rovnoběžný s izobarami, ale odchyľuje se na stranu nízkého tlaku vzduchu. Tímto mechanismem se vyrovnávají rozdíly v tlaku vzduchu.

Na proudění vzduchu má vliv střídání teplot mezi pevninou, horami a údolími, zalesněnými a holými plochami. Směrem k rovníku proudí pasáty a v horních vrstvách zase opačným směrem antipasáty. V jihovýchodní Asii dochází k půlročnímu střídání monzunů vanoucích od moře s antimonzunou, které vanou opačným směrem. Kromě uvedených faktorů na pohyb atmosféry má vliv i přitažlivost Měsíce a Slunce. Hranice využitelného vztaku vzduchu končí ve výškách 60 - 80 km (tzv. von Karmanova linie). Nad ní je možný jen let po balistické dráze. Ve výškách 120 - 200 km prakticky zaniká odpor vzduchu. Zde také leží aerodynamická hranice mezi atmosférou a kosmickým prostorem. Mezinárodní astronautická federace ji stanovila ve výši 100 km.

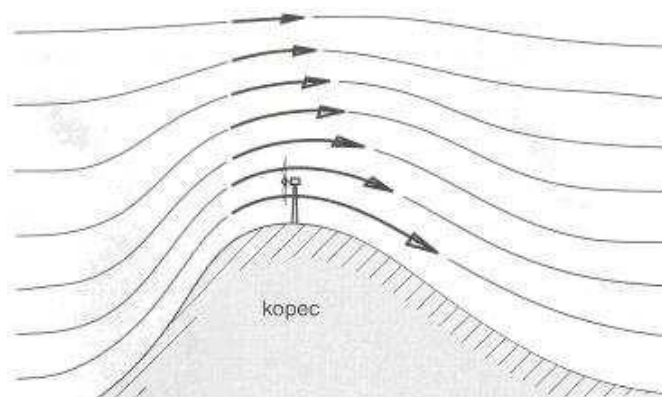
Na ukázkou měnících se vlastností vzduchu (viz obr. 3).

Výška (m)	Teplota [t] (°C)	Tlak (mm Hg) při [t°C]	Tlak (kPa)	Hustota (kg/m³)
0	15	760	101,31	1,226
500	11,8	716	95,44	1,168
1 000	8,5	674	89,86	1,112
2 000	2,0	596	79,48	1,007
3 000	-4,5	526	70,10	0,910
5 000	-15,5	405	53,99	0,737
8 000	-37,0	267	35,58	0,525
11 000	-56,5	170	22,60	0,264

obr. 3 – Tabulka vlastností vzduchu v závislosti na výšce [3].

1.2.1 Vhodnost lokality

Hory, kopce, stromy, keře, a budovy brání stejnoměrnému proudění a brzdí jej. Běžně roste rychlost větru s výškou. U kopců nebo horských hřebenů je rychlost větru těsně nad vrcholem vyšší než ve větších výškách (viz. obr. 4).



obr. 4 Urychlení větru na horském hřebenu [12].

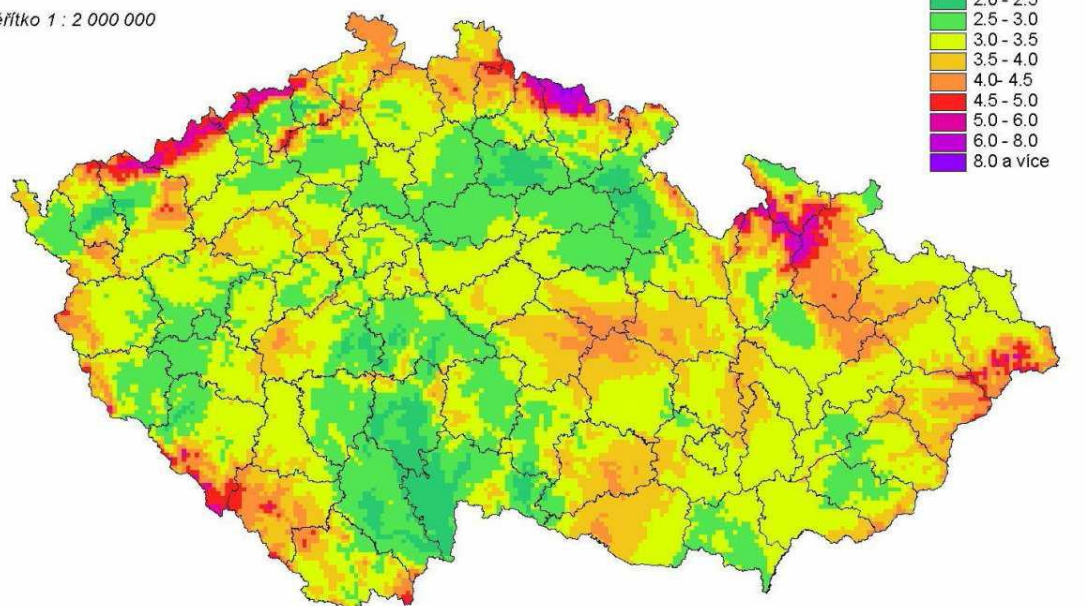
Zatímco vyšší polohy stanoviště často příznivě ovlivňují použitelnou rychlost větru, vytvářejí stromy a budovy v přízemních vrstvách vzduchu poryvy a víry, které jsou pro využití větrné energie spíše nežádoucí [4]. Na pevnině převládají západní větry a nejvhodnější lokality pro umístění větrných elektráren se nacházejí vždy na západním pobřeží kontinentů, kde jsou větry stálé a silné. Dále do vnitrozemí síla větru slábne, jeho směr se mění podle terénu a jeho využitelný potenciál klesá.

Jako první zdroj informací k výběru lokality se užívá větrné mapy, která udává průměrnou rychlost větru v 10 metrech. V každém případě je třeba ověřit, zda se jedná o lokalitu dostatečně větrnou. U malých elektráren je možno se spolehnout na odborný odhad, tj. z nadmořské výšky, charakteru krajiny (otevřenosti vzhledem k převládajícím větrům) i místních jevů (např. tvaru stromů) usoudit na větrnost dané lokality. Při tom je vhodné si vyžádat odborné stanovisko. Je také možno získat výpis z větrné mapy ČR, která byla vytvořena Ústavem fyziky atmosféry (ÚFA) Akademie věd ČR interpolací údajů meteorologických stanic a z numerického modelu proudění nad naším územím (viz obr. 5).

Větrná mapa ČR

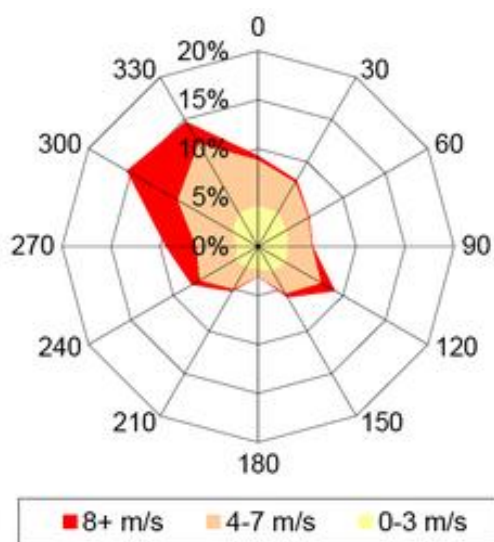
průměrná rychlost větru v 10 m

měřítko 1 : 2 000 000



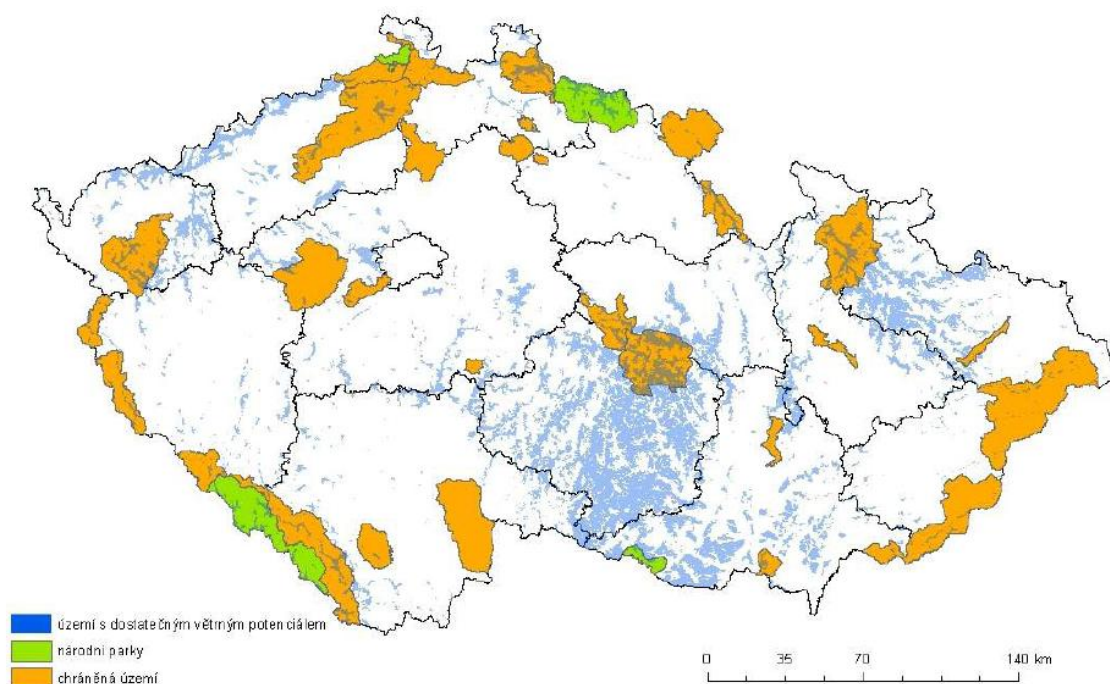
obr. 5 - Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren [6].

Ukázka směru proudění větru růžice (viz obr. 6).



obr. 6 Ukázka větrné růžice

Při výběru lokality pro větrnou elektrárnu je také nutné přihlédnout k chráněným územím a národním parkům (viz mapa na obr. 5).



obr. 7 - Území s dostatečným větrným potenciálem vs. chráněná území a národní parky [7].

Pro větší projekty (pro elektrárny napojené na elektrovodnou síť) je nezbytné měření rychlosti větru přímo v dané lokalitě registračním anemometrem. Měření by mělo být aspoň šestiměsíční, nejlépe však roční. Rychlost větru se měří obvykle ve výšce 10 m, pro větší výšky se přepočítává podle vztahu:

$$\frac{v_h}{v_0} = \frac{(h)^n}{(h_0)^n}$$

v_0 - naměřená rychlost větru ve výšce h_0 (m/s)

v_h - vypočítaná rychlost větru (m/s)

h_0 - výška, ve které se provádí měření (m)

h - výška umístění rotoru (m)

n - exponent závisící na drsnosti povrchu (obvykle = 0,1)

U velkých projektů se provádí měření přímo v ose rotoru, případně na několika vybraných místech.

Výsledky měření se zpracovávají do sloupcových grafů, kde na vodorovné ose jsou vynášeny měřené rychlosti větru a na svislé ose jejich četnost v hodinách nebo v

procentech za rok. Ze sloupcového grafu se vyhodnocuje střední rychlost větru zpravidla během jednoho roku. Naměřená roční průměrná rychlost větru by měla být vyšší než 4,8 m/s. Nutno ověřit, zda projekt větrné elektrárny, resp. uvažovaný objem výroby elektřiny opravdu vychází z provedených měření rychlosti větru v dané lokalitě [10].

Pro elektrárny odevzdávající elektrickou energii do sítě by se měly uvážit následující body:

- optimální umístění elektrárny vzhledem k vzdálenosti elektrického vedení, případně vzhledem k objektu, který bude elektřinu odebírat,
- kapacita trafostanice,
- umístění lokality (stavba v CHKO velmi komplikuje povolovací řízení), přístupnost pro stavební mechanizmy,
- dostatečná vzdálenost od obydlí z hlediska hlučnosti,
- vliv větrné elektrárny na šíření radiového a televizního signálu a na ptactvo,
- estetické hledisko (vzhled krajiny).

Větrné poměry (větrné klima) jsou statistickým souhrnem větrných podmínek v určitém místě za klimatologicky dostatečně dlouhé období nejlépe více než 1 rok. Zpravidla se vztahují k ose rotoru větrné elektrárny.

Větrné podmínky ve výškách instalace malých větrných elektráren jsou obecně horší než ve výškách velkých větrných elektráren. Tato skutečnost vyplývá ze základních vlastností atmosférického proudění, které je poháněno silami vznikajícími v celém objemu atmosféry, zatímco nejintenzivnější brzdící silou je tření o zemský povrch. Všeobecné větrné poměry lokality mohou být ve výšce malých větrných elektráren pozměněny vlivem okolních objektů. Tento vliv může být teoreticky i pozitivní v důsledku zesílení proudění při obtékání překážek, ve většině případů se však bude jednat o dopady negativní.

Může se jednat o stínění nedalekými objekty, jako jsou například stromy nebo budovy, což povede ke snížení rychlosti větru. Pokud se větrná elektrárna nachází pod úrovní okolních překážek a tyto překážky se nacházejí ve směru převládajícího proudění, potom může být toto zeslabení větru zásadní a znehodnotit smysl výstavby malé větrné elektrárny.

Další okolností je změna vlastností proudění blízkými překážkami. Jedná se například o zvýšení turbulence, výskyt stříhu větru (tj. změny vektoru proudění v rámci

rozsahu větrné turbíny) nebo proudění se šikmou složkou (odkloněnou od horizontální roviny). Ve všech těchto případech dojde ke snížení výkonu větrné elektrárny pod úroveň její výkonové křivky a mohou nepříznivé vlastnosti proudění negativně ovlivnit životnost tohoto zařízení.

Je vhodné malou větrnou elektrárnu umístit na pokud možno vyvýšené místo na otevřeném prostranství či vysoko nad okolní překážky a do největší výšky nad zemí. U nejmenších typů malých větrných elektráren může být výhodné umístění elektrárny na střeše budovy. Zvláště v případě výškových budov, kde lze očekávat vyšší rychlosti větru, nebo na jiném objektu.

1.3 Větrné motory

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Jejich princip spočívá ve zpomalení proudu vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou. Tímto berou část jeho energie. Větrné motory můžeme rozdělit podle aerodynamického principu na motory vztahové a odporové. Dále je možné rozdělit větrné motory na pomaloběžné a rychloběžné. Rychloběžnost se udává jako poměr mezi rychlostí konce lopatky a rychlostí větru.

1.3.1 Větrné motory pracující na odporovém principu

Motory pracující na odporovém principu patří mezi nejstarší. Plocha nastavená proti směru větru mu klade aerodynamický odpor, tímto proud vzduchu zpomaluje, je na ní přenášena síla, která je přetvářena zpravidla na rotační pohyb. Motory na tomto principu mohou mít svislou i vodorovnou osu rotace a různé způsoby konstrukce.

1.3.2 Větrné motory pracující na vztahovém principu

Vítr obtéká lopatku, která má tvar podobný letecké vrtuli, kde vzniká vztahová síla, která roztáčí rotor. Motory pracující na vztahovém principu jsou nejrozšířenější s vodorovnou osou rotace.

1.3.3 Pomaloběžné

Maximální momentový součinitel a tedy i moment síly při stojícím rotoru zajišťoval snadný rozběh i při malých rychlostech větru (2 až 3 m.s-1) a při větších pasivních odporech. Rotor je tvořen velkým počtem jednoduše tvarovaných lopatek.

1.3.4 Rychloběžné větrné motory

Tyto motory mají rotor konstruován nejčastěji třílistou vrtulí, s pevnými nebo natáčecími listy. Výhodou těchto rychloběžných větrných motorů je jejich relativně malá hmotnost. Nevýhodou je jejich špatný rozběh při malých rychlostech větru.

2 Výkon větru - teorie

Výkon větru stoupá s jeho rychlostí podle třetí mocniny. Dvojnásobná rychlost větru znamená osminásobný výkon [8]. Pohybuje-li se objem V vzduchu rychlostí v , je jeho kinetická energie rovna:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 [W]$$

E_k - kinetická energie [W]

ρ - hustota vzduchu - dosazováno $\rho = 1.28 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

V - objem vzduchu [m^3]

v^2 - rychlost větru [m/s]

Postavíme-li proudícímu vzduchu kolmo do cesty plochu S , (např. plochu, kterou opisuje rotor vrtule) projde touto plochou za čas t objem vzduchu:

$$V = S \cdot v \cdot t \cdot v^2$$

S - plocha rotoru, u turbíny s vodorovnou osou otáčení je to plocha kruhu $S = \pi \cdot r^2 [\text{m}^2]$

t - čas (s)

Pokud bychom dokázali teoreticky využít všechnu kinetickou energii vzduchu, byl by výkon větru proudícího plochou S dán vztahem:

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

2.1 Výpočet reálného výkonu

Reálný výkon vypočítáme, pokud teoretický vynásobíme účinností:

$$P = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \text{ (W)}$$

P - výkon vrtule [W]

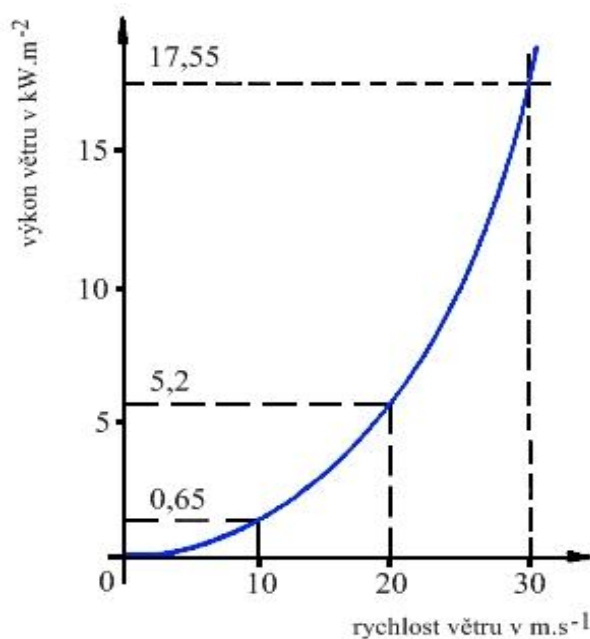
c_p - součinitel výkonu (účinnost) [0 - 0.5]

S - plocha rotoru, u turbíny s vodorovnou osou otáčení je to plocha kruhu $S = \pi \cdot r^2$ [m²]

ρ - hustota vzduchu - dosazováno $\rho = 1.28$ [kg·m⁻³]

v - rychlost větru [m/s]

Výkon větru stoupá s jeho rychlostí podle třetí mocniny. Dvojnásobná rychlost větru znamená, osminásobný výkon viz grafické znázornění (obr. 8).



obr. 8 Závislost výkonu větru proudícího plochou 1 m² na jeho rychlosti [12].

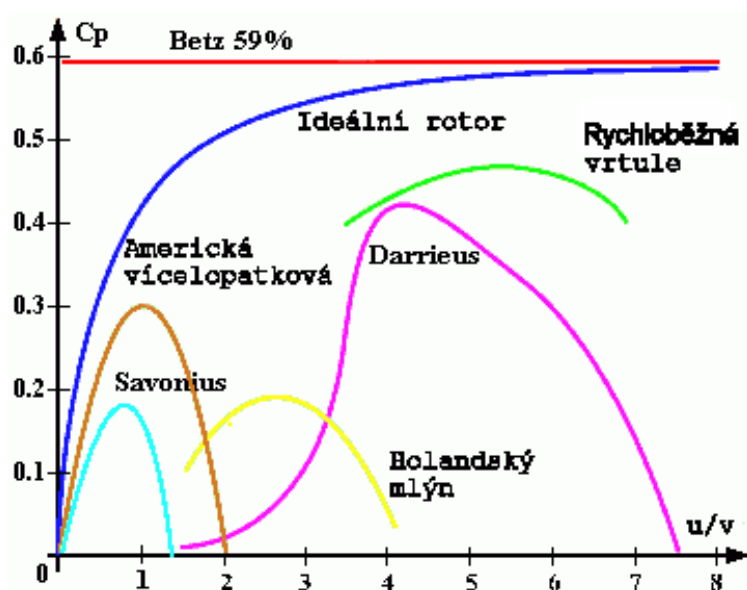
2.2 Rychloběžnost, součinitel výkonu

Pokud budeme vyrábět elektrickou energii tak jsou důležité rychloběžné rotory, protože generátory elektrické energie využijí lépe vysoké otáčky. U pomaloběžných rotorů lze využít převodovky, ale ta je vždy zdrojem ztráty energie a znesnadňuje rozběh rotoru při nižší rychlosti větru.

2.2.1 Definice součinitele výkonnosti

Součinitel výkonnosti je sám o sobě funkcí rychlosti větru a je dán konstrukčním řešením turbíny, konkrétně převodní křivkou úhlu natočení lopatek turbíny v závislosti na rychlosti větru. To, v kombinaci s kubickou závislostí na rychlosti větru způsobuje pronikavou závislost skutečného výkonu na rychlosti větru (při poloviční rychlosti je výkon osminový atd.)

Níže (viz obr. 9) ukazuje závislost mezi typem VE, rychloběžností (u/v) a výkonovým součinitelem. **Betz** je teoreticky vypočítaná účinnost, které lze dosáhnout, ukázka odvození je v kapitole 1.6. Znamená to, že nemůžete z pohybujícího se vzduchu odebrat veškerou energii. Kdybyste to udělali tak by se vzduch za rotorem zastavil a začal se hromadit, proto je teoretická účinnost 0,59. **Ideální rotor** by musel mít nekonečný počet nekonečně tenkých lopatek, které nemají žádné tření a pohybují se nekonečně velkou rychlostí, aby v obtékajícím vzduchu nevznikala rotační složka.



obr. 9 Graf závislosti VE, rychloběžností (u/v) a výkonovým součinitelem [12].

2.3 Otáčky rotoru

Pokud známe rychloběžnost, rychlost větru a průměr rotoru pak můžeme vypočítat rychlost otáčení.

$$n = \frac{60 \cdot \lambda \cdot v}{\pi \cdot D} \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

2.4 Účinnost větrných turbín

Účinnost větrných turbín se hodnotí pomocí experimentálně zjištěné křivky, která ukazuje závislost aerodynamického koeficientu výkonu C_p na rychlostním parametru λ .

C_p (Aerodynamic power koeficient) je dán vztahem:

$$C_p = \frac{2 \cdot P}{\rho \cdot S \cdot v^3}$$

P - aerodynamický výkon získaný rotorem

v - rychlost větru

S - plocha v průmětu rotoru

ρ - hustota vzduchu

Parametr λ , kterému se také říká rychlostní koeficient, je dán poměrem:

$$\lambda = \frac{u}{v} \quad u = \omega \cdot R$$

u - obvodová rychlost okrajové části rotoru

R - poloměr rotoru

v - rychlost větru

ω - úhlová rychlost rotoru [14].

2.5 Využitelnost energie větru a odvození Betzova zákona

Maximální využití energie z větru rotorem větrného stroje formuloval v roce 1926 německý inženýr, fyzik a mechanik Albert Betz, proto **Betzův zákon**. Vztah určuje maximální teoretický výkon zařízení s uvažováním účinnosti. Ta je 59%.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 = 0,59 \text{ [W]}$$

P - výkon

ρ - hustota vzduchu

S - průměr rotoru

v_1 - rychlost vetru před rotorem

Betzovo pravidlo zformuloval Albert Betz při studiu teorie větrem poháněných strojů. Pravidlo odvozuje, jaká maximální množství energie lze získat pomocí rotoru z média, pohybujícího se zadanou rychlostí. Pro odvození maximální účinnosti takového stroje (například větrné turbíny) lze vycházet z představy, že médium se pohybuje ve formě válce s průřezem rovným průřezu disku rotoru a výškou odpovídající rychlosti průtoku média.

Nechť v_1 je rychlost média nabíhajícího na rotor a v_2 rychlost média za rotorem. Průměrná rychlost média vzhledem k disku rotoru bude v_{avg} , kde:

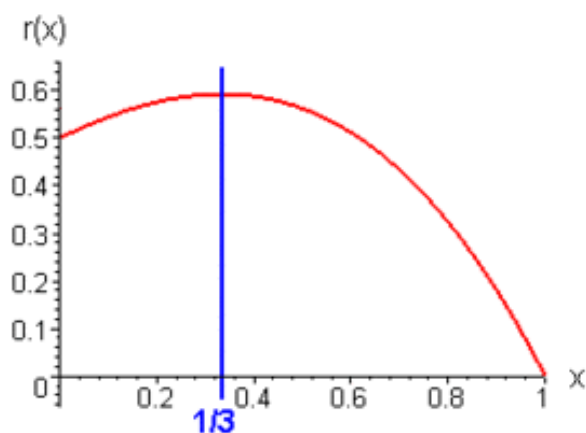
$$v_{avg} = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_2)$$

Jestliže je plocha disku rotoru rovna S , a ρ je hustota média, bude hmotnostní tok média diskem za jednotku času roven:

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot v_{avg} = \frac{\rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2)}{2}$$

Odvedená práce bude rovna rozdílu kinetických energií média nabíhajícího na rotor a média opouštějícího rotor:

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \end{aligned}$$



obr. 10 Graf - na vodorovnou osu je vynesena poměr rychlostí média před a za rotorem $\frac{v_2}{v_1}$, svislá osa ukazuje průběh součinitele výkonnosti C_p [16].

Derivací $\dot{E}$ podle $\frac{v_2}{v_1}$ pro dané rychlosti v_1 a daný průměr disku rotoru S získáme extrém funkce $\dot{E}$. Výsledkem je hodnota maxima $\dot{E}$ pro $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$. Po dosazení této hodnoty je zřejmé, že:

$$E_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3$$

Práce, kterou může odevzdat médium s rychlostí v_1 rotoru o průřezu S bude rovna:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3$$

Součinitel výkonnosti $C_p = \frac{E_{\max}}{E}$ dosahuje maxima pro:

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0,593 \text{ tedy } 59,3 \%$$

Rotory reálných zařízení (například větrných turbín) vykazují další ztráty energie, které jejich účinnost dále snižují. Moderní zařízení proto dosahují hodnot C_p v rozsahu od 0,4 do 0,5, tedy 70 až 80 % teoreticky možných.

2.6 Výpočet výroby elektřiny

Pro orientační výpočet elektrického výkonu větrné elektrárny se udává:

$$P = k \cdot D^2 \cdot v^3$$

D - délka lopatky v m

v - rychlost větru v m/s

k - koeficient závislý především na typu větrné turbíny a její účinnosti (0,2 až 0,5)

Podrobněji lze elektrický výkon vyjádřit:

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot n_c \cdot r^2 \cdot v^3$$

P_e - el. výkon ve W

π - 3,1415927 (Ludolfovo číslo)

ρ - hustota vzduchu (pohybuje se v rozmezí mezi 1,0 – 1,3 kg/m³)

n_c - celková účinnost soustavy

r - poloměr rotoru v m

v - rychlost proudu vzduchu před rotorem v m/s [18].

Celková účinnost soustavy pak je:

$$\eta_c = \eta_r \cdot \eta_{pr} \cdot \eta_g \cdot \eta_i$$

η_r - účinnost rotoru (u třílistého rotoru cca 0,47)

η_{pr} - účinnost převodové skříně (orientačně 0,97)

η_g - účinnost generátoru (u asynchronního stroje cca 0,94)

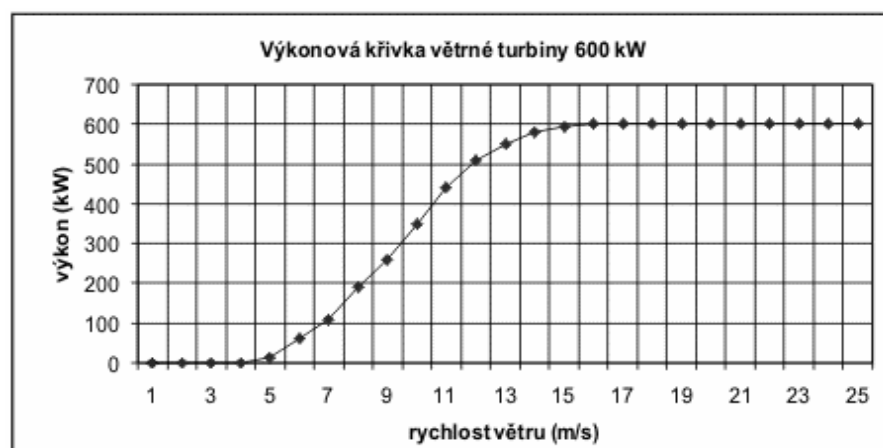
η_i - ostatní účinnosti vyjadřující ztráty až po výstup z větrné elektrárny (cca 0,95)

Po vyčíslení lze tedy přibližně počítat:

$$P_e = 0,639 \cdot \rho \cdot r^2 \cdot v^3$$

Uvedený vztah lze brát jako orientační pro stanovení výkonu. Přesný výpočet uvažuje s rozdílnou rychlostí větru daleko před rotorem a v rovině rotoru a s podrobným výpočtem účinnosti rotoru s ohledem na geometrické charakteristiky rotorových listů a s přesným výpočtem i účinností ostatních částí větrné elektrárny.

Z tohoto důvodu se používají výkonové charakteristiky jednotlivých výrobců pro danou velikost větrné elektrárny. Výkonová charakteristika udává závislost skutečného okamžitého výkonu na rychlosti větru. Na ukázkou je na (obr. 11) graf výkonové křivky pro větrnou elektrárnu s výkonem 600W:



obr. 11 Závislost skutečného okamžitého výkonu na rychlosti větru

Orientačně lze možnou výrobu stanovit dle vztahu:

$$E = P_i \cdot 8760 \cdot K$$

E - roční výroba elektřiny v kWh/r

P_i - instalovaný výkon větrné elektrárny v kW

K - kapacitní faktor (součinitel využití)

Pozn.: **Součinn $8760 \cdot K$ = využití instalovaného výkonu $\left[\frac{h}{rok}\right]$**

h – hodina

Součinitel využití K v závislosti na střední rychlosti větru v_s po minimální úpravě podle dosahovaných skutečností vykazuje následující hodnoty:

$v_s \left[\frac{m}{s}\right]$	4	5	6	7	8
K	0,08	0,14	0,18	0,25	0,31

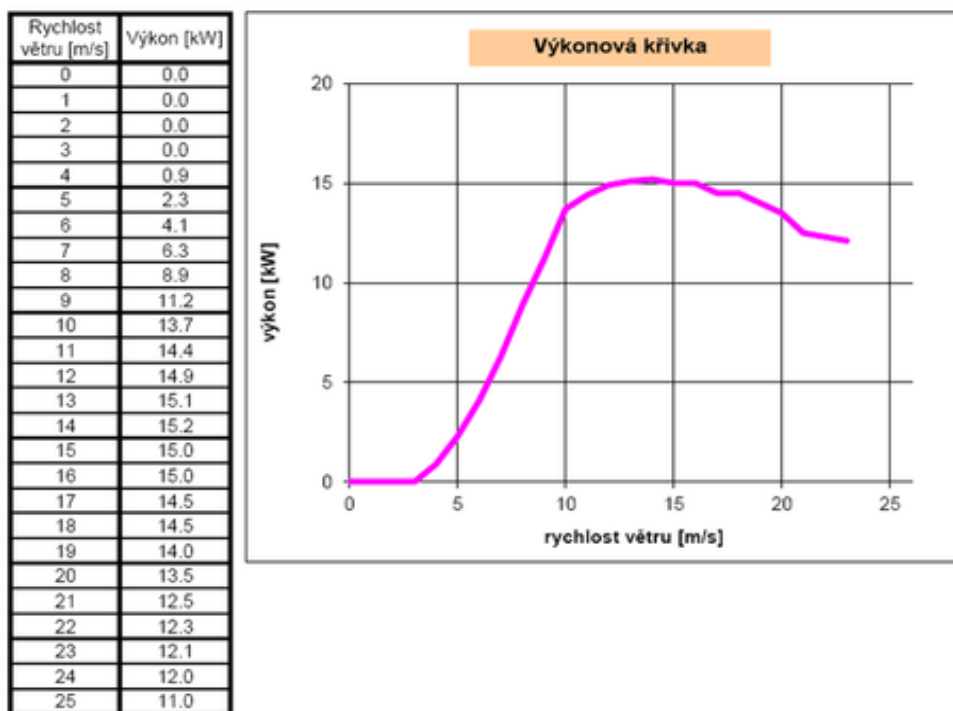
V našich podmínkách při středních rychlostech větru v rozmezí 5 až 7 m/s se tedy součinitel K pohybuje od 0,14 do 0,25. To odpovídá využití instalovaného výkonu 1226 h/r až 2190 h/r.

Přesnější výpočet výroby elektřiny se provádí podle poměrně složitých výpočtových programů, vždy je však potřeba výsledky porovnat s údaji výrobců a respektovat podmínky konkrétní lokality. Údaje udávané výrobcí se nacházejí obvykle na horní hranici možné výroby (reprezentují výrobu za ideálních podmínek) a vzhledem ke skutečnému dosahovanému využití již provozovaných větrných elektráren je třeba tyto údaje korigovat. Zejména jde o prostoje způsobené poruchami, výpadky sítě, údržbou, ztrátami ve vedení k trafostanici a v trafostanici a vlivem místních podmínek. Skutečná výroba pak může být nižší až o 15% proti hodnotám výrobců větrných elektráren [17].

2.7 Výkonová křivka větrných elektráren

Výkonová křivka definuje závislost okamžité výroby elektrické energie větrnou elektrárnou na okamžité rychlosti větru v ose jejího rotoru. Ve většině případů elektrárna začíná vyrábět při rychlostech větru kolem 3–4 m/s, pak výkon prudce roste až do dosažení jmenovitého výkonu, zpravidla mezi 10 a 15 m/s. Při extrémně vysokých rychlostech větru by větrná elektrárna měla být odstavena, aby nedošlo k jejímu poškození. Výkonová křivka je proto ukončena nejčastěji mezi 20 a 25 m/s, v případě malých i níže. Relativní průběh výkonové křivky je u většiny větrných elektráren podobný a v rozmezí „středních“ rychlostí větru (cca mezi 4 a 9 m/s) velmi zhruba sleduje kubickou závislost výkonu elektrárny na rychlosti proudění. Při přiblížení se jmenovitému výkonu již aktuální výkon s rostoucí rychlostí větru roste pomaleji a po dosažení této úrovně již dále neroste, případně klesá. Určitou výjimku mohou tvořit typy větrných elektráren umožňující výrobu energie při nejnižších rychlostech větru, jako jsou Savoniovy turbíny či mnoholisté vrtule. Výkon těchto elektráren s rostoucí rychlostí větru roste pomaleji a jejich celková efektivita je nižší než v případě klasické konstrukce či při použití principu Darreiovy turbíny.

Nominální výkon: 15 kW
Průměr rotoru: 9m



obr. 12 Ukázka výkonové křivky malé větrné elektrárny [25].

Příklad výkonové křivky malé větrné elektrárny ukazuje obr. 21. Jde o větrnou elektrárnu klasické konstrukce (třílistá vrtule). K nastartování výroby elektřiny dochází při rychlosti větru kolem 4 m/s a přibližně jmenovitého výkonu je dosaženo při rychlostech mezi 12 a 16 m/s. Ve 14 m/s větrná elektrárna dosahuje maximální výroby a při vyšších rychlostech větru její výkon zvolna klesá. Mírný pokles výkonu při vysokých rychlostech větru je důsledkem konstantního nastavení listů vrtule – tzv. typ regulace *stall*. Velké větrné elektrárny standardně umožňují natáčení listů a výkon při vyšších rychlostech je přibližně konstantní. Z hlediska celkové výroby elektrické energie je ovšem průběh horního konce výkonové křivky nedůležitý, protože rychlosti přes 10 m/s se v běžných výškách malých VTE vyskytují ojediněle.

Přestože se jedná zásadní údaj, není uvádění výkonové křivky malé větrné elektrárny samozřejmostí. Údaj, který výrobci malých větrných elektráren udávají je jejich jmenovitý výkon. Tato hodnota obvykle vztahuje k vysokým rychlostem větru, jaké se v místě malé elektrárny vyskytují málo kdy. Výše jmenovitého výkonu má proto význam zejména z hlediska nároků na elektroinstalaci, pro odhad budoucí výroby elektrické energie. Při běžných rychlostech větru závisí aktuální výkon větrné elektrárny

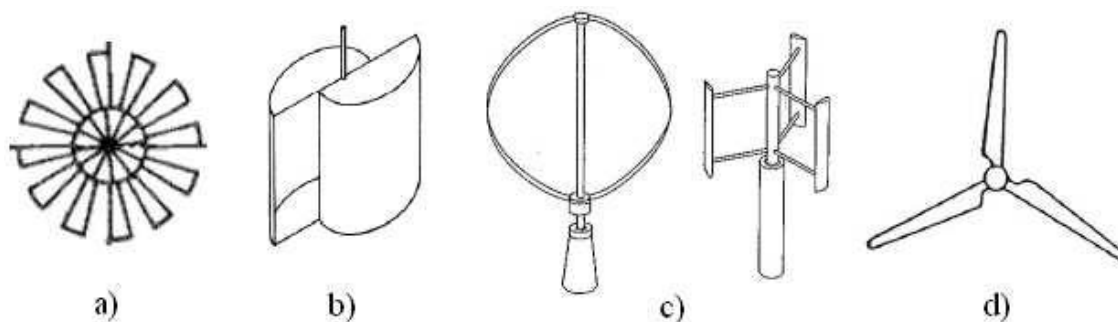
především na rozměru a konstrukci větrné turbíny. Malé větrné elektrárny a mikroelektrárny nebývají testovány za reálných podmínek, z čehož vyplývá, že výkonové křivky nejspíše budou odvozovány z teoretických vztahů.

2.8 Další okolnosti ovlivňující výrobu energie

Výroba energie může být negativně ovlivněna již zmíněnými negativními vlastnostmi proudění, jako je vysoká turbulence nebo stříh větru. Dále je nutno počítat s energetickými ztrátami ve výrobním řetězci, například při vedení a transformaci elektřiny. A v neposlední řadě lze očekávat, že dostupnost větrné elektrárny pro výrobu energie nemusí být stoprocentní. Příčinami mohou být například poruchy zařízení, problémy s vyvedením výkonu či z jiných důvodů specifických pro danou instalaci (například tvorba námrazy v námrazové oblasti).

3 Typy větrných elektráren

Větrné elektrárny rozdělit podle typu větrného rotoru. Větrný rotor převádí energii větru na rotační mechanickou práci. Existuje několik základních typů, které se dále dělí podle orientace osy otáčení na vertikální a horizontální, nebo podle aerodynamického principu na odporové a vztlkové.



obr. 13 Typy větrných motorů:

a) Lopatkové kolo b) Savoniův rotor c) Darrieův rotor d) Vrtule

3.1 Lopatkové kolo

Je pomaloběžný větrný motor založený na vztakovém principu. Rozběhová rychlost je pouze 0,16 m/s. Běžný průměr lopatkového kola je 5 až 8m. Účinnost 20 - 43 %. Používá se pro čerpání vody nebo na výrobu elektrického proudu pro vlastní spotřebu.

3.2 Americká vícelopatková turbína

Tato turbína se používala na americkém západě pro čerpání vody. Jako lopatky se používaly nahýbané plechy. Díky velkému počtu lopatek má dobrý rozběhový moment. Obecně platí, že čím má VE větší rychloběžnost tím má menší počet lopatek a je třeba precizněji volit profil listu. Tento typ VE má malou rychloběžnost, což ale pro čerpání vody nevadí.



obr. 14 Americká vícelopatková turbína [11].

3.3 Holandský mlýn

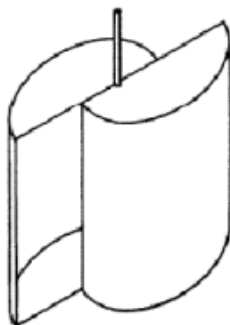
Tyto mlýny sloužily k mletí obilí. Na vítr se natáčely buď ručně, nebo pomocí malé větrné turbíny z převodované k natáčení gondoly. Jednotlivé části lopatek se daly odkrývat a tím regulovat výkon rotoru.



obr. 15 Holandský mlýn [11].

3.4 Savoniův rotor

Savoniův rotor je rotor pracující na odporovém principu se svislou osou otáčení. Jelikož dosahuje malé rychloběžnosti, tak se hodí spíše na čerpání vody než na výrobu elektřiny. Jeho výhodou je snadná výroba, žádné natáčení na vítr a rozběh už při malém větru [11].



obr. 16 Savoniův rotor

Savoniův rotor je založen na odporovém principu. Využívá rychlosti větru kolem 2 – 3 m/s. Rotor tvoří dvě přesazené válcové plochy, které využívají tzv. Robinsonova jevu. Ten spočívá v tom, že odpor vydaté části je asi 4x větší než odpor části vypuklé, tím dochází k rotaci. Mezi hlavní výhody tohoto rotoru je cena a poměrně snadná konstrukce. Další jeho výhodou je, že nemusí být natáčen ve směru větru.

Nevýhodou je pak menší účinnost, asi 15 – 25 % a kolísání rychlosti otáčení rotoru způsobené nepravidelností větru, při využití předávání elektrického proudu přímo do rozvodny. Používá se taktéž pro čerpání vody nebo pro výrobu stejnosměrného

proudu. Vzhledem k dobré rozběhové charakteristice se Savoniovy rotory někdy používají v kombinaci s rotory, které mají horší rozběhovou charakteristiku např. Darreirův rotor.

Savoniovy rotory můžeme rozdělit do několika skupin. Dle využití druhu energie na větrné a vodní. Dle konstrukce na jednostupňový, vícestupňový a spirálový. Dle uspořádání lopatek na levotočivé a pravotočivé. Dle osy rotace na vertikální a horizontální. Dle uložení rotoru na horní, dolní a oboustranné.

Další výhody:

- jednoduchá konstrukce: stavba z různých druhů materiálů (barely, plechové roury, plastové trubky) tzv. nízké pořizovací náklady a jednoduchá obsluha
- nezávislost na směru větru, bez potřeby natáčení rotoru do směru větru.
- nízká hlučnost
- přímý přenos kroutícího momentu na svislou hřídel, která může vést až k zemi a tam pohánět různé pracovní stroje podle potřeby v závislosti na síle větru. Pomocí jednoho zařízení lze např. za slabého větru čerpat vodu a při vyšší rychlosti větru ještě vyrábět stejnosměrný proud
- využití širokého pásma síly větru, na rozdíl od mnoha jiných větrných turbín, které jsou optimalizovány na určitou rychlost větru, mohou správně zkonstruované Savoniovy rotory využít vítr jak o rychlosti extrémně nízké (2 až 3 m.s-1), tak i o rychlosti střední (4 až 10 m.s-1) a vysoké (15 až 25 m.s-1)
- zvětšení plochy turbíny aniž by došlo k výraznému poklesu otáček, zatímco u větrných turbín s horizontální osou zvětšení průměru vrtule nebo kola nutně způsobuje snížení otáček a často i problémy s převody
- vysoká odolnost vůči bouřím. Při správném provedení mají rotory zvláště sníženou citlivost vůči vírům a turbulencím

Další nevýhody:

- vysoká hmotnost rotoru, což sice díky použití levných materiálů neznamena vysoké náklady, avšak vyžaduje pečlivé vyvážení, aby se zabránilo kritickému kmitání při vysokých otáčkách. Vysoká hmotnost však je zejména při poryvech větru zároveň předností; stabilizuje otáčky, a při správné konstrukci rotoru zvyšuje jeho odolnost proti bouřím

- malá rychloběžnost, relativně nízké otáčky a vysoké točivé momenty: je možno přímo pohánět vodní čerpadla, u generátorů je nutné použití převodu pro dosažení vyšších otáček.
 - pro nabíhající proud vzduchu existují dva mrtvé úhly, pro které je točivý moment vznikající na stojícím rotoru malý a může být i záporný a jeho velikost závisí na velikosti přesazení válcových částí rotoru.

3.5 Darrieův rotor

Je to turbína se svislou osou otáčení, pracující na vztakovém principu. Jednotlivé listy jsou aerodynamicky profilovány. Vztlak na křídlech vzniká jen při otáčení, což znamená, že při stojící VE na ni nepůsobí při větru žádný kroutící moment, je tedy nutno tuto VE roztáčet pomocí cizího zdroje (např. motorem nebo Savoniovým rotorem).



obr. 17 Darrieův rotor [11].

Darrieův rotor patří do skupiny využívající vztakového principu. Opět se jedná o rotor se svislou osou a nemusí tak být natáčen ve směru větru. Díky vysokým otáčkám při velkých rychlostech větrů dosahuje účinnosti až 38 %. Dá se použít na výrobu střídavého i stejnosměrného proudu, avšak díky vyššímu dynamickému namáhání, které značně snižuje jejich životnost, se tyto elektrárny příliš neuplatnily.

3.6 Rychloběžná vrtule

Dnes nejpoužívanější typ větrné elektrárny na výrobu elektrické energie. Listy jsou pečlivě tvarovány do aerodynamického profilu. Větší typy mají natáčivé rotorové listy, kterými vlivem změny úhlu náběhu mění výkon. Menší typy jsou natáčeny na vítr pomocí ocasní plochy, větší typy jsou natáčeny pomocí motorů a čidel směru větru.

Rychloběžná vrtule je rychloběžný typ větrného rotoru založený na vztakovém principu. Dosahuje účinnosti až 45 %. Je nejčastěji využíván v dnešních velkých větrných elektrárnách pro výrobu třífázového elektrického proudu a bude detailněji popsán v následující části práce.



obr. 18 Rychloběžná vrtule [11].

3.7 Simeti

Jako alternativa ke známým typům větrných elektráren mě zaujala česká firma Simeti, která připravuje svůj produkt sériově vyrábět. Při menším nebo srovnatelném průměru rotoru je osazena lehčí vrtule, udávají rozběhovou rychlost rotoru pod 2 m/s a další odlišnosti od známých technických řešení (viz příloha 2).

4 Blade Tip Power Systém

Turbína Windtronics využívá patentovanou technologii Blade Tip Power Systém. Elektrická energie je generována na vrcholech rotorových lopatek. Jedná se o

bezgenerátorovou technologii BTPS, která se vyznačuje minimálními ztrátami a vyšší účinností v porovnání s turbínami s generátorem. Instalace turbíny je možná svisle i vodorovně, většinou se používá k rekuperaci odpadního proudu vzduchu z výdechů klimatizačních a ventilačních systémů. Minimální rozběhová rychlost větru je teoreticky 0.2 m/s a maximální využívaná rychlost větru je 17.0 m/s, kdy se turbína začíná automaticky přibrzďovat elektrodynamickou brzdou.



obr. 19 Turbína Windtronics [55].

5 Větrné motory

Větrné motory se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou práci. Jejich princip spočívá ve zpomalení proudu vzduchu, který protéká jejich pracovní plochou. Tímto berou část jeho energie. Větrné motory můžeme rozdělit podle aerodynamického principu na motory vztahové a odporové. Dále je možné rozdělit větrné motory na pomaloběžné a rychloběžné.

5.1 Větrné motory pracující na odporovém principu

Motory pracující na odporovém principu patří mezi nejstarší. Plocha nastavená proti směru větru mu klade aerodynamický odpor, tímto proud vzduchu zpomaluje, je na ní přenášena síla, která je přetvářena zpravidla na rotační pohyb. Motory na tomto principu mohou mít svislou i vodorovnou osu rotace a různé způsoby konstrukce.

5.2 Větrné motory pracující na vztlakovém principu

Vítr obtéká lopatku, která má tvar podobný letecké vrtuli, kde vzniká vztlaková síla, která roztáčí rotor. Motory pracující na vztlakovém principu jsou nejrozšířenější s vodorovnou osou rotace.

5.3 Pomaloběžné

Maximální momentový součinitel a tedy i moment síly při stojícím rotoru zajišťoval snadný rozběh i při malých rychlostech větru (2 až 3 m.s-1) a při větších pasivních odporech. Rotor je tvořen velkým počtem jednoduše tvarovaných lopatek.

5.4 Rychloběžné větrné motory

Tyto motory mají rotor konstruován nejčastěji třílistou vrtuli, s pevnými nebo natáčecími listy. Výhodou těchto rychloběžných větrných motorů je jejich relativně malá hmotnost. Nevýhodou je jejich špatný rozběh při malých rychlostech větru.

5.5 Orientace větrných motorů

Z odvozování aerodynamických poměrů na vrtulovém listu rotoru vyplývá, že podmínkou pro dosažení maximální účinnosti přeměny energie větru na mechanickou práci je orientace osy rotoru do směru větru. Při nedodržení této podmínky lze předpokládat poměrnou ztrátu výkonu v závislosti na odchylce směru větru. Vrtulové větrné motory se vyznačují vyšší citlivostí orientačního zařízení na směr větru. Natáčení se provádí poměrně rychle, zejména při velkých rychlostech větru a náhlých změnách jeho směru. To vyvolává velké gyroskopické momenty na rotoru a tím i zvýšené namáhání vrtulových listů, hřídele rotoru a celého jeho uložení [9].

6 Beaufortova stupnice síly větru

Tato stupnice se používá v každodenní praxi meteorologů a lze se s ní setkat například v televizních nebo rozhlasových předpovědích počasí. Její výhodou její jednoduchost a použitelnost bez jakýchkoliv přístrojů.

Beaufortova stupnice byla vytvořena počátkem 19. století kontradmirálem Francisem Beaufortem. Slouží k odhadu rychlosti větru podle jeho snadno pozorovatelných projevů na moři či souši. Beaufortova stupnice má dvanáct stupňů. Rychlosti větru se týkají standardní výšky 10 m nad zemí ve volném terénu.

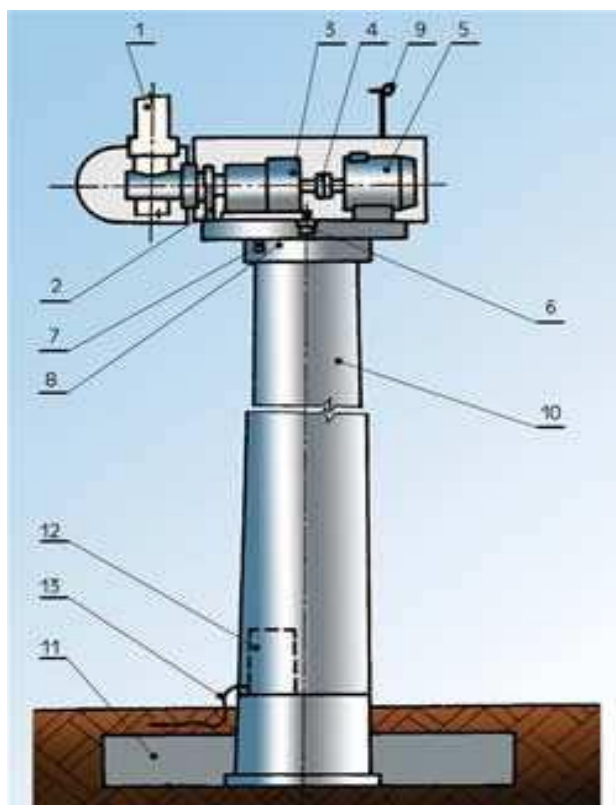
Beaufortův stupeň	Slovní vyjádření	Rychlost		Účinky větru na souši
		[m/s]	[km/h]	
0	Bezvětří	0,0 až 0,2	méně než 1	Bezvětří, kouř stoupá svisle vzhůru
1	Vánek	0,3 až 1,5	1 až 5	Směr větru rozpoznatelný podle kouře, vítr nepohybuje větrnou korouhví
2	Slabý vítr	1,6 až 3,3	6 až 11	Vítr začíná být cítit ve tváři, větrná korouhev se začíná pohybovat a listí stromů šelestí
3	Mírný vítr	3,4 až 5,4	12 až 19	Listy stromů a tenké větvičky jsou v trvalém pohybu, vítr napíná praporky
4	Dostí čerstvý vítr	5,5 až 7,9	20 až 28	Vítr zdvihá prach a kousky papíru a pohybuje menšími větvemi
5	Čerstvý vítr	8,0 až 10,7	29 až 38	Listnaté keře se začínají pohybovat, malé stromky se ohýbají
6	Silný vítr	10,8 až 13,8	39 až 49	Vítr pohybuje silnějšími větvemi, telegrafní dráty sviští a použití deštníků je nesnadné
7	Prudký vítr	13,9 až 17,1	50 až 61	Vítr pohybuje celými stromy a chůze proti němu je obtížná
8	Bouřlivý vítr	17,2 až 20,7	62 až 74	Vítr pohybuje kmeny, ulamuje větve a chůze proti němu je téměř nemožná
9	Vichřice	20,8 až 24,4	75 až 88	Vítr láme slabší stromy a působí menší škody na stavbách

10	Silná vichřice	24,5 až 28,4	89 až 102	Vichřice láme silné větve, vyvrací stromy a působí větší škody na stavbách
11	Mohutná vichřice	28,5 až 32,6	103 až 117	Vyskytuje se velmi zřídka, přičemž působí rozsáhlé pustošení v lesích
12	Orkán	více než 32,6	více než 117	Vítr má maximální ničivé účinky, odnáší domy a pohybuje těžkými hmotami

obr. 20 - Beaufortova stupnice síly větru

7 Větrné elektrárny

Větrná elektrárna se může skládat z následujících základních částí (viz obr. 21).



obr. 21 Základní části větrné elektrárny [21].

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

7.1 Možnosti využití větrné elektrárny

- přímá přeměna na mechanickou práci
- nepřímá přeměna na elektrickou energii

Při přeměně větrné energie na elektrickou lze použít dvou rozdílných systémů. Prvním systémem je systém nezávislý na rozvodné síti (grid-off), neboli autonomní systém. Slouží pro lokální zásobování elektřinou nezávisle na okolní elektrizační soustavě. Zde se většinou používá malých elektráren s malým výkonem od 10 kW. Větší systémy lze kombinovat se záložními zdroji.

Druhým systémem je systém dodávající elektrickou energii přímo do rozvodné sítě (grid-on). Jedná se o nejrozšířenější systémy, které se používají v oblastech s velkým větrným potenciálem. Zde je snaha stavět co největší stroje z důvodu klesajících nákladů na jednotku výkonu.

Dále k zefektivnění provozu se větrné stroje slučují do skupin, kde pak mluvíme o větrných farmách. Nevýhodou je velká závislost na počasí, ročním období a denní době.

7.2 Základní rozdělení větrných elektráren

Zde popisované části větrných elektráren se mohou u jednotlivých typů lišit, například u moderních elektráren už není tak často používána převodovka. Například systém natáčení strojovny je u malých elektráren založen na primitivním principu, ale u výkonových strojů je to už složitější zařízení poháněné motory s převodovkou a hydraulikou.

7.3 Mikroelektrárna

Mikroelektrárny se používají pro napájení jednotlivých zařízení, například dobíjení akumulátorů. Energie z akumulátorů slouží k napájení nízkoeenergeticky náročných spotřebičů (osvětlení pro reklamní billboardy). Dělají se s výkonem do 1kW. Bývají alternativou k slunečním článkům v místech, kde je dost větrno a naopak méně svítí slunce.

Mikroelektrárny, které dosahují výkonů až několik jednotek kW, již mají pevnou instalaci a mohou napájet i malé energeticky nenáročné objekty. Protiargumentem je vysoká cena a dlouhá návratnost. Když nefouká vítr elektrická energie se akumuluje do akumulátorů. Navíc je možné ji doplnit o solární články/panely a vhodným systémem, který přerozdělování výroby elektrické energie automaticky inteligentně řídí. Tato kombinace je vhodná, protože když nefouká vítr, tak často svítí slunce a obráceně. Překážkou je cena. Celosvětově lze již nalézt na poli mikroelektráren celkem rozsáhlou nabídku.

7.4 Rozdělení větrných elektráren podle velikosti

Mikroelektrárny s malými výkony (cca 100 W) mohou například napájet osvětlení reklamních panelů podél dálnic, aktivní inteligentní dopravní značky, měřiče teploty a hodiny apod. Jejich skládací verze mohou sloužit v přírodě jako mobilní nabíječe akumulátoru, napájení světlení, vařiče, malého topení, vysílačky, počítače nebo televizoru.



obr. 22 Příklad provedení a použití mikroelektráren [26].

Mikroelektrárny, které dosahují výkonů až několik jednotek kW. Elektrická energie se většinou akumuluje do akumulátorů, které pokrývají spotřebu při špičkových zatíženích nebo když nefouká. Navíc je možné ji doplnit o solární články/panely a vhodným řídicím systémem, který přerozdělování výroby el. energie automaticky inteligentně řídí. Generátor mikroelektrárny obvykle poskytuje výkon mezi 1 W až cca 1 kW a bateriová napětí 12, případně 24 V.

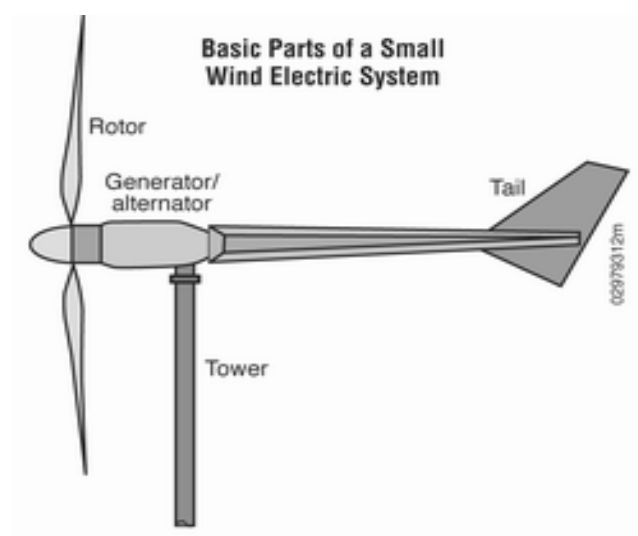
Dnešní mikroelektrárny jsou obvykle v horizontálním provedení s rotorem se dvěma až čtyřmi listy z kompozitového materiálu (skleněná vlákna). Průměr rotoru definuje tzv. "zametací oblast (swept area)" nebo množství zachyceného vzduchu (the quantity of wind intercepted by the turbine). Ocas (tail) provádí natáčení a stabilizaci rotoru ve větru.

Tzv. větrná mikroelektrárna je složená z následujících mechanických částí:

- rotor s listy
- generátor nebo alternátor zamontované v rámu (frame)
- stabilizačního a natáčecího ocasu (tail)
- upevňovacího podstavce/tyče (tower)

A elektrických částí - regulačního systému:

- řídicí jednotka (controller)
- invertory (inverters)
- akumulátory/baterie (batteries)



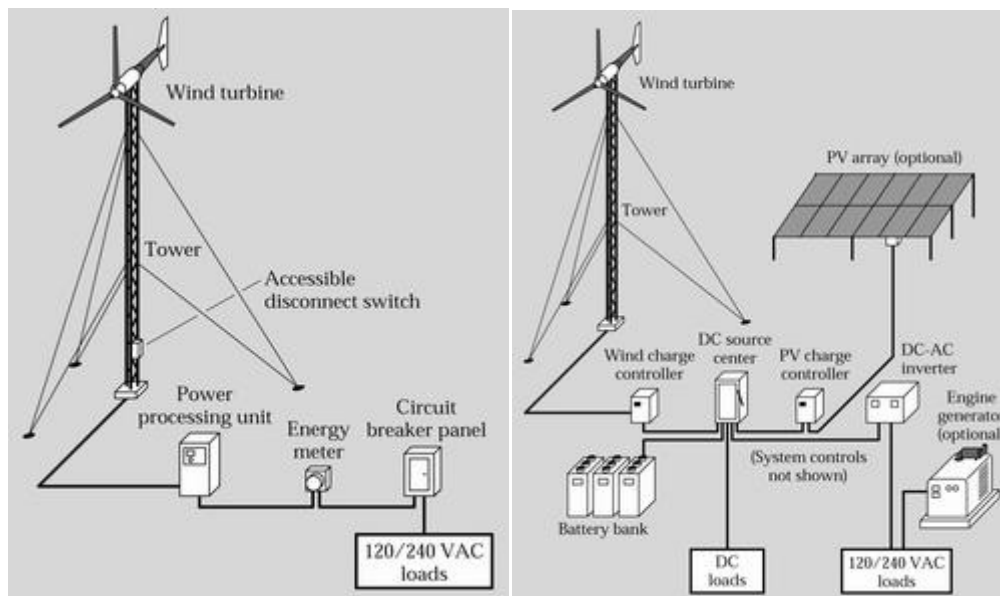
obr. 23 Základní části malé větrné elektrárny [26].

7.4.1 Malé elektrárny

Tento typ se opět používá k dobíjení akumulačního zařízení, většinou vhodná nabíjecí a jistící elektronika s akumulátory a polovodičovým měničem na síťové napětí. Generátory jsou s jmenovitým výkonem do 15 kW. Takto uspořádaný systém může zásobovat elektrickou energii rodinný domek nebo i větší méně energeticky náročnou usedlost.

7.4.2 Středně velké elektrárny

Tímto názvem jsou označovány elektrárny s jmenovitým výkonem do 100 kW. Jejich upotřebení může být jak autonomní, pro napájení s vhodným regulačním a akumulacním systémem velkých farem a odlehlých usedlostí. Tak mohou v kombinaci s trafostanicí dodávat elektrickou energii do sítě.



obr. 24 Výroba elektřiny větrnou elektrárnou (vlevo) a kombinace větrné elektrárny a solárních panelů (vpravo)

7.4.3 Velké elektrárny

Tyto elektrárny vždy dodávají elektrickou energii do sítě. Jejich jmenovité výkony jsou od stovek kW po jednotky MW. Náklady na jejich výstavbu jsou v řádu desítek miliónů, ale z ekonomického hlediska jsou nejefektivnější.

8 Konstrukce velké větrné elektrárny

8.1 Rotor

Mechanická část ústrojí větrné elektrárny, která přenáší kinetickou energii větru na mechanickou rotační energii. Podle aerodynamického principu a umístění osy

otáčení se dají rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou rotory vztahové s vodorovnou osou otáčení. Vítr u nich obtéká lopatky s profilem podobným letecké vrtuli. Na straně působení větru vzniká přetlak, naopak za listem vrtule podtlak. List rotoru má snahu tuto změnu vyrovnat, proto se začne otáčet v rovině kolmé na osu rotoru. Při stejném průměru rotoru platí nepřímá závislost mezi počtem listů a frekvencí otáčení. Dnešní elektrárny mají obvykle tři listy, jsou však vyvinuty i s dvěma listy. U nich ale nastává problém s rozkmitáním a nestabilitou, protože vždy jeden z listů je zatížen jinou rychlostí větru (blíže k povrchu je rychlost větru nižší až 3 násobně). Tento problém je u třílistých rotorů zanedbatelný. Druhou skupinou v praxi téměř nepoužívanou jsou rotory odporové. Jedná se především o rotory s vertikální osou otáčení.

Příkladem může být typ Savoniův, který má místo listů vrtule jakési misky. Jejich výhodou je, že mohou pracovat při vyšší rychlosti otáčení a není je třeba natáčet do směru převládajícího větru. V praxi se neujaly, protože u nich dochází k mnohem většímu dynamickému namáhání, které snižuje jejich životnost. Další jejich nevýhodou je malá výška rotoru nad terénem, takže pracují při menší rychlosti větru.

8.2 Převodovka

Převodovka je obvykle propojena s rotorem přes válečkové ložisko s hlavním odlitkem gondoly, kvůli zabránění přenosu nesymetrického zatížení od rotoru na hřídel a následně do převodovky. Slouží k převodu nízkých otáček rotoru v velkém krouticím momentem na otáčky generátoru – řádově stovky až několik tisíc. Nejvíce se zde uplatňují dvoustupňové planetové převodovky.

V dnešní době je trendem konstruovat zařízení bez převodovky, která využívají nízkorychlostních multiplových generátorů. Přepínáním počtu pólů se mění synchronní otáčky podle otáček motoru. Toto řešení snižuje počet rotujících částí, spojovacích prvků a systém zjednodušuje.

8.3 Spojka

Spojka má ve velkých větrných elektrárnách ochrannou funkci. Při překročení maximálního momentu nebo poruše převodovky dojde k jejímu odepnutí. Přenáší točivý moment z rotoru na převodovku popřípadě generátor.

8.4 Generátor

Generátor transformuje pohyb hřídele na elektrickou energii. Pro tyto účely se používají dva základní typy generátorů – asynchronní a synchronní.

8.4.1 Asynchronní generátory

Tyto generátory mají vinutí rotoru klecové nebo kroužkové. Oproti synchronním generátorům mají nižší účinnost, ale na druhé straně jsou jednodušší, proto levnější a mají menší nároky na údržbu.

8.4.2 Synchronní generátory

Synchronní generátory jsou složitější než asynchronní a mají vyšší účinnost. Mohou pracovat s větším rozsahem při rychlostech větru. Hlavní výhodou je jejich přímé spojení s rotorem bez převodovky. Jejich využití je v samostatných sítích bez připojení do sítě.

8.5 Systém natáčení strojovny a listů u elektráren s rychloběžnou vrtulí

U mikroelektráren je tato činnost zajištěna jednoduše ocasní plochou. U velkých elektráren je natáčení strojovny zajištěno elektronickým systémem, pomocí elektromotorů. Natáčení listů je řešeno buď hydraulicky nebo pomocí elektromotorů.

8.6 Brzdňý systém

Brzdňý systém větrné elektrárny je nutný zajistit při vysoké rychlosti větru (bývá kolem 30 (m/s) nebo poruše. Základní způsob brzdňého systému je mechanická brzda ovládaná hydraulicky. Další způsoby se využívají u větších větrných elektráren, jedná se o elektromechanický princip založený na využití generátoru a aerodynamický princip založený na natáčení listů rotoru.

9 Řízení větrné elektrárny

9.1 Řídicí systém

Obecně se celý řídicí systém skládá z mnoha snímacích prvků jako jsou senzory rychlosti a směru větru, senzory rychlosti rotoru, napětí a proudů, senzory natočení listů, vibrační a limitní senzory a další. Dále zahrnuje hydraulické a elektrické pohony, množství spínačů a ostatních akčních členů a konečně samotnou řídicí jednotku, která se skládá z počítače nebo mikrokontroléru, jež generuje výstupní řídicí signály pro akční členy.

Posledním článkem je pak bezpečnostní systém, který musí být schopen v případě poruchy bezpečně odstavit větrnou elektrárnu. Celý řídicí systém větrné elektrárny se dá rozdělit na tyto tři stupně.

Nadřazený řídicí systém hlídá a řídí jednotlivé operace větrné elektrárny – rozběh, výroba elektrické energie, odstavení, nouzové vypnutí. Řídicí systém větrné elektrárny lze dělit na primární a sekundární:

primární regulace

- regulace otáček turbíny-generátoru
- regulace natočení gondoly proti směru větru
- regulace natočení listů rotoru pro optimální využití energie větru
- řízení natočení listů při rozběhu a brzdění
- řízení převodovky

sekundární regulace

- řízení výkonového měniče a regulace parametrů výstupního napětí dle požadavků nadřazeného řízení distribuční sítě
- regulace činné a jalové složky výkonu

9.2 Bezpečnostní systém

Bezpečnostní systém má za úkol zastavit chod větrné elektrárny v případě poruchy nebo vysoké rychlosti větru, hardwarového selhání, konstrukční vady.

9.3 Regulace

9.3.1 Regulace Pasive stall

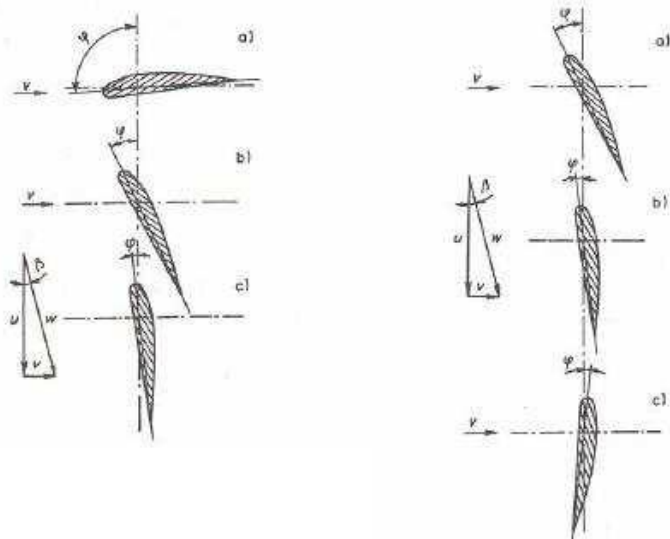
Nejjednodušší způsob regulace je regulace Pasive stall. Regulace je zajištěna pouze navrženým aerodynamickým profilem listů rotoru. Poloha rotoru se vzhledem ke směru větru nemění. Při vysoké rychlosti větru dochází na odvrácené straně listů od větru k vytváření turbulencí, což má za následek odtržení proudu vzduchu. Nevýhodou je zatížení listů rotoru při odstávce větrné elektrárny. U tohoto způsobu regulace je důležité navrhnout tvar listů tak, aby nedocházelo k vibracím turbíny při odtržení proudu větru.

9.3.2 Regulace Pitch – natočení listů

Regulace Pitch znamená natáčení celého listu větrné elektrárny. Způsob nastavuje při zastaveném větrném motoru vrtulové listy náběžnou hranou proti větru tak, aby kladly větru minimální odpor a nevznikala na nich síla, která by roztáčela rotor. Vyhodnocuje se zde vyráběný výkon a porovnává se jmenovitým. Pro účel regulace výkonu se listy natáčí o 30 stupňů. Na zastavení je potřeba natočit listy až o 90 stupňů. Natáčení se uskutečňuje nejčastěji pomocí hydrauliky nebo elektromotorů.

9.3.3 Regulace active stall

Regulace active stall je podobná jako regulace pitch, liší se tím, že dochází k otáčení v opačném směru. Dosažení jmenovitých otáček vrtulový list nemění svůj smysl natáčení, ale při vzrůstu rychlosti větru se natáčí dále ve stejném směru až do polohy, kdy tětíva profilu zaujme polohu prakticky rovnoběžnou s rovinnou vrtule. Rozsah úhlu natáčení vrtulového listu je proti předchozímu principu přibližně třetinový. Regulace je zde přesnější.



obr. 25 Způsoby natáčení celého listu větrné elektrárny

Regulace natočení gondoly spočívá v natáčení gondoly podle snímače, který je umístěn ve strojovně za rotorem.

9.4 Hlavní části strojovny rotoru velké elektrárny s rychloběžnou vrtulí

Na ocelovém tubusu stožáru je umístěna gondola s generátorem elektrárny, který je hlavní hřídelí přes převod napojen na trojlistý rotor. Elektrárna je vybavena systémem, je jímž pomocí může pracovat s různým počtem otáček (15 – 30 ot/ min). Start mechanismu začíná přibližně v rychlosti větru kolem 4 m/s a končí v 25 m/s, kdy dojde k odstavení.

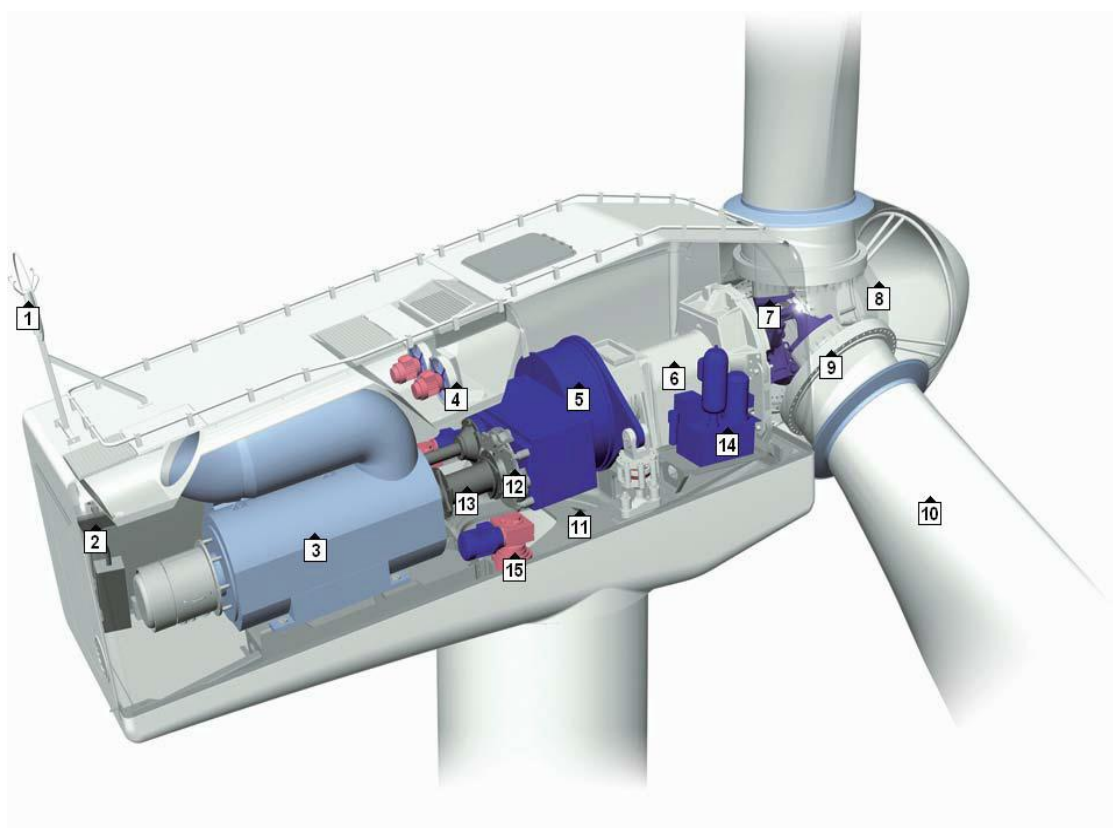
Tento typ elektráren bývá vybaven systémem s regulačním systémem naklápění listů, kdy jejich úhel nastavení se přizpůsobuje momentální povětrnostním podmínkám, což má vliv i na vznik nepříznivého hluku zařízení. Změny úhlu nastavení listů rotoru jsou aktivovány přes momentové rameno hydraulickým systémem, který umožňuje listům rotoru axiálně rotovat. Listy rotoru bývají vyrobeny z epoxidové pryskyřice vyztužené skelným vláknem.

Mechanická energie je od rotoru přenášena hlavním hřídelem přes převod na generátor. U převodovky se jedná o kombinovaný planetový/čelní ozubený převod. Přenos výkonu z převodovky na generátor se uskutečňuje pomocí kompozitní spojky nevyžadující údržbu. Generátor je speciální čtyřpólový asynchronní generátor s vinutým rotorem. Zabrždění větrné elektrárny je prováděno nastavením listů rotoru do praporu.

Převodovky se starají o směřování po větru otáčením pastorků, které zasahují do zubů velkého otočného věnce, který je upevněn na vrcholu věže. Ložiskový systém směřování po větru je systém kluzného ložiska.

Veškeré funkce větrné elektrárny jsou kontrolovány a řízeny řídicími jednotkami založenými na bázi mikroprocesorů. Tento systém řízení provozu je umístěn v gondole. Kuželová ocelová trubková věž je dodávána s vhodnou povrchovou úpravou. Křídla gondoly vyrobené z plastu vyztuženého skelným vláknem chrání veškeré komponenty uvnitř gondoly před deštěm, sněhem, prachem, slunečním zářením atd. Centrálně umístěný otvor umožňuje ke gondole přístup z věže. Uvnitř gondoly je umístěn údržbový jeřáb.

Kuželová ocelová trubková věž je sešroubována z pěti hlavních dílů a je dodávána s vhodnou povrchovou úpravou. Věž je zakotvena do základu ve formě železobetonové desky.



obr. 26 Hlavní části strojovny rotoru velké elektrárny s rychloběžnou vrtulí [38].

1 - ultrazvukový větrný senzor, 2 - údržbový jeřáb, 3 – generátor, 4 - olejové a vodní chlazení, 5 – převodovka, 6 - hlavní hřídel, 7 - Pitch systém, 8 - listová příruba, 9 - ložisko listu, 10 – list, 11- základ strojovny, 12 - mechanická brzda, 13 – spojka, 14 - hydraulická jednotka, 15 - otáčení strojovny

9.5 Stožáry větrných elektráren

Stožár je hlavní částí nosného systému větrné elektrárny. Tubus elektrárny musí být dostatečně vysoký, aby vynesl větrnou turbínu nad přízemní pásmo větrných turbulencí, a dostatečně pevný, aby odolal hmotnosti celého soustrojí a silám vznikajícím vlivem větrného proudění.

V Evropě jsou nejrozšířenější **ocelové tubusové stožáry** v mírně kónických tvarech. Stožár se skládá z jednotlivých částí, ze kterých se následně sestavuje. Toto řešení je výhodné z hlediska přepravy.



obr. 27 Ocelový stožár VTE WinWind [37].

Trend je stavět stále vyšší stožáry. Se zvyšující se výškou nad zemí vzrůstá i rychlost větru a proudění vzduchu je méně ovlivněno tvarem zemského povrchu.

Betonové stožáry se stejně jako ocelové stožáry skládají z jednotlivých částí. Betonová konstrukce má velmi dlouhou životnost a nízké nároky na opravy v průběhu životnosti. Betonový stožár má lepší tlumící vlastnosti ve srovnání s ocelovým stožárem. Vydává menší provozní hluk, vibrace a způsobuje menší únavu rotoru.

Příhradové stožáry nebývají v Evropě tak časté. Tento typ stožáru se většinou nelíbí různým ochráncům, ale jejich výhodou je průhledná konstrukce.

Montáž příhradového stožáru a doprava jeho částí je jednodušší. Montáž probíhá až v dané lokalitě, kam se jednotlivé komponenty dopravují. Jako povrchová úprava se

používá pozinkování. Při stejných nákladech lze tedy postavit příhradový stožár o 20 % vyšší než tubusový.



obr. 28 Příhradový stožár VTE Führlander [38].

9.5.1 Vliv větrné elektrárny a životní prostředí

Provozem větrných elektráren, jako obnovitelným zdrojem energie nevznikají škodlivé emise ani nebezpečný odpad. Zabírá relativně malou plochu přibližně kolem 2000m². Větrné elektrárny díky své velikosti vytváří v krajině nové pozorovatelné objekty. Jejich vliv na krajinu má méně škodlivý dopad než je tomu u jiných zdrojů energie. Z pohledu vlivu staveb na životní prostředí - EIA (posuzování vlivu stavby na faunu, flóru, krajinu, zdraví obyvatel atd.) má ČR jedny z nejpřísnějších kritérií v Evropě [40].

9.5.2 Narušení vzhledu krajiny

Při výstavbě větrných elektráren musí být respektován zákon o ochraně přírody a krajiny ČNR č. 114/92 Sb. Podle tohoto zákona nejsou přípustné stavby v národních

parcích, v přírodních rezervacích, v chráněných krajinných oblastech první zóny a v blízkosti národních památek [40].

Narušení krajinného rázu je nejspíše nejproblematictější. Někomu se elektrárny líbí, někomu ne. V české krajině, kde lze jen s obtížemi najít panorama nerušené stožáry elektrického vedení, představují větrné elektrárny další, nezvyklý prvek. Paradoxně se u nich někdy dostává do konfliktu požadavek státní ochrany přírody na "nenápadnost" elektrárny s požadavkem bezpečnosti leteckého provozu na umístění zábleskového zařízení na vrchol stožáru kvůli viditelnosti. Trend stavět stále větší stroje vede k tomu, že elektráren může být méně, ale současně budou více vidět.

Elektrárny však mohou také pomoci snížit počet různých stožárů v krajině. Na stožár jedné elektrárny lze umístit několik různých telekomunikačních zařízení (zejména vysílače mobilních telefonů), které bohužel často mají každý svůj vlastní stožár. Díky umístění ve větší výšce mohou pak vysílače pokrýt větší území. Vzhledem k ekonomické životnosti elektrárny 20 let může jít jen o dočasnou stavbu, která snadno zmizí [42].

9.5.3 Hluk

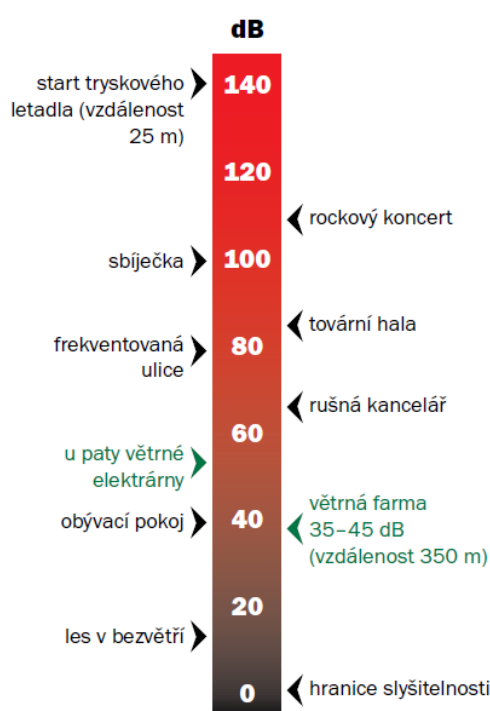
Hluk větrných elektráren je intenzivně monitorován. Před stavbou větrné elektrárny je potřeba vypracovat tzv. hlukovou studii, která je nutná ke stavebnímu povolení. Hodnoty akustického výkonu od výrobce se přepočítávají na hladinu zvuku v konkrétních místech. Hluk současných generací strojů je poměrně nízký a navíc jsou elektrárny stavěny v dostatečné vzdálenosti od obydlí. Nedoporučuje se umísťovat jednotlivé velké větrné elektrárny do vzdálenosti menší než 200 m od obydlí. U větrných farem se doporučuje pás hlukové ochrany zvětšit na 300 – 400 m. V českých normách jsou stanoveny konkrétní přísné limity pro hladiny hluku, které nesmějí být překročeny v denní (50 decibelů) a noční době (40 decibelů).

Při provozu větrné elektrárny vznikají dva druhy hluku. Jedním je mechanický, jehož zdrojem je strojovna zařízení, kde je převodové ústrojí a vlastní generátor větrného motoru.

Druhým je hluk aerodynamický, který je u moderních elektráren převládající, je periodický, spojený s přibližováním a vzdalováním jednotlivých listů rotoru vůči pozorovateli a s procházením listů kolem věže. Díky optimalizovanému tvaru listů

vtule je aerodynamický hluk minimální. V zabrzděném stavu (u středních a velkých větrných elektráren to bývá do rychlosti větru 3,5 až 4 m/s) je hluk vyvolán jen obtékáním konstrukčních prvků větrné elektrárny. Velká pozornost je permanentně věnována inovacím profilu rotorových listů, s cílem ještě větší optimalizace hluku.

V některých případech je nutno ovšem přikročit i k vypínání některých strojů v nočních hodinách. Zvuky okolí, tedy šumící stromy a keře, silnice a jiné každodenní hluky převyšují hluk z elektrárny samotné. Proto nelze vycházet z újmy hlukem, která by stála za zmínku. Moderní výkonné turbíny jsou lépe tlumeny a běží pomaleji než modely starší, čímž problém hlukových emisí pozbyl dalekosáhle na významu.



obr. 29 Srovnání zdroje hluku [46].

S hlukem souvisí infrazvuk. Infrazvuk je označení pro nízkofrekvenční zvuk pod hladinou vnímání lidského sluchu (<20 Hz). Měřitelnost není již od 70. let žádným problémem. Typické zdroje infrazvuku v životním prostředí člověka poznamenaném technikou jsou všechny druhy strojů: auta, letadla, vlaky, výrobní stroje, ale i klimatizační zařízení a stavební objekty (výškové budovy, tunely, mosty). V přírodě je vytvářen infrazvuk bouřkami, vodopády nebo také větrnými turbulencemi na budovách. Ohrožení zdraví vzniká však teprve při trvalé hladině zvukového tlaku nad 130 dB.

Z měření na větrných elektrárnách vyplynulo, že tyto hodnoty nejsou zdaleka dosahovány a že jsou za dodržení zákonem předepsaných vzdáleností sotva měřitelné. Neustálá přítomnost infrazvuku v lidském životním a pracovním prostředí vedla k podrobným dlouholetým výzkumům. Ty ukázaly, že neslyšitelný infrazvuk lze ohodnotit jako naprosto neškodný.

Je tedy možno vyvodit následující závěry: hladiny infrazvuku v okolí větrných elektráren se nachází hluboko pod prahem vnímatelnosti. Neexistují žádné důkazy možného ohrožení nebo poškození osob, které by bylo způsobeno infrazvukem vycházejícím z větrných elektráren [43].

9.5.4 Stroboskopický efekt

Stroboskopický efekt někdy nazývaný diskoeffekt vzniká tím, že se lopatky větrné elektrárny neustále otáčejí a tím vrhají pohyblivý stín. Tento jev je nejintenzivněji vnímatelný, když je slunce nejnižší. Je pozorovatelný maximálně 300 metrů od zdroje. Vzhledem k tomu, že většina posuzovaných větrných elektráren bývá lokalizována ve vzdálenosti nad 500 metrů od obytného území, takže tento jev není nijak v praxi závažný.

Se stroboskopickým efektem souvisí i jev, který odráží sluneční paprsky od otáčejících se lopatek. To lze jednoduše vyřešit matnými nátěry rotoru.

9.5.5 Rušení zvěře a vliv na ptactvo

Podle dlouhodobých pozorování větrné elektrárny zvěř neruší. Provoz elektráren tedy nevede ani k odchodu zvěře, ani ji nenutí se těmto místům vyhýbat. Zvířata si totiž na zařízení zvyknou, takže jimi nejsou rušena. Potvrzují to také zkušenosti myslivců i zemědělců z mnoha zemí, kde jsou větrné elektrárny v provozu.

Pro ptactvo představují otáčející se lopatky minimální nebezpečí. Elektrárna je pro ně viditelná překážka, kterou oblétají. Nepotvrdilo se tedy, že by ve velkém množství rotující listy zabíjely ptáky. Když už ke kolizi dojde, bývá to v noci nebo za mlhy a za jiných nepříznivých podmínek. Což se normálně stává u vysokých staveb v městech, protihlukových stěn u silnic a jiných podobných překážek.

Britská Královská společnost pro ochranu ptáků provedla měření na větrných farmách ve Walesu a dospěla k závěru, že na každých deset tisíc ptáků, kteří proletí přes větrnou farmu, dojde pouze k jedné smrtelné kolizi. Přepočteno na jednu vrtuli, jde maximálně o jeden až dva střety za rok. K podobným výsledkům dospěly studie uskutečněné v USA (2,19 smrtelné kolize na turbínu a rok), Finsku (0,2), Španělsku (0,13) a v dalších zemích [47].

10 Návrh rotoru

Níže je ukázán postup, jak by se postupovalo v případě, že bychom nemohli zakoupit sériově vyráběnou větrnou mikroelektrárnu a museli bychom sami navrhnout a vyrobit větrnou elektrárnu. Popisuji postup návrhu rotoru třílisté vrtule a Savoniův rotor.

Vycházíme ze zvoleného průměru rotoru třílisté vrtule:

Průměr rotoru $D = 1,2\text{m}$

Náběhová rychlost $v = 7\text{ m/s}$

Hustota vzduchu $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$

Pro teoretický výkon platí:

$$P = \frac{D^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot v^3 \cdot 0,59}{8} \quad [W]$$

$$P = \frac{1,2^2 \cdot 1,2 \cdot 3,14 \cdot 7^3 \cdot 0,59}{8} = 137,3 \text{ W}$$

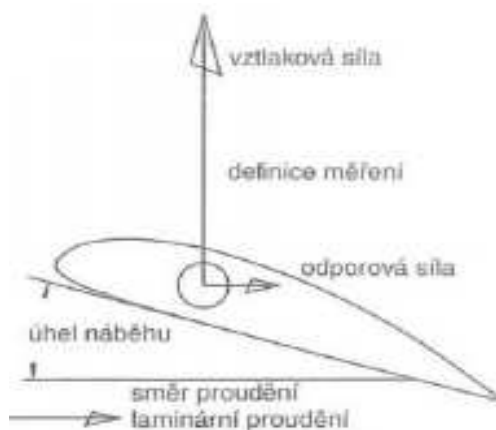
Skutečná využitelnost u elektrárny s tímto typem rotoru je 40 - 45 % to znamená kolem 55 W.

10.1 Lopatky rotoru - tvar

Nejvýznamnější dvě síly jsou síla odporová a vztlaková. Síla, která těleso tlačí dozadu, se nazývá odporová síla. Druhá síla, která působí kolmo na směr proudění, se

nazývá vztlaková síla. Největší vztlaková síla vzniká při určitém úhlu náběhu, který svírá středová přímka profilu (tětiva profilu) se směrem proudění [48].

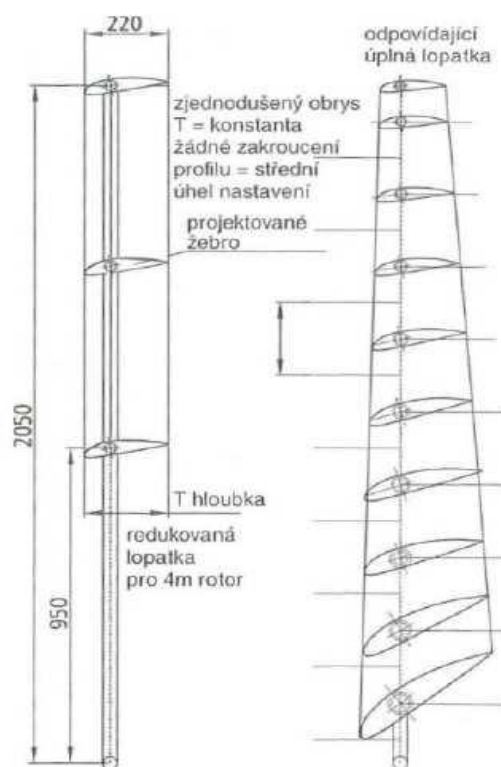
Řez lopatkou by měl mít tvar vztlakového profilu (viz obr. 36).



obr. 30 Tvar lopatky

10.2 Lopatky rotoru - výběr profilu

Lopatky se používají dle (obr. 31). Vyrábějí se např. z cedrového dřeva nebo kompozitních materiálů.



obr. 31 Použití lopatek [48].

10.3 Alternátor s permanentními magnety

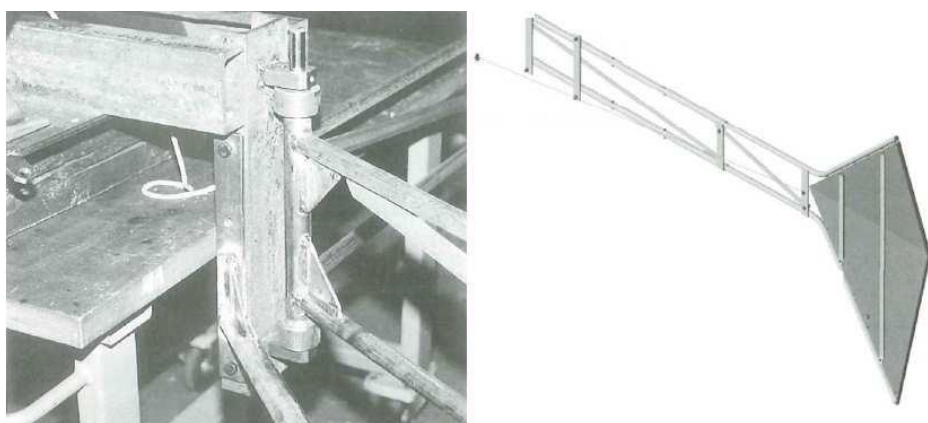
Vhodnější jsou generátory buzené permanentními magnety, které jsou pevné zabudované, a proto nepotřebují žádný budicí proud.

10.4 Zabezpečení proti nepřízní počasí

Větrnou mikroelektárnu je nutné chránit před nepříznivými větrnými podmínkami, které mají za následek příliš vysoké otáčky a jiné nežádoucí síly působící na soustavu. Tyto síly by mohly poškodit zařízení. U mikroelektráren s třílistou vrtulí, se používá regulace vytáčeující rotor mimo hlavní směr větru. Existuje několik způsobů této mechanické regulace.

10.5 Vytočení boční deskou

Používá se u větších 4 - 5m (průměr rotoru) agregátu. Ideálními tvary desek jsou čtverce postavené na roh nebo trojúhelníky s hrotem směřujícím dopředu. Tím se dosáhne hladké regulace. Kormidla s dlouhými, svislými hranami vystavují vetru tzv. tvrdé náběžné a obrysové hrany a způsobují tvrdou regulaci(48)..



obr. 32 Trojúhelníkový tvar desky s hrotem směřujícím dopředu [48].

10.6 Využití pružiny

Rotor není vůči stožárovému ložisku umístěn symetricky, ale excentricky. Tím se rotor i při nejslabším tlaku vetru vytáčí z jeho směru. Tomu zabraňuje kormidlo,

které je připevněno na závěsu a je pružinou drženo v šikmé poloze. S rostoucí rychlostí větru narůstá tlak větru na rotor. Po překročení prahové hodnoty, která se dá nastavit prostřednictvím plochy kormidla a síly pružiny, je rotor díky svému excentrickému uložení vytlačen z větru, zatímco kormidlo ve směru větru zůstává. Povolí-li tlak větru, stáhne pružina hlavu rotoru zpět do větru.

Prahová hodnota, při níž se hlava rotoru začíná vytáčet z větru, se nastavuje Předpětím pružiny a musí být stanovena pokusně [48].

10.7 Regulace elektronická

U nynějších miktroelektráren je využíváno elektronické regulace, která je součástí rotoru.

10.8 Stožár

Vzhledem k rozměrům mikroeletkrárny postačí jednoduchá varianta např. pomocí trubkového ukotveného stožáru s ukotvením na otočném šroubu (viz. obr. 33).



obr. 33 Ukotvení stožáru

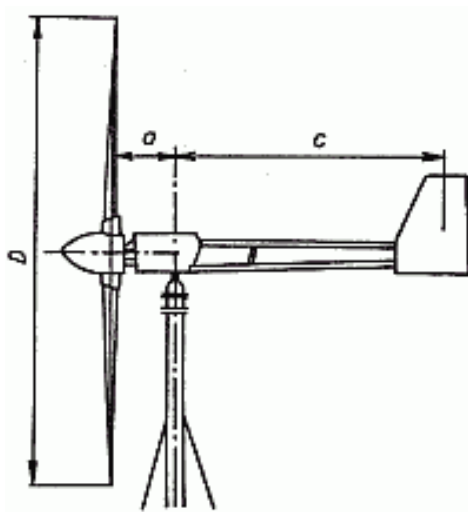
11 Konstrukční řešení

11.1 Rotorová část

- **Vrtule** - skládá se ze tří listů vhodného aerodynamického profilu. Listy jsou ke zbytku rotoru sešroubovány šrouby.
- **Stator a rotor** - u statoru je důležité, aby místa děr pro šrouby byla stejná ve statoru i v držáku statoru.
- **Náboj** - v těle náboje musí být použity ložiska.

11.2 Nosná část

Trubkový profil. Uložení pomocí čepů.



obr. 34 Klasického natáčení VE pomocí kormidla

$$A = D^2 \cdot \frac{a}{c} \cdot k [m^2]$$

A - plocha kormidla [m^2]

D - průměr rotoru [m]

a - vzdálenost osy otáčení od roviny rotoru [m]

c - vzdálenost osy otáčení od těžiště kormidla $c = (2 \text{ až } 5) a$ [m]

k - empirický koeficient $k = 0.13$ u rychloběžných rotorů, $k = 0.32$ u pomaloběžných

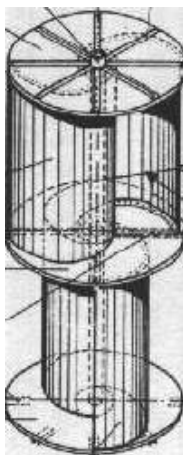
$$A = 1,2^2 \cdot \frac{0,25}{2} \cdot 0,13 [m^2]$$

$$A = 0,234 [m^2]$$

Větší kormidlo má vliv na citlivost natáčení VE, ale zvyšuje namáhání rotoru od gyroskopických momentů. Větší citlivost také zajišťuje krátké vysoké kormidlo, nebo dvě desky s malým úhlem rozevření.

11.3 Ukázka návrhu Savoniova motoru

Pro dosažení rovnoměrného točivého momentu se doporučuje konstruovat zařízení jako dvoustupňové, kde stupně rotoru jsou pootočený proti sobě o 90° (viz obr. 35). Pak bude jedno křídlo stát vždy plně ve větru a rotor se i při malé síle větru může snadno rozběhnout.



obr. 35 Dvoustupňový rotor s pootočenými lopatkami o 90° [18].

11.3.1 Uložení rotoru

Uložení rotoru může být jednostranné nebo oboustranné. Jednostranné uložení se používá jen u malých rotorů. U větších rotorů v jednostranném uložení mohou vznikat nežádoucí vibrace při namáhání ložisek.

11.3.2 Stožár

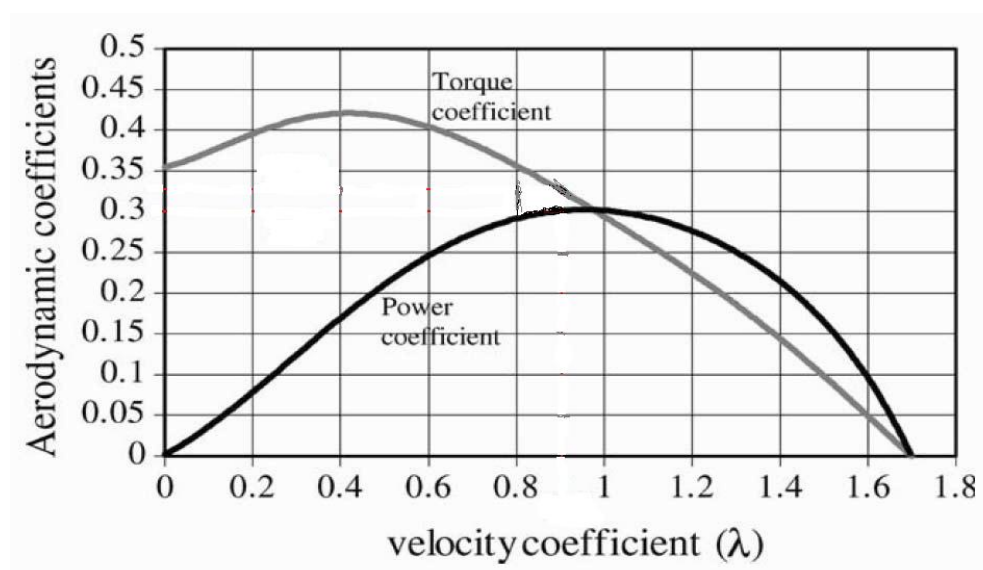
Stožár rotoru by měl být jednoduchý a neměl by clonit rotoru svojí konstrukcí.

11.3.3 Výkon

Nejvyšší výkon má rotor, když jeho obvodová rychlost je přibližně stejná jako rychlost větru. Otáčky závisí na průměru rotoru, zatížení a rychlosti větru. S rostoucím průměrem rotoru roste moment a snižují se otáčky.

11.4 Výpočet rotoru

Parametry rotoru závisí na součiniteli rychloběžnosti λ , který definuje poměr obvodové rychlosti u a rychlosti větru. Dále je nutné znát koeficient momentu a výkonu, které se určují experimentálně.



obr. 36 Grafu závislosti součinitele výkonu C_p a součinitele momentu C_m [51].

Z tohoto grafu vychází hodnoty součinitele výkonu $C_p = 0,2$, součinitele momentu $C_m = 0,3$ a součinitele rychloběžnosti $\lambda = 0,9$. $\eta_g = 0,8$ = účinnost generátoru.

P - výkon větru procházející plochou větrného rotoru

A - plocha rotoru, kterou prochází vítr

ρ - hustota vzduchu

12 Výpočet

$$P = 140 \text{ W}$$

$$v = 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

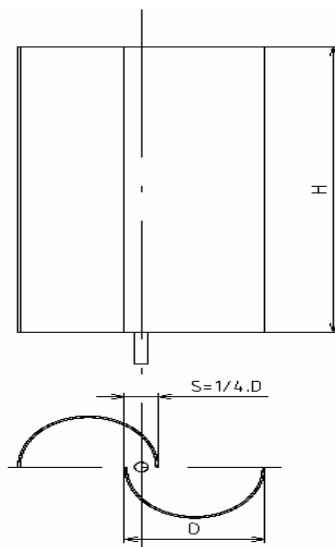
$$\rho = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Výkonový součinitel C_p se pohybuje u Savoniova rotoru okolo 0,2.

Pro stanovený výkon :

$$A = \frac{2 \cdot P}{C_p \cdot \rho \cdot v^3} = \frac{2 \cdot 140}{0,2 \cdot 1,2 \cdot 7^3} = 2,91 \text{ m}^2$$

Z důvodu vyšší účinnosti volím přesazení lopatek o $\frac{1}{4}$.



obr. 37 Skica rotoru

$$A = 1,75 \cdot R \cdot H$$

Průměr R volím 0,8 m.

$$2,91 = 1,75 \cdot 0,8 \cdot H$$

Z toho vyplývá:

$$H = 2$$

Návrh konstrukce Savoniova motoru navrhuji dvě varianty:

- Jednostupňový - jednodušší konstrukce a náklady
- Dvoustupňový - složitější konstrukce s vyšší účinností

Skládá se z dvou lopatkových sekcí vzájemně pootočených o 90 stupňů. Základ je tvořen ocelovou deskou na kterou jsou připevněny lopatky navařením, které jsou předsazeny [18].

Přesazení je o 0,2m

Výška jedné sekce je 1m

Průměr lopatek je 0,8m

Průměr centrální hřídele dle [18] nemá být větší než 25 procent šíře vzduchového kanálu. Z toho vychází:

$$d = 0,25 \cdot 0,2 \text{ m} = 0,05 \text{ m} = 50 \text{ mm}$$

Výkresy obou variant (viz příloha 8).

13 Návrh laboratoře

Ze zadání práce řeším úkol navrhnout laboratoř obnovitelných zdrojů, která bude měřit výrobu elektrické energie při měnící se rychlosti a směru větru pro tři vybrané větrné elektrárny budoucí laboratoře areálu TU Husova.

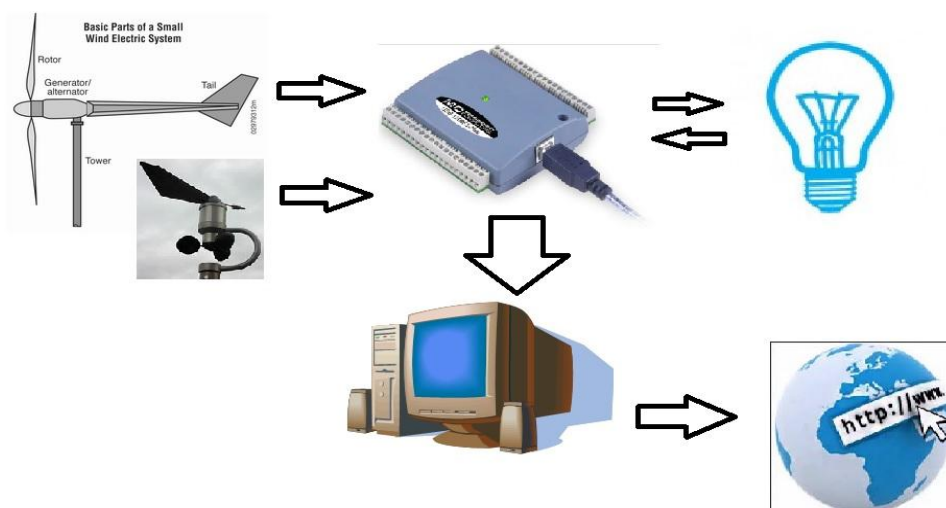
13.1 Návrh umístění rotoru větrné elektrárny a anemometru

Rotor a anemometr bude osazen na střeše budovy (viz. obr. 38) a zbytek by mohl být v blízké místnosti střechy.



obr. 38 Foto střechy laboratoře

Cílem mého řešení vycházejícího ze zadání bylo navrhnout laboratoř, která bude pokud možno nejjednodušší a nejlevnější. Zbytek laboratoře navrhuji v místnosti budovy sestávající se z měřicí karty, žárovky a PC, který může dál sdílet data na internetu dle obrázkového schéma:



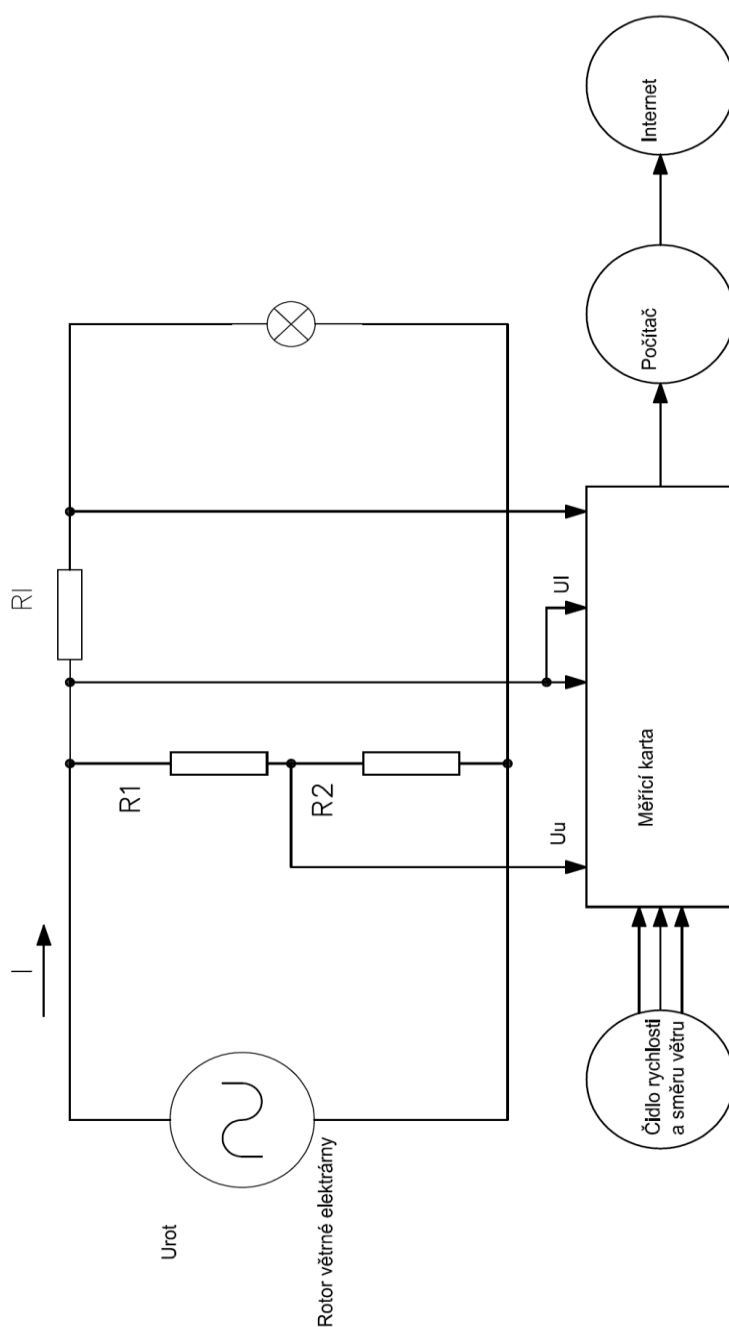
obr. 39 Schéma laboratoře

13.2 Elektro část

Pro sestavení elektroschéma vycházím z rotoru, který má maximální napětí při plném výkonu 24V AC, tento výkon bude spotřebován na žárovce. Bude se měřit napětí a proud na rotoru. Pro toto měření jsem vybral měřicí kartu, která má rozsahy vstupních

napětí max $\pm 10\text{V}$. Z tohoto důvodu potřebuji upravit hodnoty na rozsahy měřicí karty napěťovým děličem a proud budu měřit jako úbytek napětí na odporu. Měřicí kartu bude třeba naprogramovat např. v Matlabu. Měřicí karta bude získávat analogové signály, přenášet je do počítače, kde budou zaznamenány v čase a mohou být sdíleny na internetu, kde by mohly být sledovány i mimo laboratoř.

13.2.1 Měření výroby elektrické energie



obr. 40 Elektrické schéma laboratoře

R_I - odpor na kterém se měří úbytek napětí podle Ohmova zákona

R_1 a R_2 - napěťový dělič

U_1 a U_2 - Měření proudu jako úbytek napětí na odporu

Nejdříve si vypočítám výkonový potenciál a maximální proud z rotoru. Vycházím z údajů výrobce kde znám měsíční energetický potenciál a maximální napětí na rotoru.

$$P_p = \frac{P_m}{n} [kWh] = \frac{40}{720} = 0,056 kWh$$

$$I_{Vmax} = \frac{P_p}{U_{Vmax}} \cdot 1000 [A] = \frac{0,056}{24} \cdot 1000 = 2,3 A$$

P_m - měsíční energetický potenciál

n - počet hodin v měsíci

P_p - výkonový potenciál

U_{Vmax} - maximální napětí na rotoru

I_{Vmax} - maximální proud z rotoru

měsíční energetický potenciál	40 kWh
počet hodin v měsíci	720 h
výkonový potenciál	0,056 kW
max napětí na rotoru	24 V
maximální proud v rotoru	2,3 A

obr. 41 Tabulka veličin

13.2.2 Předpoklad elektro veličin a dopočet

Odpor R_I je odpor, na kterém se měří úbytek napětí podle Ohmova zákona, z něho vypočítáme proud I , když dosadíme do rovnice výkon na odporovém proudu, spočítáme z rovnice z Ohmova zákona:

Rozsah měřicí karty = 1V.

$$P_{RI} = U_{I_{max}} \cdot I_{max} [W]$$

$$2,314 = 1 \cdot 2,314 [W]$$

Ztrátový výkon na R_I .

$U_{I_{max}}$ $R_{I_{teor.}}$ vypočítám z:

$$R_{I_{teor.}} = \frac{U_{I_{max}}^2}{I_{max}^2} [Ohm]$$

$$0,432 = \frac{1}{2,314} [Ohm]$$

Z dostupných součástek volím hodnotu nižší, abych získal nižší ztrátový výkon 0,39 Ohmů.

$$P_{RI} = \frac{U_{I_{max}}^2}{R_I} = \frac{1}{0,39} [W] \quad P_{RI} = I_{max}^2 R_I [W]$$

$$P_{RI} = 2,3^2 \cdot 0,39 [W] = 2,06 W$$

Odpor R_I volím odpor **RR W5-0.39R**.

Měřené napětí odpovídající napětí rotoru spočítáme:

$$U_{U_{max}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{R_{max}} [V]$$

Maximální napětí na napěťovém vstupu do měřicí karty daný úrovní vstupního signálu této karty volím R_I odhad, aby byl ztrátový výkon do 0,1 W, pro optimální hodnotu proudu, velký, aby se zbytečně nedimenzovali na vysoký ztrátový výkon, ani malý, srovnatelný se vstupním proudem do měřicí karty.

$$R_1 = 10 kOhm$$

$$R_2 = R_1 \frac{U_{Rmax}}{U_{Umax}} - R_1 [k\Omega] = 10 \frac{24}{10} - 10 = 14 \text{ k}\Omega$$

Měřené napětí odpovídající proudu, který jde z rotoru spočítáme z Ohmova zákona:

$$U_V = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_U [V]$$

$$I = \frac{U_I}{R_I} [A]$$

Dosazením předešlých dvou vztahů dostávám rovnici pro výpočet výkonu rotoru:

$$P_{rot} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_I} U_U U_I [W]$$

13.3 Jednotlivé komponenty laboratoře a jejich popis



obr. 42 rotor se stožářem AIR 40 Southwest větrná elektrárna [52].

13.3.1 Měřicí karta

Měřicí kartu musíme zvolit především na základě požadavků dostatečného množství vstupů a výstupů. Měřicí karta je k zakoupení na stránkách <http://www.mccdaq.com/usb-data-acquisition/USB-1208FS-LS-1408FS-Series> od firmy Mearusement Computing. Měřicí kartu je nutné naprogramovat, možnost programování je v následujících programovacích jazycích:

- TracerDAQ® software included for acquiring and displaying data and generating analog signals
- Universal Library includes support for Visual Studio® and Visual Studio® .NET, including examples for Visual C++®, Visual C#®, Visual Basic®, and Visual Basic® .NET
- InstaCal software utility for installing, calibrating, and testing
- ULx for NI LabVIEW™
- DAQFlex open-source software framework – includes support for Linux®, and Mac® platforms (USB-1208FS-Plus/1408FS-Plus only)
- Comprehensive drivers for DASyLab®
- USB-1208LS/1208FS/1408FS supported by MATLAB® Data Acquisition Toolbox™
- Supported Operating Systems: Windows® 8/7/Vista®/XP SP2, 32-bit or 64-bit



obr. 43 propojení

Měřicí karta bude USB konektorem propojena s počítačem, který může data sdílet s internetovou sítí. V tomto případě by bylo možné hodnoty kdykoliv sledovat online. Výstupem z počítače na obrazovku bych si představoval graf závislosti rychlosti větru na výrobě elektrické energie.

13.3.2 Měření intenzity větru

K měření směru a rychlosti větru se užívá různých druhů anemometrů. Vzhledem k tomu, že na škole není funkční zařízení pro měření rychlosti a směru větru, navrhuji pro účely laboratoře čidlo rychlosti a směru větru - TM WSD o firmy Baghira s.r.o.



obr. 44 čidlo rychlosti

Souprava se skládá z čidla a převodníku s proudovými případně napěťovými výstupy. K čidlu může být rovněž připojen indikátor TM-U pro přímý odečet rychlosti a směru větru. Čidlo má zabudované topení a regulátor teploty.

Technická data:	měřicí rozsah rychlosti	0...30m/s
	citlivost	0,7m/s
	měřicí rozsah směru	0...360°
	rozlišení	10°
	výstupní signál	4...20mA nebo
	napájení	0...10V (Option)
	topná jednotka	15...18V DC
	provozní teplota	24V DC 30W
	hmotnost čidla	-40...+60°C
	krytí	cca 175g
		IP 53

obr. 45 čidlo rychlosti [53].

Toto čidlo je možno zakoupit za 13.710,-Kč bez DPH z ceníku z roku 2006. Čidlo bude umístěno v těsné blízkosti rotoru větrné elektrárny a samozřejmě ve stejné výšce. Čidlo navrhuji jako mobilní, aby se dalo posunovat po střeše budoucí laboratoře a případně sledovat rozdíly v naměřených hodnotách čidla a výroby elektrické energie. Čidlo jsem vybral z důvodu jeho ceny a potřebných výstupů do měřicí karty, zabudovaného topení a regulátoru teploty.

13.4 Výstup z počítače

Na obrazovce PC navrhuji graf závislosti rychlosti větru a výroby elektrické energie a graf závislosti aktuálního výkonu za zvolený čas hodinu den týden. PC by zaznamenával a archivoval tyto hodnoty a dále by mohl počítat a ukazovat již vyrobenou elektrickou energii, která by vypovídala o návratnosti laboratoře.

dle vzorce:

$$E = \sum P_{rot} \cdot \Delta t$$

Δt - interval vzorkování karty

E - celková vyrobená energie

P_{rot} - výkon okamžitý

13.5 Výpočet návratnosti investice

$$P_{rot} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_I} U_U U_I [W]$$

Vzhledem k tomu, že vyrobenou energii nebudeme efektivně využívat, tím je myšleno pouštět do rozvodné sítě tzv. Grid on, nelze dle mého názoru mluvit o skutečné návratnosti, ale pouze o teoretické. Návratnost malých větrných elektráren odhadují výrobci kolem 15 let. V případě výběru nejméně nákladnou variantu s rotorem vrtule za přibližně 41.000,- Kč, výrobce uvádí při průměrné rychlosti 6 m/s výrobu 40 kWh měsíčně, což je ročně 480 kWh. Při úvaze ceny 5Kč/kWh je návratnost celé laboratoře 18 let když nepočítáme s provozními náklady a údržbou.

13.6 Rozpočet finančních nákladů

Rotor se stožárem a uchycením. Usuzuji, že se v dnešní době finanční a časově nevyplatí svépomocí stavět samostatně rotory a stožáry, když se dnes sériově vyrábějí komplety se zárukou. K našim účelům doporučuji mikroelektrárnu s vrtulí s libovolnou geometrií lopatek.

1. Vrtulová mikroelektrárna např. AIR 40 Southwest větrná elektrárna od firmy Altereko s.r.o. dostupné na stránkách <http://www.tepelna-cerpadla-eshop.cz/vetrne-mikroelektrarny-c91/air-40-southwest-vetrna-elektrarna-i723/>

23,690,- Kč

2. Savoniova mikroelektrárna vlastní výroby

25.000,- Kč

3. Blade Tip Power Systém od firmy Windtronics

3.800 USD 77.520,- Kč

Čidlo na měření rychlosti a směru větru TM WSD od firmy Baghirra s.r.o., dostupný na <http://www.baghirra.cz/produkty/mereni-vetru/>

14.000,- Kč

Měřicí karta od firmy Measurement Computing USB-1208FS/LS/1408FS Series dostupný na <http://www.mccdaq.com/usb-data-acquisition/USB-1208FS-LS-1408FS-Series.aspx>

129 USD aktuálně 2.632,-Kč

Kabely a odpory lze zakoupit na stránkách <http://www.gme.cz/>, od firmy GM Electronic

do 200,-Kč

Předřadný odpor je dostupný na (odpor RR W5-0.39R)
<http://www.gme.cz/rr-w5-0-39r-p114-160>.

Počítač s klávesnicí a monitorem popřípadě s přístupem na internet, není potřeba nový, postačí funkční vyřazený

0,- Kč

Žárovky na 24V 100W (2 kusy + poštovné a balné) dostupný na <http://www.philips-levne.cz/p/philips-zarovka-na-male-napeti-24v-100w-e27/>

100,-Kč

Celkem navrhovaná varianta s vrtulí 40.622,- Kč.

13.7 Technické řešení upevnění elektrárny

O základních typech stožárů větších větrných elektráren je zmínka v kapitole 9.5. Pro potřebu navrhované mikroeletřárny postačí jednoduchý stožár, jehož ukotvení je součástí dodávky mikroeletřárny. Téměř všichni výrobci mikroeletřáren nabízejí k vlastnímu rotoru jako součást produktu stožár různé výšky s technickým řešením upevnění podle podmínek objednatele.

ZÁVĚR

Při své práci jsem se zabýval základními typy větrných motorů, jejich teoretickými základy při jejich výpočtu a dalšími parametry. Podle dvou ze tří variant těchto výpočtů, jsem nakreslil elektrárny (viz příloha). Z důvodu mého cíle na jednoduchost a dosažení co nejnižších nákladů jsem v laboratoři navrhl využít větrnou elektrárnu sériově vyráběnou, jejíž součástí je i technické řešení upevnění.

Spočítal jsem finanční náklady na nákup jednotlivých dílů pro funkční zařízení jako celek. V kapitolách zmiňuji i stručný popis větrných elektráren jako celku, jejich regulaci a vlivu na ekologii. Jako kritérium vhodnosti lokality slouží orientačně větrná mapa, která udává rychlost větru v 10 metrech nad zemí, ale samozřejmě nejpřesnější je provést roční měření v daném místě, kde se můžou projevit i další ovlivňující faktory. Tyto data poskytuje Český hydrometeorologický ústav. V našem případě by se jednalo o data podle záznamů meteorologické stanice Liberec (398 m n. m.).

Z parametrů výrobce mikroelektrárny jsem vypočítal odhad roční výroby elektrické energie a teoretickou návratnost. Jako úkol své diplomové práce pojal vymyslet finančně nenáročnou jednoduchou laboratoř pro názornou ukázkou výroby malého množství elektrické energie pro studijní účely a ne podnikatelský záměr na distribuci vyrobené energie s rychlou návratností.

Pro přesnější odhad roční výroby elektrické energie, výkonovou křivku a výkonový součinitel v místě předpokládané budoucí laboratoře by bylo dobré mít naměřené hodnoty v průběhu roku z místa laboratoře. Výkonový součinitel a výkonová křivka závisí na typu větrné elektrárny a přesnosti návrhu a provedení. Ve své práci jsem navrhl technická řešení pro tři vybrané elektrárny a provedl jsem i teoretický výpočet jak by se postupovalo při stavbě vlastní mikroelektrárny bez možnosti zakoupit sériově vyráběný rotor. Jednotlivé varianty jsou ve výkresu v příloze. Finanční náklady, jak jsem již zmiňoval, jsou nejnižší pro nejužívanější rotor, rotor s vrtulí. Nemyslím si, že by bylo ekonomické stavět po jednotlivých dílech větrnou elektrárnu, jak je tomu ve dvou variantách ze tří, protože existuje mnoho druhů sériově vyráběných větrných mikroelektráren se zárukou výrobce, které se podle velikosti pohybují v cenách okolo 20 000 korun, právě kterou jsem navrhl pro účely laboratoře.

Jako hlavní cíl své diplomové práce, jak název napovídá, jsem pojal laboratoř obnovitelných zdrojů. Navrhl jsem způsob měření výroby elektrické energie při měřených rychlostech a směru větru.

Téměř všechny cíle práce byly dle mého názoru splněny, až na vypracování výkonové křivky a výkonového součinitele přímo v místě budoucí laboratoře. Pro tuto část zadání by měla sloužit naměřená data z navržené laboratoře.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1]. Elektro – časopis pro elektrotechniku
URL: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26559>,
[cit. 2013-12-05].
- [2]. Wikipedie – otevřená encyklopedie
URL: < http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9Btrn%C3%A1_energie>,
[cit. 2013-12-05].
- [3]. Jiříček I. - Rábl V.: Větrná energie. VŠCHT AZE 04/2005. Praha 2005
- [4]. Hallenga, U., Malá větrná elektrárna, nakladatelství HEL, ISBN-80-86167-00-3
- [5]. TZB-info
URL: < <http://www.tzb-info.cz>>,
[cit. 2013-12-05].
- [6]. Draci.net
URL: < <http://www.draci.net/prumerna-rychlost-vetru-v-cr.a133.html>>,
[cit. 2013-12-05].
- [7]. Česká společnost pro větrnou energii
URL: < <http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie>>,
[cit. 2013-12-05].
- [9]. RYCHETNÍK, V., PAVELKA, J., JANOUŠEK J. Větrné motory a elektrárny.
1. vydání. Vydavatelství ČVUT Praha, 1997. 199 stran. ISBN 80-01-01563-7
- [10]. Stránky o větrné energii
URL: < <http://www.wind-energy.wz.cz/informace.html>>,
[cit. 2013-12-05].
- [11,13]. Malé větrné elektrárny
URL: < <http://ve.ic.cz/print.php?id=2>>,
[cit. 2013-12-05].
- [12]. Uwe hallenga, malá větrná elektrárna. 2, přepracované a rozšířené české vydání
Nakladatelství HEL Ostrava, 2006. 95 stran. ISBN 80-86167-27-5
- [14]. MENET J. –L. A double-step Savonius rotor for local production of electricity:
a design study. Renewable Energy, 2004, vol. 29, no. 11, s. 1843–1862.
- [15]. Betz, A. (1966) Introduction to the Theory of Flow
Machines. (D. G. Randall, Trans.) Oxford: Pergamon Press.

- [16]. Wikipedie – otevřená encyklopedie
URL: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Betzovo_pravidlo>,
[cit. 2013-12-05].
- [17]. Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů
URL: < <http://www.spvez.cz/pages/vitr.htm>>,
[cit. 2013-12-05].
- [18]. SCHULZ, H. Savoniův rotor. Ostrava: nakladatelství HEL, s.r.o., 2005.
77 s. ISBN: 80-86167-26-7
- [19]. VĚTRNÁ ENERGIE, EOLICKÁ ENERGIE. Zdroje Energie [online].
2005 [cit. 20012-11-23], s. 13-14.
URL: <<http://www.vscht.cz/ktt/zdrene/>>
- [20]. Wikipedie – otevřená encyklopedie
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice>,
[cit. 2013-12-05].
- [21]. I- ekis – internetové poradenské a informační středisko, www.i-ekis.cz
- [24,23,22]. Ekowatt – centrum pro obnovitelné zdroje
URL:<<http://www.ekowatt.cz/cz/informace/obnovitelne-zdroje-energie/energie-vetru>>,
[cit. 2013-12-05].
- [25]. TZB- info
URL: <<http://oze.tzb-info.cz/vetrna-energie/8358-vetrne-podminky>>,
[cit. 2013-12-05].
- [27]. Wikipedie – otevřená encyklopedie
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADtr>>,
[cit. 2013-12-05].
- [28, 26]. Vojáček A. : Větrné elektrárny - mikro, malé i velké - princip, provedení, regulace
URL: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006102901>>,
[cit. 2013-12-05].
- [30]. HANSEN, A., IOV, F., JAUCH, C., a další. Advanced Tools for Modeling, Design and Optimization of Wind Turbine Systems 2004,
Chalmers university of technology
- [31]. BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E., Wind energy handbook. Wiley 2001, England, ISBN 0 471 48997 2

- [32]. NĚMEC, L., Hydrostatické systémy a převodovky větrných elektráren [online].
- [33]. Firemní podklady Bosch Rexroth, www.boschrexroth.cz
- [34]. Vestas – výrobce větrných elektráren, www.vestas.cz
- [35]. ERU – energetický regulační úřad, www.eru.cz
- [37]. Winwind, www.winwind.com
- [38]. CSVE – společnost pro větrnou energii
URL: <<http://www.csve.cz/en/clanky/prihradovy-stozar-vetrne-elektrarny/228>>,
[cit. 2013-12-05].
- [39]. Windpower – databáze větrných turbín, www.thewindpower.net
- [40]. Kolektiv autorů: Brožura „Větrná energie současnosti“; ČSVE 2009
- [41]. ŠTEKL, J. Bestweb- Větrné elektrárny: 1. oficiální web shromažďující informace o všech větrných elektrárnách v České republice [online]. Poslední úpravy 2006
URL: <http://www.vetrneelektrarny.bestweb.cz/info_ve_ziv_pros.html>,
[cit 2012- 5-17].
- [42]. Energetika – informační portál
URL: <<http://www.energetika.cz/index.php?id=170>>,
[cit 2012- 5-17].
- [43]. Eldaco – společnost specializující se na větrnou energetiku
URL: <http://www.eldaco.cz/vite_ze/>,
[cit 2012- 5-17].
- [44]. Společnost pro větrnou energii, www.csve.cz
- [45]. Alternativní zdroje energie
URL: <<http://www.alternativni-zdroje.cz/vetrne-elektrarny.htm>>,
[cit 2012- 5-17].
- [46]. Hnutí duha, www.hnutiduha.cz
- [47]. Calla – sdružení pro záchranu prostředí
URL: <<http://www.calla.cz/index.php?path=energetika&php=vte.php>>,
[cit 2012- 5-17].
- [48]. Horst Crome, Technika využití energie vetru: Svépomocná stavba větrných zařízení, 1. české vydání. Ostrava: HEL, 2002. 145 s. ISBN 80-86167-19-4.
- [49]. Větrné elektrárny
<http://www.thebackshed.com/windmill/Docs/Furling.asp>
[cit 2012- 5-17].

- [50]. Malé větrné elektrárny
URL: <<http://www.ve.ic.cz/index.php?id=8>>,
[cit 2012- 5-17].
- [51]. STŘEŠOVSKÝ, JAN. Větrný rotor typu Savonius pro výkon 1 kW. Diplomová práce, Brno, FSI VUT Brno 2007, 75 stran
- [52]. Tepelná čerpadla
URL: <<http://www.tepelna-cerpadla-eshop.cz/vetrne-mikroelektrarny-c91/air-40-southwest-vetrna-elektrarna-i723/>>,
[cit 2012- 5-17].
- [53]. Měřicí technika
URL: <<http://www.baghirra.cz/produkty/mereni-vetru/>>,
[cit 2012- 5-17].
- [54]. Simeti s.r.o.
- [55]. WindTronics East, s.r.o.

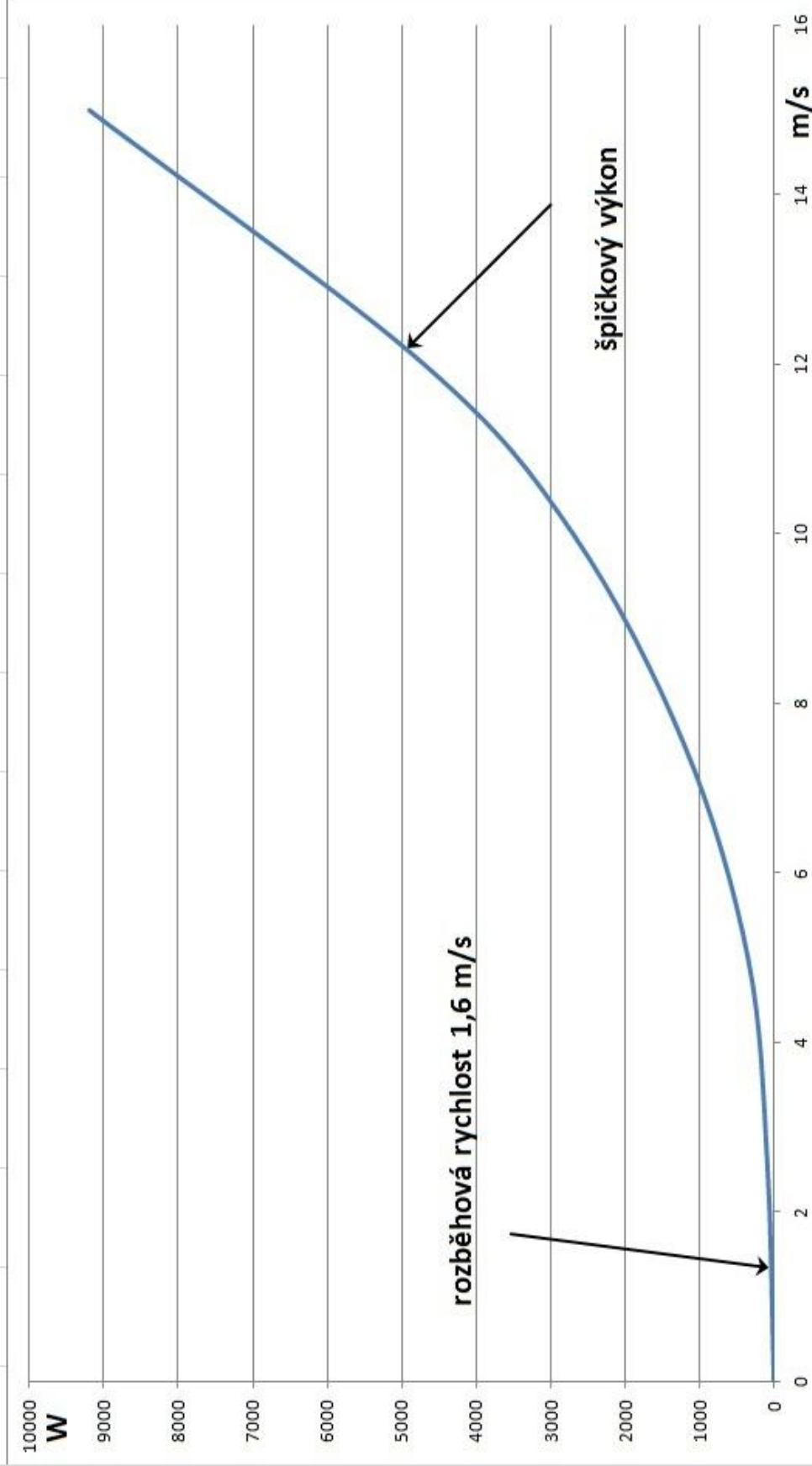
SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: třílistá vrtule Simeti_detail
- Příloha 2: třílistá vrtule Simeti
- Příloha 3: graf_závislost výkonu na rychlosti větru
- Příloha 4: prezentace_malá větrná elektrárna
- Příloha 5: leták_porovnání jednotlivých typů vrtulí
- Příloha 6: leták_aplikace zapojení
- Příloha 7: katalog Aerogenesis
- Příloha 8: BTPS- Blade Tip Power System
- Příloha 9: výkres





Závislost výkonu na rychlosti větru 5kWp turbíny



ekonomika | flexibilita | ekonomickosť

FREEDOM FOR FUTURE

SVOBODA PRO BUDOUCNOST



SIMETI
W I N D E N E R G Y

MALÁ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA

LISTOPAD 2012

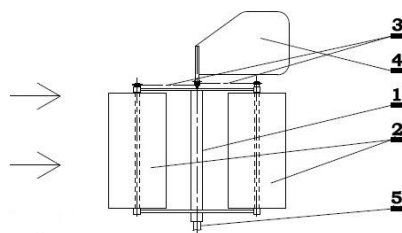
OBSAH

- Popis MVE (malé větrné elektrárny)
- Parametry MVE
- Výhody MVE
- Možnost využití



POPIS MVE

- Turbína
- Atypický generátor
 - Výměna statoru s rotorem
 - Bez převodů
 - Nižší ztráty
 - Vyšší účinnost



PARAMETRY MVE

- Jmenovitý výkon 5 kWp (2 kWp, 8 kWp, 10 kWp)
- Jmenovitá rychlost větru 12 m/s
- Rozběhová rychlost 2,6 m/s
- Maximální rychlost větru 50 m/s
- Výška 2,4 m
- Plocha listu 2,4 m²
- Maximální otáčky rotoru 150 n/min
- Magnet generátoru PMG's
- Výstupní napětí 230 V
- Systém ochrany přepojení do ochranného tělesa
- Váha 250 kg
- Hlučnost menší než 40 dB
- Statická elektřina 0 V



VÝHODY MVE

- umístění: ploché střechy, šikmé střechy, vysílače (BTS)
- pořizovací cena ve srovnání s konkurencí
- vysoká životnost 30 let
- stavebnicový systém
- jednoduchá montáž
- výška umístění od 2 m na budově
- nízká hmotnost celého zařízení
- vysoká účinnost
- bezhlučnost a bez vibrací



MOŽNOST VYUŽITÍ MVE

- bytové a rodinné domy
- komerční objekty
- vysílače, radiové spojení
- ostrovní systémy
- vytápění objektů
- doplňkový zdroj
- pobřežní pásy a ropné plošiny
- integrované záchranné systémy
- lodní doprava



RODINNÉ DOMY

- ohřev bazénu
- ohřev TUV (teplé užitkové vody)
- vytápění
- napájení elektrických spotřebičů



BYTOVÉ DOMY

- osvětlení společných prostor
- ohřev TUV (teplé užitkové vody)
- vytápění
- napájení výtahů



KOMERČNÍ OBJEKTY

- osvětlení vnitřních a venkovních prostor
- ohřev TUV (teplé užitkové vody)
- vytápění
- napájení klimatizačních jednotek
- napájení elektrických spotřebičů



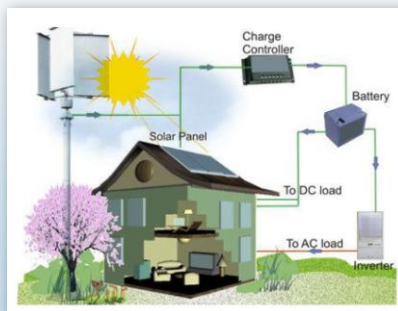
VYSÍLAČE A RADIOVÉ SPOJE

- napájení BTS antén
- napájení klimatizačních jednotek
- napájení řídicích jednotek
- dobíjení záložních baterií



OSTROVNÍ SYSTÉMY

- napájení spotřebičů domácnosti
- přednostní směrování energie
- úspora až 80 %





SIMETI, s. r. o.

Na Pankráci 30, 140 00 Praha 4

www.simeti.eu

Cell : +420 734 699 921

Email: zolic@simeti.eu



v ý k o n o s t | f l e x i b i l i t a | e k o n o m i č n o s t

FREEDOM FOR FUTURE

SVOBODA PRO BUDOUCNOST

POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ VRTULÍ



KLASICKÁ VRTULE

- Průměr rotoru 8 m
- Váha 680 kg
- Stroboskopický efekt (nebezpečí pro ptáky)

KLASICKÁ VRTULE

- Průměr rotoru 5 m
- Váha 550 kg
- Stroboskopický efekt (nebezpečí pro ptáky)

VERTIKÁLNÍ VRTULE

- Průměr rotoru 4 m
- Váha 390–1 200 kg
- Stroboskopický efekt (nebezpečí pro ptáky)

VRTULE SIMETI

- Průměr rotoru 5 m
- Váha 250 kg
- Bez stroboskopického efektu (není nebezpečný pro ptáky)



SIMETI, s. r. o. | Na Pankraci 30, 140 00 Praha 4 | GSM +420 776 117 737

W W W . S I M E T I . E U

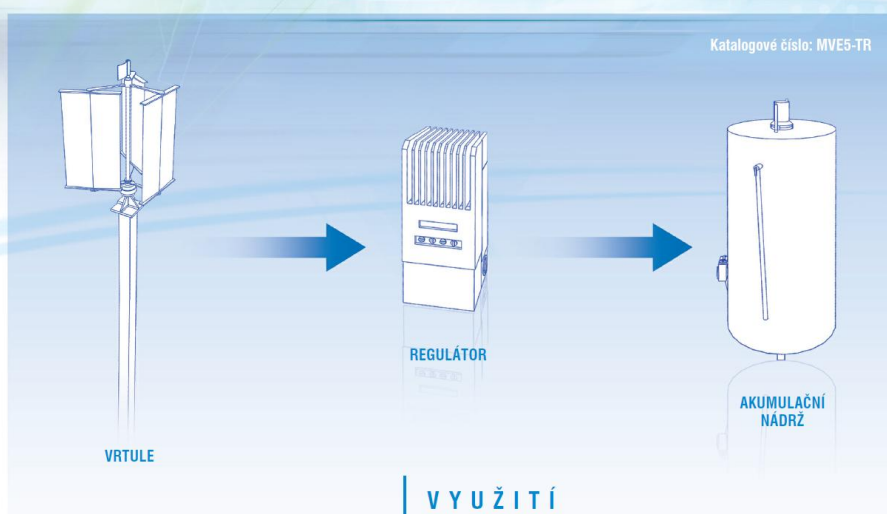
v ý k o n o s t | f l e x i b i l i t a | e k o n o m i č n o s t

FREEDOM FOR FUTURE

SVOBODA PRO BUDOUCNOST

MALÁ VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA SIMETI

APLIKACE ZAPOJENÍ



VYUŽITÍ

- topení
- ohřev TUV
- ohřev bazénů
- akumulční nádrž



Aerogenesis Australia (Australia)

PO Box 153,
Callaghan
NSW 2308

www.aerogenesis.com.au

E-mail: contact@aerogenesis.com.au
Contact: David Wood

5 years in business

Distribution: Domestic, International,
turbines are also available Direct
from factory by large order



Model	Aerogenesis 5 kW
Orientation	Upwind
Rated Output	5 kW
Peak Output	5 kW
Output Voltage (VDC)	24, 48 or other as specified by customer
Output Voltage (VAC)	110V 60 Hz / 220V, 240V (both 50 Hz)
Generator Type	Fan cooled 4 pole, 3 phase induction generator
Applications	Stand Alone and Grid Connection
Controller Type	Microprocessor controlled IGBT
Overspeed Protection	Microprocessor control of generator and electro-mechanical brake
Blade Material	Vacuum infused fibre glass reinforced epoxy
# of Blades	2
Rotor Diameter (m)	5
Swept Area (m ²)	19.64
Windspeed (m/s)	
Rated	10,5
Cut-in	3
Cut-out	15
Governing	Does not furl
Survival	50
Head Weight (kg)	170
Tower Type	Counterweighted swing tower hinged at 8 m from the base, an alternative tilt-up tower is also available
Tower Height (m)	18
Product Life (years)	20
Warranty (years)	2
Units sold	3
Years on the market	First installations 2010
Price (EUR)	27 000 € approx. for installation and grid connection
Additional Info	The controller has an integral inverter so the customer does not need to purchase this additional item. For battery charging a DC-DC link is required, cost depends on battery voltage. The blade is uniquely designed for quiet operation, high power output and good low wind performance. The blade and controller have been patented. Continued field testing and product development is underway.



SFT-V4.2

Silent Future Tec GmbH (Austria)

Bundesstraße 7-9
4341 Arbing

www.silentfuturetec.at

Tel: +43 699 101 16 233
E-mail: info@silentfuturetec.at
Contact: Michael Broser

3 years in business

Domestic and International
distribution through distributors



Model	SFT-V4.2	SFT-V8-12	SFT-V15-12
Orientation	VAWT		
Rated Output	4.2 kW	8 kW	15 kW
Peak Output	4.5 kW	12 kW	20 kW
Output Voltage (V)	230 VAC 50Hz		
Generator Type	PMG		
Applications	Grid Connection (Stand Alone coming soon)		
Controller Type	SPS		
Overspeed Protection	Yes		
Blade Material	Glassfiber		
# of Blades	3		
Rotor Diameter (m)	4	6	8
Rotor Height (m)	4	5.30	7.5
Swept Area (m ²)	16	31.8	60
Windspeed (m/s)			
Rated	11		
Cut-in	3		
Cut-out	12 continuous		
Governing			
Survival	50		
Head Weight (kg)	390	600	1070
Tower Type	Steel or concrete		
Tower Height (m)	7 - 20		12 - 20
Product Life (years)	minimum 20		
Warranty (years)	2 years, rotor 5 years		
Units sold	14		
Years on the market	3		
Price	For current cost information please contact Silent Future Tec		
Additional Info			



Cleanfield Energy Corp. (Canada)

772 Gordon Baker Road
Toronto, Ontario
M2H 3B4

www.cleanfieldenergy.com

Tel: +1 416-756-4890
Fax: +1 416-756-4837
E-mail: info@cleanfieldenergy.com
Contact: Tony Verrelli

12 years in business

Distribution:
Domestic, International
and Direct from factory



Model	V3
Orientation	VAWT
Rated Output	3.5 kW
Peak Output	5 kW
Output Voltage (V)	208VAC - 3Ph, 240VAC - 1Ph
Generator Type	3-phase PMG
Applications	Stand Alone, Grid Connection, Direct Heating
Controller Type	Back to back converter, IGBT based, DSP controlled
Overspeed Protection	Yes
Blade Material	Reinforced fibreglass
# of Blades	3
Rotor Diameter (m)	2.75
Rotor Height (m)	3
Swept Area (m ²)	8.25
Windspeed (m/s)	
Rated	13
Cut-in	4.5
Cut-out	16 (for 10min), 25 (gust)
Governing	No
Survival	45 (with blades attached); 60 (without blades)
Head Weight (kg)	415
Tower Type	Roof-top mount and ground mounts (monopole)
Tower Height (m)	Roof-top: 3 Monopole: 8.5, 12.8, 17
Product Life (years)	20
Warranty (years)	5
Units sold	90
Years on the market	6
Price (CAD)	\$19 900 price includes: turbine, generator, inverter and built-in anemometer
Additional Info	The inverter has been designed with a custom algorithm for either permanent magnet generator or induction generator. The flux vector control software provides an extremely sophisticated means of monitoring voltage, frequency, and current without costly and unreliable external sensors. This software is capable of profiling and predicting patterns and conditions of the turbine. The control algorithm allows variable speed operation at the optimum power level by closely following the power curve of the turbine.



Cyclone Green Power Inc (Canada)

Head Office:
6054 Island Hwy West,
Qualicum Beach, British Columbia
V9K 2E1

www.cyclonewindgenerators.com

Tel: +1-250-757-2069
Fax: +1-250-757-2059
E-mail: sales@cyclonewindgenerators.com
Contact: Kevin Marwick

11 years in business

Distribution: Domestic, International
and Direct from factory

Model	800 Watt	1.6 kW	3.2 kW	4.8 kW	14.5 kW
Orientation	Upwind				
Rated Output	800 W	1.6 kW	3.2 kW	4.8 kW	14.5 kW
Peak Output	900 W	1.8 kW	3.3 kW	5 kW	16.5 kW
Output Voltage (V)	12, 24, 48, 380	24, 48, 380	48, 380		
Generator Type	Direct drive permanent magnet				
Applications	Stand Alone, Grid Connection (w/additional inverter), Direct Heating				
Controller Type	Breeze Boost PWM controller w/boost				
Overspeed Protection	Mechanical and electrical				
Blade Material	Fibreglass				
# of Blades	3				
Rotor Diameter (m)	2.4	2.8	4	5	8
Swept Area (m ²)	4.52	6.15	12.56	19.63	50.24
Windspeed (m/s)					
Rated	13		12		
Cut-in	2~3				
Cut-out					
Governing	16~18				
Survival	39				
Head Weight (kg)	58	67	229	263	1380
Tower Type	Mono or guyed				
Tower Height (m)	6		7		14
Product Life (years)	15 to 25				
Warranty (years)	5				
Units sold					
Years on the market	11				
Price (CAD)	\$2 493	\$2 999	\$6 665	\$8 854	\$34 501
(as of April 2011)	Prices include: wind generator w/computerized Breeze Boost controller				
Additional Info	CE approvals; Power boost and inverter control				



S-343



G-3120 / E-3120

Endurance Wind Power (Canada)

107, 19052-26th Avenue
Surrey, BC V3S 3V7

www.endurancewindpower.com

Tel: 1 888 440-4451
Contact: Ana Kozjak
E-mail: info@endurancewindpower.com

4 years in business

Distribution: Domestic and International



Model	S-343	G-3120	E-3120
Orientation	Upwind	Downwind	
Rated Output	5.2 kW	35 kW	50 kW
Peak Output			60 kW
Output Voltage (V)	240V 60Hz single phase	480	400, 480
Generator Type	Induction	Induction, 3 phase 60Hz	Induction, 3 phase & Single phase 50Hz & 60Hz
Applications	Grid Connection		
Controller Type	PLC based is standard	PLC based is the standard, many other options are available	
Overspeed Protection	see below; Additional Info		
Blade Material	Epoxy / Fiberglass	Fiberglass / Polyester	
# of Blades	3		
Rotor Diameter (m)	6.37	19.2	
Swept Area (m ²)	31.9	290	
Windspeed (m/s)			
Rated	11	9.5	
Cut-in	4.1	3.5	
Cut-out	24	25	
Governing	NA		
Survival	52		
Head Weight (kg)	300	3990	
Tower Type	Freestanding monopole tilt-up, or Tubular guyed tilt-up	Freestanding monopole or lattice	
Tower Height (m)	27.5 or 31.1, 36.6	24, 30, 36, 42 (monopole & lattice)	
Product Life (years)	20 years (provided service and maintenance schedules are strictly followed)		
Warranty (years)	5 years parts and labour		
Units sold	Contact for more information		
Years on the market	4	3	
Price	Contact dealer for full pricing		
Additional Info	Overspeed Protection for the S-343; Rapid fail-safe mechanical brake on rotor shaft; Redundant fail-safe mechanical brake on rotor shaft. Overspeed Protection for the G-3120 and E-3120; Rapid fail-safe brake on high speed shaft; Pitch Control system (over speed regulation) using passive spring loaded mechanism.		

Huhhot Bo-Yang Renewable Energy Co., Ltd (China)



#2 Lane to the west of
Machine Tool
Accessory Plant,
HaiXi Road, Huhhot,
Inner Mongolia, China

www.boyangenergy.com

Tel: +86 471 3966770

Fax: +86 471 3966770

E-mail:

boyangenergy@163.com

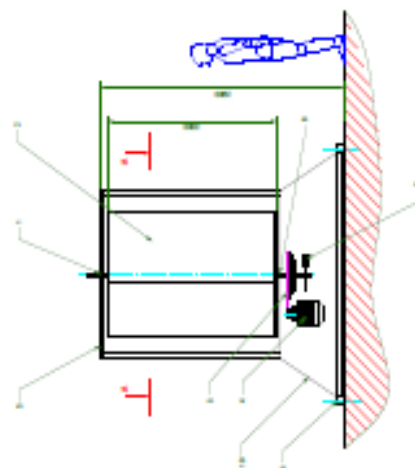
Contact: Zhangbo

Established in 2001

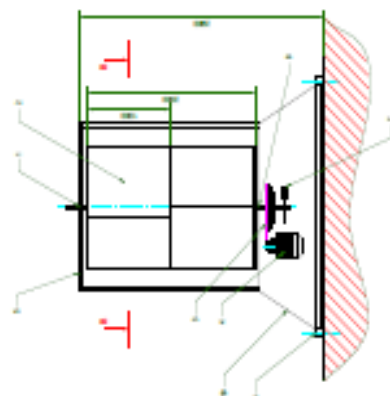
Distribution:
Domestic, International
and Direct from factory

Model	WG 300W	WG 1KW	WG 5KW
Orientation	Upwind		
Rated Output	300 W	1 kW	5 kW
Peak Output	400 W	1.5 kW	5 kW
Output Voltage (V)	24 or 36	56	220 or 380
Generator Type	10 pole PMG		
Applications	Stand Alone		
Controller Type	ORBITAL controller		
Overspeed Protection	Mechanical stall		
Blade Material	Wood and glass fiber		
# of Blades	3		
Rotor Diameter (m)	2.5	3	4
Swept Area (m ²)	4.9	7.1	12.57
Windspeed (m/s)			
Rated	8	9.2	12
Cut-in	3.2		4
Cut-out	Non-stop		
Governing	12		
Survival	60		55
Head Weight (kg)	55	80	260
Tower Type	Guyed pipe		
Tower Height (m)	6	6 or 8	12
Product Life (years)	8		15
Warranty (years)	2		
Units sold	20 000	15 000	
Years on the market	12		
Price	Contact Bo-Yang Company for current price information.		
Additional Info			

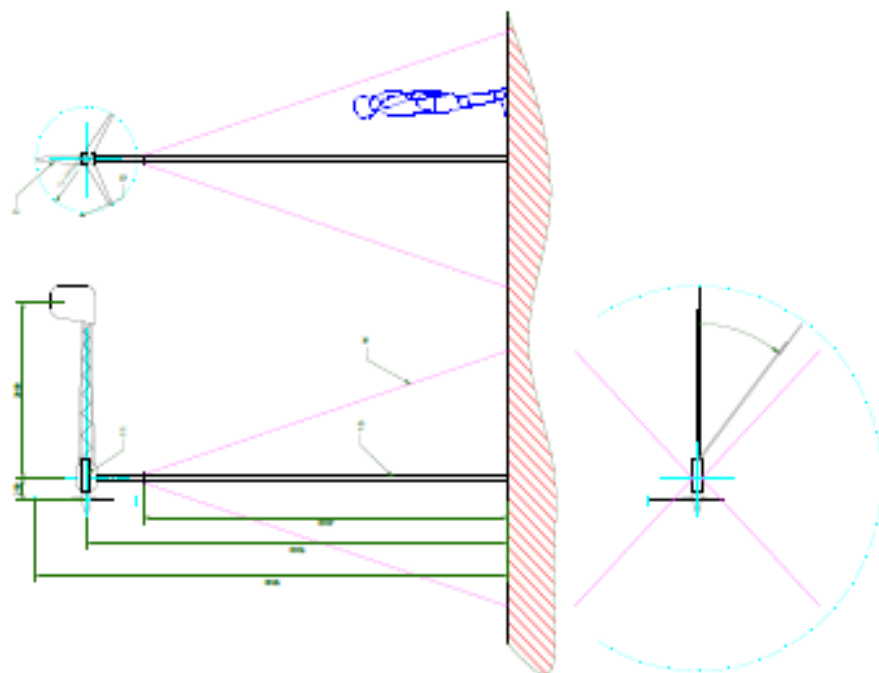
1 - Saventuv motor



2 - Dvoustupňový Savonius motor



3 - Třída vstupů a elektřina





www.spolstav.cz

20.11.2013