



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# **VYUŽITÍ ENERGIE VĚTRU PRO KRYTÍ POTŘEB MALÉHO OBJEKTU**

WIND POWER PRODUCTION FOR SMALL-SCALE ENERGY SUPPLY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**RICHARD PAVLIK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ POSPÍŠIL, Ph.D.**

BRNO 2011



## **Abstrakt**

Náplní této bakalářské práce je problematika využívání energie větru. Nejprve je zde popsán vznik větru, způsoby měření směru a rychlosti proudění a následně princip využívání energie větru větrnými motory. V další části jsou představeny větrné motory z hlediska konstrukce, výstavba větrných parků, vývoj nových typů větrných motorů a možnosti akumulace vyrobené energie. Na závěr je proveden návrh systému větrné elektrárny pro krytí potřeb malého objektu včetně ekonomického zhodnocení.

## **Klíčová slova**

Vítr, energie, obnovitelné zdroje, větrný motor, větrný park, akumulátor, návrh

## **Abstract**

The aim of this work is the issue of utilization of wind energy. At first, the cause of wind, measuring methods of wind direction and speed and the principle of utilization of wind energy by wind turbines are described. Subsequently, the structure of wind turbines, the construction of wind parks, the development of new types of wind turbines and the possibilities of energy accumulation are introduced. In conclusion, the concept and the economic evaluation of wind powered system for small scale energy supply is analyzed.

## **Key words**

Wind, energy, renewable energy resources, wind turbine, wind farm, accumulator, concept

### **Bibliografická citace práce:**

PAVLIK, R. *Využití energie větru pro krytí potřeb malého objektu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

### **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu vypracoval samostatne na základe uvedenej literatúry pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

V Brne, dňa 23.5.2011

.....  
Richard Pavlik

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za pedagogickú a odbornú pomoc pri tvorbe bakalárskej práce. Ďalej by som chcel poďakovať rodičom a priateľom, ktorí ma podporovali pri štúdiu.

# Obsah

|       |                                                                                     |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Úvod.....                                                                           | 10 |
| 2     | Vietor .....                                                                        | 11 |
| 2.1   | Vznik vetra .....                                                                   | 11 |
| 2.2   | Meranie smeru a rýchlosti vetra .....                                               | 12 |
| 3     | Využívanie energie vetra .....                                                      | 14 |
| 4     | Prevedenie veterných motorov .....                                                  | 17 |
| 4.1   | História.....                                                                       | 17 |
| 4.2   | Prehľad základných typov veterných motorov .....                                    | 18 |
| 4.2.1 | Veterné motory so zvislou osou.....                                                 | 18 |
| 4.2.2 | Veterné motory s vodorovnou osou.....                                               | 19 |
| 4.3   | Veterné parky .....                                                                 | 23 |
| 4.3.1 | Veterné parky na pevnine .....                                                      | 23 |
| 4.3.2 | Morské veterné parky .....                                                          | 24 |
| 4.4   | Vývojové smery veterných motorov .....                                              | 26 |
| 5.    | Akumulácia elektrickej energie .....                                                | 27 |
| 5.1   | Elektrochemická akumulácia .....                                                    | 27 |
| 5.1.1 | Kyselé akumulátory .....                                                            | 27 |
| 5.1.2 | Alkalické akumulátory.....                                                          | 28 |
| 5.2   | Mechanická akumulácia.....                                                          | 29 |
| 5.2.1 | Prečerpávacie vodné nádrže.....                                                     | 29 |
| 5.2.2 | Zásobníky stlačeného vzduchu .....                                                  | 30 |
| 5.2.3 | Zotrvačníky .....                                                                   | 30 |
| 5.3   | Tepelná akumulácia .....                                                            | 31 |
| 6     | Návrh veternej elektrárne pre zásobovanie malého objektu elektrickou energiou ..... | 33 |
| 6.1   | Výber lokality.....                                                                 | 34 |
| 6.2   | Poveternostné podmienky danej lokality .....                                        | 35 |
| 6.3   | Voľba komponentov .....                                                             | 36 |
| 6.4   | Výpočet energie vyrobenej veternou elektrárnou za jeden rok.....                    | 38 |
| 6.5   | Ekonomické vyhodnotenie veternej elektrárne .....                                   | 42 |
| 7     | Záver .....                                                                         | 45 |
| 8     | Zoznam použitých zdrojov .....                                                      | 46 |
| 9     | Zoznam použitých skratiek a symbolov .....                                          | 50 |

# 1 Úvod

Vezmeme 100 kilogramov deutéria, pridáme 150 kilogramov trícia. V termojadrovej elektrárni prebehne fúzia, pri ktorej sa uvoľní energia schopná pokryť výkon dvoch blokov atómovej elektrárne Mochovce za celý rok. Takto by mohla vyzerat' budúcnosť výroby energie. Oba izotopy vodíka sú takmer nevyčerpatel'né, no pre vytvorenie podmienok na zlúčenie dvoch atómov je treba vyvinúť teplotu 150 miliónov stupňov Celzia, čo sa dá prirovnať k desaťkrát vyššej teplote ako v jadre Slnka. Bohužiaľ, dostupná technológia na využitie tohto obrovského zdroju energie na Zemi zatiaľ nejestvuje.

Na pokrytie energetickej spotreby ľudstvo využíva najmä spaľovanie fosílnych palív, ako uhlie, ropa alebo zemný plyn. Ložiská týchto zdrojov energie sú však obmedzené a môžu byť za niekoľko desaťročí nenávratne vyčerpané, čo spôsobuje aj nárast ich cien. V tejto dobe sa však do pozornosti dostáva otázka klimatických zmien. Dlhú dobu sa zmena klimatických podmienok spochybňovala, no dnes už nikto nepochybuje, že dochádza k zvýšenému otepľovaniu zemského povrchu, ktoré ovplyvňuje životné podmienky a to výraznejšie, než za posledné tisícročia. Využívanie fosílnych palív je zdrojom koncentrácie stopových plynov v atmosfére, čo sa považuje za hlavnú príčinu zvyšovania teploty. Najdostupnejšie riešenie týchto problémov je postupná náhrada terajších spôsobov získavania energie zdrojmi obnoviteľnými - regeneratívnymi, ktoré by mohli pokryť spotrebu klimaticky šetrným a trvale udržateľným spôsobom.

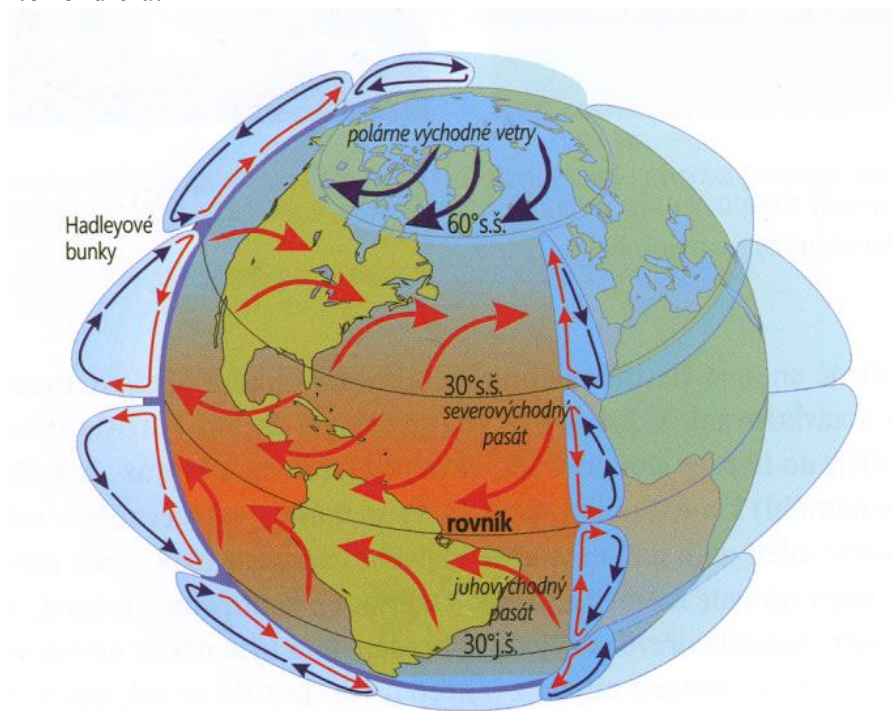
Medzi formy obnoviteľných energií patrí napr. slnečná energia, termálna energia, veterná energia alebo energia biomasy. Zdroj týchto energií, Slnko, sa v porovnaní s dobou do vyčerpania fosílnych palív považuje za nevyčerpatel'né. Využívanie obnoviteľných zdrojov siaha ďaleko do minulosti, pred spaľovanie fosílnych palív, avšak dostupnosť a efektívnosť spracovania uhlia, ropy, zemného plynu, a neskoré vytvorenie iniciatívy pre podporu spoľahlivého získavania energií z dlhodobého hľadiska, spôsobilo kvantitatívny skok medzi počtom zariadení v minulosti a dnešnej dobe. Eliminácia tohto rozdielu by mala byť spoločným záujmom dnešných aj budúcich generácií.

Cieľom tejto práce je zamerať sa na problematiku energie vetra, ktorá sa môže medzi ostatnými zdrojmi obnoviteľných energií pýšiť titulom „vzorová“, pretože sa dokázala v priebehu niekoľkých rokov vyvinúť z úzadia do odvetvia s miliardovým obratom.

## 2 Vietor

### 2.1 Vznik vetra

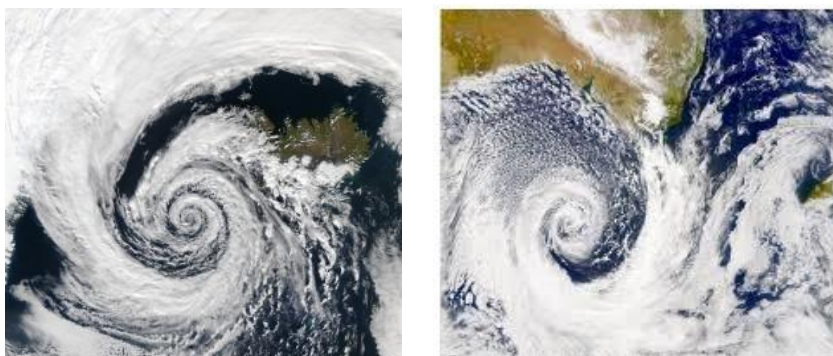
Pohyb vzduchu vzniká v dôsledku rozdielov v atmosférickom tlaku, pôsobením rozdielných teplôt a následne im odpovedajúcim hustotám vzduchu. Vzduch prúdi z miest s vyššou hodnotou tlaku vzduchu do miest o nižšom tlaku a rýchlosť prúdenia je závislá na veľkosti tohto rozdielu.



Obr. 2.1 Globálne prúdenie vzduchu. [2]

Za vznik týchto rozdielov môže Slnko, ktoré na Zem vyžaruje obrovské množstvá energie. Z dôvodu natočenia zemskej osi o  $23,5^\circ$  od roviny obiehanie okolo Slnka sa mení množstvo tepla, ktoré dopadá na určité miesto na zemskom povrchu a s ním aj teplota a hustota vzduchu. Dráha, ktorú musí prekonať slnečné svetlo k zemským pólom je dlhšia ako k rovníku, čo spôsobuje, že sa v týchto miestach vyžaruje do priestoru nepomerne viac energie, než sa prijíma. Na rovníku je situácia opačná, množstvo dopadajúcej energie je väčšie ako tej, ktorá uniká do kozmu. Výsledkom teplotného rozdielu je globálny transport tepelnej energie od rovníku k pólom, ktorý sa realizuje prostredníctvom vzduchovej výmeny.

Na Zemi existujú dve pásma vysokého tlaku medzi  $30^\circ$  a  $40^\circ$  severnej a južnej šírky, odkiaľ prúdi vzduch pri povrchu do oblastí nízkého tlaku na rovníku a druhým smerom k pólom. Toto prúdenie je značne ovplyvnené zemskou rotáciou. Na miestach s vyššou obvodovou rýchlosťou, na rovníku, zaostáva vzduchová vrstva za rotujúcim povrchom a odchyľuje sa na západ (severovýchodný pasát) a na miestach, kde vzduchový prstenec predbieha povrch, dochádza k stáčeniu vetra na východ (juhovýchodný pasát). Z dôvodu opačného prúdenia vzduchu vo vyšších vrstvách atmosféry, do miest vysokého tlaku, vznikajú na oboch pologuliach tri takzvané Hadleyové bunky: nad tropickým pásmom, miernym pásmom a nad polárnou oblasťou. Tieto prstence sú v priebehu roka deformované nerovnomerným ohrievaním vzduchu nad pevninou a morskou vodou.



Obr. 2.2 Vľavo: tlaková níz nad Islandom. Vpravo: tlaková níz nad Austráliou. [7] [8]

Na základné prúdenie vzduchu majú vplyv aj miestne tlakové výše a níz. Rotácia vzduchu okolo tlakových níží je v protismere hodinových ručičiek na severnej pologuli a na južnej v smere hodinových ručičiek. Zmysel rotácie okolo tlakových výší je opačný.

## 2.2 Meranie smeru a rýchlosti vetra

Meranie rýchlosti a smeru vetra, spolu s ostatnými klimatickými faktormi, sa zvyčajne uskutočňuje rozmiestnením siete meteorologických staníc. Pre všetky merania platia určité štandardy, napr. výška, pri ktorej sa meria rýchlosť a smer prúdenia vzduchu, by mala byť 10 metrov nad povrchom. Ak meranie v tejto výške nie je uskutočniteľné, hodnoty nameraných rýchlostí sa podľa dohodnutého spôsobu prepočítavajú. Štandardizovaná je aj doba, kedy sa odčítavajú merané veličiny. Pokiaľ sa nemeria nepretržite, hodnoty sa odčítavajú súčasne v termínoch dohodnutých rovnako na celom svete a to v 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 a 21 hodín svetového času, avšak vo väčšine prípadov sa na meteorologických staniách meranie uskutočňuje v takzvaných klimatických termínoch, v 7, 14 a 21 hodín miestneho stredného slnečného času, čo je výrazne menej náročné na čas. Tieto časy sa zhodujú so SEČ na 15° východnej šírky, pričom o každý stupeň na východ sa meria o 4 minúty skôr a smerom na západ o 4 minúty neskôr.



Obr. 2.3 Príklad anemometru s veternou smerovkou. [9]

Na meranie smeru vetra sa väčšinou používa veterná smerovka, skladajúca sa zo zvislej dosky, ktorá sa v určitej vzdialenosti od jej ťažiska otáča okolo zvislej osi. Väčšinou býva súčasťou rýchlomera. Pre menej presné meranie sa môže použiť aj veterný rukáv, napr. pri diaľniciach alebo letiskách, ktorý je veľmi dobre viditeľný. Smer vetra sa udáva v desiatkach stupňov azimutu, pričom sa používa 36 smerov. Základné značenie je: E (východ) – 09, S (juh) – 18, W (západ) – 27 a N (sever) – 36, pre bezvetrie platí 00.

Rýchlosť vetra sa zvyčajne udáva v metroch za sekundu ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), no s obľubou sa používa aj Beaufortová stupnica (bft).

| Stupeň | Vietor         | Rýchlosť |         | Účinky                                    |
|--------|----------------|----------|---------|-------------------------------------------|
|        |                | m/s      | km/h    |                                           |
| 0      | bezvetrie      | < 0,5    | < 1,0   | dym stúpa kolmo hore                      |
| 1      | vánok          | ~1,25    | 1-5     | smer vetra poznateľný podľa pohybu dymu   |
| 2      | vetrík         | ~3       | 6-11    | listie stromov šuští                      |
| 3      | slabý vietor   | ~5       | 12-19   | listy stromov a vetvičky v trvalom pohybe |
| 4      | mierny vietor  | ~7       | 20-28   | zdvíha prach a útržky papieru             |
| 5      | čerstvý vietor | ~9,5     | 29-39   | listnaté kríky sa začínajú hýbať          |
| 6      | silný vietor   | ~12      | 40-49   | telegrafné drôty svišťa                   |
| 7      | mierny víchor  | ~14,5    | 50-61   | celé stromy sa pohybujú                   |
| 8      | čerstvý víchor | ~17,5    | 62-74   | lámu sa vetvy                             |
| 9      | silný víchor   | ~21      | 75-88   | vietor strháva komíny, škridly zo striech |
| 10     | plný víchor    | ~24,5    | 89-102  | vytrháva stromy, škody na obydlích        |
| 11     | vichrica       | ~29      | 103-114 | pôsobí rozsiahle škody                    |
| 12-17  | hurikán        | > 30     | > 117   | ničivé účinky                             |

Tab. 2.1 Beaufortová stupnica sily vetra. [2]

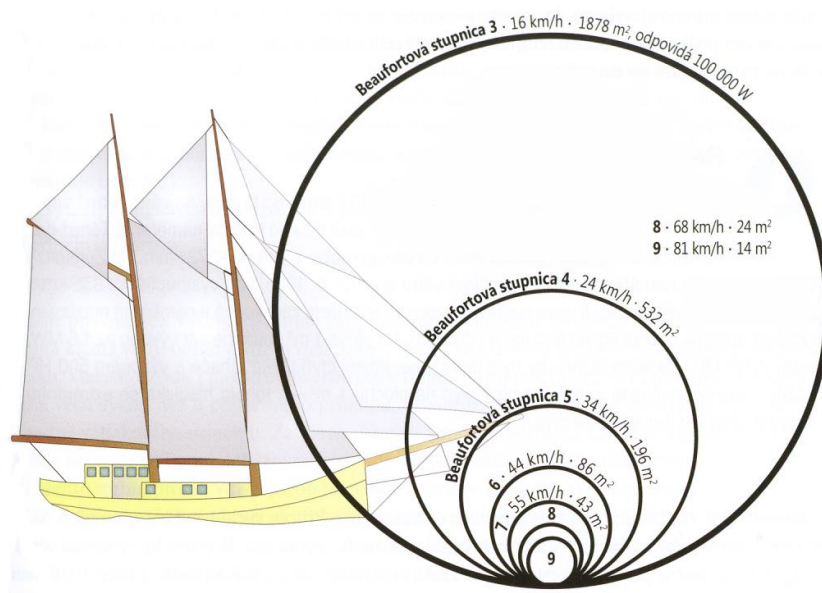
Na meranie rýchlosti vetra sa väčšinou používa zariadenie nazývané miskový anemometer. Skladá sa z polgulových misiek uchytených na trojramennom rotore, ktorý rotuje na zvislom hriadelí. Hriadeľ býva spojený s permanentným magnetom ako rotor dynama. Vyrobené napätie je úmerné rýchlosti vetra a meria sa galvanometrom. Niekedy sa na snímané napätie prevádzajú otáčky kríža s miskami. Z dôvodu zotrvačnosti pohybu častí anemometru sa musí počítať s malými odchýlkami v nameranej priemernej rýchlosti oproti skutočnej. Prístroj zaznamenáva rýchlosti od 1 až 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pri nepretržitom meraní sa spravidla vyhodnocuje priemerná rýchlosť vetra za hodinu.

Na presnejšie zaznamenávanie zmeny rýchlostí sa používajú prístroje založené na snímaní dynamického tlaku vzduchu, tzn. tlaku, ktorý vznikne pri spomalení prúdenia vzduchu na nulovú rýchlosť. Používajú sa však hlavne na meranie väčších rýchlostí vetra.

Tretia varianta využíva anemometer s nahriatym drôtom, umiestneným kolmo na smer vetra. Prúdením vzduchu dochádza k ochladzovaniu drôtu, pričom sa zaznamenáva zmena jeho elektrického odporu, alebo zmena napätia oproti nechladenému drôtu.

### 3 Využívanie energie vetra

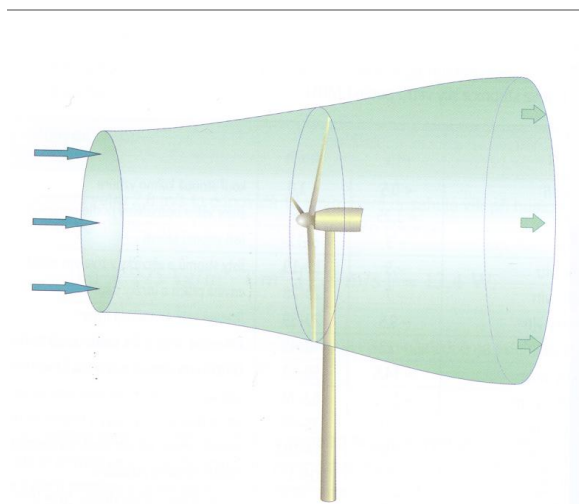
Potenciál využívania energie z vetra niekoľkonásobne prevyšuje celkový dopyt po energii, nie všade je však jej využívanie možné. Z technologického hľadiska je najdostupnejšie získavanie energie na pevnine, tam však vplyvom povrchových nerovností rýchlo klesá rýchlosť vetra a ovplyvnený je aj smer prúdenia. Podľa tvaru prekážky môže dochádzať k poklesu rýchlosti až o 40%, do vzdialenosti piatich výšok danej prekážky a turbulentné zmeny v rýchlosti značne zvyšujú namáhanie rotoru. Z tohto dôvodu sa generátory umiestňujú do vyšších polôh a pokrývajú stále väčšiu plochu. Optimálne miesta sú vrcholky kopcov a hôr, kde je sa už dá považovať vplyv nerovností za zanedbateľný. Ideálna, avšak technologicky náročnejšia, je výstavba generátorov nad otvoreným morom, kde je priemerná rýchlosť prúdenia vzduchu viditeľne väčšia a nenachádzajú sa tam žiadne prekážky, ktoré by mohli rýchlosť ovplyvniť. Kompromis poskytujú miesta na pobreží, kde dochádza k prúdeniu z mora na pevninu.



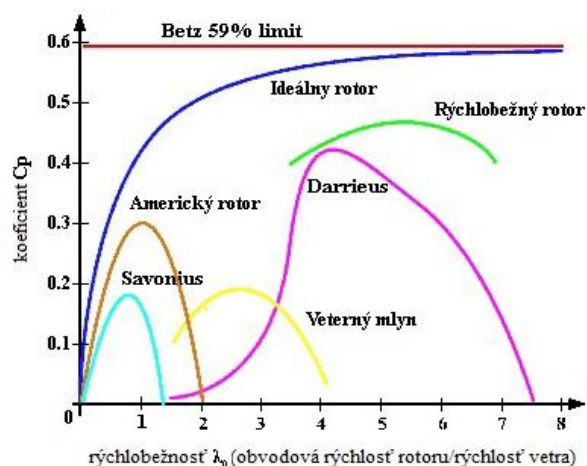
Obr. 3.1 Plocha potrebná na získanie výkonu 100 kW pri rôznych rýchlostiach vetra. [2]

Pri využívaní veternej energie sa musí počítať s veľkou premenlivosťou v sile prúdenia vzduchu. Veterné motory by mali byť natoľko citlivé, aby dokázali využiť poskytnutý výkon aj pri nízkych rýchlostiach vetra, avšak v prípadoch extrémne vysokých rýchlostí nesmie dôjsť k porušeniu častí zariadenia.

Moderné systémy pracujú na princípe spomaľovania rýchlosti prúdenia, čím dochádza k zmene tohto prúdu tak, že za generátorom preteká väčšou plochou. Už v roku 1920 nemecký fyzik Karl Betz uviedol, že k tomu aby sa využila celková kinetická energia vetra, muselo by sa jeho prúdenie spomaliť na nulovú rýchlosť, čo však nie je možné. Dokázal, že ak sa pôvodná rýchlosť vetra spomalí na tretinu, dochádza k maximálnej efektívnosti využívania dostupného výkonu. Táto hodnota využiteľného výkonu, 59,3%, bola pomenovaná na jeho počesť ako Betzov výkonnostný koeficient. Tento koeficient, anglicky nazývaný „power factor ( $C_p$ )“, je jedna z veličín, ktoré sa udávajú v prospektoch k veterným elektrárnám a vyjadruje ich maximálnu účinnosť, tzn. akú veľkú časť veternej energie dokážu využiť. Najmodernejšie veterné motory navrhnuté na hranicu fyzikálnych možností sú schopné vyžívať maximálne 50% výkonu vetra za optimálnych podmienok.



Obr. 3.2 Schéma prúdenia vzduchu turbínou. [2]

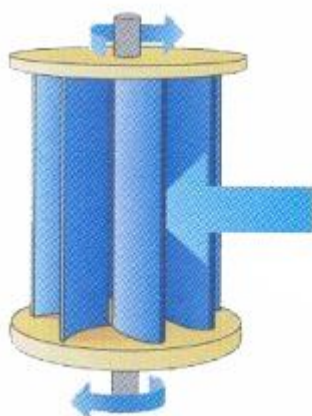


Obr. 3.3 Prehľad účinností veterných motorov. [10]

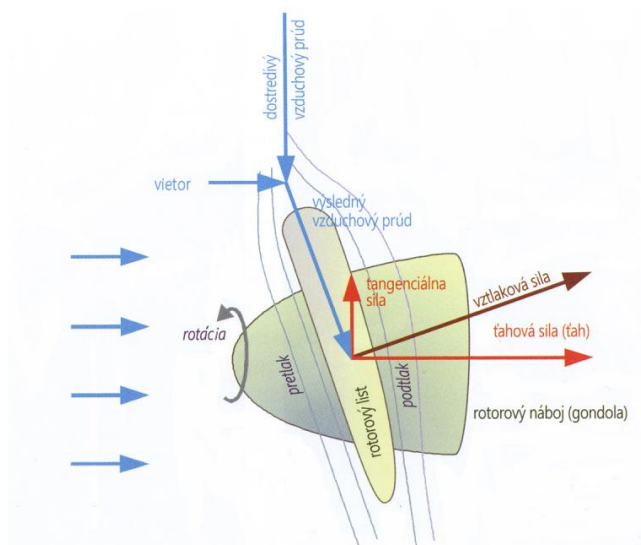
Veterné motory sa z aerodynamického hľadiska delia do dvoch skupín:

- veterné motory odporové
- veterné motory vztlakové

Medzi prvé zariadenia pracujúce na odporovom princípe patria staré plachetnice s rahnovými plachtami. Ich pohon zabezpečoval vietor, ktorý pôsobil tlakom na odpor kladúcu plachtu. Odporové veterné motory patria medzi najstaršie typy veterných motorov. Pracujú na rovnakom princípe, kde na náveternú plochu pôsobí sila, ktorá sa premieňa na rotačný pohyb. Táto plocha rýchlosť vetra spomaľuje a pohybuje sa v smere prúdenia. Z dôvodu vykonávania rotačného pohybu sa určité plochy rotoru vždy dostávajú do protismeru tohto prúdenia. Tým, že sa funkčné plochy vyrábajú v tvare, kedy sa ich odpor mení v závislosti na natočení, sa tento jav podstatne eliminuje. Druhou variantou je prekrytie plôch pohybujúcich sa proti vetra štítom, ktorý sa podľa smeru prúdenia natáča. Tretou je natáčanie plôch rotoru pomocou zvláštného mechanizmu, v závislosti na smere pohybu voči smeru vetra.



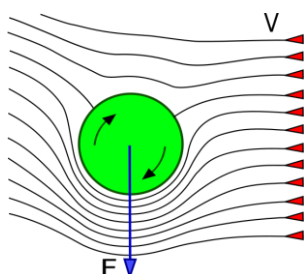
Obr. 3.4 Rotor s valcovými plochami. [11]



Obr. 3.5 Princíp funkcie rotoru s horizontálnou osou. [2]

Moderné veterné motory pracujú výhradne na princípe vztlakovom, pričom ako najefektívnejšie sa ukázali rotory s horizontálnou osou. Vzduchový prúd, ktorý pôsobí na každý list rotoru, sa skladá zo súčtu dvoch zložiek: prúdu, ktorý vytvára vietor prúdiaci spredu na náboj a z dostredivého vzduchového prúdu, ktorý obteká strany listu pri otáčaní. Vplyvom aerodynamického profilu listu, profil „krídla“, dochádza k rozdeľovaniu výsledného vzduchového prúdu a to tak, že na hornej strane listu musí prúd vzduchu uraziť väčšiu dráhu ako na spodnej. Dochádza k zhutňovaniu prúdnic, narastá rýchlosť prúdenia a tým vzniká podtlak. Výsledkom tlakových rozdielov je vztlaková sila pôsobiaca kolmo na výsledný vzduchový prúd. Pôsobenie tejto sily sa rozkladá do dvoch zložiek, z ktorých väčšia, ťahová sila, negatívne vplyva na listy rotoru a spôsobuje ohybové namáhanie. Menšia, tangenciálna sila pôsobiaca na obvode rotoru, vytvára užitočný točivý moment. Natáčaním sklonu listov rotoru, v závislosti na rýchlosti vetra, sa veľkosť tangenciálnej zložky optimalizuje. Tento dej sa odborne nazýva „pitch control“.

Na vztlakovom princípe pracujú aj veterné motory využívajúce takzvaného Magnusovho efektu. Hlavnou časťou tohto typu motoru je rotujúci valec, ktorý v homogennom prúde tekutiny vyvolá vo svojej blízkosti nerovnomerné zakrivenie prúdnic, pričom vzniká vztlaková sila. V smere pôsobenia tejto sily dochádza následne k pohybu valca. Pri optimálnom pomere rýchlosti rotácie valca a rýchlosti prúdenia tekutiny môže byť veľkosť vzniknutej vztlakovej sily niekoľkokrát väčšia ako u najlepších aerodynamických profilov. K výrobe energie by mohla slúžiť súprava vozíkov s generátormi na kolesách, pohybujúcich sa po uzavretej dráhe, pričom pohyb umožňujú rotujúce valce so zvislou osou (tzv. Flettnerov rotor, podľa vynálezcu Antona Flettnera). Nevýhodou sú však vysoké náklady a fakt, že pri objazdu dráhy by bolo nutné dvakrát zmeniť smer rotácie valca. Flettnerové rotory našli uplatnenie v lodnej doprave. Loď E ship 1 využíva výfukové plyny z dieselových motorov, poháňajúcich lodné šróby, k pohonu 27 metrov vysokých a 4 metre širokých vertikálnych valcov. Tieto pomocné „plachty“ znižujú spotrebu paliva o 30 – 40 %.



Obr. 3.6 Princíp Magnusovho efektu. [12]



Obr. 3.7 Loď E ship 1 využívajúca Flettnerové rotory. [13]

Podľa uplatnenia je veterné motory možné rozdeliť do 3 základných skupín:

- **Výroba elektrickej energie:** pohon generátorov s výkonom stoviek wattov až do niekoľkých megawattov.
- **Čerpanie vody:** bežne využívané pri zavlažovaní z riek, pri odvodňovaní alebo zásobovaní vodou zo studní.
- **Mechanické pohony:** v minulosti využívané na mletie obilia a ako pohon pracovných strojov v dielňach, aktuálne je to priama výroba tepla.

## 4 Prevedenie veterných motorov

### 4.1 História

Energia vetra slúžila ľuďstvu už veľmi dávno v minulosti. Patrí k najdostupnejším zdrojom užitočnej práce a preto sa jej využívanie objavuje už v období pred 5000 rokmi, kde vietor poháňal plachty lodí na Níle. V 17. Storočí pred Kristom zavodňujú svoje územia pomocou veternej energie panovníci Mezopotámie a pramene obsahujúce záznamy o prvých veterných mlynoch sú staré asi 2200 rokov. Vyskytovali sa na územiach Perzie a starovekej Číny, kde boli zostrojované s vertikálnou osou. Záznamy o najstarších veterných motoroch s vodorovnou osou pochádzajú z Egypta a datujú sa do obdobia 3. storočia pred Kristom.[1]



Obr. 4.1 Vľavo: staroveké perzské veterné mlyny. Vpravo: veterné mlyny, Castilla la Mancha, Španielsko. [14] [15]

V stredovekej Európe sa veterné mlyny začali rozširovať v 13. storočí. Medzi prvé patrili mlyny v Taliansku, Francúzsku, Španielsku a Portugalsku, neskôr vo Veľkej Británii, Holandsku a Nemecku. Najvýznamnejšou krajinou vo využívaní veternej energie bolo Holandsko, ktoré využívalo vietor, okrem mletia obilia a výroby oleja a papiera, na odčerpávanie vody a v 19. storočí tu už stálo okolo 9000 veterných mlynov. V tomto období dochádzalo aj k výstavbe v západných oblastiach USA, kde sa malé veterné motory používali prevažne na čerpanie vody pre potreby fariem.

Vynájdением parného motoru a postupným rozvojom malých spaľovacích motorov dochádzalo k rapidnému úpadku veterných motorov. K výnimkám patrili motory ako napr. veterný motor postavený na Kryme v roku 1931 s výkonom 100 kW, anglický veterný motor spoločnosti Enfield Cable Company okolo roku 1950 s dutými, na konci otvorenými lopatkami, ktoré odsávali vzduch zo stožiaru s rýchloběžnou turbínou opatrenou generátorom a najväčší veterný motor tej doby Smith-Putnam, nainštalovaný vo Vermonte, s výkonom 1250 kW. K najúspešnejším veterným motorom patrila Hütter-Algaier o výkone 100 kW, prevádzkovaný v rokoch 1957 až 1968. Z dôvodu ochrany životného prostredia a prudkého zvýšenia cien fosílnych palív však dochádza k opätovnému návratu k využívaniu veternej energie a značnému rozvoju tohto odvetvia.

## 4.2 Prehľad základných typov veterných motorov

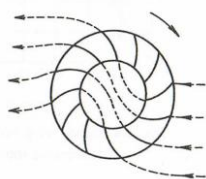
Podľa polohy osi rotoru voči zemskému povrchu sa veterné motory delia do 2 skupín:

- veterné motory so zvislou (vertikálnou) osou
- veterné motory s vodorovnou (horizontálnou) osou

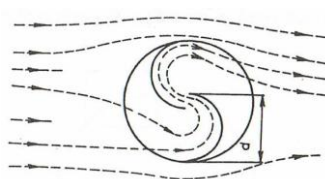
### 4.2.1 Veterné motory so zvislou osou

K najstarším typom veterných motorov patria motory so zvislou osou. Vyznačujú sa jednoduchou konštrukciou a absenciou zložitého mechanizmu na prenos výkonu, pokiaľ nepracujú vo veľkých výškach. Podľa princípu práce sa rozdeľujú na odporové a vztlakové.

Medzi menej využívané typy patria motory odporové, ktorých základné prevedenia boli popísané v kapitole 3. Medzi typické vlastnosti patrí malá rýchlobežnosť  $\lambda_0$  (pomer rýchlosti konca lopatky a rýchlosti vetra) a nízky výkonnostný koeficient, ktoré sú dôsledkom pohybu častí rotoru proti smeru prúdenia vetra. Nevýhodou je aj vysoká hmotnosť a relatívne veľký odpor pri nečinnosti. Efektívnejšie využívanie energie vetra dosahujú rotory Lafond a Savonius, ktoré však nejde jednoznačne zaradiť medzi odporové. Pri dobrom prevedení dokáže Lafondová turbína využívať až 16% energie vetra a k rozbehu dochádza od rýchlosti približne  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Najdokonalejším veterným motorom z tejto skupiny je motor využívajúci Savoniov rotor, ktorý pracuje na princípe prúdenia vzduchu medzi dvoma polovicami valcových plôch. Pri optimálnom presadení týchto plôch, čo odpovedá šiestine priemeru jednej plochy, môže výkonnostný koeficient dosahovať hodnotu až 30%.

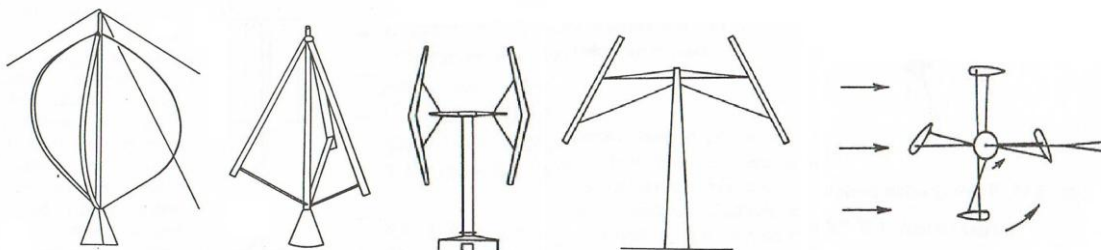


Obr. 4.2 Obtekanie rotoru Lafond. [1]



Obr. 4.3 Obtekanie rotoru Savonius. [1]

Veterné motory so zvislou osou, ktoré pracujú na vztlakovom princípe, patentoval francúzsky inžinier Georges Jean Marie Darrieus. Základný typ rotoru má tvar gréckeho písmena  $\Phi$ , existujú však aj prevedenia v tvare trojuholníku, písmena H alebo s prizmatickými listami, ktoré umožňujú regulovať otáčky rotoru zmenou sklonu. Počet listov môže byť 2, 3 alebo 4 a sú tvarované za účelom minimalizácie vplyvu odstredivých síl. Navzdory tomu, že veterné motory tohto typu pracujú nezávisle na smeru prúdenia vetra, im tvar neumožňuje rozbehnutie bez cudzieho zdroja. Tento nedostatok sa eliminuje použitím rotoru s prizmatickými listami, ktoré oscilujú okolo pozdĺžnej osi v rozsahu niekoľkých stupňov. Tento mechanizmus však podstatne komplikuje celú konštrukciu a negatívne vplyva na životnosť a spoľahlivosť. Odborne sa rotor tohto typu nazýva „giromill“ alebo „cyclogiro“.



Obr. 4.4 Typy rotorov Darrieus. Zľava:  $\Phi$ ,  $\Delta$ , H, s prizmatickými listami a rotor giromill. [1]

#### 4.2.2 Veterné motory s vodorovnou osou

Medzi najrozšírenejšie veterné motory tejto doby patria motory s vodorovnou osou a rovinou otáčania kolmou na smer prúdenia vetra. Pracujú výhradne na princípe vztlakovom a rozdeľujú sa do 3 skupín:

- veterné mlyny
- pomalobežné veterné motory
- rýchlobežné veterné motory

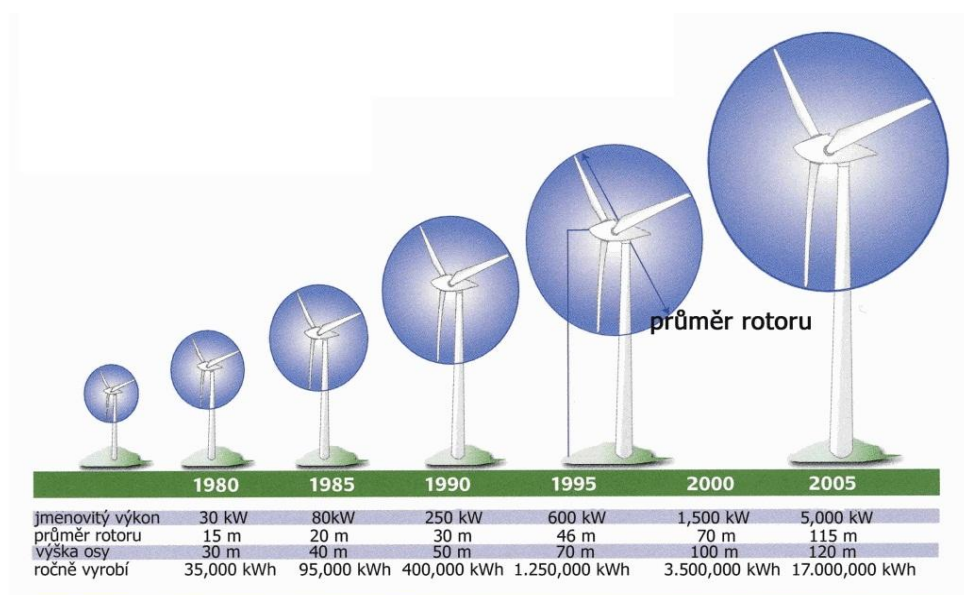
Veterné mlyny sú neodmysliteľnou súčasťou histórie využívania vetra. Stáročia zbierania skúseností so stavbou a vylepšovaním ich konštrukcie prispeli k postupnému zdokonaleniu rotorov. Prevedenie a aerodynamické vlastnosti moderných veterných motorov umožňujú rozbeh aj pri nízkych rýchlostiach a využívanie stále väčšej časti veternej energie.

Okolo roku 1870, pri osídľovaní USA, zohrali významnú úlohu hlavne pomalobežné veterné motory. Ich rotor je tvorený veľkým počtom jednoduchých plechových lopatiek, ktoré umožňujú motoru dosahovať výkonnostný koeficient 30% pri rýchlobežnosti 1. Z dôvodu vhodnosti nízkej frekvencie otáčania rotoru pre čerpanie vody sú tieto motory schopné rozbehu už pri rýchlostiach vetra 2 až 3 m.s<sup>-1</sup>. Hlavnou nevýhodou rotoru je veľká plocha vystavená náporu vetra aj pri zastavení, čo spôsobuje zvyšovanie nároku na reguláciu a namáhania konštrukcie. V tomto prípade nepomôže ani natočenie rotoru po smeru prúdenia vetra, pretože rotor nedokáže dostatočne rýchlo reagovať na zmeny v smere prúdenia. Ďalšou z nevýhod veľkého počtu lopatiek je vysoká hmotnosť, preto sa bežne vyrábajú rotory do veľkosti 9 metrov. Priamym spojením rotoru s čerpadlom sa však dá ušetriť na hmotnosti gondoly absenciou generátoru, v niektorých prípadoch aj prevodovky. Podstatnou výhodou tohto „amerického“ veterného motoru je jeho jednoduchá konštrukcia.



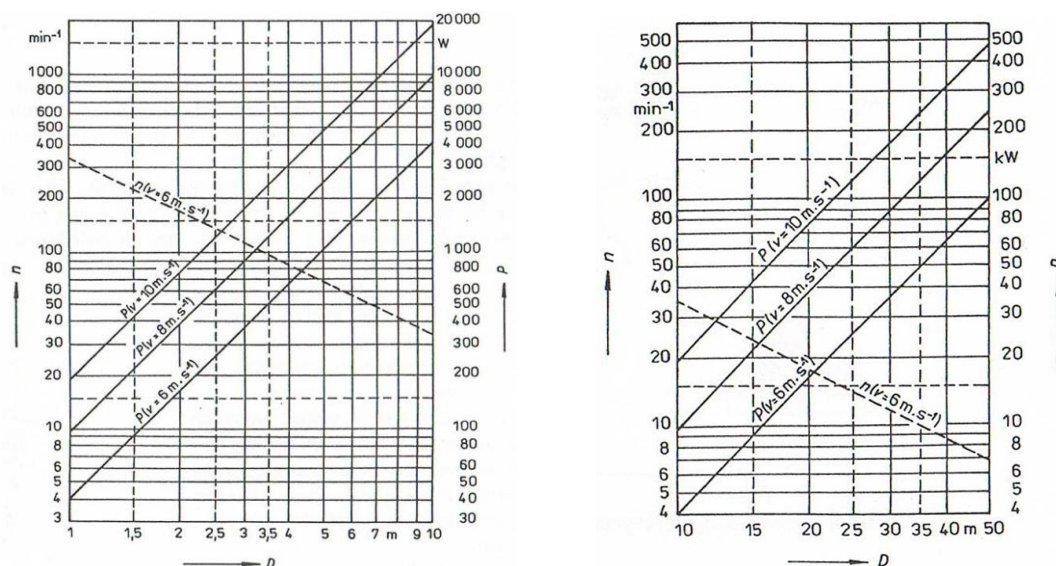
Obr. 4.5 Vľavo: pomalobežný veterný motor s dvomi rotormi. Vpravo: moderné rýchlobežné veterné motory. [16] [17]

Rýchlobežné veterné motory sa prevažne používajú na výrobu elektrickej energie. Rotory týchto motorov pozostávajú väčšinou z dvoj alebo trojlistovej vrtule, ktorá je schopná dosahovať hodnôt výkonového koeficientu väčších ako 45% pri rýchlobežnostiach 6 a viac. Prevedenie listov rotoru môže byť ako pevné alebo natáčacie, pričom každý z nich má veľmi kvalitný aerodynamický profil po celej dĺžke listu, aby bola zabezpečená čo najväčšia účinnosť a boli pritom splnené všetky požiadavky na pevnosť. Výhodou je aj relatívne malá hmotnosť rotoru, ktorá sa pohybuje od 5 do 7 kg na 1 m<sup>2</sup> u elektrární s výkonom 50 až 100 kW. Popri malej hmotnosti je oproti pomalobežnému motoru výrazne menší aj odpor, ktorý kladie plocha rotoru vetra.



Obr. 4.6 Vývoj rýchlobežných veterných motorov. [18]

V závislosti na rýchlosti vetra je v rámci potreby možné obmedziť otáčky rotoru natočením listov. Zvýšením odporu zostane pôsobenie zotrvačnej sily na prijateľnej úrovni a nemusí dôjsť k poškodeniu. Takto sú moderné rýchlobežné motory schopné spoľahlivo pracovať aj pri rýchlostiach presahujúcich  $50 \text{ až } 70 \text{ m.s}^{-1}$ , bez prerušenia chodu. Nevýhodou je však nedostatočné rozbiehanie pri malých rýchlostiach vetra. K rozbehu dôjde až pri rýchlostiach okolo  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , pričom množstvo vyrobenej energie pri takýchto rýchlostiach je veľmi malé. Z tohto dôvodu sa s rýchlobežnými motormi počíta vo veternejších oblastiach, kde sú schopné dosahovať príslušného menovitého výkonu.



Obr. 4.7 Približné hodnoty výkonu a otáčok pre priemery vrtule od 1 do 50 m.[1]

K správnej funkcii rýchlobežného veterného motoru a efektívnemu odvodu energie musia byť spoľahlivo navrhnuté všetky diely zo sústavy celého zariadenia. I tie najväčšie veterné turbíny sa dajú zmontovať v priebehu niekoľkých dní.

Základnou časťou veterného motoru je stožiar, ktorý vynáša všetky inštalované systémy do väčších výšok, do oblastí rýchlejšieho prúdenia vzduchu. Stožiar a jeho betónový základ musí odolávať pôsobeniu všetkých síl, ktoré sa akumulujú na plochách rotoru

a ďalších častí. Najčastejšie používaným typom stožiaru, hlavne pre veterné elektrárne väčších rozmerov, je kónický tubusovitý stožiar z veľkopriemerových oceľových trubiek. Výhodou tohto typu stožiaru je jeho jednoduchosť, pri dostatočnej stabilite a pevnosti. Ďalším typom stožiaru, ktorý pripomína stožiare vedenia vysokého elektrického napätia, je stožiar priehradový. Niekedy sa elektrické stožiare priamo používajú na uchytenie turbín. Na inštaláciu menších veterných motorov, väčšinou pre súkromnú produkciu elektrickej energie, sa používajú jednoduchšie stožiare opatrené vystužovacími lanami.



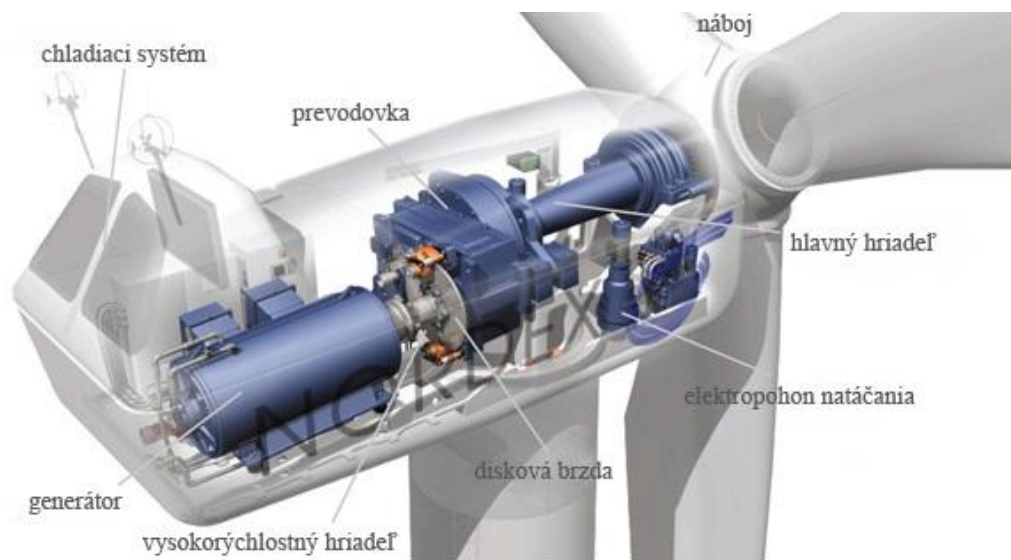
*Obr. 4.8 Typy stožiarov veterných turbín. Zľava: kónický tubusovitý, priehradový, s lanovou výstužou. [19] [20] [21]*

Na prenos všetkých pôsobiacich síl a momentov z vrtuľových listov slúži vrtuľová hlava. Obsahuje systém uchytenia lopatiek rotoru a u väčších turbín aj systém nastavovania sklonu natočenia. Vrtuľová hlava je priamo spojená s hlavným hriadeľom veternej elektrárne. Je veľmi dôležité správne dimenzovanie tohto hriadeľa, ktorý je vystavený vplyvom ohybových a krútiacich momentov, a bočnej sily, ktorá vzniká pri obtekaní vrtule vetrom.

Veterné turbíny väčších rozmerov slúžia prevažne na zásobovanie verejnej siete elektrickou energiou. Bežné uhlové rýchlosti týchto turbín sú nízke až veľmi nízke, čo priaznivo vplyva na hlučnosť vrtule. Z dôvodu nízkych otáčok sú medzi hlavný hriadeľ a generátor inštalované prevodovky, ktoré optimalizujú otáčky pre generátor. Prevodovka je svojou konštrukciou, mazaním a chladením najkomplikovanejšia časť celého zariadenia. Svojou zložitosťou produkuje väčší hluk ako samotný rotor, preto musí byť aplikovaná zvuková izolácia. Generátory s prevodovkou pracujú s otáčkami okolo 1000/min, pričom sa kladie menší dôraz na rozsah generátoru. V prípade absencie prevodovky sa generátor otáča zároveň s rotorom, čo sa prejaví výrazným zvýšením veľkosti a ceny generátoru, aby sa dosiahlo zhodnej efektívnosti. K zastaveniu otáčania za každých okolností slúži mohutná disková brzda, ktorá sa nachádza na vysokorýchlostný hriadeľ medzi prevodovkou a generátorom.

Generátory trojfázového striedavého prúdu, využívané vo veterných elektrárnach, sa delia na synchronné a asynchronné. Synchronné generátory pracujú s konštantnou rýchlosťou otáčania, závislou na kmitočte siete a počtom pólov, u asynchronných je rýchlosť rotoru odlišná od rýchlosti otáčania magnetického poľa statoru. Malé veterné elektrárne majú dostatočne vysoké otáčky pre použitie viacpólových synchronných generátorov s permanentnými magnetmi a usmerňovačom napájania akumulátorovej batérie alebo autonómnej jednosmernej siete o napätí 12, 24 a 120 V. Pre napájanie striedavých jednofázových spotrebičov sa tieto generátory dopĺňujú o polovodičový striedač. Vo

veterných elektrárnach stredných výkonov sa používajú asynchrónne generátory s kotvou nakrátko. Pracujú v režime generátorického chodu, kedy je rýchlosť otáčania vyššia ako u synchronných generátorov. V motorickom režime je rýchlosť otáčania o tento rozdiel nižšia. Hlavnými prednosťami týchto generátorov sú jednoduchosť a vysoká spoľahlivosť pri relatívne nízkej cene.



Obr. 4.9 Schéma gondoly veternej turbíny Nordex N90 [22]

Všetky popísané časti veternej turbíny sú uložené na masívnej základni tvorenej oceľovými nosníkmi a vytvárajú takzvanú gondolu. Tá je uložená na špeciálnom ložisku, ktoré umožňuje natáčanie gondoly voči stožiaru. Kryt gondoly býva zvukovo izolovaný.

Mechanický systém turbíny je ovládaný jednoúčelovým počítačom, ktorý zaznamenáva hodnoty z pripojených meracích čidiel a tým predchádza prípadnému poškodeniu alebo zničeniu zariadenia. V prípade ohrozenia plynulého chodu, tzn. prehriatie ložiska alebo generátoru, vysoká rýchlosť vetra atď., musí počítač celý mechanizmus zastaviť. Okrem zastavovania má za úlohu spúšťanie systému pri optimálnych prevádzkových podmienkach. Pomocou anemometrov vyhodnocuje okamžitú rýchlosť vetra a pri dostatočnej rýchlosti po určitú dobu rotor odbrzdí, poprípade spustí čiastočné roztočenie. Natočením gondoly nasmeruje vrtuľu do optimálnej polohy proti smeru vetra a po úplnom roztočení dochádza k pripojeniu generátoru do rozvodnej siete, u synchronného typu zabezpečí prífázovanie. Z dôvodu vzniku námrazy sa tiež vyhodnocuje teplota a vlhkosť vzduchu v okolí. Všetky namerané meteorologické a technické údaje z turbín sa cez modem posielajú po telefónnej sieti do riadiaceho centra.

Spoľahlivosť kvalitne navrhnutých veterných elektrární väčšinou dosahuje viac ako 95%. Nemenej dôležitá je aj pravidelná údržba, ktorá sa vykonáva obvykle raz za pol roka alebo rok. Poruchy, ktoré sa vyskytujú na turbínach sú väčšinou spôsobené extrémnymi prejavmi počasia. Z tohto dôvodu je možné celé zariadenie poistiť, pokiaľ splňuje všetky bezpečnostné predpisy. Medzi najhlavnejšie podmienky predpísané poisťovňami patrí vybavenie každej jednotky aspoň dvoma nezávislými systémami umožňujúcimi úplné zastavenie chodu v každej situácii. Okrem diskovej brzdy sa vyžaduje najčastejšie aerodynamické brzdenie. U rotorov s pevnými listami sa využíva natáčanie koncov listov, približne 15% plochy, okolo pozdĺžnej osi o uhol asi 60°. Týmto sa dosiahne obmedzenie vztlakovej sily a zvýšenie odporu v takej miere, že dôjde k spomaleniu rotácie na veľmi malé až nulové otáčky.

### 4.3 Veterné parky

Celkový prínos veternej energetiky je závislý na čo najefektívnejšom využívaní potenciálu lokalít s priaznivými rýchlosťami prúdenia vzduchu. Z tohto dôvodu sa veterné elektrárne už od počiatku výstavby umiestňujú do takzvaných veterných parkov.

Veterné parky pozostávajú z minimálne troch veterných elektrární, no v dnešnej dobe sa využívajú parky, kde sa tieto zariadenia počítajú na stovky. Oproti individuálnej výstavbe majú značné množstvo výhod. Medzi najhlavnejšie patrí racionálnejší priebeh projektovania, podstatne efektívnejšie vykonávanie údržby a z finančného hľadiska významné úspory v nákladoch pri výstavbe. Nemenej významné je aj zjednodušenie výstražných signalizačných zariadení. Vo veterných parkoch je pre prípad zníženej viditeľnosti postačujúce použitie farebného označenia koncov rotorových listov a signálnych svetiel len na vonkajších zariadeniach, čo zlepšuje prehľadnosť a šetrí prostriedky. Najväčším nedostatkom veterných parkov je vzájomné tienenie jednotlivých elektrární, ktoré sa prejavuje znížením výkonu zariadení stojacich za sebou. Z tohto dôvodu je nutné udržiavať vopred stanovené rozostupy, čo značne eliminuje spôsobené straty, avšak u každého veterného parku sa musí počítať s poklesom celkového výkonu o 3-15%. Negatívny vplyv na okolie môže mať produkovaný hluk a vrhané tieňe z elektrární, preto sa musia dodržiavať optimálne vzdialenosti od obytných domov.

#### 4.3.1 Veterné parky na pevnine



Obr. 4.10 Veterný park Tehachapi Pass, Kalifornia. [23]

Prvý, takzvaný onshore, veterný park na pevnine bol postavený v roku 1980 na juhu štátu New Hampshire v USA. Pozostával z 20 veterných elektrární, pričom každá z nich produkovala výkon 30 kW. V tejto dobe je USA najvýznamnejšou svetovou mocnosťou na poli využívania veternej energie. Najväčším výrobcom tejto energie je štát Texas, ktorý v roku 2009 poskytoval výkon 8 335 MW. K celkovému výkonu tohto štátu prispieva aj najväčší veterný park na svete Roscoe, s výkonom 781,5 MW na rozlohe 400 km<sup>2</sup>. Majiteľom parku je spoločnosť E.ON, ktorá tu nainštalovala spolu 627 veterných turbín schopných pokryť spotrebu 230 000 domácností.

| Štát       | Veterný park   | Menovitý výkon |
|------------|----------------|----------------|
| Texas      | Roscoe         | 781 MW         |
| Indiana    | Fowler Ridge   | 750 MW         |
| Texas      | Sherbino       | 750 MW         |
| Texas      | Horse Hollow   | 736 MW         |
| Kalifornia | Tehachapi Pass | 690 MW         |

Tab 4.1 Najväčšie veterné parky v USA. [24]

| Štát         | Veterný park                          | Menovitý výkon |
|--------------|---------------------------------------|----------------|
| Južná Dakota | Titan Wind Project                    | 5 050 MW       |
| Kalifornia   | Tehachapi Pass<br>(Renewable Project) | 4 500 MW       |
| Texas        | Pampa Wind Project                    | 4 000 MW       |
| Nebraska     | Banner County                         | 2 000 MW       |
| Oregon       | Shepherds Flat                        | 909 MW         |

Tab 4.2 Najväčšie plánované veterné parky v USA. [24]

Najväčším plánovaným projektom veternej energetiky na svete má byť veterný park Gansu, taktiež nazývaný Jiuquan Wind Power Base, ktorého výstavba započala v roku 2009 na území provincie Gansu v Číne. Projekt je rozdelený na niekoľko častí, pričom prvá časť, s výkonom 5 160 MW, bola dokončená v roku 2010. Do roku 2015 má byť dosiahnutý výkon 12 710 MW a v roku 2020 by mal byť tento veterný park schopný dosahovať menovitého výkonu 20 000 MW. Celkové náklady na výstavbu sa odhadujú na 17,5 miliardy dolárov.

#### 4.3.2 Morské veterné parky



Obr. 4.11 Najväčší offshore veterný park na svete Thanet Offshore Wind Project, Veľká Británia. [27]

S narastajúcim počtom onshore veterných parkov sa postupne znižuje počet vhodných lokalít na umiestnenie nových a stále väčších parkov. Z tohto dôvodu sa nové projekty čoraz viac orientujú na otvorené plochy priamo v mori. Okrem rozsiahlych voľných plôch sa táto poloha vyznačuje hlavne rovnomerným prúdením a priaznivými rýchlosťami vetra, pri ktorých sú veterné elektrárne schopné dosahovať výkonov až o 50% vyšších ako na pevnine.

Zvážení celkového ekonomického a konštrukčného hľadiska sa javí ako najoptimálnejšie výstavba veterných parkov pri pobreží. K výstavbe takýchto veterných elektrární sa používajú špeciálne lode so žeriavmi, ktoré sa počas priebehu inštalácie dokážu pomocou vysúvateľných „nôh“ nadvihnúť nad hladinu a pôsobiť ako plošiny. Základové, veľkopriemerové oceľové trubky, sa umiestňujú do veľkých hĺbok pod povrch morského dna, v závislosti na nosnosti pôdy. Kotvenie v mäkkých základových zeminách býva veľmi nákladné aj pri malých hĺbkach, preto je veľmi dôležitý vhodný výber lokality. Najväčší dôraz sa kladie na kvalitné prevedenie turbín a ich jednoduchú údržbu, z dôvodu obmedzeného prístupu. Pri údržbe sa používajú špeciálne upravené lode, ktoré sú schopné prevádzky len za dobrých podmienok. Pri zlom počasi a veľkých vlnách sa rozsiahlejšia údržba nemôže uskutočniť. Negatívny vplyv na komponenty má aj slaná morská voda, preto musí byť aplikovaná dostatočná protikorózna ochrana. Pripojenie offshore veterných parkov na sieť sa uskutočňuje pomocou trafostanice, do ktorej ústia podmorské káble zo všetkých veterných elektrární. Nachádza sa priamo na mori a je súčasťou parku. V trafostanici dochádza k premene elektrického napätia z elektrární na vysoké napätie, pre čo najväčšie eliminovanie strát pri prenose. Pri väčších vzdialenostiach od pobrežia dochádza k stratám aj pri prenose striedavého napätia podmorskými káblami, preto sa využíva špeciálny usmerňovač na transformáciu napätia na jednosmerné.

| Štát           | Veterný park                 | Menovitý výkon |
|----------------|------------------------------|----------------|
| Veľká Británia | Thanet                       | 300 MW         |
| Dánsko         | Horns Rev II                 | 209 MW         |
| Dánsko         | Rødsand II                   | 207 MW         |
| Veľká Británia | Lynn and Inner Dowsing       | 194MW          |
| Veľká Británia | Robin Rigg<br>(Solway Firth) | 180 MW         |

Tab 4.3 Najväčšie offshore veterné parky v Európe. [25]

Prvý offshore veterný park bol postavený v roku 1991 v Dánsku. Od tejto doby si Európa udržuje výrazné prvenstvo vo využívaní energie vetra nad morskou hladinou. V roku 2010 bolo evidovaných 39 offshore veterných parkov v prevádzke, s celkovým výkonom 2 396 MW. Európska asociácia pre veternú energiu (EWEA) si do roku 2020 kladie za cieľ zvýšiť celkovú kapacitu na 40 GW a do roku 2030 až na 150 GW menovitého výkonu. Najväčším offshore veterným parkom súčasnosti je projekt Thanet Wind Farm, ktorý sa rozprestiera na ploche 35 km<sup>2</sup>, 11 kilometrov od pobrežia Kentu vo Veľkej Británii. Presne 100 veterných turbín spoločnosti Vestas produkuje menovitý výkon 300 MW. Najväčším projektom vo výstavbe je veterný park London Array, umiestnený 28,6 kilometrov od pobrežia Kentu, patriaci spoločnostiam DONG Energy, E.ON a Masdar. V prvej fáze výstavby dodá spoločnosť Siemens 175 veterných elektrární o menovitom výkone 630 MW, no celková kapacita po dokončení parku sa plánuje na hodnotu 1000 MW.

## 4.4 Vývojové smery veterných motorov

Hlavným cieľom vo všetkých vývojových smeroch je zvyšovanie produkovaného výkonu. U klasických elektrární, ako parné alebo atómové, platí, že cena za kilowatthodinu vyrobenej energie je najnižšia pri čo najväčších výkonoch. Pre veterné elektrárne však táto závislosť neplatí. Zvýšením nákladov na výrobu listov a stožiarov u veľkých experimentálnych turbín výrazne stúpa aj cena produkovanej energie. Z tohto dôvodu sa vývoj moderných veterných elektrární uberať najrozličnejšími cestami zvyšovania efektívnosti.



1. Offshore veterná turbína spoločnosti SWAY s výkonom 10 MW - špeciálny kotviaci systém umožňuje prevádzku vo väčších vzdialenostiach od pobrežia. [30];
2. Offshore veterná turbína Aerogenerator X s výkonom 10 MW - vertikálna osa eliminuje cyklické namáhanie gravitačnou silou [31]
3. Veterná turbína MagLev pracujúca na princípe magnetickej levitácie – využitím permanentných magnetov nedochádza k stratám spôsobených trením. [32]
4. Veterná turbína MARS spoločnosti Magenn vyplnená héliom – možnosť prevádzky vo väčších výškach s väčšími rýchlosťami vetru. [33]
5. Koncept KiteGen využívajúci padáky ako listy rotoru – padáky umožňujú dynamickú odozvu na aktuálne veterné podmienky [34]
6. Koncept piezoelektrických „stebiel“ z uhlíkových vlákien – energia vzniká trením piezoelektrických diskov pri ohýbaní 55 metrov vysokých tyčí. [35]

Obr. 4.12 Vývoj veterných elektrární.

## 5. Akumulácia elektrickej energie

Veterné elektrárne menších výkonov sa využívajú prevažne na pokrývanie spotrieb jednotlivých objektov, pričom už nedochádza k dodávaniu generovaného elektrického prúdu do verejnej elektrorozvodnej siete. Z tohto dôvodu je dôležité zamedziť vzniku strát spôsobených nepravidelnou dodávkou energie veterným motorom a nerovnomernou spotrebou daného objektu. K tomuto účelu slúžia akumulátory, zariadenia umožňujúce viacnásobnú akumuláciu vyrobenej elektrickej energie. V tomto smere existuje niekoľko spôsobov akumulácie energie, ktoré pripadajú v úvahu.

### 5.1 Elektrochemická akumulácia

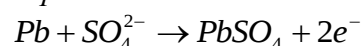
Základnou jednotkou akumulátoru pracujúceho na elektrochemickom princípe je elektrochemický (galvanický) článok. Jeho zloženie pozostáva z kladnej a zápornej elektródy, ktoré sú vzájomne oddelené a iontovo vodivého elektrolytu, umiestneného v kontakte s oboma elektródami. Pri chemických reakciách, ktoré prebiehajú počas činnosti, sa prijímajú a uvoľňujú elektróny. Produkty reakcií pri vybíjaní článku je možné znovu uviesť do stavu aktívnych reaktantov privedením elektrického prúdu - elektrická energia sa akumuluje vo forme chemickej energie. Životnosť článkov sa pohybuje od stoviek až po tisíce cyklov nabitie – vybitie. Jednotlivé články disponujú relatívne malým napätím (1,2 až 2 V), preto sa vyskytujú v skupinách tvoriacich takzvané akumulátorové batérie. V závislosti na použítom elektrolyte sa akumulátory delia na kyselé (Pb, Pb-Co) a alkalické (Ni-Cd, Ni-Fe, Ni-MH, Ag-Zn).

#### 5.1.1 Kyselé akumulátory

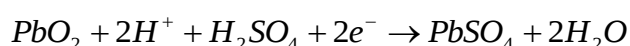
**Olovené akumulátory:** patria medzi najčastejšie používané sekundárne zdroje elektrického prúdu. Výhodou je vysoká spoľahlivosť, relatívne nízka cena a dostatočný výkon. Vyrábajú sa v širokej škále kapacít, od 1 až do 10 000 A·h, s účinnosťou okolo 80%. Elektrolytom je kyselina sírová ( $H_2SO_4$ ) zriedená s vodou, ktorá disociuje na síranové anióny a vodíkové kationy. Pri vybíjaní akumulátoru dochádza k reakcii týchto iónov s aktívnym materiálom elektród, pričom sa na zápornej elektróde s aktívnou hmotou tvorenou poréznym olovom uvoľňujú elektróny, ktoré prúdia uzavretým elektrickým obvodom ku kladnej elektróde s aktívnou vrstvou oxidu olovičitého.

Priebeh chemických reakcií na elektródach pri vybíjaní:

*Záporná elektróda:*

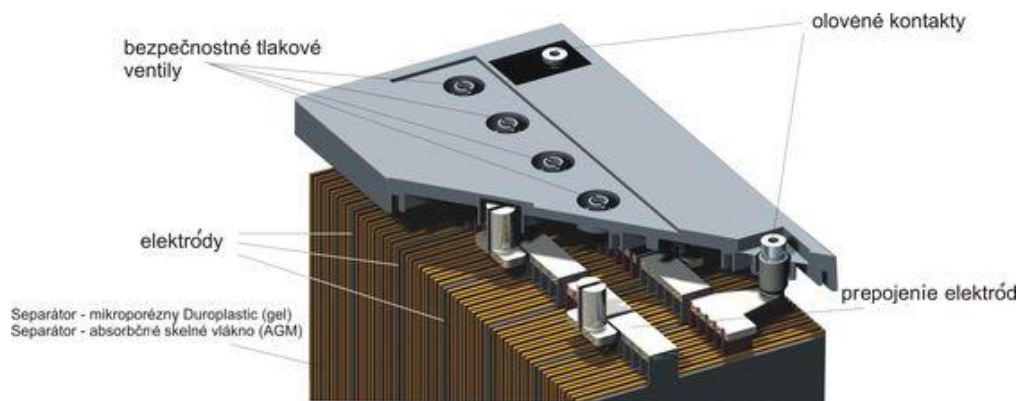


*Kladná elektróda:*



Zmena hustoty elektrolytu indikuje stupeň vybitia, resp. nabitia akumulátoru. Pri uskladňovaní olovených akumulátorov v nenabitom stave môže dôjsť k takzvanej sulfatácii, pri ktorej síran olovnatý prechádza do nerozpustnej formy a trvale znižuje kapacitu akumulátoru. Z tohto dôvodu je nutné pravidelné nabíjanie akumulátoru, trvalo alebo v určitých intervaloch po celú dobu uskladnenia, v závislosti na vlastnostiach akumulátoru a okolitého prostredia.

**Olovo – kobaltové akumulátory:** majú podobné vlastnosti ako predchádzajúce akumulátory, no pridaním kobaltovej oceli do zloženia kladnej elektródy dochádza k zvýšeniu kapacity.



Obr. 5.1 Schéma konštrukcie akumulátoru [36]

### 5.1.2 Alkalické akumulátory

**Nikel – kadmiové akumulátory:** v súčasnosti patria medzi najrozšírenejšie alkalické akumulátory. Elektrolytom je vodný roztok hydroxidu draselného (KOH) s hustotou  $1,21 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$  pri pokojovej teplote. Ako prísada na zlepšenie nabitia a predĺženie životnosti sa používa hydroxid lítňny (LiOH). Zloženie aktívnych hmôt elektród sa líši v závislosti na výrobcovi daného akumulátoru. Záporná elektróda je bežne tvorená 80% hydroxidom kademnatým ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ), 18% jemne disperzným železom (Fe) a 2% grafitu. Aktívna hmota kladnej elektródy môže byť z 80% hydroxid nikelnatý ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ), z 20% práškový grafit, poprípade z ďalších prísad na zlepšenie vlastností. Hydroxid draselný, obsiahnutý v elektrolyte, nereaguje s aktívnou hmotou elektród, no chemické reakcie prebiehajúce pri nabíjaní a vybíjaní sú zložitejšie ako pri akumulátoroch olovených. Pri vybíjaní sa oxihydroxid nikelnatý ( $\text{NiOOH}$ ) redukuje na oxid nikelnatý ( $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ), na kadmiovej elektróde dochádza k oxidácii hydroxidovými iontami ( $\text{OH}^-$ ), pričom vzniká hydroxid kademnatý ( $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ). Pri vybíjaní nedochádza k výraznej zmene hustoty elektrolytu.

Priebeh chemických reakcií na elektródach pri vybíjaní:

Záporná elektróda:

Kladná elektróda:



Medzi výhody týchto akumulátorov oproti akumulátorom oloveným patrí:

- vyššia životnosť
- väčšia mechanická odolnosť a odolnosť voči prebíjaniu
- možnosť dlhodobého skladovania bez dobíjania
- možnosť prevádzky v nižších teplotách – menší pokles kapacity
- výroba článkov s kapacitou už od 10 mA·h.

Medzi nevýhody patrí:

- vyššia cena
- nižšia účinnosť a väčšie počiatočné samovybíjanie
- nižšie napätie článkov
- nemožnosť určovania stupňa vybitia, resp. nabitia, podľa hustoty elektrolytu
- u akumulátorov so zaplavenými elektródami dochádza k reakcii vzdušného oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ) s elektrolytom (KOH) za vzniku karbonátov ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), ktoré znižujú kapacitu a zvyšujú vnútorný odpor akumulátoru.

**Nikel – železné akumulátory:** vynikajúca životnosť, avšak malá účinnosť a veľké samovybíjanie. Extrémny pokles kapacity za nízkych teplôt.

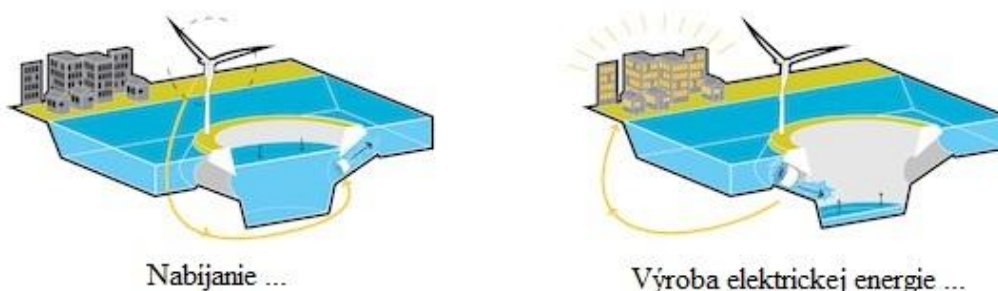
**Nikel – metalhydridové akumulátory:** náhrada Ni-Cd akumulátorov bez toxického kadmia. Disponujú dvojnásobnou kapacitou pri polovičnej životnosti.

**Striebro – zinkové akumulátory:** vyššie napätie a výrazne vyššia kapacita ako Ni-Cd akumulátory. Nevýhodou je však krátka životnosť spôsobená zinkovou elektródou a vysoká cena.

## 5.2 Mechanická akumulácia

Mechanické akumulátory pracujú na princípe akumulácie mechanickej energie a to vo forme potenciálnej energie alebo energie kinetickej. Akumulácia potenciálnej energie prebieha v takzvaných prečerpávacích vodných nádržiach a v zásobníkoch stlačeného vzduchu. Vzhľadom k menšiemu množstvu akumulovanej energie sa využívajú strednetlaké a vysokotlaké sústavy. Na akumuláciu kinetickej energie sa využívajú zotrvačníky.

### 5.2.1 Prečerpávacie vodné nádrže

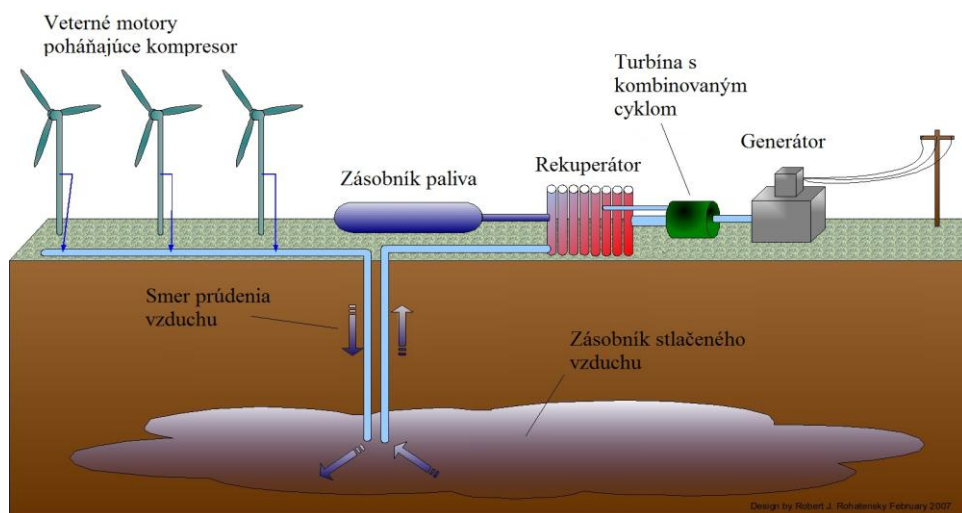


Obr. 5.2 Schéma systému prečerpávacích vodných nádrží [37]

Prečerpávacie vodné nádrže predstavujú špeciálny typ akumulátoru elektrickej energie, ktorý využíva vplyv gravitačnej potenciálnej energie vody. Hlavné časti zariadenia pozostávajú z dvoch vodných nádrží, ktoré sú prepojené spádovým potrubím. Jedna z nádrží je umiestnená na vyššom mieste, druhá je položená na mieste nižšom. Prebytočná elektrická energia, ktorá sa vyrobí mimo spotrebnej špičky sa využíva na prečerpávanie vody z dolnej nádrže do hornej, ktorá slúži ako zásobník. V čase, kedy je potrebné väčšie množstvo energie v sieti, dochádza k riadenému vypúšťaniu vody z hornej nádrže. Voda, ktorá prúdi potrubím, prechádza cez turbínu pripojenú na generátor, pričom dochádza k premene energie vody na energiu elektrickú. Prvé systémy tohto typu mali samostatný okruh na prečerpávanie vody s čerpadlom poháňaným elektromotorom, v dnešnej dobe sa však využíva na čerpanie samotná turbína hnaná generátorom, ktorý pracuje ako synchronný elektromotor. Prechod do tohto režimu trvá obvykle len 3 až 6 minút.

V priebehu prečerpávania vody do hornej nádrže dochádza k spotrebovaniu väčšieho množstva elektrickej energie, aké je množstvo energie produkovanej. Každý kilowatthodine vyrobenej počas špičky odpovedá približne 1,3 kWh spotrebovanej energie, preto účinnosť prečerpávacích nádrží nepresahuje 80%.

## 5.2.2 Zásobníky stlačeného vzduchu



Obr. 5.3 Schéma sústavy s podzemným zásobníkom stlačeného vzduchu. [38]

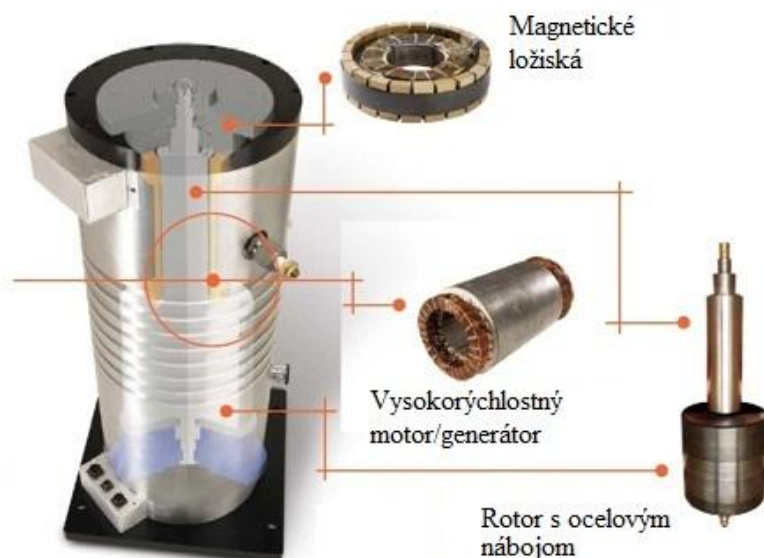
Zásobníky stlačeného vzduchu sa využívajú pri akumulácii elektrickej energie vo forme potenciálnej energie stlačeného vzduchu. Pri uskladňovaní väčšieho množstva energie slúžia ako zásobníky podzemné nepriepustné kaverny, pri malých množstvách sa energia ukladá do tlakových nádob. V prípade podzemných zásobníkov môže byť dutina prepojená s vodnou nádržou na povrchu, ktorá udržiava v zásobníku takmer konštantný tlak s malými rozdielmi spôsobenými kolísaním hladín.

V dobe prebytku elektrickej energie sa veterný motor využíva k pohonu kompresoru, ktorý dodáva stlačený vzduch do zásobníku. Medzi kompresor a zásobník je vhodné umiestniť dobre izolovaný chladiaci systém, ktorý odvádza časť tepla zo stlačeného vzduchu a zabráňuje tým prehriatiu vzduchotechnických zariadení a zásobníku. K ochladzovaniu môže priamo slúžiť aj rekuperátor inštalovaný za výstupom zo zásobníku, tým sa využíva odvedené teplo na následné znovuohriatie. V čase spotrebnej špičky dochádza k obrátenému chodu, pričom nastáva uvoľnenie stlačeného vzduchu zo zásobníku. Vzduch sa ohrieva v rekuperátore a v spalovacej komore, následne expanduje so spalínami v turbíne, ktorá poháňa generátor. Spaľovanie paliva zvyšuje náklady na výrobu elektrickej energie, no celková účinnosť týchto systémov sa výrazne nelíši od predchádzajúcich zariadení.

## 5.2.3 Zotrvačníky

Zotrvačníky predstavujú elektromechanický systém pracujúci na princípe kinetickej energie rotujúcej hmoty. Množstvo energie akumulovanej v zotrvačníku závisí na hmotnosti rotoru a jeho obvodovej rýchlosti. Zvyšovaním otáčok rotoru sa úmerne zvyšuje pracovné napätie, preto je veľmi dôležité kvalitné prevedenie a vhodná voľba materiálu.

Konštrukcia zotrvačníku pozostáva z rotoru uloženého v ložiskách a statoru. Rotor je tvorený hriadeľom, na ktorom je upevnený samotný náboj zotrvačníku a permanentný magnet, stator je tvorený motorom/generátorom. V dobe prebytku vyrobenej elektrickej energie pracuje zotrvačník ako elektromotor, ktorý roztáča rotor, tým dochádza k premene energie na kinetickú. V čase bezvetria alebo v čase spotrebnej špičky pracuje zariadenie ako generátor. Z dôvodu zníženia strát spôsobených trením a aerodynamickým odporom využívajú moderné zotrvačníky bezkontaktné magnetické ložiská a pracovný priestor sa odčerpáva na vákuum. Miesto ťažkých celokovových materiálov smeruje vývoj k využívaniu uhlíkových kompozitov, ktoré sú schopné prevádzky s otáčkami až  $16\,000\text{ min}^{-1}$ . Celková účinnosť najmodernejších zotrvačnickov presahuje 80%.



Obr. 5.4 Schéma zotrvačníku spoločnosti Vycon. [39]

### 5.3 Tepelná akumulácia

Tepelné akumulátory pracujú na princípe bežného ohrevu vhodnej látky (akumulátory citelného tepla), druhou variantou je využitie prebytočnej energie na zmenu látkového skupenstva (akumulátory latentného tepla). Uvoľnené teplo pri vybíjaní sa využíva na vykurovanie alebo zásobovanie objektu teplou vodou. Tak ako teplo je možné akumulovať i chlad, pokiaľ disponuje veterný motor príslušenstvom na jeho výrobu.

Pri ohrievaní pracovnej látky prvého typu akumulátoru je množstvo akumulovaného tepla priamo úmerné tepelnému rozdielu medzi teplotami pred a po nabíjaní, hmotnosti a tepelnej kapacite danej látky. Výhodou tohto spôsobu skladovania tepla je nízka cena pracovnej látky, nevýhodou je však veľký objem akumulátoru a fakt, že dostupná teplota klesá v priebehu vybíjania. Ako pracovná látka sa bežne využíva voda, ktorá má zo všetkých látok najväčšiu mernú tepelnú kapacitu  $4,2 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$  a súčasne slúži aj ako nosná látka. V prípade použitia kameňa alebo inej pevnej látky, disponuje akumulátor vyšším rozsahom pracovných teplôt a jednoduchšou konštrukciou. Ako nosná látka sa v tomto prípade používa vzduch.

Druhý spôsob využíva k akumulácii tepla tavenie alebo vyparovanie pracovnej látky. Z dôvodu vzniku väčších tlakov pri vyparovaní je výhodnejší prechod medzi tuhou látkou a kvapalinou. Množstvo energie, ktoré je možné prijať, je priamo úmerné hmotnosti a mernému skupenskému teplu danej látky. Výhodou tohto typu akumulátoru je, že pri spätnom tuhnutí pracovnej látky je potrebný menší objem, aby množstvo uvoľneného tepla bolo zhodné ako pri vybíjaní akumulátoru citelného tepla. Ako príklad môže slúžiť jeden liter hexahydrátu chloridu vápenatého oproti približne desiatim litrom vody. Nevýhodou je však vyššia cena týchto látok. Pracovné látky sa volia podľa teploty tavenia, ktorá musí odpovedať požadovanej teplote. Okrem chemicky čistých látok, ktoré sa tavia pri konštantnej teplote, sa používajú zmesi, u ktorých je možné dosahovať rôzne teploty fázovej premeny voľbou vhodného zloženia. Tavenie zmesí prebieha v širšom rozsahu teplôt.

| Materiál                                  | Merná tepelná kapacita (kJ/kg·K) | Hustota (kg/m <sup>3</sup> ) | Tepelý obsah (kJ/m <sup>3</sup> ·K) |
|-------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Betón                                     | 1,13                             | 2300                         | 2600                                |
| Hliníkový šrot                            | 0,96                             | 2700                         | 2600                                |
| Magnetovec Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,75                             | 5100                         | 3800                                |
| Sodík (do 96°C)                           | 1,12                             | 970                          | 1173                                |
| Tehly špeciálne                           | 0,84 až 1,0                      | 2100                         | 1000                                |
| Voda                                      | 4,19                             | 1000                         | 4180                                |
| Železný šrot                              | 0,50                             | 7800                         | 3900                                |

Tab. 5.1 Prehľad materiálov vhodných do akumulátorov citelného tepla. [1]

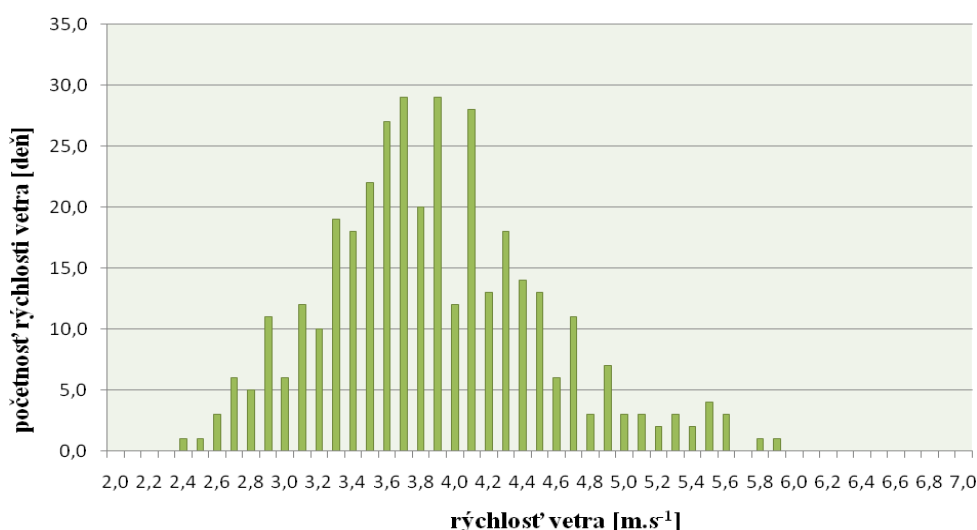
| Materiál                                                         | Teplota tavenia (°C) | Hustota (kg/m <sup>3</sup> ) | Skupenské teplo (J/kg) |
|------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------|
| Chlorid vápenatý<br>CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O         | 29 až 39,5           | 1660                         | 147                    |
| Chlorid železitý FeCl <sub>3</sub>                               | 304                  | 3100                         | 265                    |
| Dusičnan líthny LiNO <sub>3</sub>                                | 249                  | 2400                         | 367                    |
| Hydrid líthny LiH                                                | 682                  | 860                          | 4186                   |
| Hydroxid sodný NaOH                                              | 322                  | 2150                         | 322                    |
| Kyselina fosforečná H <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>6</sub> | 55                   | 1600                         | 214                    |
| Kovový sodík                                                     | 98                   | 970                          | 115 (98)               |

Tab. 5.2 Prehľad materiálov vhodných do akumulátorov latentného tepla. [1]

## 6 Návrh veternej elektrárne pre zásobovanie malého objektu elektrickou energiou

Návrh malého systému veternej elektrárne bude vychádzať z hodnôt rýchlostí vetra nameraných v rokoch 1998 - 2008 na ulici Kroftova v Brne, vo výške 10 m nad zemským povrchom. Namerané hodnoty boli prepočítané do jedného priemerného roku a následne, z dôvodu nedostatočnej intenzity vetra, boli hodnoty vynásobené číslom 2. Výsledná priemerná rýchlosť vetra má hodnotu **4 m.s<sup>-1</sup>**.

Charakteristika vetra, vytvorená na základe početností výskytu jednotlivých rýchlostí vetra po dobu uvažovaného roku má nasledujúci tvar:



Graf 6.1 Charakteristika vetra použitá k výpočtu.

Na výrobu elektrickej energie bude využitý veterný generátor Whisper 200 od americkej spoločnosti Southwest Windpower, ktorý disponuje nasledujúcimi parametrami [6]:



|                             |                                           |
|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Priemer rotoru:             | <b>2,7 m</b>                              |
| Štartovacia rýchlosť vetra: | <b>3,1 m.s<sup>-1</sup></b>               |
| Výstupné napätie:           | <b>24 V DC</b>                            |
| Menovitý výkon:             | <b>1000 W (pri 11,6 m.s<sup>-1</sup>)</b> |
| Maximálna rýchlosť vetra:   | <b>55 m.s<sup>-1</sup></b>                |
| Záruka:                     | <b>5 rokov</b>                            |

Obr. 6.1 Veterný generátor Whisper 200. [42]

Postup pri návrhu systému bude detailne popísaný v nasledujúcich kapitolách.

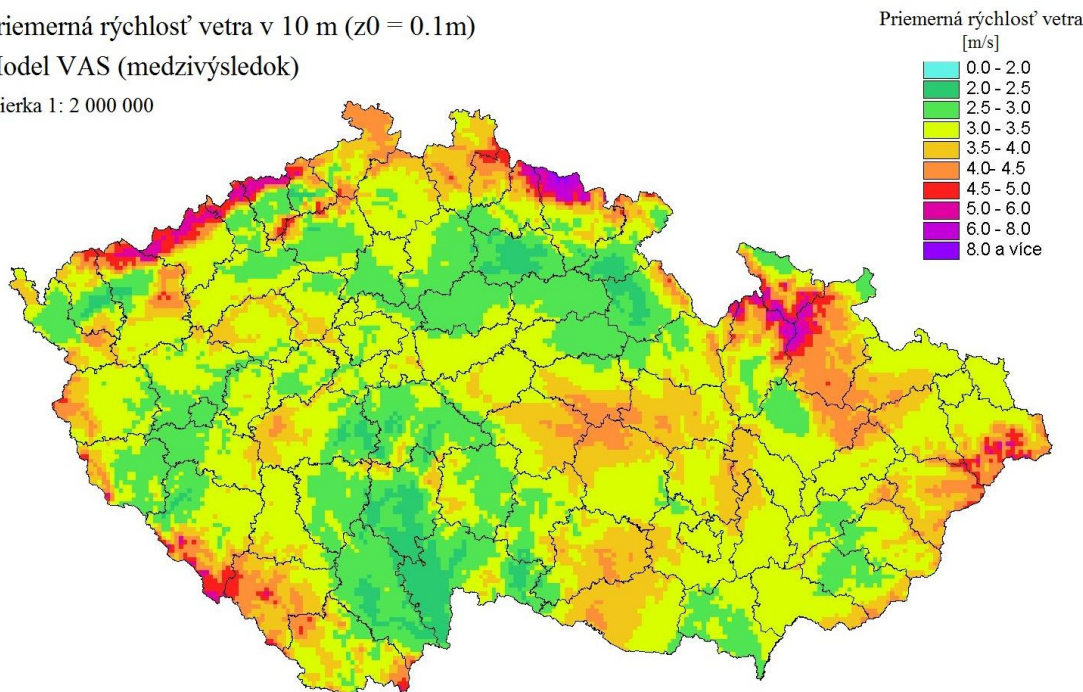
## 6.1 Výber lokality

Česká republika nedisponuje tak optimálnymi veternými podmienkami k rozvoju veternej energetiky ako má Holandsko či Nemecko, avšak aj na tomto území sa nachádzajú využiteľné lokality.

Priemerná rýchlosť vetra v 10 m ( $z_0 = 0.1\text{m}$ )

Model VAS (medzivýsledok)

Mierka 1: 2 000 000



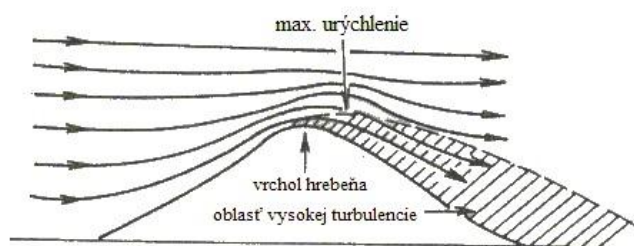
Obr. 6.2 Veterná mapa Českej republiky. [41]

Vzhľadom k nižším rýchlostiam vetra v nížinách, nemá v súčasnosti a v blízkej budúcnosti využívanie veternej energie v rovinných oblastiach väčší význam. Lepšie poveternostné podmienky sú v miestach s nerovným terénom a vyššou nadmorskou výškou. Táto situácia nastáva v dôsledku troch vplyvov.

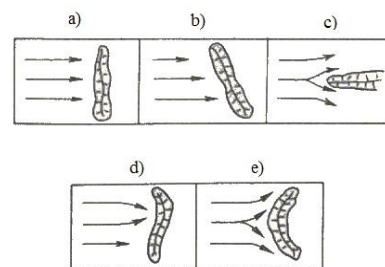
So stúpajúcou nadmorskou výškou sa rýchlosť vetra zvyšuje. Z tohto dôvodu vyzdvihuje terénna vyvýšenina, rovnako ako stožiar, veternú elektrárňu do oblastí s väčšími rýchlosťami vetra a umožňuje dosiahnutie väčšieho výkonu.

V oblastiach vyšších ako 150 metrov nad okolím dochádza taktiež k eliminácii nezanedbateľného vplyvu nočného ochladzovania. Vzduch, ktorý sa v noci ochladí, klesá v dôsledku väčšej hustoty do údolí. Vytvorená vrstva, vysoká sto a viac metrov, sa oddeľuje od prúdenia vzduchu vo väčších výškach a tým spôsobuje ranné bezvetrie. Ešte výraznejšia situácia môže nastať v zime, pokiaľ sa do oblasti dostane studený vzduch, pričom nastáva dlhodobé bezvetrie.

Treťou výhodou vyšších polôh je urýchlenie prúdenia vzduchu obtekajúceho kopce. V mieste najväčšieho zhustenia prúdnic, ktoré nemusí vždy odpovedať najvyššie položenému miestu na kopci, môže dôjsť až k viac ako dvojnásobnému zvýšeniu rýchlosti vetra.



Obr. 6.3 Urýchlenie vetra na hrebeni. [1]



Obr. 6.4 Vplyv orientácie kopca. [1]

Najvýhodnejšia poloha pre veternú elektrárňu je tesne pred vrcholom kopca, orientovaného kolmo na smer vetra (Obr. 6.4a). V takomto prípade je vietor nútený pretekať cez vrchol, pričom dochádza k urýchleniu. Z hľadiska pôdorysného tvaru je vhodný kopec, orientovaný svojou vydutou stranou proti vetra (Obr. 6.4b). Tým sa čiastočne eliminuje obtekanie vetra po stranách a zvyšuje sa intenzita prúdenia cez vrchol.

Dôležitým faktorom ovplyvňujúcim rýchlosť vetra je aj drsnosť povrchu, nezávisle na tom, či ide o rovný terén alebo kopec. K výpočtu priemernej rýchlosti vetra v závislosti na danom povrchu sa používa vzťah

$$\frac{v^*}{v_0^*} = \left( \frac{h}{h_0} \right)^n, \quad (6.1)$$

kde  $v^*$  predstavuje priemernú rýchlosť vetra vo výške  $h$  nad povrchom;

$v_0^*$  je nameraná priemerná rýchlosť vetra v referenčnej výške  $h_0$ ;

$n$  závisí na drsnosti povrchu a jeho typické hodnoty sú uvedené v tabuľke 6.1.

| Druh povrchu                         | $n$  |
|--------------------------------------|------|
| vodná hladina, piesok                | 0,14 |
| nízky trávnatý porast, orná pôda     | 0,16 |
| vysoká tráva, obilné porasty         | 0,18 |
| vysoké kultúrne plodiny, nízke lesné | 0,21 |
| rozsiahle lesy                       | 0,28 |
| dediny a malé mestá                  | 0,48 |

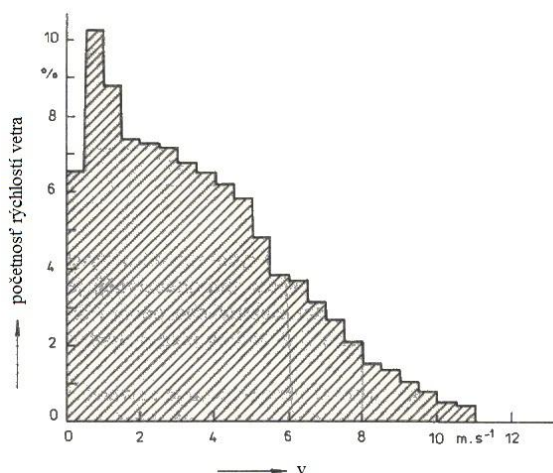
 Tab. 6.1 Závislosť exponentu  $n$  na druhu povrchu. [1]

Umiestňovanie veterných motorov v členitom prostredí je značne komplikovaná záležitosť. Na väčšine miest v Českej republike je veľmi zložitý dopredu určiť energeticky najvýznamnejší smer vetra a odhadnúť vplyv rôznych terénnych nerovností na prúdenie vzduchu v prízemnej vrstve. Použitie výsledkov meraní na ideálnych modeloch je v tomto prípade značne obmedzené, preto by sa pri hľadaní najvhodnejšieho miesta na inštaláciu malo vychádzať zo skúseností z konkrétnej lokality a porovnávať ich so všeobecnými poznatkami.

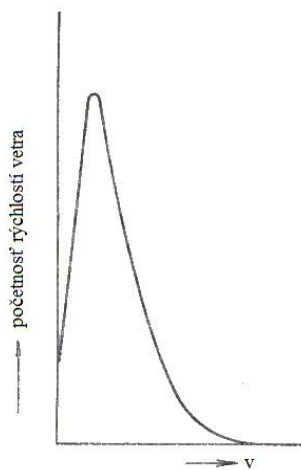
## 6.2 Poveternostné podmienky danej lokality

Hodnota priemernej rýchlosti vetra v konkrétnej lokalite má len informatívny charakter a nie je postačujúca pre výpočet energie vyrobenej veternou elektrárnou. Rýchlosť

vetra je veľmi premenlivá a to nie len v rámci hodín, ale aj niekoľkých sekúnd. Z tohto dôvodu je vhodné pri výbere vhodného miesta pre veternú elektrárňu stanovenie distribučnej charakteristiky rýchlostí vetra na základe častých meraní v kratších časových intervaloch. Ako distribučnú charakteristiku rýchlostí vetra označujeme funkciu, ktorou je možné vyjadriť rozdelenie početností rýchlostí vetra, tzn. akú časť z celkovej doby merania vietor prúdil určitou rýchlosťou.



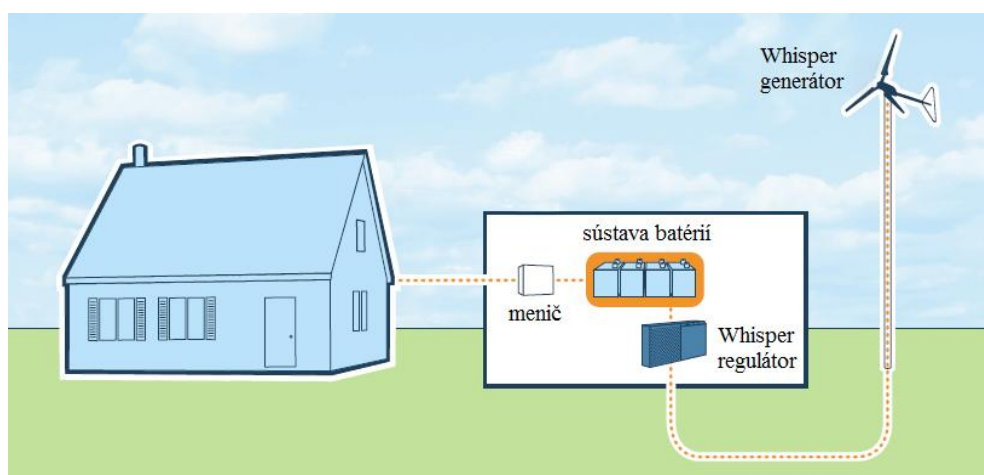
Obr. 6.5 Početnosť rýchlostí vetra na meteorologickej stanici v Liberci. [1]



Obr. 6.6 Distribučná funkcia Vetra. [1]

Podľa možnosti by meranie malo prebiehať priamo na vybranom mieste a v predpokladanej výške stredu plochy, z ktorej veterný motor využíva energiu. U veterných motorov s horizontálnou osou to je miesto osy rotoru. K stanoveniu uvedenej charakteristiky vetra sa využívajú prístroje, ktoré merajú rýchlosť vetra a automaticky zaznamenávajú ako často bola určitá rýchlosť nameraná.

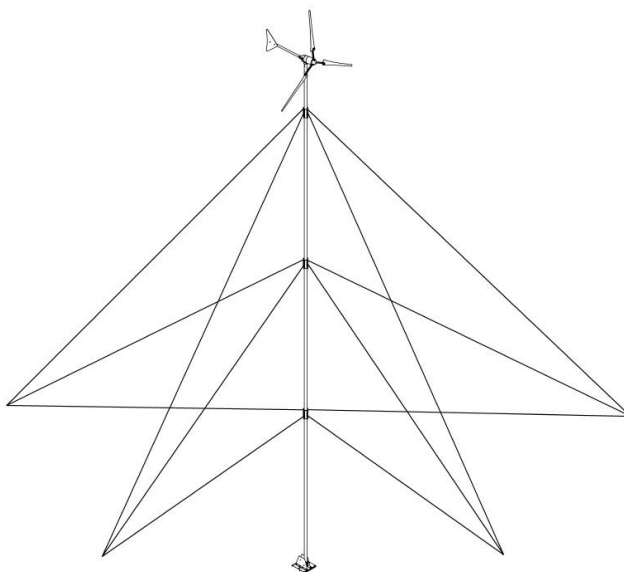
### 6.3 Voľba komponentov



Obr. 6.7 Návrh systému veternej elektrárne. [5]

Systém veternej elektrárne pozostáva z niekoľkých častí. Generátor je umiestnený na stožiar, ktorého výška by mala byť minimálne 6 metrov (20 ft) nad najvyššou prekážkou v okolí približne 76 metrov (250 ft). Vhodné stožiare s lanovou výstužou sú dostupné

s výškami 7 m (24 ft), 9 m (30 ft), 15 m (50 ft), 20 m (65 ft) a 24 m (80 ft). V tomto prípade bude použitý stožiar vysoký 15 metrov. Základy uvedených stožiarov nie je nutné betónovať.



Obr. 6.8 Schéma kotvenia stožiaru s veterným generátorom. [43]



Obr. 6.9 Komponenty systému veternej elektrárne. Zľava: regulátor Whisper Charge Controller, batéria Rolls S-530, menič napätia HQ-INV2500/24. [44] [45] [45]

Spolu s generátorom je dodávaný regulátor Whisper Charge Controller, ktorý slúži na kontrolu a zabezpečenie plynulého chodu generátoru. Napätie jednosmerného prúdu vyrobeného generátorom je implicitne nastavené na hodnotu 24 V, prenastavením je však možné túto hodnotu zmeniť na 12, 36 alebo 48 V. Zvolené napätie generátoru má hodnotu 24 V a vyrobená elektrická energia je akumulovaná sústavou batérií 24V/530Ah, tvorenej štyrmi batériami s hlbokým cyklom vybíjania Rolls S-530. Batérie disponujú menovitým napätím 6 V a kapacitou 530 Ah. Transformáciu jednosmerného napätia (24 V) na striedavé napätie (230 V) domácej siete zabezpečuje sínusový menič napätia HQ-INV2500/24.

Rozmery káblov použitých pri návrhu systému veternej elektrárne sa líšia v závislosti na vzdialenostiach medzi jednotlivými zariadeniami. Z tohto dôvodu je nutné voliť kabeláž až po ukončení návrhu celého systému.

| Komponenty systému veternej elektrárne | Cena   |
|----------------------------------------|--------|
| Veterný generátor + regulátor          | 2370 € |
| Stožiar                                | 564 €  |
| Batérie (4 ks)                         | 1075 € |
| Menič napätia                          | 379 €  |
| Kabeláž + ostatné náklady              | 112 €  |
| Celkové náklady                        | 4500 € |

Tab. 6.2 Celkové náklady na systém veternej elektrárne. [45].

Celkové náklady na systém veternej elektrárne majú hodnotu **4500 €**, pri aktuálnom menovom kurze NBS **110 106 Kč**.

## 6.4 Výpočet energie vyrobenej veternou elektrárnou za jeden rok

Odvozenie vzťahu pre výkon veternej elektrárne spočíva vo vyjadrení teoretického výkonu vetra, ktorý vychádza z elementárneho vzťahu pre kinetickú energiu

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (6.2)$$

kde  $v$  predstavuje rýchlosť prúdenia vzduchu;

$m$  je hmotnosť pohybujúcej sa hmoty vzduchu.

Hmotnosť vzduchu  $m$  je možné vyjadriť ako súčin objemu vzduchu  $V$  a hustoty vzduchu  $\rho$

$$m = V\rho = Sx\rho, \quad (6.3)$$

kde  $S$  predstavuje plochu, ktorou daný objem vzduchu preteká;

$x$  je dráha, ktorú pohybujúci sa vzduch prekoná.

Výkon vetra je možné vyjadriť pomocou energie  $E$  za jednotku času

$$P_v = \frac{E}{t} = \frac{\frac{1}{2}Sx\rho}{t}, \quad (6.4)$$

po dosadení vzťahu  $v = x/t$  má konečný výraz tvar

$$P_v = \frac{1}{2}S\rho v^3. \quad (6.5)$$

Z vyjadreného vzťahu vyplýva, že výkon je priamo úmerný ploche, ktorou vzduch preteká, hustote vzduchu a tretej mocnine rýchlosti prúdenia. Dosadením plochy v  $\text{m}^2$ , hustoty v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a rýchlosti v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  dostaneme jednotku výkonu Watt (W).

Pri aplikácii vzťahu teoretického výkonu vetra na výkon veternej elektrárne predstavuje plocha  $S$  plochu rotoru, ktorú je možné vyjadriť v tvare

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (6.6)$$

kde  $d$  predstavuje priemer rotoru.

Po dosadení do vzťahu 6.5 má vzťah pre výkon tvar

$$P = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho v^3. \quad (6.7)$$

Najväčší vplyv na výkon veternej elektrárne má účinnosť jednotlivých komponentov. Z tohto dôvodu sa celkový výkon vypočíta podľa vzťahu

$$P = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho v^3 \eta_r \eta_p \eta_g, \quad (6.8)$$

kde  $\eta_r$  predstavuje účinnosť rotoru;

$\eta_p$  je účinnosť prevodovky;

$\eta_g$  je účinnosť generátoru.

Najmodernejšie veterné elektrárne disponujú hodnotami účinností  $\eta_r = 0,45$ ,  $\eta_p = 0,97$  a  $\eta_g = 0,96$ . Uvažovaná hustota vzduchu má hodnotu  $1,2 \text{ kg/m}^3$ .

Pri výpočte množstva energie  $E[\text{Wh}]$  vyrobenej veterným generátorom po dobu jedného roku bude použitý nasledujúci vzťah

$$E = \sum E_i = \sum_{v_{\min}}^{v_{\max}} y_i P_i \cdot 24, \quad (6.9)$$

kde  $y_i$  predstavuje početnosť jednotlivých rýchlostí vetra (deň);

$P_i$  je výkon generátoru pri určitej rýchlosti vetra (W).

S využitím vzťahu 6.8, 6.9 a grafu 6.1 je možné zostrojiť nasledujúcu tabuľku:

| 1<br>Rýchlosť vetra<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | 2<br>Početnosť rýchlosti<br>vetra (deň) | 3<br>Výkon veternej<br>elektrárne (W) | 4<br>(2)·(3) |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 3,1                                         | 12,0                                    | 44,2                                  | 530,5        |
| 3,2                                         | 10,0                                    | 48,6                                  | 486,3        |
| 3,3                                         | 19,0                                    | 53,3                                  | 1013,3       |
| 3,4                                         | 18,0                                    | 58,3                                  | 1049,9       |
| 3,5                                         | 22,0                                    | 63,6                                  | 1399,8       |
| 3,6                                         | 27,0                                    | 69,2                                  | 1869,5       |
| 3,7                                         | 29,0                                    | 75,2                                  | 2180,0       |
| 3,8                                         | 20,0                                    | 81,4                                  | 1628,7       |
| 3,9                                         | 29,0                                    | 88,0                                  | 2553,0       |
| 4,0                                         | 12,0                                    | 95,0                                  | 1139,8       |
| 4,1                                         | 28,0                                    | 102,3                                 | 2863,9       |
| 4,2                                         | 13,0                                    | 110,0                                 | 1429,4       |
| 4,3                                         | 18,0                                    | 118,0                                 | 2123,9       |
| 4,4                                         | 14,0                                    | 126,4                                 | 1769,9       |
| 4,5                                         | 13,0                                    | 135,2                                 | 1758,1       |
| 4,6                                         | 6,0                                     | 144,5                                 | 866,7        |
| 4,7                                         | 11,0                                    | 154,1                                 | 1694,9       |
| 4,8                                         | 3,0                                     | 164,1                                 | 492,4        |
| 4,9                                         | 7,0                                     | 174,6                                 | 1222,2       |
| 5,0                                         | 3,0                                     | 185,5                                 | 556,5        |
| 5,1                                         | 3,0                                     | 196,9                                 | 590,6        |
| 5,2                                         | 2,0                                     | 208,7                                 | 417,3        |
| 5,3                                         | 3,0                                     | 220,9                                 | 662,8        |
| 5,4                                         | 2,0                                     | 233,7                                 | 467,4        |
| 5,5                                         | 4,0                                     | 246,9                                 | 987,6        |
| 5,6                                         | 3,0                                     | 260,6                                 | 781,9        |
| 5,7                                         | 0,0                                     | 274,8                                 | 0,0          |
| 5,8                                         | 1,0                                     | 289,6                                 | 289,6        |
| 5,9                                         | 1,0                                     | 304,8                                 | 304,8        |
| $\sum_{3,1}^{5,9} (2) \cdot (3)$            |                                         |                                       | 33130,6      |

Tab. 6.3 Výpočet množstva vyrobenej energie za rok.

$$E = 33130,6 \cdot 24 = 795134,4 \text{ Wh}$$

Množstvo energie vyrobenej veterným generátorom Whisper 200 po dobu jedného roku, pri priemernej rýchlosti vetra 4 m.s<sup>-1</sup>, má teoretickú hodnotu **795,13 kWh**.

Druhá varianta výpočtu množstva energie vyrobenej veterným generátorom vychádza z grafu závislosti výkonu na rýchlosti vetra udávaného výrobcom. Postup výpočtu je podobný ako v predchádzajúcom prípade, no jednotlivé hodnoty výkonu budú odčítané z grafu 6.2.



Graf 6.2 Závislost výkonu veterného generátoru Whisper 200 na rýchlosti vetru. [6]

Po odčítaní hodnôt výkonu je možné zostrojiť nasledujúcu tabuľku:

| 1<br>Rýchlosť vetra<br>(m.s <sup>-1</sup> ) | 2<br>Početnosť rýchlosti<br>vetra (deň) | 3<br>Výkon veternej<br>elektrárne (W) | 4<br>(2)·(3) |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|--------------|
| 3,1                                         | 12,0                                    | 30,0                                  | 360,0        |
| 3,2                                         | 10,0                                    | 38,0                                  | 380,0        |
| 3,3                                         | 19,0                                    | 42,0                                  | 798,0        |
| 3,4                                         | 18,0                                    | 47,0                                  | 846,0        |
| 3,5                                         | 22,0                                    | 52,0                                  | 1144,0       |
| 3,6                                         | 27,0                                    | 59,0                                  | 1593,0       |
| 3,7                                         | 29,0                                    | 66,0                                  | 1914,0       |
| 3,8                                         | 20,0                                    | 72,0                                  | 1440,0       |
| 3,9                                         | 29,0                                    | 80,0                                  | 2320,0       |
| 4,0                                         | 12,0                                    | 88,0                                  | 1056,0       |
| 4,1                                         | 28,0                                    | 96,0                                  | 2688,0       |
| 4,2                                         | 13,0                                    | 107,0                                 | 1391,0       |
| 4,3                                         | 18,0                                    | 115,0                                 | 2070,0       |
| 4,4                                         | 14,0                                    | 125,0                                 | 1750,0       |
| 4,5                                         | 13,0                                    | 135,0                                 | 1755,0       |
| 4,6                                         | 6,0                                     | 147,0                                 | 882,0        |
| 4,7                                         | 11,0                                    | 160,0                                 | 1760,0       |
| 4,8                                         | 3,0                                     | 172,0                                 | 516,0        |
| 4,9                                         | 7,0                                     | 185,0                                 | 1295,0       |
| 5,0                                         | 3,0                                     | 200,0                                 | 600,0        |
| 5,1                                         | 3,0                                     | 214,0                                 | 642,0        |
| 5,2                                         | 2,0                                     | 227,0                                 | 454,0        |
| 5,3                                         | 3,0                                     | 240,0                                 | 720,0        |
| 5,4                                         | 2,0                                     | 255,0                                 | 510,0        |
| 5,5                                         | 4,0                                     | 270,0                                 | 1080,0       |
| 5,6                                         | 3,0                                     | 285,0                                 | 855,0        |
| 5,7                                         | 0,0                                     | 300,0                                 | 0,0          |
| 5,8                                         | 1,0                                     | 318,0                                 | 318,0        |
| 5,9                                         | 1,0                                     | 335,0                                 | 335,0        |
| $\sum_{3,1}^{5,9} (2) \cdot (3)$            |                                         |                                       | 31472,0      |

Tab. 6.4 Výpočet množstva vyrobenej energie za rok odčítaním hodnôt výkonu.

$$E = 31472 \cdot 24 = 755328 \text{ Wh}$$

Množstvo energie vyrobenej veterným generátorom Whisper 200 po dobu jedného roku, pri priemernej rýchlosti vetra 4 m.s<sup>-1</sup>, má hodnotu **755,33 kWh**.

## 6.5 Ekonomické vyhodnotenie veternej elektrárne

Z ekonomického hľadiska má významný vplyv na výhodnosť malého systému veternej elektrárne doba návratnosti počiatočných investícií. Pri vhodných podmienkach nemusí veterná elektráreň slúžiť len ako zdroj „čistej“ energie, ale je možné za dobu životnosti

pokryť celkové náklady a následne ušetriť nezanedbateľné množstvo financií výrobou vlastnej elektrickej energie.

Doba návratnosti celkových nákladov  $T[\text{rok}]$  na systém veternej elektrárne sa vypočíta pomocou vzťahu

$$T = \frac{N_c}{EC}, \quad (6.10)$$

kde  $N_c$  predstavuje hodnotu celkových nákladov (Kč);

$E$  je množstvo vyrobenej energie veternou elektrárnou za jeden rok (kWh);

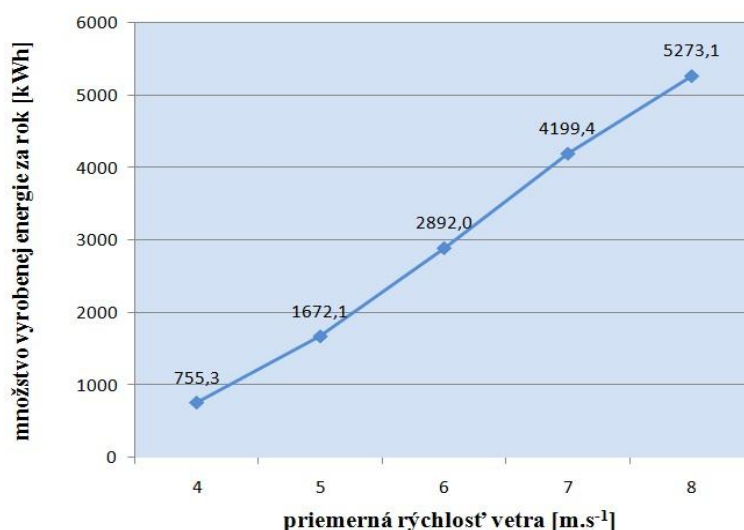
$C$  je aktuálna nákupná cena elektrickej energie (Kč/kWh).

Pri výpočte bude použitá hodnota množstva vyrobenej energie vypočítaná s využitím grafu 6.2, z dôvodu menšej teoretickej odchýlky od skutočnosti. Uvažovaná hodnota ceny elektrickej energie bude 4,54 Kč za jednu kilowatthodinu. Táto hodnota odpovedá tarifu Comfort D-Standard od spoločnosti ČEZ.

$$T = \frac{110106}{755,33 \cdot 4,54} = 32,1 \text{ rokov}$$

Výsledná hodnota doby návratnosti systému veternej elektrárne pri priemernej rýchlosti vetra  $4 \text{ m.s}^{-1}$  je **32,1 rokov**. Táto hodnota vysoko prevyšuje dobu životnosti 20 rokov, ktorú udávajú výrobcovia veterných elektrární. Z tohto dôvodu je zrejmé, že využívanie veternej elektrárne pri takto nízkych rýchlostiach vetra nie je výhodné.

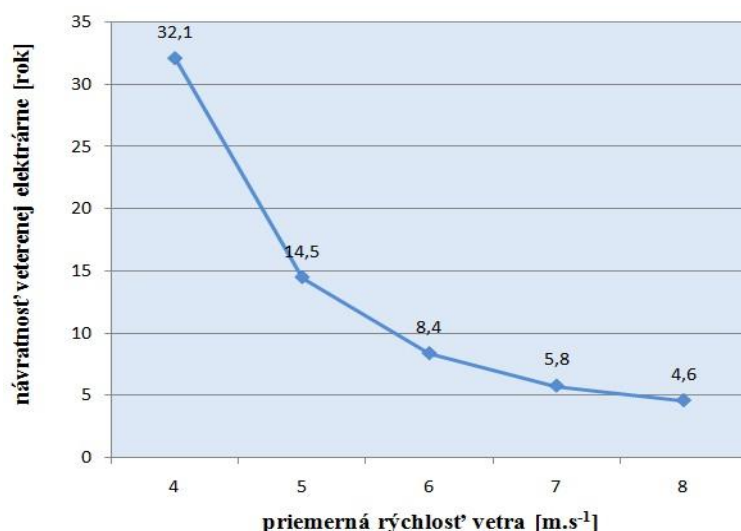
Upravením hodnôt rýchlostí vetra v prílohe č.1 tak, aby výsledné priemerné rýchlosti nadobudli hodnoty 5, 6, 7 a  $8 \text{ m.s}^{-1}$  a využitím vzťahu 6.9 a grafu 6.2, je možné zostrojiť nasledujúci graf.



Graf 6.3 Závislosť množstva vyrobenej energie na priemernej rýchlosti vetra.

Graf 6.3 dokazuje, že už pri zvýšení hodnoty priemernej rýchlosti na  $5 \text{ m.s}^{-1}$  je množstvo energie vyrobenej veternou elektrárnou viac ako dvojnásobné.

Po dosadení predchádzajúcich hodnôt množstva vyrobenej energie do vzťahu 6.10, je možné zostrojiť závislosť doby návratnosti systému na priemernej rýchlosti vetra.



Graf 6.4 Závislosť návratnosti systému na priemernej rýchlosti vetra za rok.

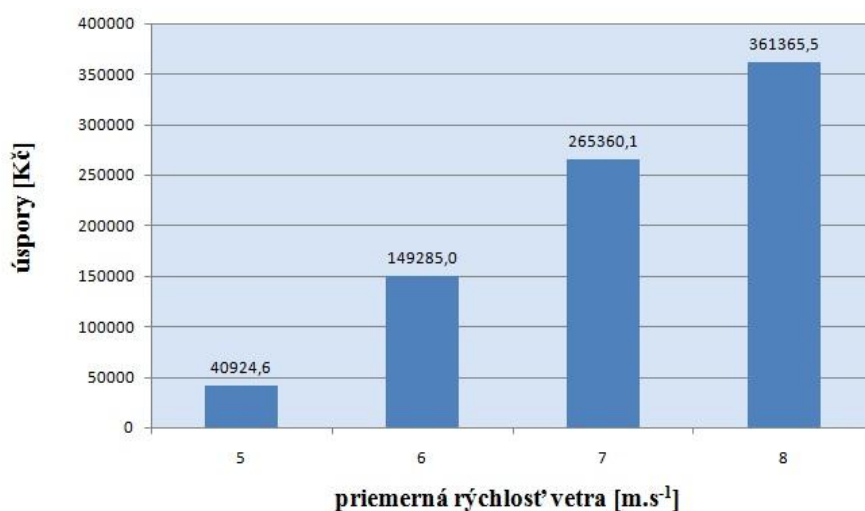
Z grafu 6.4 je zrejmé, že pri vyšších rýchlostiach vetra je výhodnosť veternej elektrárne výrazne vyššia.

Približnú hodnotu úspor  $U$  [Kč] za elektrickú energiu po uplynutí doby návratnosti systému, pri uvažovaní životnosti 20 rokov, je možné spočítať nasledujúcim vzťahom

$$U = (20 - T)EC \quad (6.11)$$

S využitím grafu 6.3 a 6.4 majú úspory v prípade priemernej rýchlosti vetra 5 m.s<sup>-1</sup> hodnotu

$$U = (20 - 14,5) \cdot 1672,1 \cdot 4,45 = 40924,6 \text{ Kč}$$



Graf 6.5 Závislosť hodnoty úspor na priemernej rýchlosti vetra za rok.

Graf 6.5 má však len informatívny charakter, z dôvodu veľkého množstva faktorov ovplyvňujúcich celkové úspory, ako napr. rozdielna životnosť jednotlivých zariadení a náklady na ich údržbu.

## 7 Závěr

Hlavná, rešeršná časť tejto práce je prevažne všeobecným prehľadom využívania energie vetra, ktorý odpovedá súčasnemu stavu.

Na úvod bola popísaná príčina pohybu vzduchu a faktory, ktoré ovplyvňujú celkovú charakteristiku tohto pohybu na Zemi. Na túto tému bolo nadviazané v kapitole o zaznamenávaní prúdenia vzduchu, kde boli uvedené základné normy platné pre meteorologické stanice po celom svete a prístroje, ktoré sa k tomuto účelu využívajú.

V základnej časti práce boli popísané jednotlivé druhy rozdelení veterných motorov a to z hľadiska princípu práce a následne z hľadiska prevedenia. Dlhá história využívania veterných motorov ukázala, že ako najefektívnejšie sa javia rýchlobežné veterné motory s horizontálnou osou, a to z viacerých dôvodov ako bolo uvedené v príslušných kapitolách.

Ako najvýznamnejšia krajina v produkcii energie vyrobenej z vetra sa ukázala byť USA, konkrétne štát Texas, kde sa nachádza aj najväčší veterný park na svete. Dominantné postavenie vo výrobe energie z offshore veterných parkov si však udržuje stále Európa. Štáty ako Dánsko, Holandsko alebo Veľká Británia disponujú veľmi výhodnými lokalitami v Severnom mori. Na ázijskom kontinente nemá veterná energetika v súčasnosti také zastúpenie ako v Európe, no finančné zázemie krajín ako Čína alebo Spojené arabské emiráty môžu túto situáciu v blízkej budúcnosti zmeniť.

Moderné veterné motory konvenčných konštrukcií sú v tejto dobe navrhnuté na hranicu fyzikálnych možností. Z tohto dôvodu je trendom vo vývoji využívanie nových technológií, ako napr. magnetická levitácia, a prispôbovanie veterných motorov pre prácu v náročnejších podmienkach s vyššími rýchlosťami vetra.

V kapitole zameranej na akumuláciu energie boli popísané možnosti „uskladňovania“ elektrickej energie za účelom jej využitia v dobe spotrebnej špičky. Ako najvýhodnejšie riešenie pre akumuláciu menšieho množstva elektrickej energie je elektrochemická akumulácia, z dôvodu relatívne nízkej ceny. Mechanické akumulátory, ako napr. prečerpávacie elektrárne alebo zásobníky stlačeného vzduchu, sú využívané predovšetkým na vyrovnanie spotreby elektrickej energie z elektrorozvodnej siete.

Výpočtová časť práce pozostávala z návrhu systému veternej elektrárne pre malý objekt. Uvažovaná priemerná rýchlosť vetra bola vypočítaná z upravených hodnôt rýchlostí vetru nameraných na ulici Kroftova v Brne tak, aby čo najviac odpovedala reálnej situácii v Českej republike. Veterný generátor bol zvolený na základe vhodnosti pri nízkych rýchlostiach vetra. Výpočet množstva energie bol vykonaný na základe odvodeného vzťahu pre výkon veterného motoru a následne s využitím výkonovej charakteristiky uvedenej výrobcou. Bolo dokázané, že teoretická hodnota množstva energie vypočítaná prvou variantou prevyšuje hodnotu množstva energie z druhej varianty výpočtu. Prvá varianta výpočtu nie je vhodná pri vyšších rýchlostiach vetra, a to z dôvodu, že vo vzťahu pre výkon veterného motoru sa neuvažuje vplyv poklesu produkovaného výkonu pri prekročení určitej hodnoty rýchlosti vetra. Následne bola vypočítaná doba návratnosti systému, ktorá vyšla výrazne vyššia ako je doba životnosti. Z tejto skutočnosti vyplýva, že využívanie veternej elektrárne pri priemernej rýchlosti  $4 \text{ m.s}^{-1}$  nie je výhodné. Pri vyšších priemerných rýchlostiach vykazuje veterná elektráreň výrazne lepšie výsledky. Na záver tejto časti práce bola zostrojená informatívna závislosť úspor na priemernej rýchlosti vetra počas uvažovanej doby životnosti systému, ktorá je však v skutočnosti ovplyvnená rozdielnou životnosťou jednotlivých komponentov, podmienkami danej lokality a nákladmi na údržbu celého systému. Dobrou údržbou je však možné predĺžiť životnosť veternej elektrárne až na viac ako 30 rokov.

## 8 Zoznam použitých zdrojov

- [1] RYCHETNÍK, Václav; PAVELKA, Jiří; JANOUŠEK, Josef. *Větrné motory a elektrárny*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- [2] QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha : GRADA Publishing, 2008, 296 s, ISBN 978-80- 247-3250-3.
- [3] CENEK, Miroslav, et al. *Obnovitelné zdroje energie*. Praha : FCC Public, 2001. 208 s. ISBN 80-901985-8-9.
- [4] CENEK, Miroslav, et al. *Akumulátory od principu k praxi*. Praha : FCC Public, 2003. 248 s. ISBN 80-86534-03-0.
- [5] *Southwest Windpower* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Product brochure. Dostupné z WWW: <[http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/3-CMLT-1347-01\\_whisper\\_brochure.pdf](http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/3-CMLT-1347-01_whisper_brochure.pdf)>.
- [6] *Southwest Windpower* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Spec sheet. Dostupné z WWW: <[http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/3-CMLT-1346-01\\_Whisper\\_spec.pdf](http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/3-CMLT-1346-01_Whisper_spec.pdf)>.
- [7] *Venus* [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. Coriolis effect. Dostupné z WWW: <<http://venus.uvic.ca/research/ocean-processes/coriolis-effect/>>.
- [8] *Earth Observatory* [online]. 20.9.2008 [cit. 2011-05-22]. Low-pressure system off Australia. Dostupné z WWW: <<http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=9208>>.
- [9] *NovaLynx Corporation* [online]. 2007 [cit. 2011-05-22]. Micro response wind sensors. Dostupné z WWW: <<http://www.novalynx.com/200-2020-2030.html>>.
- [10] *Darrieus wind turbine analysis* [online]. 6.11.2002 [cit. 2011-05-22]. Technical introduction on Darrieus wind turbine. Dostupné z WWW: <<http://www.windturbine-analysis.netfirms.com/index-intro.htm>>.
- [11] *Splinder* [online]. 12.4.2008 [cit. 2011-05-22]. Panemone. Dostupné z WWW: <<http://www.splinder.com/mediablog/ProfeGM/media/19239290>>.
- [12] *Wikipedia* [online]. 10.5.2011 [cit. 2011-05-22]. Magnus effect. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Magnus\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnus_effect)>.
- [13] *The old salt blog* [online]. 17.4.2010 [cit. 2011-05-22]. E Ship 1 – Has the Flettner rotor ship finally arrived?. Dostupné z WWW: <<http://www.oldsaltblog.com/2010/08/17/e-ship-1-has-the-flettner-rotor-ship-finally-arrived/>>.
- [14] *WebEcoist* [online]. 25.1.2009 [cit. 2011-05-22]. 7 ancient wonders of green design & technology. Dostupné z WWW: <<http://webecoist.com/2009/01/25/ancient-green-architecture-alternative-energy-design/>>.

- 
- [15] *Inspired in Spain* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Don Quixote Route. Dostupné z WWW: <<http://www.inspiredinspain.com/?Region=costa-blanca&SubRegion=castilla-la-mancha&Article=don-quixote-route>>.
- [16] *Tripadvisor* [online]. 2007 [cit. 2011-05-22]. Photos of American wind power center, Lubbock. Dostupné z WWW: <[http://www.tripadvisor.com/LocationPhotos-g56208-d270366-American\\_Wind\\_Power\\_Center-Lubbock\\_Texas.html#17127841](http://www.tripadvisor.com/LocationPhotos-g56208-d270366-American_Wind_Power_Center-Lubbock_Texas.html#17127841)>.
- [17] *Investments in energy* [online]. 16.12.2010 [cit. 2011-05-22]. GE 1.5 SL wind turbines for sale. Dostupné z WWW: <<http://investmentsinenergy.com/ge-1-5-sl-wind-turbines-for-sale/>>.
- [18] *Eurosolar.cz* [online]. 2007 [cit. 2011-05-22]. Větrná energie. Dostupné z WWW: <<http://www.eurosolar.cz/phprs/showpage.php?name=vitr>>.
- [19] *Wind energy planning* [online]. 23.9.2008 [cit. 2011-05-22]. How wind turbines work. Dostupné z WWW: <<http://www.windenergyplanning.com/how-wind-turbines-work/>>.
- [20] *Good news from Finland* [online]. 30.4.2010 [cit. 2011-05-22]. Ruukki strengthens its position as a supplier of wind turbine towers. Dostupné z WWW: <<http://www.goodnewsfinland.com/archive/ruukki-strengthens-its-position-as-a-supplier-of-wind-turbine-towers/>>.
- [21] *Otherpower.com* [online]. 13.7.2005 [cit. 2011-05-22]. Large 20' homebrew wind turbine. Dostupné z WWW: <<http://www.otherpower.com/>>.
- [22] *Highfield wind energy project* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. The Highfield wind energy project. Dostupné z WWW: <<http://www.highfieldwindenergy.co.uk/highfield.asp>>.
- [23] *Rapidgraphs.com* [online]. 2006 [cit. 2011-05-22]. Tehachapi wind farm. Dostupné z WWW: <<http://www.rapidgraphs.com/qwr.php?q=tehachapi-wind-farm&page=5>>.
- [24] *Nazeleno.cz* [online]. 19.10.2009 [cit. 2011-05-22]. Největší větrná farma Roscoe o výkonu 781,5 MW stojí v USA. Dostupné z WWW: <<http://www.nazeleno.cz/energie/vetrna-energie/nejvetsi-vetrna-farma-roscoe-o-vykonu-781-5-mw-stoji-v-usa.aspx>>.
- [25] *Wikipedia* [online]. 18.5.2011 [cit. 2011-05-22]. Wind farm. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_farm](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm)>.
- [26] *Technology review* [online]. 14.9.2009 [cit. 2011-05-22]. China's potent wind potential. Dostupné z WWW: <<http://www.technologyreview.com/energy/23460/page2/>>.
- [27] *International business times* [online]. 7.10.2010 [cit. 2011-05-22]. Government leases sea tract for wind farm. Dostupné z WWW: <<http://www.ibtimes.com/articles/69733/20101007/wind-power.htm>>.

- [28] *Global Energy Magazine* [online]. 23.9.2010 [cit. 2011-05-22]. World's biggest offshore wind farm opens today. Dostupné z WWW: <<http://www.globalenergymagazine.com/2010/09/worlds-biggest-offshore-wind-farm-opens-today/>>.
- [29] *London Array* [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. How it all began. Dostupné z WWW: <<http://www.londonarray.com/the-project/>>.
- [30] *Renewbl* [online]. 2.9.2010 [cit. 2011-05-22]. SWAY creates SWAY Turbine – main focus on next gen 10 MW turbines. Dostupné z WWW: <<http://www.renewbl.com/2010/09/02/sway-creates-sway-turbine-main-focus-on-next-gen-10-mw-turbines.html>>.
- [31] *Arup* [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. 10MW wind turbine unveiled. Dostupné z WWW: <[http://www.arup.com/News/2010\\_07\\_July/27\\_Jul\\_2010\\_Arup\\_and\\_Wind\\_Power\\_Limited\\_unveil\\_10MW\\_Wind\\_Turbine/10MW\\_wind\\_turbine\\_unveiled\\_1.aspx](http://www.arup.com/News/2010_07_July/27_Jul_2010_Arup_and_Wind_Power_Limited_unveil_10MW_Wind_Turbine/10MW_wind_turbine_unveiled_1.aspx)>.
- [32] *Inhabitat* [online]. 26.11.2007 [cit. 2011-05-22]. THE MAGLEV: The super-powered magnetic wind turbine. Dostupné z WWW: <<http://inhabitat.com/super-powered-magnetic-wind-turbine-maglev/>>.
- [33] *Magenn* [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. Technology. Dostupné z WWW: <<http://www.magenn.com/technology.php>>.
- [34] *EcoFriend* [online]. 21.1.2008 [cit. 2011-05-22]. KiteGen - Rivaling nuclear power for global electricity consumption. Dostupné z WWW: <<http://www.ecofriend.com/entry/kitegen-rivaling-nuclear-power-for-global-electricity-consumption/>>.
- [35] *Ekologické bydlení* [online]. 23.8.2010 [cit. 2011-05-22]. Umělá stébla jako sběrače větrné energie. Dostupné z WWW: <<http://www.ekobydleni.eu/vetrna-energie/umela-stebbla-jako-sberace-vetrne-energie>>.
- [36] *Batéria* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Olověný akumulátor (Pb). Dostupné z WWW: <<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-oloveny-akumulator-pb.htm>>.
- [37] *Ekologické bydlení* [online]. 11.8.2010 [cit. 2011-05-22]. Přecherčpávací elektrárny - ideální doplněk pro solární a větrné zdroje. Dostupné z WWW: <<http://www.ekobydleni.eu/energie/precerpavaci-elektrarny-idealni-doplnek-pro-solarni-a-vetrne-zdroje>>.
- [38] *SHPEGS* [online]. 2006 [cit. 2011-05-22]. Compressed air wind electrical generation system. Dostupné z WWW: <<http://www.shpegs.org/cawegs.html>>.
- [39] *Eco Friendly Mag* [online]. 10.3.2011 [cit. 2011-05-22]. Flywheel-based power storage can replace batteries and more . Dostupné z WWW: <<http://www.ecofriendlymag.com/sustainable-transporation-and-alternative-fuel/flywheel-based-power-storage-can-replace-batteries-and-more-3/>>.

- 
- [40] *Tzb-info* [online]. 14.5.2003 [cit. 2011-05-22]. Akumulace tepelné energie - fyzikální principy. Dostupné z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/1482-akumulace-tepelne-energie-fyzikalni-principy>>.
  - [41] *Ústav fyziky atmosféry* [online]. 2010 [cit. 2011-05-22]. Výzkum vhodnosti lokalit v ČR z hlediska zásob větrné energie a zpracování metodiky pro posuzovací a schvalovací řízení při zavádění větrných elektráren. Dostupné z WWW: <<http://www.ufa.cas.cz/vetrna-energie/doc/vav/priloha02.jpg>>.
  - [42] *EMarine Systems* [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. 220V Model Whisper 200 with no Controller. Dostupné z WWW: <<http://www.emarineinc.com/products/220V-Model-Whisper-200-with-no-Controller.html>>.
  - [43] *Southwest Windpower* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Whisper 100/200 Tower Manuals. Dostupné z WWW: <[http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/0028\\_REV\\_E\\_50FootWhisperTowerManual\\_0.pdf](http://www.windenergy.com/sites/webtest.windenergy.com/files/0028_REV_E_50FootWhisperTowerManual_0.pdf)>.
  - [44] *Sneha Enterprises* [online]. 2009 [cit. 2011-05-22]. Whisper 200 Controller. Dostupné z WWW: <<http://www.snehaenterprizes.com/whisper-200-controller.htm>>.
  - [45] *Kremík* [online]. 2008 [cit. 2011-05-22]. Vetrné elektrárne. Dostupné z WWW: <<http://kremik.sk/veterne-elektrarne-c-719.html>>.

## 9 Zoznam použitých skratiek a symbolov

|             |                             |                       |
|-------------|-----------------------------|-----------------------|
| $c_p$       | výkonnostný koeficient      | [%]                   |
| $\lambda_0$ | rýchlobežnosť               | [-]                   |
| $h$         | výška                       | [m]                   |
| $v$         | rýchlosť                    | [m.s <sup>-1</sup> ]  |
| $n$         | koeficient drsnosti povrchu | [-]                   |
| $E$         | energia                     | [Wh]                  |
| $m$         | hmotnosť                    | [kg]                  |
| $V$         | objem                       | [m <sup>3</sup> ]     |
| $\rho$      | hustota                     | [kg.m <sup>-3</sup> ] |
| $S$         | plocha                      | [m <sup>2</sup> ]     |
| $x$         | dráha                       | [m]                   |
| $t$         | čas                         | [s]                   |
| $P$         | výkon                       | [W]                   |
| $d$         | priemer                     | [m]                   |
| $\eta_r$    | účinnosť rotoru             | [%]                   |
| $\eta_p$    | účinnosť prevodovky         | [%]                   |
| $\eta_g$    | účinnosť generátoru         | [%]                   |
| $y$         | početnosť rýchlosti vetra   | [deň]                 |
| $T$         | doba návratnosti            | [rok]                 |
| $N_c$       | celkové náklady             | [Kč]                  |
| $C$         | cena elektrickej energie    | [Kč]                  |
| $U$         | úspory                      | [Kč]                  |