

Technická analýza vhodnosti využitia rôznych typov veterných rotorov pre pohon kompresora akumuláčného systému umožňujúceho využitie nízkopotenciálnej veternej energie

Kudelas Dušan¹ a Rybár Radim¹

Technical analysis of utilization suitability of various wind rotor's types for compressor's power driving for accumulation system based on low-potential wind energy

Conception is from the converting of wind energy, which flows across the wind turbine in mechanic work needed for compressor working. The wind motor one part of energy transform into mechanical work, part of energy is unused and part of energy of steady flow is transformed into eddy after wind rotor.

The aim was rendering of technical analysis for equipment, which would use the wind with parameters for chosen area and whole unit would supply power in peak demand. Unit consists of wind turbine, which pushes compressor. Compressor pumps air into the compressed air storage. The air is used for power producing in time of peak demand.

Key words: wind turbine, electric power, peak demand, torque, compressed air storage.

Úvod

Vychádzame z premeny kinetickej energie vetra, ktorý prechádza prietokovou plochou veterného motora na mechanickú prácu potrebnú pre pohon kompresora. Veterný motor časť energie premení na mechanickú prácu, časť energie ostáva nevyužitá a časť energie ustáleného prúdenia sa premení na vírenie vzduchu za rotorom.

Objektom technickej analýzy sú parametre zariadenia, ktoré by využívalo vietor v danej lokalite s tým, že celá jednotka by dodávala elektrickú energiu v čase špičkovej záťaže. Veterná energia slúži ako prvotný zdroj, poháňajúci kompresor, ktorý naplňa pneumatikový akumulátor (zásobník stlačeného vzduchu).

Z pneumatikového zásobníka sa v čase špičkovej záťaže elektrizačnej sústavy stlačený vzduch spotrebúva na prácu pneumatikového motora, ktorý poháňa generátor a vyrobená elektrická energia sa dodáva do verejnej siete. V čase nedostatočného výkonu veternej energie je kompresor poháňaný klasickým zdrojom energie. Veterná energia slúži ako doplnkový zdroj pre pohon kompresora. Pri návrhu potrebného kompresora uvažujeme s výrobou stlačeného vzduchu, a teda aj elektrickej energie i v čase bezvetria.

Silové účinky vzduchu na rotor turbíny

Energetický potenciál v závislosti iba na rýchlosti vetra, sa hodnotí ako energetický tok naprieč plochou vrtule. Ak predpokladáme, že veterná turbína opisuje kruh o ploche A a pracuje ideálne, potom celú kinetickú energiu vetra mení na mechanický výkon na hriadeľi (Šefter, 1991).

Výkon $P[W]$ odoberaný prúdiacemu vzduchu turbínou je daný súčinom axiálnej sily $F[N]$ pôsobiacej na turbínu a rýchlosti vetra v rovine turbíny $u_1[m.s^{-1}]$.

$$P = F \cdot u_1 \quad (1)$$

Axiálnu silu pôsobiacu na turbínu je možné vyjadriť na základe nenarušeného prúdu vzduchu (rýchlosti vetra) u_0 a vtokového faktora $a[-]$.

$$F = 2\rho \cdot A_1 \cdot a(1-a) \cdot u_0^2 \quad (2)$$

kde ρ - hustota vetra [$kg.m^{-3}$]

A - plocha turbíny [m^2]

u_0 - rýchlosť vetra [$m.s^{-1}$]

u_1 - rýchlosť prúdenia v rovine turbíny [$m.s^{-1}$]

Po vyjadrení axiálnej sily podľa vzťahu (2) a dosadení do vzťahu (1) potom platí

$$P = 2\rho \cdot A_1 \cdot a(1-a) \cdot u_0^3 \quad (3)$$

¹ Ing. Dušan Kudelas, Ing. Radim Rybár, PhD., TU v Košiciach, Fakulta BERG, katedra podnikania a manažmentu, (Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 11. 2. 2005)

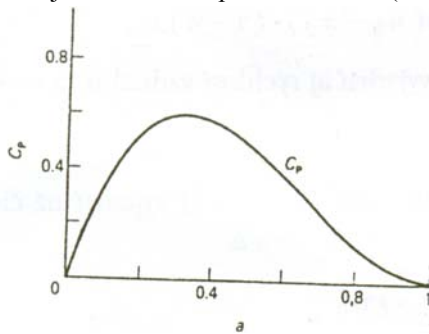
Zavedením súčiniteľa výkonu c_p , ktorý má tvar

$$c_p = 4a(1-a^2) \quad , \quad (4)$$

je možné vyjadriť výkon turbíny vzťahom

$$P = \frac{1}{2} \rho c_p A u_0^3 \quad , \quad (5)$$

Súčiniteľ výkonu je závislý iba na tom, do akej miery turbína spomaľuje pretekajúci vzduch. Ak by turbína pretekajúci vzduch nespomalila vôbec ($a=0$), vtedy by aj súčiniteľ výkonu c_p mal nulovú hodnotu. Ak by naopak turbína odobrala pretekajúcemú vzduchu všetku energiu ($a=1$), vtedy by mal súčiniteľ výkonu c_p opäť nulovú hodnotu, pretože by došlo k zastaveniu prúdenia ($u_1=0$), čo vyjadruje graf znázornený na obr. 1.



Obr. 1. Závislosť výkonového súčiniteľa c_p na vtokovom faktore a .

Fig. 1. Dependence of form of power coefficient c_p on inflow factor a .

Z obr.1 je zrejmé, že hodnota výkonového súčiniteľa c_p dosahuje maximum pri hodnote vtokového faktora $a = 1/3$. Dosadením do (4) potom získame maximálnu hodnotu

$$c_{p\max} = \frac{16}{27} \doteq 0,593 \quad . \quad (6)$$

Maximálna hodnota výkonového súčiniteľa sa nazýva Betzov limit. Ideálna veterná turbína má účinnosť približne 59 %. Na to, aby ju dosiahla, by mala spomaľovať vzduch na dvojtretinovú rýchlosť prúdenia v mieste rotora a jednotretinovú za rotorom.

Kinetická energia $E[J]$, obsiahnutá v jednotke objemu vzduchu prúdiaceho rýchlosťou $u_0 [m.s^{-1}]$, je daná vzťahom

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot u_0^2 \quad . \quad (7)$$

Hustota výkonu vetra $P_S [W]$ (wind power density) je výkon, ktorý by bolo možné získať 100 % využitím kinetickej energie vetra prúdiaceho jednotkovou plochou kolmou na smer prúdenia.

$$P_S = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad , \quad (8)$$

kde \bar{u} je horizontálna zložka rýchlosti vetra, dosadzovaná do rovnice (8) ako priemerná rýchlosť z časového intervalu 10 minút alebo 1 hodina.

Pri teoretických úvahách popisujúcich rýchlosť prúdenia vetra sa uvažuje s okamžitou rýchlosťou vetra (označovanou u), pri určovaní parametrov veterných zariadení sa uvažuje so strednou rýchlosťou prúdenia vetra označovanou v .

Zo uvedeného vzťahu (5) bola vyjadrená plocha rotora potrebná pre stanovený výkon.

$$A = \frac{2.P}{c_p \cdot \rho \cdot v^3} \quad [m^2] \quad . \quad (9)$$

Otáčky $n [min^{-1}]$ boli stanovené zo vzťahu

$$n = 0,5 \cdot \lambda \cdot v^2 \sqrt{\left(\frac{c_p}{2\pi \cdot P} \right)} \quad . \quad (10)$$

Krútiaci moment $M_k [Nm]$ je daný vzťahom

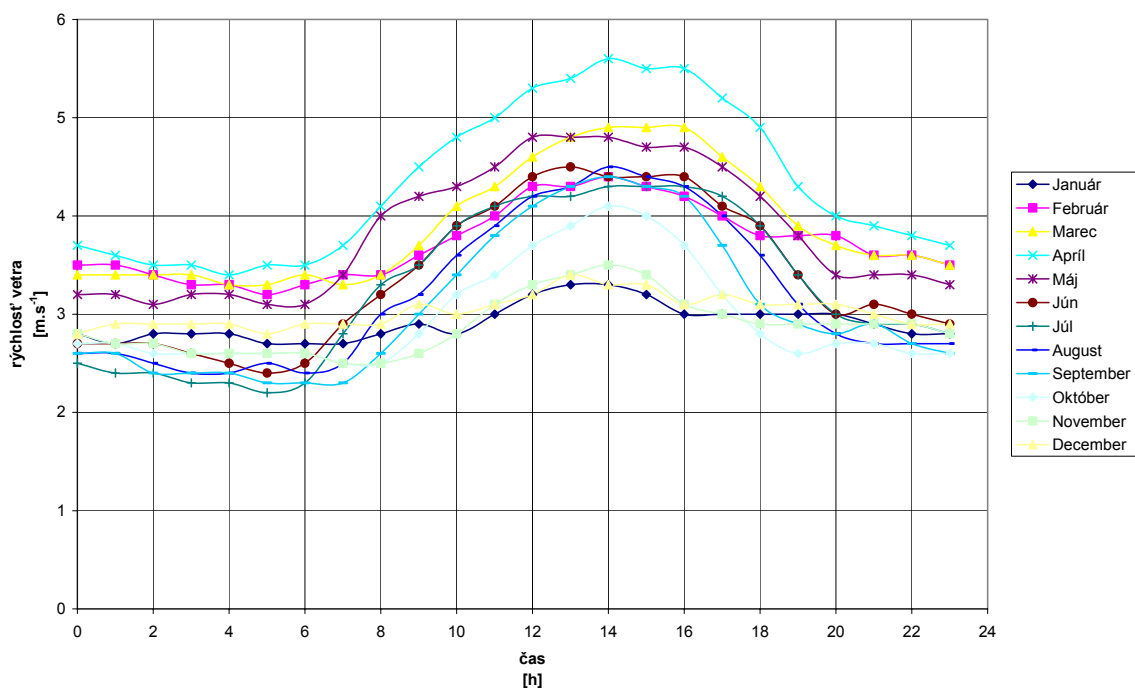
$$M_k = \frac{1}{16} \cdot c_m \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^3 \cdot v^2 \quad , \quad (11)$$

kde c_m je súčiniteľ výkonu (Rybár et. al., 2004).

Posúdenie vhodnosti rôznych typov rotorov pre navrhovaný systém

Na základe kritéria pre rozdelenie veterných motorov z hľadiska aerodynamického princípu boli pre účely analýzy vybrané typy motorov pracujúce na odporovom princípe – Savoniov motor a štyri typy motorov pracujúcich na vztlakovom princípe – troj, päť a dvanásť listový rotor a rotor Darrieus.

Vzhľadom na technicky využiteľnú rýchlosť vetra, ktorá je $v = 3 \text{ m.s}^{-1}$ t.j. minimálnu rýchlosť vetra, pri ktorej začína veterné zariadenie pracovať a priemernú rýchlosť vetra v Košiciach $v = 3,6 \text{ m.s}^{-1}$, treba pripomenúť, že uvažované kompresory, ktoré naplňajú pneumatically akumulátor, napojené na veterné zariadenia sú dimenzované na rýchlosť vetra $v = 4 \text{ m.s}^{-1}$. Túto hodnotu dosahuje vietor v Košiciach a okolí najmä v popoludňajších hodinách (obr.2). Čas naplnenia akumuláčného zásobníka bol zvolený na $t = 4 \text{ h}$. Tlak v zásobníku $p = 0,8 \text{ MPa}$.



Obr. 2. Priemerná hodinová rýchlosť vetra počas dňa v jednotlivých mesiacoch v Košiciach.
Fig. 2. Average of hourly wind speed by day in months in Košice.

Trojlistový a viaclistový rotor

Prúd vzduchu pretekajúci plochou vrtule pôsobí počas jej otáčania na všetky listy rovnako. Na pohon vrtule sa využívajú aerodynamické sily vztlaku a odporu aerodynamického profilu. Súčiniteľ výkonu pri dobre navrhutej vrtuli sa blíži k teoretickej hodnote Betzovho súčiniteľa. Má pomerne vysoké otáčky, vhodné pre pohon generátora. S rastúcim počtom listov vrtule klesá jej účinnosť, znižujú sa otáčky, pri ktorých je dosiahnutá maximálna účinnosť vrtule ale stúpa krútiaci moment. Je to zrejme pri mnoholopatkovom kolese, ktoré je pri nízkych otáčkach viac vhodné pre pohon piestových čerpadiel, i piestových kompresorov, nie však pre pohon generátorov pre výrobu elektrickej energie. Viaclistová vrtuľa je vhodná všade tam, kde je potrebné znížiť počet otáčok vrtule. Mierne zníženie účinnosti sa nahradí zväčšením priemeru rotora. Všeobecne sa odporúča, aby obvodová rýchlosť špičky vrtule nebola vyššia než 60 m.s^{-1} (Strakoš, 2001).

Vstupné parametre trojlistového rotora sú $P = 110 \text{ W}$, $c_p = 0,48$, $\lambda = 6$.

Vstupné parametre päťlistového rotora sú $P = 110 \text{ W}$, $c_p = 0,44$, $\lambda = 3,6$.

Pre prepočet súčiniteľa rýchlobežnosti λ z trojlistovej vrtule je možné použiť vzťah

$$\frac{\lambda_3}{\lambda_5} = \frac{b_5}{b_3} = \frac{5}{3}, \text{ teda}$$

$$\lambda_5 = \lambda_3 \frac{3}{5} = 6 \frac{3}{5} = 3,6,$$

kde b_3, b_5 je počet listov vrtule.

Pät'listová vrtuľa dosiahne maximálny výkon pri nižších otáčkach ako trojlistová.

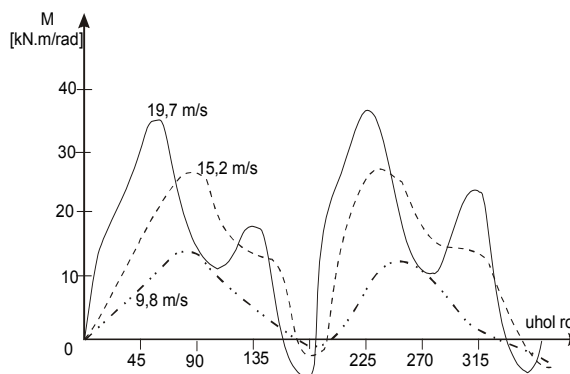
Vstupné parametre dvanásťlopatkového rotora sú $P = 110 \text{ W}$, $c_p = 0,3$, $\lambda = 1,5$

$$\frac{\lambda_3}{\lambda_{12}} = \frac{b_{12}}{b_3} = \frac{12}{3},$$

$$\lambda_{12} = \lambda_3 \frac{3}{12} = 6 \frac{3}{12} = 1,5.$$

Darrieusov rotor

Tento typ rotora má v porovnaní s klasickou vrtuľou nevýhodu v tom, že počas jednej otáčky pôsobia sily na každý list, ktoré sú premenlivé nielen čo do veľkosti ale i smeru, takže v jednej polohe je list rotora brzdený a neprispieva k hnaciemu momentu rotora (obr.4). Ďalšia nevýhoda tohto typu rotora je v tom, že rotor sa ťažko rozbíha z kľudovej polohy, takže vo väčšine prípadov musí byť rotor rozbehnutý pomocou generátora, ktorý tak beží v motorickom režime. Výhoda Darrieusovho rotora je v tom, že sa nemusí natáčať do smeru prúdenia vetra a pri všetkých smeroch pracuje rovnako.



Obr. 4. Zmena hnacích síl na liste rotora Darrieus.
Fig. 4. The traction forces fluctuation on Darrieus's rotor blade.

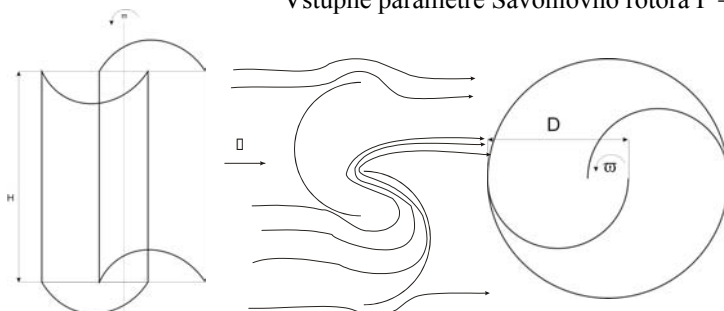
Konštrukčne je pomerne jednoduchý, najmä pri prevedení (I), pri ktorom je list namáhaný iba ťahom, takže môže byť pomerne jednoducho vyrobený z ťahaného duralového profilu. Pri type (H) sú listy rotora ohýbané a aerodynamické sily zvyšujú priehyb listu, na rozdiel od listov klasickej vrtule, kedy odstredivé sily výrazne znižujú priehyb listu (Strakoš, 2001).

Vstupné parametre Darrieusovho trojlistového rotora sú $P = 110 \text{ W}$, $c_p = 0,38$, $\lambda = 4,5$.

Savoniusov rotor

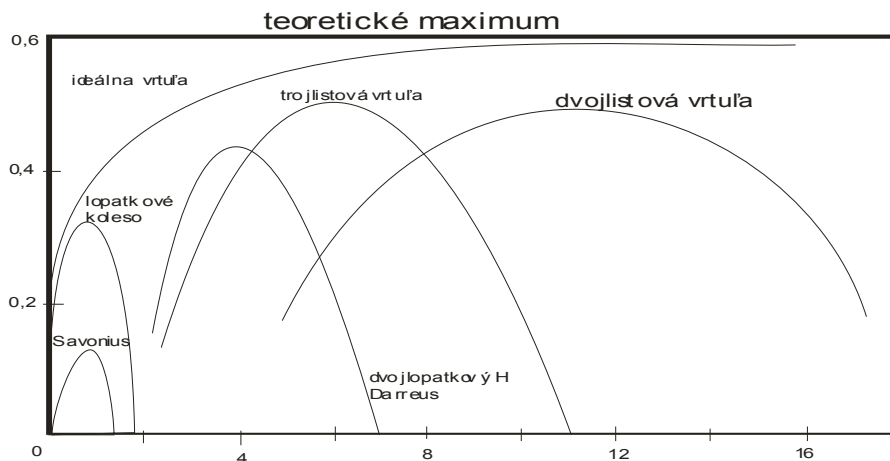
Kinetická energia vzdušného prúdu je menená na tlak, ktorý pred sebou tlačí zakrivenú lopatku rotora (obr.5). Ustupujúca lopatka je hnaná vetrom, postupujúca lopatka je vetrom brzdená, takže polovica rotora sa podieľa na tvorbe krútiaceho momentu. Rotory tohto typu sú vhodné pre čerpadlá a podobné zariadenia, ktoré vyžadujú veľký krútiaci moment, ale nízke otáčky. Tým, že len polovica rotora sa počas otáčania podieľa na tvorbe krútiaceho momentu je účinnosť rotora nižšia ako účinnosť predchádzajúcich typov.

Vstupné parametre Savoniovho rotora $P = 110 \text{ W}$, $c_p = 0,2$, $\lambda = 1,2$.



Obr. 5. Savoniov rotor: D –priemer lopatky, H – výška lopatky, spôsob prúdenia vetra.
Fig. 5. Savonius's rotor: D –diameter, H –height, way of wind flow.

Pre každý z uvažovaných typov rotorov bol vykonaný návrh hlavných rozmerov veterného motora, ktorý pri rôznych rýchlostiach vetra má príkon na hriadelí kompresora 110kW. Súčasne je vypočítaný maximálny krútiaci moment a otáčky (tab.1).



Obr. 6. Závislosť súčiniteľa výkonu c_p na súčiniteli rýchlobežnosti λ .
Fig. 6. Dependence of power coefficient c_p and coefficient λ .

Tab. 1. Určené rozmery rotorov, otáčky a krútiace momenty.
Tab. 1. Wind rotors measurements, RPM and torque.

Typ	Plocha rotora $S[m^2]$	Polomer rotora/výška $H[m]$	Priemer rotora $D[m]$	Otáčky rotora $N[min^{-1}]$	Krútiaci moment $M_k[Nm]$
trojlistový	5,53	1,33	2,66	172,72	6,08
päťlistový	6,04	1,39	2,77	99,22	10,40
dvanásťlistový	8,85	1,68	3,36	34,14	18,47
Savonius	13,28	5,15	2,58	22,30	28,51
Darrius	6,99	1,87	3,74	115,26	25,49

Záver

Vzhľadom na to, že pre pohon kompresora potrebujeme veľký krútiaci moment akumuláčnej jednotky je potrebné uvažovať s mnoho lopatkovým alebo Savoniusovým rotorom. Pri listovom rotore prúd vzduchu pretekajúci plochou vrtule pôsobí na všetky listy rovnako počas otáčania vrtule. K pohonu vrtule sa využívajú aerodynamické sily vzlaku a odporu aerodynamického profilu. Súčiniteľ výkonu pri dobre navrhnutom rotore i k teoretickej hodnote Betzovho súčiniteľa. Má pomerne vysoké otáčky, vhodné pre pohon generátora. S rastúcim počtom listov vrtule klesá jej účinnosť, znižujú sa otáčky, pri ktorých je dosiahnutá maximálna účinnosť vrtule ale stúpa krútiaci moment. Je to zrejme pri mnoho lopatkovom kolese, ktoré je pri nízkych otáčkach viac vhodné pre pohon piestových čerpadiel, i piestových kompresorov, nie však pre pohon generátorov pre výrobu elektrickej energie. Viaclistová vrtuľa je vhodná všade tam kde je potrebné, znížiť počet otáčok vrtule. Mierne zníženie účinnosti je možné eliminovať zväčšením priemeru rotora.

Príspevok bol vypracovaný v rámci riešenia grantového projektu VEGA č. 1/2195/05.

Literatúra – References

- Horák, M., Vančura, P.: Technika stlačeného vzduchu. *Návody na cvičenia. STU – Bratislava 1994.*
 Horák, M.: Technika stlačeného vzduchu. *STU – Bratislava 1994.*
 Šeřter, J., I.: Využití energie vetru. *SNTL, Praha, 1991.*
 Strakoš, L.: Technická analýza vhodnosti využítí různých typů rotorů pro pohon generátorů větrných elektráren. *Větrná energie 1/03.*
 Rybár, R., Kudelas, D., Fischer, G.: Alternatívne zdroje energie III – Veterná energia. *Dočasná vysokoškolská učebnica. Edičné stredisko/AMS, Košice, 2004, ISBN 80-8073-144-6.*