

Ján Tkáč

## Veterné elektrárne s vertikálnou osou

Abstrakt- predkladaný príspevok sa zaoberá využívaním veternej energie na výrobu elektrickej energie, pomocou veterných elektrární s vertikálnou osou. V súčasnosti sú najviac používané veterné elektrárne, ktorých turbíny majú horizontálnu os otáčania. Ich inštalovaný výkon narastá rýchlym tempom a v súčasnosti dosahuje už okolo 300 GW. Menej známe je používanie vertikálnych rotorov, ktoré majú celý rad výhod. Práca je zameraná na overovanie vlastností vertikálnych veterných turbín pomocou laboratórneho modelu. Boli zhotovené viaceré konštrukčne odlišné rotory na báze Savoniusovho rotora. Výsledky poukazujú, že konštrukciu rotora je možné ešte zlepšovať. Najviac sa osvedčili viacstupňové rotory.

Kľúčové slová: veterná energia, veterné turbíny, savoniusov rotor, model

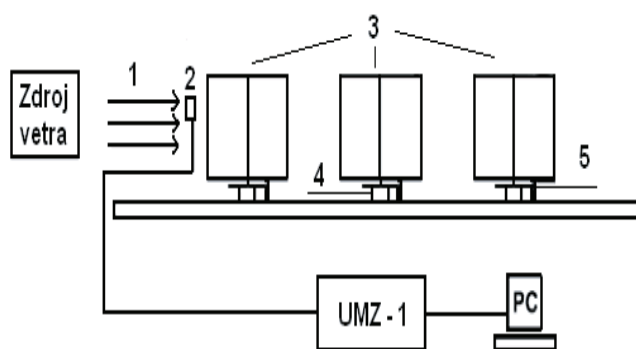
### I. ÚVOD

V súčasnosti sa ľudstvo zameriava na využívanie obnoviteľných zdrojov energie, ktoré neznečisťujú životné prostredie a vyhovujú aj z kvantitatívneho hľadiska. Takými zdrojmi sú obnoviteľné zdroje energie OZE ako sú slnko, vietor, voda a geotermálna energia, ktoré sa nachádzajú všade okolo nás. OZE a výroba elektrickej energie pomocou nich je výhodná najmä kvôli tomu, že nenarušujú termodynamickú stabilitu planéty a znižujú produkciu nežiaducich emisií. Ich výhodou je možnosť výroby elektriny distribuovaným spôsobom na ktoromkoľvek mieste na planéte aj bez spolupráce s elektrickou sieťou, alebo pracujúce do autonómnej siete [2]. Využitelnosť vetra siaha do dávnej minulosti, kedy ho ľudia začali využívať na mletie obilia za pomoci veterných mlynov, čerpadiel, pohon lodí v námorníctve a napokon aj na výrobu elektriny. V dnešnej dobe je vietor využívaný najmä na výrobu elektrickej energie a veterné elektrárne majú jednotkové inštalované výkony až na úrovni niekoľkých MW. Priemery rotorov dosahujú vyše 100m. Ich výhodou je, že vyrábajú elektrickú energiu získanú zo zdroja, ktorý sa vyskytuje po celom zemskom povrchu, vrátane polárnych oblastí a je zdarma.

Vzhľadom na rozmery veterných elektrární nie je možné realizovať na nich laboratórne merania a preto sa tieto realizujú na zmenšených modeloch. Náplňou našej práce bolo navrhnuť a skonštruovať malé veterné turbíny rôznej konštrukcie a laboratórnymi meraniami zistiť ich vlastnosti a vzájomne ich porovnať. Modely veterných turbín rôznych tvarov budú v konečnom dôsledku tvoriť laboratórnu veternú farmu, ktorá bude slúžiť aj ako ukážka prevádzky veterných elektrární.

### II. KONŠTRUKCIA LABORÁTORNEHO MODELU

Laboratórny model bol skonštruovaný podľa blokovej schémy na Obr. 1. Prúd vzduchu zo zdroja 1 ktorého rýchlosť je meraná pomocou anemometra 2 na tepelnom princípe pôsobí na tri vertikálne rotory 3 prichytené magneticky na rotory generátorčekov 4, ktorých otáčky sa merajú optickými snímačmi 5. Všetky merané veličiny sú prevádzané do meracieho zariadenia UMZ -1 ktoré ich digitalizuje a dáva na záznam a vyhodnotenie pomocou PC..



1 - prúdenie vzduchu, 2 - elektronický anemometer, 3 - vertikálne rotory, 4 - generátorček, 5 - snímač na meranie otáčok

Obr. 1 Schéma modelu veterného parku

Celá aparatúra je konštruovaná tak, aby umožňovala súčasnú prevádzku a meranie troch rotorov. Jej konštrukčné riešenie je na Obr. 2. Meranie rýchlosti prúdenia vzduchu si vyžadovalo skonštruovať miniaturný anemometer so snímačom o rozmere 5x 10x 3mm, ktorý by neovplyvňoval prúdenie vzduchu.



Obr. 2 Konštrukčné riešenie modelu

Tento snímač je na tepelnom princípe a bol spolu s meracím obvodom skonštruovaný pre tento model. a ociačovany, tak aby bola zabezpečená potrebná presnosť.

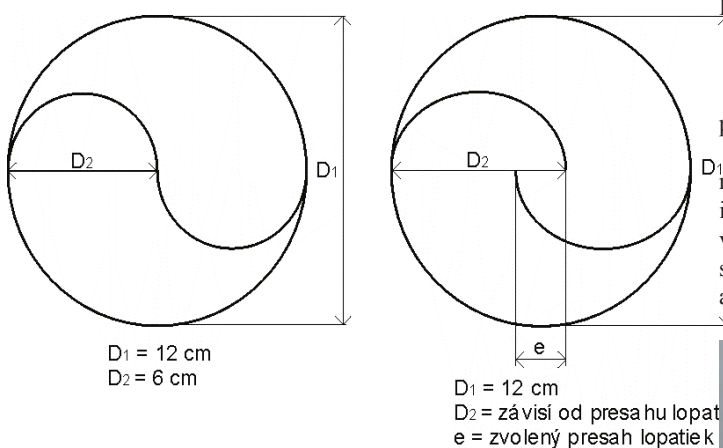
Meranie otáčok rotorov sa realizovalo na optickom princípe prerušovaní svetelného lúča perforovanou kulisou upevnenou na rotore generátora. Model bol konštruovaný, tak, aby bol ľahko prenosný a môže sa používať nielen v interiéri, ale aj v exteriéri.

### III. KONŠTRUKCIA ROTOROV

Návrh konštrukcie rotorov veterných turbín vychádzal z rotorov s vertikálnou osou otáčania, ktoré sa vyznačujú tým, že majú dobrý záberový moment a nie je ich potrebné natáčať do smeru vetra. Rozbiehajú sa pri nízkych rýchlostiach vetra a dobre spracúvajú aj turbulentný a nárazový vietor. Konštrukčne bolo potrebné zhotoviť modely vertikálnych veterných turbín rôznych druhov, ktoré budú tvoriť laboratórnu veternú farmu. Pri konštrukcii modelov veterných turbín sa vychádzalo zo Savoniusovho rotora.

Tento druh rotora bol základným druhom, z ktorého sa vychádzalo pri konštrukcii ďalších vertikálnych rotorov. Ide o pomalobežný rotor, ktorého výhoda je, že sa rozbieha pri nízkych rýchlostiach vetra, pretože zachytáva energiu z vetra z korejkoľvek strany celou plochou lopatiek. Lopatky sú konštruované v tvare písmena S, ako to je u rotorov používaných v praxi Obr.3. Tento rotor bol vylepšený realizáciou presahu lopatiek ich posunutím podľa Obr.3b čím došlo k vytvoreniu priepustného kanála, ktorý prispieva k zníženiu aerodynamického odporu znížením pretlaku vo vnútri rotora a vzniku reaktívnej sily. Aby bolo možné vzájomne porovnať vlastnosti rotorov boli tieto konštruované s rovnakými vonkajšími rozmermi a to:

priemer rotora 120mm  
výška rotora 100mm



Obr. 3 Savoniusov rotor (vľavo) bez presahu lopatiek, (vpravo) s presahom lopatiek

Na návrh modelov bolo potrebné nájsť čo najvhodnejší materiál, aby bolo možné pri konštrukcii dosiahnuť požadovaný tvar a mechanické vlastnosti. Jednotlivé rotory boli rozmerovo identické. Na konštrukciu modelov veterných turbín bol použitý plast, ktorý má malú hmotnosť a dobrú pevnosť. Celkovo bolo skonštruovaných 16 veterných turbín rôznych tvarových modifikácií.



Obr. 4 Savoniusové rotory s presahom lopatiek 0-1-2-3 cm

Všetky vychádzali z konštrukcie Savoniusovho rotora a jeho zlepšení, týkajúcich sa presahov lopatiek a počtu stupňov. Na dodržanie presnosti bolo potrebné vypracovať postupy eliminujúce mechanické pnutia vznikajúce pri montáži.

Každý z rotorov bolo potrebné staticky a dynamicky vyvážiť. Pre porovnanie vlastností boli skonštruované rotory bez presahu lopatiek, s jedno, dvoj a trojcentimetrovým presahom lopatiek. Výška lopatiek bola konštantná 100mm a ich priemer bol závislý od konkrétneho presahu lopatiek.

Rotor bez presahu lopatiek má priemer lopatky 60mm, rotor s presahom lopatiek 10mm má priemer lopatky 65 mm, rotor s presahom lopatiek 20 mm má priemer lopatky 70mm a rotor s trojcentimetrovým presahom lopatiek má priemer lopatky 75 mm. Presahom lopatiek sa získava väčšia efektívnosť využitia rotora. Merania preukázali, že rotory s presahom lopatiek sa rozbiehajú už pri nižších rýchlostiach, čo svedčí o ich vyššom záberovom momente oproti klasickému Savoniusovmu rotoru bez presahu lopatiek. Vzájomné odlišnosti skonštruovaných rotorov sa týkali iba presahu lopatiek a počtu stupňov rotorov. Pri konštrukcii všetkých rotorov sa vychádzalo z Obr. 3. Praktická realizácia rotorov je zrejmalá z Obr.4. Okrem takýchto rotorov boli urobené aj rotory viaclopatkové a taktiež Lenzova modifikácia Savoniusovho rotora.

#### VIACSTUPŇOVÉ ROTORY

Nevýhodou jednostupňových Savoniusových rotorov sú len dva pulzy výkonu počas otáčky a časť otáčky absolvuje iba zotrvačnosťou.

Tento nedostatok bol odstránený výškovým rozdelením rotora na dva a tri segmenty, tak aby každý z nich pridával v potrebných intervaloch ďalšie pulzy výkonu. Pri ich konštrukcii sa taktiež vychádzalo z Obr. 3, rozdiel bol len vo vzájomnom pootočení segmentov jednotlivých stupňov, ktoré sú vzájomne symetricky a súosovo pootočené.



Obr. 5 Dvojstupňové rotory s presahom lopatiek 0-10-20-30mm

Tieto rotory lepšie spracovávajú turbulentné prúdenie vzduchu. Sú to rotory zložené akoby z dvoch, alebo troch základných Savoniusových rotorov menšej výšky umiestnené nad sebou. Pri dvojstupňových rotoroch Obr.5 boli lopatky pootočené o  $90^\circ$ . Trojstupňové rotory Obr. 6 majú jednotlivé stupne pootočené o  $120^\circ$ .



Obr. 6. Trojstupňové rotory s presahom lopatiek 0-10-20-30 mm

Výhoda pootočenia jednotlivých stupňov je, že rotor dodáva na hriadeľ viac pulzov výkonu na otáčku a teda moment na hriadeľ je rovnomernejší. Konštrukčne boli zhotovené rotory s rovnakými presahmi lopatiek ako v predchádzajúcom prípade. Vonkajšie rozmery rotora sú totožné avšak výška jednotlivých stupňov bola rozdelená podľa počtu stupňov. Keďže bolo potrebné zhotoviť rotory s výškou 10 cm, tak tá sa pri viacstupňových rotoroch musela rozdeliť podľa počtu stupňov. Výška lopatiek pre dvojstupňové rotory bola 50mm a pre trojstupňové rotory 33 mm.

#### IV. MERANIE VLASTNOSTÍ ROTOROV

Meranie prevádzkových parametrov bolo uskutočňované pomocou univerzálneho meracieho zariadenia UMZ-1. Toto zariadenie obsahuje meracie obvody a sériové porty RS232, ktoré slúžia na komunikáciu zariadenia s počítačom. Počet portov v zariadení je dva a z toho jeden slúži pre meranie otáčok rotorov a druhý na meranie napätia, ktoré je generované z generátorčekov. Meracie zariadenie obsahuje aj USB port, ktorým sa zabezpečuje napájanie zariadenia. Namerané hodnoty sú zobrazované pomocou PC.

**MERANIE GENEROVANÉHO NAPÄTIA** - modul pre meranie napätia poskytuje možnosť merať tri generátorčeky súčasne. Ďalšou možnosťou, ktorú tento modul poskytuje je meranie prúdenia vzduchu. Spolu je ním možné odmerať súčasne štyri hodnoty. Napájanie 5V je riešené z USB portu. Impulzy od generátorčekov sa vedú cez LPT port domeracieho zariadenia UMZ-1, odkiaľ sú ďalej cez sériový port RS232 vysielané do počítača, ktorý dané impulzy spracuje a zobrazí odmerané hodnoty pomocou programu PC Voltmeter Obr.7 [1].

**MERANIE OTÁČOK ROTOROV** - na snímanie počtu otáčok bol použitý snímač otáčok, ktorý pracuje na princípe prerušenia svetla Led diódy. Snímač otáčok vyšle impulz do UMZ-1. Prerušovanie svetla je realizované pomocou otáčavej kulisy, ktorá je navrhnutá tak, že ak turbína urobí jednu otáčku, tak bude vyslaných 16 impulzov do UMZ-1. Týchto 16 impulzov odpovedá jednej otáčke rotora. Snímače otáčok sú umiestnené na meracej základni a prostredníctvom LPT portu a kábla sú pripojené k meraciemu zariadeniu UMZ-1. Z meracieho zariadenia je impulz vyslaný cez port RS232 do počítača, ktorý dané impulzy vyhodnotí pomocou programu PC Otáčkomer Obr.8 [1]. Merania vlastností rotorov boli realizované pri rôznych rýchlostiach prúdenia vzduchu a z nameraných hodnôt boli

vypracované grafické závislosti otáčok, napätia a prúdu v závislosti od rýchlosti prúdenia vzduchu. Namerané závislosti otáčok pre vybrané rotory sú na Obr.9.

Z grafickej závislosti na Obr. 8 je vidieť, že rozbeh rotorov sa začal už pri rýchlosti prúdenia vzduchu 1,3 m/s, čím sa potvrdilo, že tieto druhy rotorov sa rozbiehajú pri nízkych rýchlostiach.

Z Obr .9 je zrejмый aj vplyv počtu stupňov na linearizáciu charakteristiky v dôsledku väčšieho počtu pulzov výkonu počas jednej otáčky. Najlepšie výsledky mal z tohto pohľadu trojstupňový rotor s presahom 3 cm. Namerané závislosti výstupného napätia a prúdu pre trojstupňový rotor sú na Obr.10. a Obr.11.

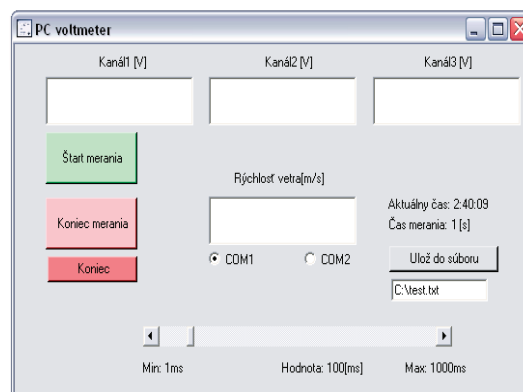
Z množstva meraní bol vytvorený katalóg rotorov s popisom konštrukcie, nameranými hodnotami a závislosťami jednotlivých rotorov.

#### V. ZÁVER

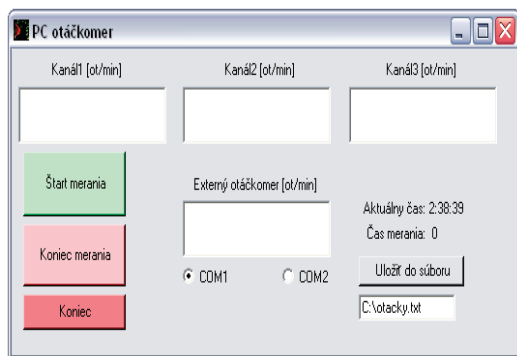
V súčasnosti nachádzajú vo veternej energetike najväčšie uplatnenie rotory s horizontálnou osou otáčania, ktoré majú dve, alebo tri lopatky, ktoré sú dobre regulovateľné zmenou uhla ich nábehu.. Konštrukcia takýchto rotorov je konštrukčne náročná, avšak umožňuje dosahovať najvyššiu účinnosť nataním do smeru zdroja energie [3]. Podstatne ľahšiu konštrukciu majú rotory s vertikálnou osou otáčania. Najznámejšie rotory z tejto koncepcie sú Savoniusov a Darrieusov rotor. Výhodou u týchto rotorov je, že nepotrebujú byť natané do smeru vetra a do pohybu sa dostávajú už pri nízkych rýchlostiach vetra. Nachádzajú dobré uplatnenie v oblastiach, kde nemá vietor dostatočnú rýchlosť a smerovú stabilitu.

Z nameraných hodnôt sa zistilo, že skonštruované rotory vyhovujú laboratórnym podmienkam merania a tvoria model veternej farmy. Všetky skonštruované rotory sa dostali do pohybu pri rýchlostiach vzdušného prúdu od 1,2 – 2 m/s, čím sa splnil predpoklad rozbiehnia pri nízkych rýchlostiach vetra. Pri zvyšovaní rýchlosti vzdušného prúdu sa okrem otáčok zvyšovalo aj napätie z generátorčeku. Pre zistenie prúdov sme zapojili ku generátorčeku záťaž s hodnotou 200 $\Omega$ , podľa ktorej sme vypočítali generovaný prúd.

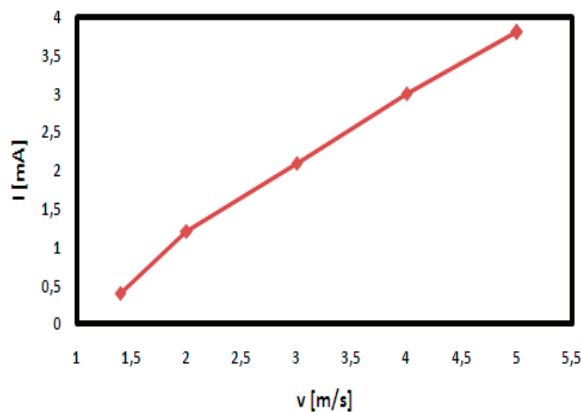
Najlepšie výsledky vykazovali dvojstupňové a trojstupňové Savoniusové rotory, ktoré dobre spracovali aj turbulentné prúdenie. V laboratórných podmienkach sa ukázalo, že niektoré ritiry by optimálne pracovali aj pri vyšších rýchlostiach prúdenia aké sme dokázali realizovať. Klasické Savoniusové rotory majú pomerne vysoký aerodynamický odpor. Čo sa prejavovalo hlavne pri vyšších rýchlostiach prúdenia vzduchu. Jednotlivé konštrukčné typy turbín vykazovali dobrú stabilitu v celom rozsahu rýchlosti prúdenia vzduchu. Súčasné meranie vlastností troch rotorov podľa výberu za rovnakých podmienok je veľmi výhodné a umožňuje meranie a demonštráciu prevádzky malej veternej farmy s rotormi s vertikálnou osou otáčania.



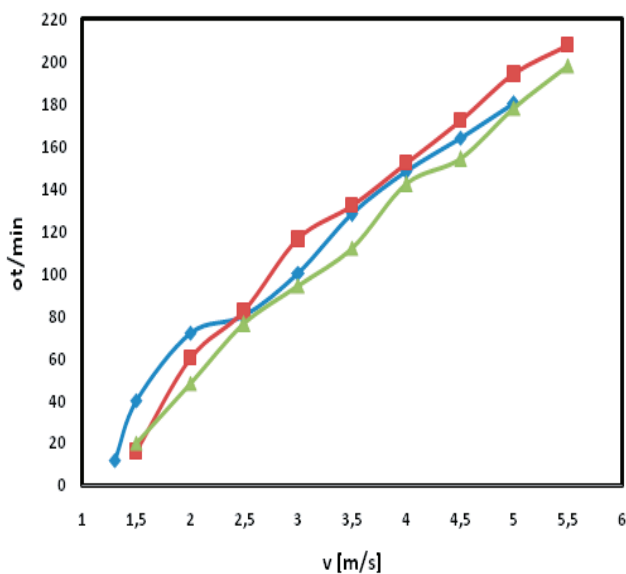
Obr. 7. Grafický výstup programu PC voltmeter



Obr. 8. Grafický výstup programu PC otáčkomer.

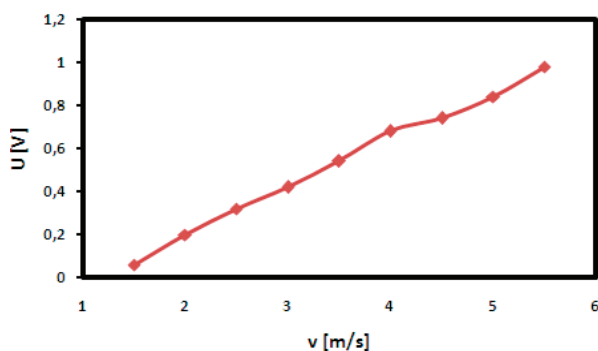


Obr. 11 Závislosť výstupného prúdu od rýchlosti vetra



— Savoniusov rotor s 2cm presahom lopatiek — Dvojstupňový Savoniusov rotor s 2cm presahom  
 — Trojstupňový Savoniusov rotor s 3cm presahom lopatiek

Obr.9. Závislosti otáčok pre vybrané rotory



Obr. 10 Závislosť výstupného napätia od rýchlosti vetra

Vertikálne rotory sa v súčasnosti často používajú na zabezpečenie elektriny v autonómnych systémoch v spolupráci aj s fotovoltaickými panelmi čím sa dosahuje lepšia stabilita a spoľahlivosť dodávaného výkonu [2], [3], [4], [5].

## POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum výskumu účinnosti integrácie kombinovaných systémov obnoviteľných zdrojov energií, s kódom ITMS: 26220220064, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja prostredníctvom finančnej podpory projektu č. APVV-0185-10

## LITERATÚRA

- [1] Š. Hudák, S. Šimoňák, **Programovacie techniky** - FEI TU Košice - I. vyd - 2010. - 220 s. - ISBN 978-80-553-0531-8
- [2] M. Taušová., P. Tauš, J. Koščo "Ekonomika ostrovnej FV elektrárne v podmienkach Slovenska". Zborník prednášok ALER 2009 , 5. ročník, str.1-8, Liptovský Ján 2009, ISBN 978-80-554-0099-0
- [3] M. Koščová, Z. Exnár, "Fuzzy riadenie systému solárnych navádzačov" ALER 2010, str.181-188 ŽU Žilina 2010 ISBN 978-80-554-0242-
- [4] P. Bača, "Ostrovni systémy: Problematika akumulácie elektrickej energie z FV do olovenného akumulátoru". In 30. NEKONVENČNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE. BRNO: ČES, 2009. s. 70-73. ISBN: 978-80-02-02164- 3.
- [5] Z. Dostál, M. Bobek, J. Župa "Meranie globálneho slnečného žiarenia" Zborník konferencie RESPECT, 2. ročník, Tatranská Lomnica, 3. – 5. 10. 2007, In: Acta Montanica Slovaca, roč. 13 (2008), číslo 3, str. 355-360, ISSN 1335-1788

## ADRESA AUTORA

Ján Tkáč, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [jan.tkac@tuke.sk](mailto:jan.tkac@tuke.sk)